

Mathias Näther, Venkatesh Naidu Nerella, Martin Krause  
Günter Kunze, Viktor Mechtcherine, Rainer Schach

# **Beton-3D-Druck – Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton**

F 3024

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2017

ISBN 978-3-7388-0028-9

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)

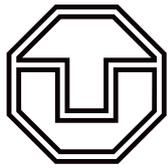


# ABSCHLUSSBERICHT

## Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton

**Dresden, 22.02.2017**





**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

---

Fakultät Maschinenwesen, Fakultät Bauingenieurwesen

---

Institut für Fluidtechnik  
Institut für Baubetriebswesen  
Institut für Baustoffe



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz,  
Bau und Reaktorsicherheit



Bundesinstitut  
für Bau-, Stadt- und  
Raumforschung  
im Bundesamt für Bauwesen  
und Raumordnung



FORSCHUNGSINITIATIVE  
**ZukunftBAU**

## **Beton-3D-Druck**

Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien  
Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton

Laufzeit: 29.09.2014 bis 30.09.2016

### **Projekt Beton-3D-Druck – Abschlussbericht**

Project Beton-3D-Druck – Final Report

– SWD-10.08.18.7-14.07 –

Mathias Näther, Venkatesh Naidu Nerella, Martin Krause  
Günter Kunze, Viktor Mechtcherine, Rainer Schach

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des  
Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-14.07)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Dresden, den 22. Februar 2017

---

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Weber  
(Direktor Institut für Fluidtechnik)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>4</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>6</b>
<b>Abkürzungs- und Symbolverzeichnis</b> .....	<b>7</b>
<b>1 Vorstellung des Projekts</b> .....	<b>8</b>
1.1 Kurzfassung des Projekts.....	8
1.2 Projektbeteiligte.....	9
1.2.1 Beteiligte Institute der TU Dresden.....	9
1.2.2 Projektpartner .....	10
<b>2 Methoden und Ergebnisse</b> .....	<b>13</b>
2.1 Institutsübergreifende Ergebnisse .....	13
2.1.1 Literaturrecherche.....	13
2.1.2 Schutzrechte .....	17
2.1.2.1 Bestehende Patente .....	17
2.1.2.2 Anmeldung der Wort- und Bildmarke „CONPrint3D“ .....	19
2.1.3 Versuchsstand .....	19
2.1.3.1 Notwendigkeit.....	19
2.1.3.2 Aufbau und Funktion.....	20
2.1.3.3 Anwendungen.....	21
2.1.4 Auszeichnung mit <i>bauma Innovationspreis 2016</i> .....	21
2.2 Ergebnisse Professur für Baumaschinen .....	23
2.2.1 Bestimmung und Untersuchung geeigneter Mechanismen .....	23
2.2.1.1 Konzepte für den Großraummanipulator .....	23
2.2.1.2 Mathematische Beschreibung des Betonpumpen-Verteilermastes.....	24
2.2.1.3 Praktische Tests am Betonpumpen-Verteilermast .....	28
2.2.1.4 Schlussfolgerungen zur Eignung der ABP als Großraummanipulator.....	34
2.2.2 Untersuchungen zur Bestimmung eines geeigneten Druckkopfes.....	36
2.2.2.1 Bestandsaufnahme .....	36
2.2.2.2 Anforderungen an den Druckkopf .....	37
2.2.2.3 Hauptaufgaben und Lösungsprinzipien .....	39
2.2.3 Untersuchungen zur Bestimmung geeigneter Pumptechnik .....	45
2.3 Ergebnisse Institut für Baustoffe .....	47
2.3.1 Materialwahlmöglichkeiten für 3D-druckbare Betone.....	47
2.3.2 Vorversuche mit einer geeigneten Mörtelrezeptur für die Materialauswahl .....	49
2.3.3 Experimentelle Untersuchungen beim Extrudieren mit der Mörtelpumpe.....	52

2.3.4	Entwicklung der ganzheitlichen Vorgehen und experimentellen Untersuchungen beim Beton-3D-Drucken mit dem Laborversuchsstand .....	54
2.3.5	Entwicklung weiterer druckbarer Betone mit unterschiedlichen Ausgangsstoffen für verschiedene Anwendungsfälle .....	56
2.4	Ergebnisse Institut für Baubetriebswesen .....	62
2.4.1	Definition von Anforderungskriterien und Anwendungsszenarien .....	62
2.4.2	Datenstrukturen und Datenmanagement .....	63
2.4.3	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen .....	66
2.4.4	Anwendung und Marktpotenziale von CONPrint3D® .....	70
<b>3</b>	<b>Übersicht der Veröffentlichungen .....</b>	<b>72</b>
3.1	Tagungsbände .....	72
3.2	Zeitschriften .....	72
3.3	Vorträge .....	72
3.4	Pressemitteilungen .....	73
<b>4</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>75</b>
4.1	Baustoffentwicklung .....	75
4.2	Maschinenentwicklung .....	75
4.3	Optimierte Druckstrategien und Datenmanagement .....	76
4.4	Praktischer Nachweis im Originalmaßstab .....	76
	<b>Quellenverzeichnis .....</b>	<b>78</b>
	<b>Anlagenverzeichnis .....</b>	<b>81</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Visualisierung der Projektidee .....	8
Abbildung 1.2: Szenario der Betonausbringung .....	9
Abbildung 2.1: Contour Crafting, University of Southern California, USA.....	14
Abbildung 2.2: Concrete Printing, Loughborough University, UK.....	14
Abbildung 2.3: 3D-Drucker, TU Eindhoven, NL .....	14
Abbildung 2.4: Holzbetondruck, TU München .....	14
Abbildung 2.5: a) Win Sun, b) Imprimere AG und c) D-Shape .....	16
Abbildung 2.6: a) Das erste 3D-gedruckte Bürogebäude in Dubai und b) Hotel von Totalkustom in Philippinen .....	16
Abbildung 2.7: Schematische Abbildung des ganzen Prozesses.....	17
Abbildung 2.8: Druckkopf .....	17
Abbildung 2.9: Verschiedene Druckkopfkonfigurationen zum Drucken verschiedener Wandteile .....	18
Abbildung 2.10: Wort- und Bildmarke CONPrint3D.....	19
Abbildung 2.11: CAD-Modell des Versuchsstandes.....	20
Abbildung 2.12: Das CONPrint3D Team vor dem 3D-Drucker an der TU Dresden.....	22
Abbildung 2.13: Planarer Dreigelenk-Manipulator .....	24
Abbildung 2.14: Bewegungskordinaten des Verteilermastes.....	25
Abbildung 2.15: Kinematische Skizze des 5-Arm-verteilerastes .....	25
Abbildung 2.16: Mastkröpfung und Mastebene.....	26
Abbildung 2.17: Viergelenkgetriebe nach .....	27
Abbildung 2.18: Kinematische Skizze der Umlenkinematik .....	27
Abbildung 2.19: a) Versuchsmaschine M38-5 auf dem Testgelände; b) Arm 5 gekürzt, mit Druckkopf-Dummy .....	28
Abbildung 2.20: Definition der Koordinatensysteme auf dem Testgelände.....	29
Abbildung 2.21: Verläufe der Gelenkwinkel bei Messung 19a .....	30
Abbildung 2.22: Bewegungsbahn des Messpunktes in der x-y-Ebene, Messung 19a .....	32
Abbildung 2.23: Messpunkt-Koordinaten im Zeitverlauf, Messung 19a .....	32
Abbildung 2.24: Gleitschalungsfertiger der Fa. Wirtgen im Einsatz.....	36
Abbildung 2.25: a) ACS Selbstklettersystem der Fa. PERI; b) ACS V beim Bau der Uddevalla Bron (SWE) .....	37
Abbildung 2.26: Designstudie des Druckkopfes und Prinzipdarstellung d. Druckvorganges ..	39
Abbildung 2.27: Prinzipdarstellung des Einschnecken- (a) und Zweischnuckenextruders (b).	40
Abbildung 2.28: Exzentrerschneckenpumpe.....	41
Abbildung 2.29: Drucken einer Betonschicht bei Laborversuchen .....	42
Abbildung 2.30: Prinzipskizze: Formung des Frischbetons durch mitgeführte Gleitschalungsbleche .....	42
Abbildung 2.31: Konzept 1 zum Drucken von Ecken unter Verwendung verschiebbarer Schalbleche.....	43

Abbildung 2.32: Konzept 2 zum Drucken von Ecken unter Verwendung von Vierkant- Formungselementen.....	43
Abbildung 2.33: a: Bewegungsachsen am Druckkopf; b: Prinzipdarstellung Parallel- und serielle Kinematik.....	44
Abbildung 2.34: Grundlegender Aufbau einer Doppelkolbenpumpe.....	46
Abbildung 2.35: Grundlegender Aufbau einer Rotorpumpe .....	46
Abbildung 2.36: Adapteraufbau zur Dosierung des Beschleunigers .....	53
Abbildung 2.37: Ergebnisse der Mörtelpumpversuche .....	54
Abbildung 2.38: a) Labor-Versuchsstand, b) Ausschnitt einer gedruckten Wand und c) ausgesägtes Probenprisma .....	55
Abbildung 2.39: a) Darstellung der Biegezugfestigkeit Prüfung, b) Druckfestigkeit Prüfung .	55
Abbildung 2.40: Ergebnisse von Druck- und Biegezugfestigkeitsversuchen .....	56
Abbildung 2.41: Hägermann-Ausbreitmaß-Ergebnisse: Vor den Stößen (links), nach 15 Stößen (rechts) .....	60
Abbildung 2.42: 1. Tag Druck- und Biegezugfestigkeitsergebnisse von unterschiedlichen Mischungen .....	60
Abbildung 2.43: Aufbereitung der Daten zur Steuerung des Gesamtprozesses.....	64
Abbildung 2.44: Prozesskette der Datenaufbereitung.....	65
Abbildung 2.45: 3D-Druckobjekt aus Kunststoff .....	65
Abbildung 2.46: 3D-Druckobjekt aus Gips.....	65
Abbildung 2.47: Grundrissplan der betrachteten Beispieltage eines Einfamilienhauses .....	67
Abbildung 2.48: Mögliche Druckreihenfolge für die Beispieltage .....	68

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Auswahl an Forschungsgruppen, die am 3D-Druck von Bauelementen arbeiten.....	13
Tabelle 2.2:	Unternehmen, die aktuell am 3D-Druck von Bauelementen arbeiten.....	15
Tabelle 2.3:	Auszug möglicher Maschinenkonzepte für den Großraummanipulator .....	23
Tabelle 2.4:	Grundlegende Anforderungen an den Druckkopf .....	38
Tabelle 2.5:	Wahl der Materialien und ihr Einfluss auf verschiedene Aspekte der Betontechnologie.....	48
Tabelle 2.6:	Grundrezeptur für druckbaren Mörtel 1 .....	50
Tabelle 2.7:	Zemente und Beschleunigervarianten.....	50
Tabelle 2.8:	Experimentelle Ergebnisse .....	51
Tabelle 2.9:	Auswahl Zement und Zusatzmittel.....	52
Tabelle 2.10:	Mechanische Eigenschaften gedruckter und herkömmlich hergestellter Probekörper (Standardabweichungen sind in Klammern angegeben).....	56
Tabelle 2.11:	Übersicht geprüfter Ausgangsstoffe und ihre experimentellen Ergebnisse in Bezug auf Extrudierbarkeit und Verbaubarkeit.....	58
Tabelle 2.12:	Notation für die Mischungen, welche extrudierbar und verbaubar sind (links) und Mischungen, welche extrudierbar aber nicht verbaubar sind (rechts) ...	59
Tabelle 2.13:	Ausführungszeiten und Baukosten für die Mauerwerksarbeiten der Beispieltage .....	67
Tabelle 2.14:	Kostenvergleich am Bsp. der modellierten Etage eines Einfamilienhauses.	69
Tabelle 2.15:	Baugenehmigungen in Deutschland 2014: verwendete Baustoffe von Wohngebäuden .....	70

## Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

<b>Abkürzung/Symbol</b>	<b>Bedeutung</b>
% v.Z.	% von Zementgewicht
AG	Arbeitsgruppe
ABP	Autobetonpumpe
BE	Beschleuniger
BIM	Building Information Modeling
DG	Drittmittelgeber - DG1: Putzmeister Engineering GmbH - DG2: MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG - DG3: OPTERRA Zement GmbH, Werk Karsdorf (ehem. Lafarge Zement GmbH) - DG4: BAM Deutschland AG
DK	Druckkopf
FDM	Fused Deposition Modeling
FE	Forschungseinrichtung der TU Dresden - FE1: Professur für Baumaschinen - FE2: Institut für Baustoffe - FE3: Institut für Baubetriebswesen
FM	Fließmittel
HT	Hägermann Ausbreitmaß Test
VT	Vikat-Test
HK	Hilfskraft
KS	Koordinatensystem
MA	Mitarbeiter
MP	Messpunkt, markiert durch den Tachymeter-Reflektor
OPTERRA	OPTERRA Zement GmbH, Werk Karsdorf
MC-Bauchemie	MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG
PM	Personenmonate Putzmeister
TCP	Tool Center Point
w/z	Wasser-Zement Wert/Verhältnis
WMA	Wissenschaftlicher Mitarbeiter
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
TUD	Technische Universität Dresden
$\mu$	Plastische Viskosität
$\tau_0$	Fließgrenze

# 1 Vorstellung des Projekts

## 1.1 Kurzfassung des Projekts

Das Forschungsprojekt „Beton-3D-Druck“ wurde durch das Programm „Zukunft Bau“ des Bundesinstituts für Bau-, Stadt-, und Raumforschung über eine Laufzeit von 24 Monaten gefördert. Im Rahmen des Projekts wurde eine Machbarkeitsuntersuchung zur Einführung eines neuen Bauverfahrens durchgeführt. Als kontinuierliche und schalungsfreie Betontechnologie kann das Beton-3D-Druckverfahren eine Innovation im Bauwesen darstellen. Innerhalb des Forschungsvorhabens sollte untersucht werden, wie das 3D-Druckverfahren auf den Bauprozess übertragen werden kann. Langfristiges Ziel des Vorhabens ist, die bestehenden, generativen Fertigungstechnologien weiterzuentwickeln um die wirtschaftliche Errichtung von Betonbauteilen und Bauwerksstrukturen unter Baustellenbedingungen zu ermöglichen.

Die TU Dresden war mit drei Instituten aus den Fachrichtungen Bauingenieurwesen und Maschinenbau an dem Projekt beteiligt. Das Institut für Baustoffe hatte die Hauptaufgabe eine geeignete Betonrezeptur zu entwickeln. Der für den 3D-Druck geeignete Beton soll sich durch gute Verarbeitbarkeit und Pumpfähigkeit auszeichnen und dabei eine hohe Grünstandfestigkeit besitzen, d. h. der Beton muss beim Austritt aus der Düse sehr schnell erstarren. Die Arbeit der Professur für Baumaschinen bestand darin, ein passendes Konzept für die maschinelle Umsetzung zu entwickeln, das auf der Nutzung konventioneller Baumaschinen beruht. Die grundlegende Idee des Vorhabens wird in Abbildung 1.1 visualisiert.

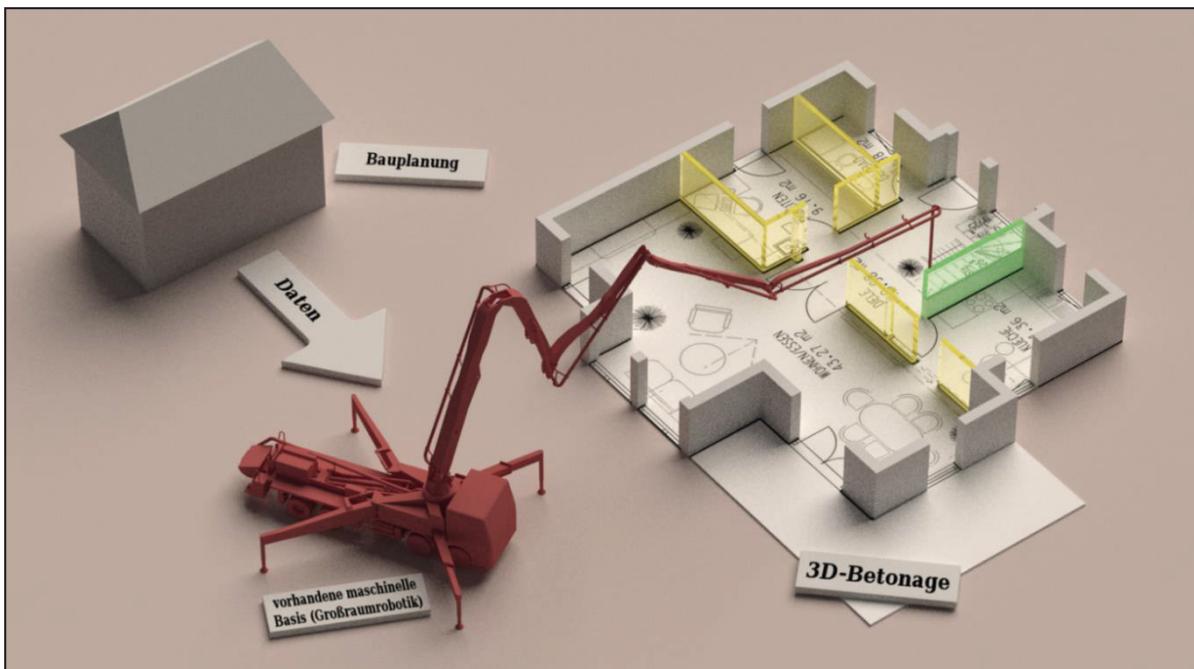


Abbildung 1.1: Visualisierung der Projektidee

Eine teilautomatisierte Autobetonpumpe (ABP) soll positionsgenau den Beton ausdrucken, um so schichtenweise die Bauteile betonieren zu können. Der Prozess soll schalungsfrei und kontinuierlich ablaufen. Dazu waren Konzepte zum positionsgenauen Ausbringen des Betons mittels Druckkopf zu entwickeln. Der Druckkopf soll ein geeignetes Formungssystem aufweisen um Betonbauteile mit guten Oberflächeneigenschaften herstellen zu können. In Abbildung 1.2 wird ein Szenario für die Betonausbringung dargestellt.

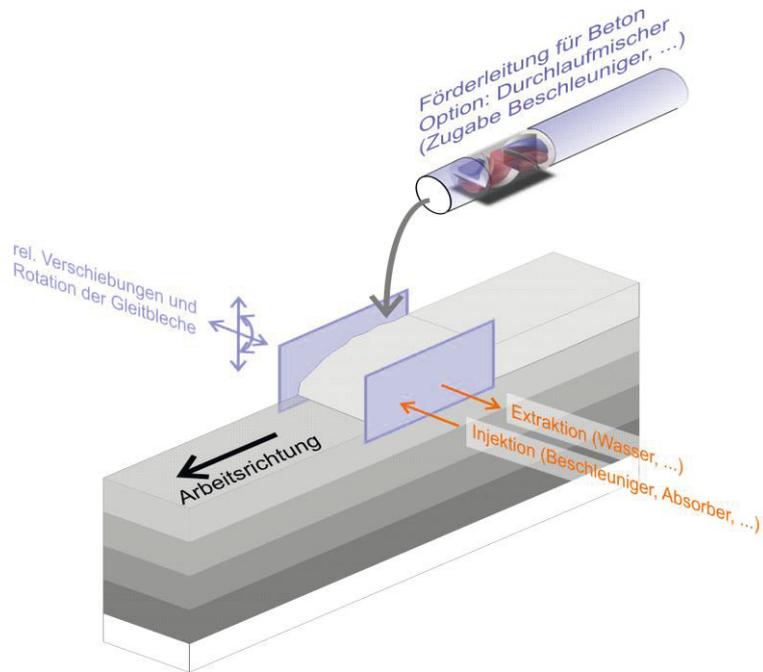


Abbildung 1.2: Szenario der Betonausbringung

Das Institut für Baubetriebswesen war dafür verantwortlich, dass die Prozesse unter Berücksichtigung der spezifischen Randbedingungen baubetrieblich optimiert ablaufen. Außerdem sollten die für den Prozess erforderlichen Datenstrukturen aufgezeigt und generiert werden. Erste Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen und Marktpotenzialstudien waren ebenso Bestandteil der Untersuchungen. Es ist zu vermuten, dass durch die neuartige Technologie zukünftig die Herstellkosten erheblich reduziert werden können, da im Prinzip gänzlich auf die Schalung verzichtet werden kann. Außerdem ließe sich der Lohnanteil des Betonierens minimieren. [KRA15]

## 1.2 Projektbeteiligte

### 1.2.1 Beteiligte Institute der TU Dresden

Die Bearbeitung des Projekts „Beton-3D-Druck“ wurde von wissenschaftlichen Mitarbeitern dreier Institute der TU Dresden übernommen. Die einzelnen Aufgaben und Ergebnisse werden in Abschnitt 2 beschrieben. Nachfolgend werden die beteiligten Institute und Projektbearbeiter kurz vorgestellt.

#### Professur für Baumaschinen (BFT):

Anschrift: München Platz 3, 01187 Dresden  
 Institutsdirektor: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Weber  
 Projektleiter: Prof. em. Dr.-Ing. habil. Günter Kunze  
 Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. Mathias Näther  
 mathias.naether@tu-dresden.de  
 Tel.: 0351 / 463-34567

Institut für Baustoffe (IfB):

Anschrift: Georg-Schumann-Str. 7, 01187 Dresden  
Projektleiter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine  
Projektbearbeiter: M.Sc. Venkatesh Naidu Nerella  
Venkatesh\_Naidu.Nerella@tu-dresden.de  
Tel.: 0351 / 463-35922

Institut für Baubetriebswesen (IBBW):

Anschrift: Nürnberger Straße 31A, 01187 Dresden  
Projektleiter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Schach  
Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. Martin Krause  
Martin.Krause3@tu-dresden.de  
Tel.: 0351 / 463-32818

### 1.2.2 Projektpartner

Das Projekt wurde durch vier renommierte Wirtschaftsunternehmen unterstützt. Im Folgenden werden die Praxispartner und deren Aufgabenschwerpunkte kurz vorgestellt.

Putzmeister Engineering GmbH (Aichtal):

Anschrift: Max-Eyth-Straße 10, 72631 Aichtal  
Tel.: +49 (0) 7127 / 599-1959  
Ansprechpartner: Peter Mögle  
MoegleP@pmw.de



Die Putzmeister Engineering GmbH betreut das Projekt im Bereich der Maschinentechnik unter folgenden Aufgabenschwerpunkten:

- Bereitstellung von Maschinen zur Durchführung von Funktionstests
- Einweisung in die Maschinen durch geschultes Personal
- Beratende Begleitung des Forschungsvorhabens durch aktive Teilnahme an Arbeits- und Meilensteintreffen
- Beurteilung der Verwertungschancen der entwickelten Technologien.

MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG (Bottrop):

Anschrift: Am Kruppwald 1-8, 46238 Bottrop  
Tel.: +49 (0) 20 41-101-270  
Ansprechpartner: Dr. H.-G. Seltmann  
hans.seltmann@mc-bauchemie.de



Das Unternehmen MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG (Bottrop) unterstützt das Projekt im Bereich der Baustofftechnik unter folgenden Aufgabenschwerpunkten:

- Bereitstellung von Betonzusatzmitteln inklusive modifizierter Beschleunigungssysteme und Funktionstests im Mörtel- und Betonlabor mit versuchsbegleitendem Personal
- Beratende Begleitung des Forschungsvorhabens durch aktive Teilnahme an Arbeits- und Meilensteintreffen
- Beurteilung der Verwertungschancen der entwickelten Technologien.

OPTERRA Zement GmbH, Werk Karsdorf:  
(früher: Lafarge Zement Karsdorf GmbH):



Anschrift: Straße der Einheit 25, 06638 Karsdorf  
Tel.: +49 34461 74998

Ansprechpartner: Hagen Uhlig  
hagen.uhlig@opterra-crh.com

Das Unternehmen OPTERRA Zement GmbH, Werk Karsdorf unterstützt das Projekt im Bereich der Baustofftechnik unter folgenden Aufgabenschwerpunkten:

- Bereitstellung von zementbasierten Bindemitteln und Funktionstests in den Laboren und Mischturm in Karsdorf mit versuchsbegleitendem Personal
- Beratende Begleitung des Forschungsvorhabens durch aktive Teilnahme an Arbeits- und Meilensteintreffen
- Beurteilung der Verwertungschancen der entwickelten Technologien.

BAM Deutschland AG (Niederlassung Dresden)



Anschrift: Tögelstraße 18, 01257 Dresden  
Tel.: 0351 28299-0

Ansprechpartner: Steffen Fuchs  
s.fuchs@bam-deutschland.de  
Rainer Franke  
r.franke@bam-deutschland.de

Die BAM Deutschland AG unterstützt das Projekt im Bereich des Baubetriebswesens und der Bauverfahrenstechnik unter folgenden Aufgabenschwerpunkten:

- Definition bauverfahrenstechnischer Randbedingungen und Beurteilung der technischen Umsetzbarkeit unter Baustellenbedingungen
- Beurteilung des Forschungsvorhabens aus Anwendersicht
- Beratende Begleitung des Forschungsvorhabens durch aktive Teilnahme an Arbeits- und Meilensteintreffen
- Beurteilung der Verwertungschancen der entwickelten Technologien.

Weitere Unterstützung erhielt das Projekt durch die Sachkenntnis von Mitgliedern einer ehrenamtlichen Expertengruppe:

- Für den Bereich der Maschinentechnik ist Prof. Dr.-Ing. Martin-Christoph Wanner vom Lehrstuhl für Fertigungstechnik der Universität Rostock als Experte berufen worden.

- Im Bereich der Baustofftechnik stand Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher vom Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum beratend zur Verfügung.
- Im Bereich Baubetriebswesen wurde die Projektbearbeitung von Prof. Dr.-Ing. Fritz Berner vom Institut für Baubetriebslehre der Universität Stuttgart begleitet.

In regelmäßigen Abständen wurden gemeinsame Arbeitstreffen mit allen Projektpartnern veranstaltet. In diesen Treffen wurden aktuelle Ergebnisse vorgestellt und diskutiert, neue Ideen eingebracht und über das weitere Vorgehen abgestimmt. Die enge und bereichsübergreifende Zusammenarbeit der Mitarbeiter und Partner aus den verschiedenen Disziplinen war in diesem Projekt von großer Bedeutung, da sich viele Schnittstellen und Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Arbeitsschritten und Aufgabenbereichen ergaben.

## 2 Methoden und Ergebnisse

### 2.1 Institutsübergreifende Ergebnisse

#### 2.1.1 Literaturrecherche

Als Teil des Arbeitspaketes A1 „Analysieren des Standes der Technik“ wurde in der ersten Projektbearbeitungsphase eine intensive Literaturstudie durchgeführt. Ziel dieser Studie war ein gründliches Verständnis des Forschungsstandes zur additiven Konstruktion. Literatur aus verschiedenen Quellen wie Journalen, Datenbanken, Bibliotheken und Zeitungsartikeln wurden gesammelt. Außerdem wurde eine Literaturrecherche beim Fraunhofer-Informationszentrums Raum und Bau (IRB) beauftragt.

Obwohl moderne Automatik und Computergestützte Fertigung (CAM) viele industrielle Prozesse grundlegend verändert hat, war der Einfluss auf das Bauwesen nur minimal. In letzter Zeit gab es verschiedenste Ansätze dies zu ändern und moderne Steuerungstechnik für das Bauwesen zu entwickeln [BUS07, KHO06, WIN15]. Diese Versuche können grob in zwei Ansätze geteilt werden:

- Methoden basierend auf dem Extrudieren und
- Methoden basierend auf selektiver Bindung.

Bei beiden Ansätzen wird ein dreidimensionales CAD-Model in ein STL-Format umgewandelt und dann, im sogenannten Slicing-Prozess, in mehrere 2D-Schichten geteilt. Die kartesischen Koordinaten der 2D Schichten werden zusammen mit Druckparametern wie „Geschwindigkeit des Druckkopfes“ und „Ausstoßrate“ an den 3D-Drucker weitergegeben. Im Falle von Extrusion wird fertig gemischter Mörtel bzw. Beton durch eine Düse verteilt, während bei selektiver Bindung (siehe Abschnitt 2.3) nur ein chemischer Aktivator auf ein Bett aus trockenem Grundmaterial aufgebracht wird. Detaillierte Beschreibungen zu beiden Technologien sind von den Antragstellern veröffentlicht worden [NER16]. Bei den beiden Methoden wird die gewünschte Struktur Schicht für Schicht aufgebaut.

Einige Beispiele für extrusionsbasierte, additive Fertigungsverfahren sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst. Nachfolgend werden die genannten Verfahren kurz in ihren Besonderheiten vorgestellt.

Tabelle 2.1: Auswahl an Forschungsgruppen, die am 3D-Druck von Bauelementen arbeiten

1	University of Southern California: Contour Crafting	USA
2	Loughborough University: Freeform 3D Concrete Printing	UK
3	TU Eindhoven: 3DPC	Niederlande
4	TU München: Additive Fertigung durch Extrusion von Holzleichtbeton	Deutschland
5	Institute for Advanced Architecture of Catalonia: Minibuilders	Spanien

- 1 Der University of Southern California kommt mit dem Verfahren „Contour Crafting“ (Abbildung 2.1) eine gewisse Pionierrolle zu. Khoshnevis et al. haben im Rahmen des Projekts „Contour Crafting“ bereits Wandelemente gedruckt. Dabei wurde die äußere Schale 3D-gedruckt und der innere Bereich manuell gefüllt [KHO06]. Darüber hinaus wurde von Elementen berichtet, die gerade geführte äußere Schalen besitzen und in-

nen von Elementen im „Zick-Zack-Muster“ verbunden sind, so dass eine räumliche Konstruktion entsteht, die im Schnitt einem Fachwerkträger ähnlich ist.

- 2 Besonders erwähnenswert ist auch das Projekt der Loughborough University, in dem ein Portal-3D-Drucker entwickelt wurde. Dieser Drucker kann Hochleistungsbeton Schicht für Schicht in der sogenannten „Concrete-Printing-Technologie“ ausbringen [LE12], siehe dazu auch Abbildung 2.2. Obwohl die Technologie nicht für den Baustelleneinsatz entwickelt wurde, gibt es trotzdem mögliche Anwendungen bei komplexen Strukturen, architektonischen Elementen und bei Arbeiten in gefährlichen Umgebungen.
- 3 Mit einer ähnlichen Technologie haben Forscher an der TU Eindhoven einen großen Labordrucker gebaut (Abbildung 2.3).
- 4 Spezielle Materialforschung wird an der TU München betrieben. Im Zeitraum von 2014 bis 2016 wurde an einem Holzleichtbeton für 3D-Anwendungen gearbeitet (Abbildung 2.4). Durch die Verwendung von Holz statt mineralischen Gemischen können leichte Strukturen mit einem relativ hohen Wärmedurchgangswiderstand im 3D-Druck erstellt werden. Als Manipulator des Druckkopfes diente ein Industrieroboter.
- 5 Das Institut für moderne Architektur in Katalonien entwickelt innerhalb des Projekts „Minibuilders“ einen digitalen Bauprozess, der durch zahlreiche Kleinstroboter ausgeführt wird. Zunächst druckt ein Fundamentroboter die Standfläche (die ersten 20 Schichten des Bauwerks). Anschließend drucken Greifroboter die weiteren vertikalen Strukturen, während sie sich an den vorherigen, gedruckten Schichten festhalten.



Abbildung 2.1: Contour Crafting, University of Southern California, USA [KHO16]



Abbildung 2.2: Concrete Printing, Loughborough University, UK [LE12]



Abbildung 2.3: 3D-Drucker, TU Eindhoven, NL [TU-E16]

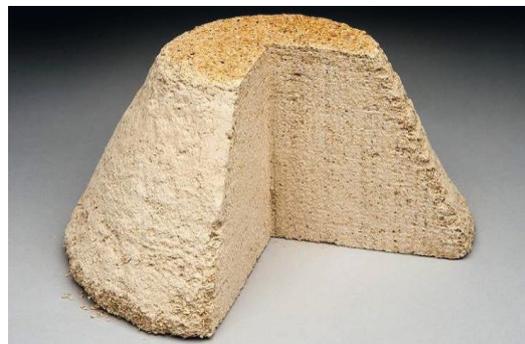


Abbildung 2.4: Holzbetondruck, TU München [HEN16]

Die additive Konstruktion ist ein Prozess mit vielen Gegensätzen, siehe auch Abschnitt 1.1. Um diese gegensätzlichen Anforderungen zu überwinden, müssen Materialien entwickelt werden, die optimale Eigenschaften in frischem wie in erhärtetem Zustand haben. Nur wenige Forscher haben in diesem Bezug von gezielten Untersuchungen berichtet. Le et al. [LE12A] berichten über Eigenschaften von druckbaren Hochleistungsbetonen wie etwa Druck- und Biegezugfestigkeit. Die Untersuchungen zur hohen Effizienz der Verwendung chemischer Zusätze, um die Aushärtung des Betons zu kontrollieren, werden von Lynch [LYN11] vorgestellt. Perrot [PER15] beschreibt den strukturellen Aufbau zementartiger Materialien und entwickelt ein mathematisches Thixotropie-Modell für die Anwendung im Bereich der additiven Konstruktion.

Weitere Forscher beschäftigen sich aktuell mit den verschiedensten Teilbereichen des Beton-3D-Drucks, wie z. B. dem Materialwesen, der Robotik und dem Datenmanagement. Generell kann festgestellt werden, dass der Beton-3D-Druck weltweit ein gewaltiges Interesse hervorruft, dass zahlreiche Forschungsprojekte gefördert werden und in dem Verfahren ein großes Potenzial gesehen wird. In keinem Forschungsprojekt wird jedoch versucht, eine Technologie für den Druck von größeren Gebäudestrukturen in Ort beton, in massiver Bauweise und mit einem Großroboter zu entwickeln.

Da der Beton-3D-Druck eine neue, innovative Technologie ist, sind aktuell nur sehr wenige Bauunternehmen auf dem Markt aktiv, siehe Tabelle 2.2. Das chinesische Unternehmen "Win Sun" verwendet aktuell einen ähnlichen Prozess wie „Contour Crafting“ für einen industriell angewendeten Beton-3D-Druck, siehe Abbildung 2.5a. Bei ihren 3D-gedruckten Häusern werden verschiedene Elemente in einer Fabrik gedruckt und später auf der Baustelle zusammengesetzt [KHO16]. CyBe, ein Unternehmen aus den Niederlanden, arbeitet eng mit der TU Eindhoven zusammen und will bald einen vorgemischten 3D-druckbaren Mörtel (Trockenmörtel) und einen Roboter, der als Drucker arbeiten kann, auf den Markt bringen. Total-Kustom [TOT15] ein amerikanisches Unternehmen, sowie die in der Schweiz ansässige Imprimere AG, siehe Abbildung 2.5b, entwickeln verschiedene 3D-Mörtel-Drucker für Fertigteilhersteller. Ein anderer Ansatz ist die D-Shape-Technology von Enrico-Dini, siehe dazu Abbildung 2.5c, die mit selektiver Bindung arbeitet. Dabei werden die Konstruktionselemente mittels Sandverfestigung schichtweise gefertigt. Jede Schicht wird in einem losen Sandbett unter Zugabe eines Bindemittels zusammengepresst bis sie erhärtet. Danach wird das Bauteil aus dem Sandbett entfernt bzw. frei geschaufelt.

Tabelle 2.2: Unternehmen, die aktuell am 3D-Druck von Bauelementen arbeiten

1	Monolite UK Ltd: D-Shape	UK
2	Yingchuang/WinSun: 3D Printing Construction	China
3	TotalKustom: 3D House Concrete Printer	USA
4	Imprimere AG: Big 3D Printer	Schweiz
5	Bet Abram: P3 House Printer	Slowenien
6	CyBe	Niederlande

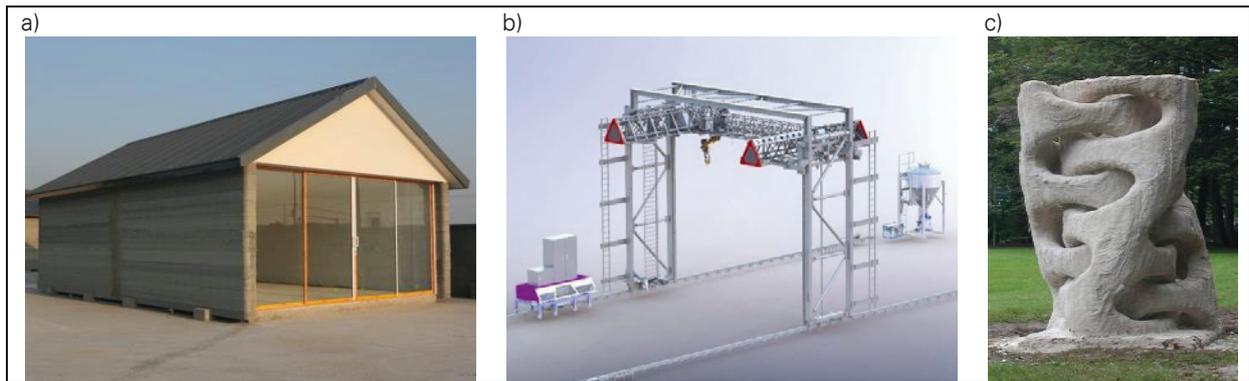


Abbildung 2.5: a) Win Sun [WIN15], b) Imprimere AG und c) D-Shape [DIN15]

Im Mai 2016 wurde in Dubai nach Angaben arabischer Nachrichtenmagazine das erste vollständig gedruckte Bürogebäude der Welt eröffnet (Abbildung 2.6). Die Vereinigten Arabischen Emirate verfolgen mit der Initiative „3D-Printing Strategy“ das Ziel, bis 2030 ein Viertel aller Gebäude mittels 3D-Druck herzustellen. Gründe für die Investitionen sind maßgebliche Reduzierungen der Produktionszeit und Arbeitskosten. Die Tragstruktur der Bürogebäude wurde in nur 17 Tagen gedruckt und in zwei Tagen vor Ort zusammengesetzt [ING16].

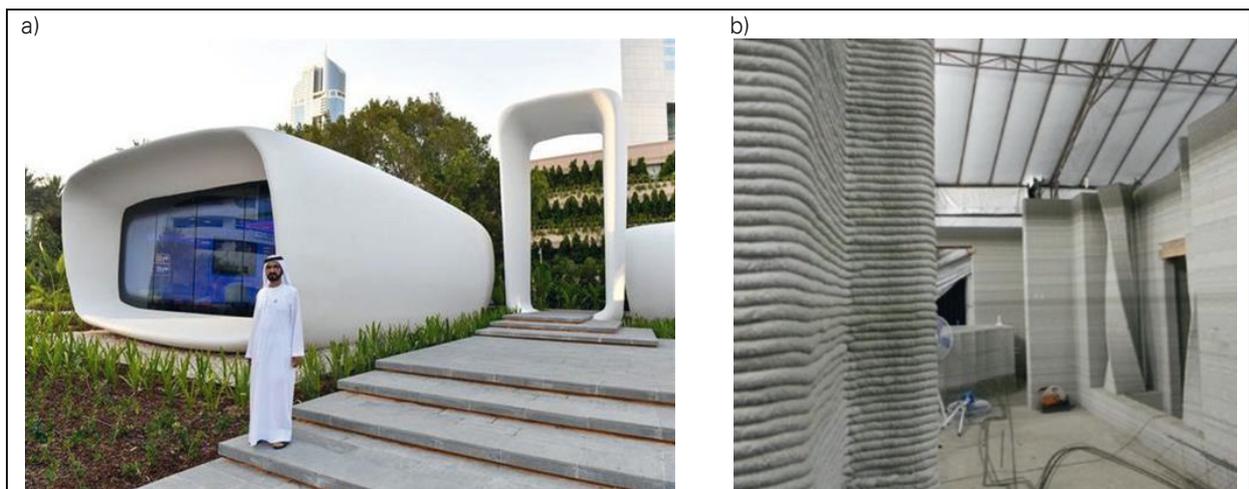


Abbildung 2.6: a) Das erste 3D-gedruckte Bürogebäude in Dubai [ING16] und b) Hotel von Totalkustom in Philippinen [TOT15]

## 2.1.2 Schutzrechte

### 2.1.2.1 Bestehende Patente

Im Rahmen des Arbeitspaketes A 2.2 „Prüfen möglicher Nachnutzung“, wurde eine ausführliche Patentstudie durchgeführt. Ziel dieser Studie ist es, Konflikte und Einschränkungen durch existierende Patente zu vermeiden. Aus dieser Untersuchung ergeben sich mehrere Vorteile:

- schneller Ausblick auf momentane und zukünftige Ideen des Forschungsbereiches,
- essentielle Informationen zur Entscheidungsfindung, wenn es mehrere Lösungsstrategien für ein Problem gibt,
- vorrausschauende Planung der Forschungsarbeiten, damit intellektuelle Konflikte vermieden werden.

Die Recherchen wurden in verschiedenen Datenbanken durchgeführt. Es wurden alle maßgebenden Datenbanken herangezogen, darunter Espacenet (European Patent Office), USPTO (United States Patent and Trademark Office), Orbit und Patselect. Auf die Patentrecherche folgte anschließend eine Zusammenfassung ausgewählter Patente (sortiert nach Relevanz). Zu erwartende Konflikte zwischen bereits verwendeten Methoden und einem Patent sind im Patentbericht erläutert. Eine kurze Zusammenfassung des Patentberichts folgt im nächsten Absatz.

Das erste Patent mit deutlicher Referenz zu computergesteuerten Bauverfahren (Abbildung 2.7 und Abbildung 2.8) wurde 1985 von Ruzicka [RUZ85] eingereicht. Anschließend vergingen etwa 18 Jahre, bis es neue Ideen im Feld der computergesteuerten Bauverfahren oder des Beton-3D-Drucks gab.

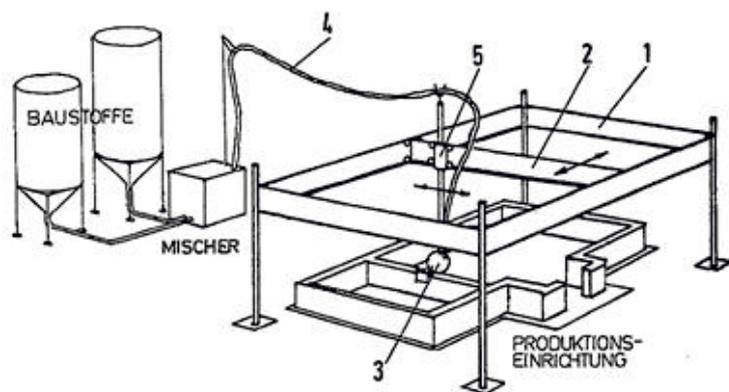


Abbildung 2.7: Schematische Abbildung des ganzen Prozesses [RUZ85]

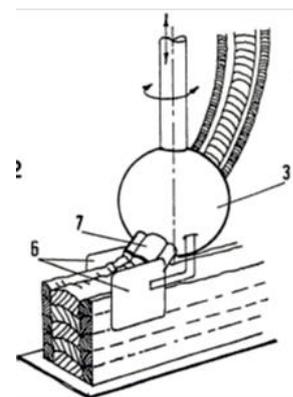


Abbildung 2.8: Druckkopf [RUZ85]

Ab 2003 gab es immer wieder neue Ideen zur Umsetzung, zu Materialien, Düsen und der Maschinerie eines Beton-3D-Druckers. Die University of Southern California wurde mit dem Verfahren „Contour Crafting“ Vorreiter für Forschungsergebnisse und Patente auf diesem Gebiet. In den letzten Jahrzehnten ist das Interesse an Beton-3D-Druck immer weiter gestiegen und Forschungseinrichtungen und Unternehmen wie Loughborough University, Surrey University, WinSun technologies und andere berichten von ihren Fortschritten auf diesem Gebiet.

Aus den Untersuchungen geht hervor, dass es hauptsächlich drei Vorgehensweisen gibt, um mit Konstruktionsmaterialien zu drucken (siehe dazu auch Abschnitt 2.1.1). Ein Ansatz ist es, bereits gemischten Beton/Mörtel zu drucken [KHO13]. Der andere Ansatz sieht vor trockenes Konstruktionsmaterial zu drucken, um es später mit Wasser oder chemischen Zusätzen zu aktivieren [UNI13]. Bei einer dritten Methode wird pulverartiges Material auf ein Bett gedruckt und ausgehärtet (mit Hilfe eines Verbindungsmittels oder eines Lasers) [SCH13]. Diese Methode kann aber noch nicht mit Beton umgesetzt werden.

Einige Patente beschreiben mehrere Düsen um verschiedene Materialien zu drucken [RUZ85, KHO07]. Der entscheidende Vorteil ist hier, dass äußere Schichten aus steiferem Material gedruckt werden können, während das Bauteilinnere mit fließfähigerem Material gefüllt wird. In anderen Patenten werden Ideen für eine schnellere Standfestigkeit der Betonschichten vorgestellt. Eine dieser Methoden ist es, heißen Dampf, der aus einer der Düsen kommt, zur schnelleren Verfestigung zu verwenden [SHI14]. Dazu kommen Patente für Druckköpfe, welche auf einer vertikalen Fläche horizontal Material anbringen können und eine Schneideinrichtung um spezifische Abschnitte der extrudierten Schichten zu entfernen, z. B. für Fensteröffnungen [KHO13]. Es wurden zudem Patente überprüft, bei denen erst eine Schalung aus anderem Material gedruckt wird und diese dann mit zementartigen Materialien gefüllt wird [WIE07]. Dieser Ansatz gehört allerdings nicht in den Bereich der schalungsfreien Bauverfahren und damit nicht zum untersuchten Projektinhalt.

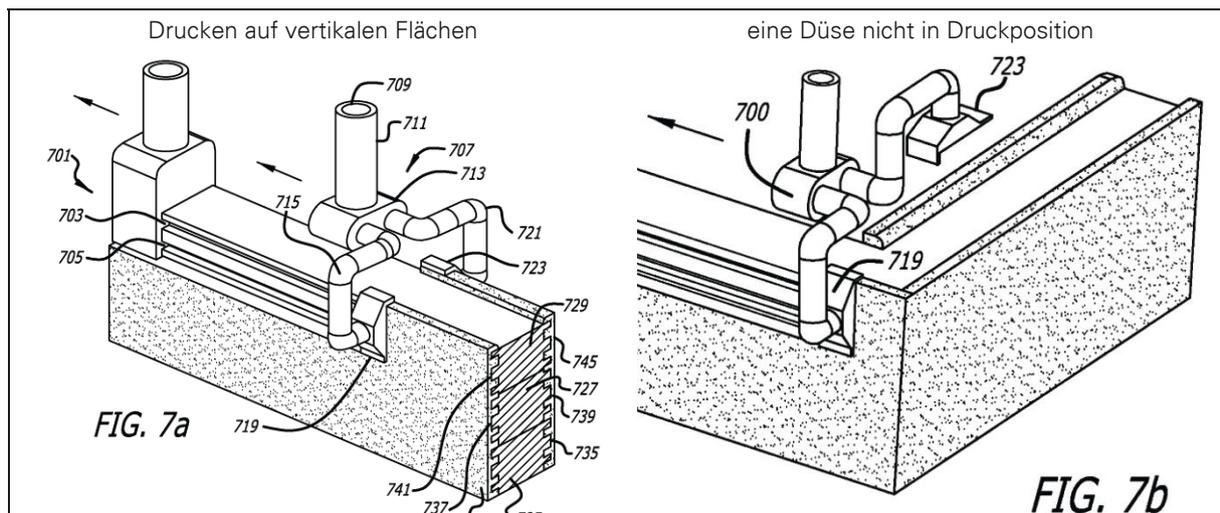


Abbildung 2.9: Verschiedene Druckkopfkonfigurationen zum Drucken verschiedener Wandteile [KHO09]

Das an der TU Dresden verfolgte Lösungsszenario für dieses Projekt, ist eine schalungsfreie, kontinuierliche Fertigung mithilfe einer Autobetonpumpe (ABP). Wichtige Aspekte bei diesem Ansatz sind:

- die Benutzung von normalen Konstruktionsmaterialien, wie etwa zugelassener Beton- und Mörtelrezepturen,
- vollständiges Einmischen von Beschleuniger zur pumpfähigen Zementmischung kurz vor dem Ausstoß aus dem Druckkopf.

Obwohl die Patente verschiedenste Ideen und Ansätze beschreiben, konnte kein direkter Konflikt mit dem Ansatz der TU Dresden im momentanen Projekt gefunden werden (zum Zeitpunkt dieses Berichtes). Lediglich das Patent "Extrusion of cementitious material with different leveling characteristics" [KHO13] erwähnt die Zugabe von chemischen Zusätzen kurz vor dem Druckkopf. Viele Patente stellen sich als Überarbeitung früherer Patente oder

als ähnliche Idee heraus. Diese Patente sind im Patentbericht nicht mit aufgenommen wurden. Die meisten Patente sind in englischer Sprache verfasst. Es ergeben sich viele wertvolle Hinweise aus den vorgeschlagenen Materialien [WAN14], den entwickelten Düsen und anderen Ideen der verschiedenen Patente.

### 2.1.2.2 Anmeldung der Wort- und Bildmarke „CONPrint3D“

Über die Projektlaufzeit war ein wachsendes Interesse von Medien und Unternehmen an der innovativen Technologie zu erkennen. Die Projektbeteiligten entschieden sich in der Folge dazu ein Markenrecht für das Bauverfahren beim Deutschen Patent- und Markenamt anzumelden. Das neuartige Bauverfahren trägt nun den Namen: „CONPrint3D – Concrete on-site 3D Printing“. Die Marke wurde als Wort- und Bildmarke (siehe Abbildung 2.10) in den nachfolgenden Waren- und Dienstleistungsklassen angemeldet:

- 07 Maschinen und Anlagen für die Bauindustrie, Baumaschinen
- 09 Software, Hardware, als Produkt, elektronisch, digital
- **37 Bauwesen**
- 42 Wissenschaftliche und technologische Dienstleistungen



Abbildung 2.10: Wort- und Bildmarke CONPrint3D

Die Beantragung wurde vom Patentinformationszentrum (PIZ) Dresden begleitet. Markeninhaber ist die Technische Universität Dresden. Die Urkunde und der Registerauszug mit der Nummer 302016014549 sind in Anlage 1 beigefügt. Die Eintragung erfolgte am 01.07.2016. Der Markenschutz endet am 31.05.2026 und kann über weitere 10 Jahre verlängert werden.

### 2.1.3 Versuchsstand

#### 2.1.3.1 Notwendigkeit

Die Erfüllung aller Anforderungen an 3D-druckbaren Mörtel (gute Pumpbarkeit, gute Extrudierbarkeit, hohe Formbarkeit und schnelle Erstarrung) ist äußerst anspruchsvoll. Zudem liegen keine Testverfahren, die die 3D-Druckbarkeit von Mörteln bzw. Beton beschreiben vor, da das 3D-Drucken von Beton ein neuartiger technologischer Prozess ist. Es wurde eine neue Methode und Technik für diesen Test erarbeitet. Schon während der ersten Monate der Projektbearbeitung hat sich gezeigt, dass gewisse Effekte des angestrebten 3D-Druckverfahrens voraussichtlich nur im praktischen Versuch erprobt werden können. Dies gilt vor allem für die Eigenschaften der neu zu entwickelnden Betonrezeptur. Aus diesem Grund wurde während des Arbeitsgruppentreffens im Februar 2015 beschlossen, einen Versuchsstand zu bauen, mit dem das angestrebte Fertigungsverfahren im Labormaßstab umfangreich getestet werden kann. Im Anschluss daran wurde durch die Mitarbeiter der FE1 und FE2 ein Konzept für den Versuchsstand erarbeitet und entsprechende Angebote eingeholt.

Abschließend wurde das Konzept in der Projektsitzung im Mai diskutiert und von den anwesenden Projektpartnern und Beratern sowie der Vertretung des Projektträgers bestätigt.

Der Versuchsstand (Gesamtkosten: 23.907,67 € inkl. MwSt / 20.090,48 € netto) wird zu 100% aus Eigenmitteln der FE und DG finanziert. Besonderer Dank gilt den Praxispartnern, die das Projekt in Form von zusätzlichen Spenden unterstützen. Die Finanzierung des Versuchsstandes wird im Einzelnen durch folgende Investitionen gewährleistet:

- Das Institut für Baustoffe finanziert 14.590,48 € netto aus Eigenmitteln.
- Die BAM Deutschland AG (Niederlassung Dresden) hat für das Vorhaben zusätzliche 3.000,- € gespendet.
- Die OPTERRA Zement GmbH, Werk Karsdorf hat für 2016 zusätzliche 2.500,- € netto zugesagt und bereits gezahlt (2.975 € mit MwSt).
- Die MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG prüft derzeit noch eine Spendenzusage.

### 2.1.3.2 Aufbau und Funktion

Der Aufbau des Versuchsstandes entspricht einem Mehrachssystem mit zwei motorisiert betriebenen Achsen und einer manuell verstellbaren Achse (Abbildung 2.11). Über das von Elektromotoren angetriebene Zweiachssystem kann der Druckkopf innerhalb einer Arbeitsfläche von ca. 1,5 x 3 m bewegt werden. Die manuell betriebene Achse dient der Höhenverstellung der Druckfläche und wird vorerst über einen Hubwagen realisiert. Eine nachträgliche Automatisierung dieser dritten Achse ist jederzeit möglich und derzeit in Planung. Die Versuchsstandsteuerung ist so ausgelegt, dass mit dem Druckkopf frei programmierbare Bahnen in beliebiger Geschwindigkeit abgefahren werden können. Die Programmierung ist sowohl in G-Code als auch über Skriptsprachen möglich. Weiterhin können über die Steuerung diverse Druckparameter eingestellt werden. Das Mitloggen des Versuchsablaufes ist ebenfalls möglich.

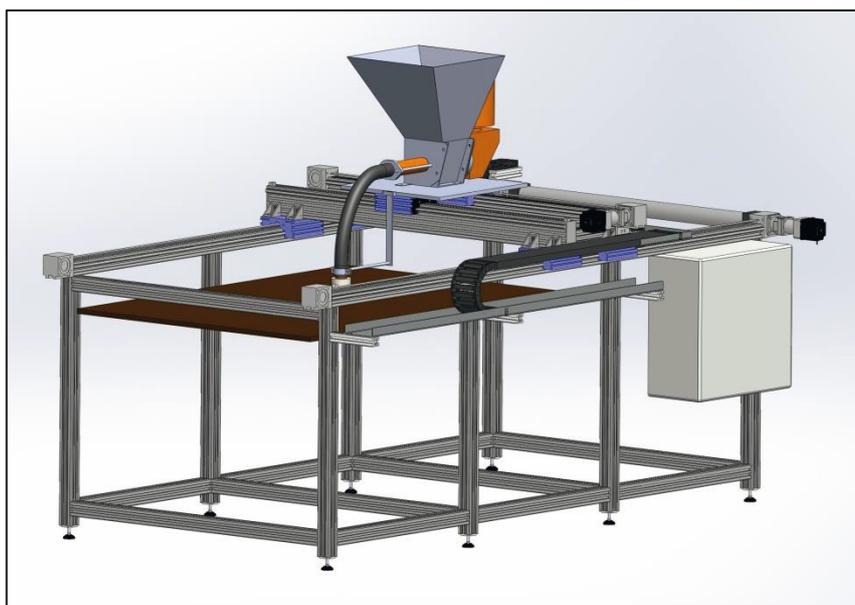


Abbildung 2.11: CAD-Modell des Versuchsstandes

Als Druckkopf dient eine leicht modifizierte Mörtelpumpe aus dem Bestand von FE2. Der Elektromotor der Mörtelpumpe ist frequenzgesteuert, sodass die Motordrehzahl über die

Steuerungssoftware eingestellt werden kann. Dadurch lässt sich über die Drehzahl des Pumpenantriebs die Austragmenge stufenlos regulieren. Über eine zusätzlich angebrachte Vorrichtung ist es möglich Zusatzmittel dosiert hinzuzugeben. Durch variable Austrittsdüsen wird der Beton gezielt auf der Druckfläche ausgebracht.

### 2.1.3.3 Anwendungen

Mit dem entwickelten Versuchstand können folgende, wichtige Materialeigenschaften getestet werden:

1. Extrudierbarkeit
2. Verbaubarkeit (Fähigkeit, die geometrische Form trotz des Drucks der darüberliegenden Schichten zu wahren / Grünstandfestigkeit)
3. Druck-, Zug- und Biegezugfestigkeit der im Versuchsstand gedruckten Betonelemente
4. Verbundfestigkeit zwischen den gedruckten Schichten und die optimale Druckgeschwindigkeit

Die Extrudierbarkeit von Betonen mit verschiedenen Ausgangsstoffen lässt sich wie folgt testen. Dazu werden die verschiedenen Mischungen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit des Motors ausgestoßen. Um die Verbaubarkeit zu testen, werden mehrere, vertikale Lagen übereinander gedruckt. Die gemessene Deformation der unteren Lagen, gibt dann die Verbaubarkeit an. Für die Druck-, Zug- und Biegezugfestigkeit werden Probekörper aus 3D-gedruckten Wänden geschnitten und nach herkömmlichen Verfahren getestet. Auch die Verbundfestigkeit zwischen den Lagen wird mit Hilfe von herausgeschnittenen Probekörpern getestet. Dazu wird der herausgeschnittene Probekörper sowohl in parallelverlaufenden als auch in querverlaufenden Richtungen zur Berührungsebene der Schichten belastet. Anhand der Ergebnisse aus den Verbundfestigkeitsversuchen (bei zu hoher Geschwindigkeit ist die Verbaubarkeit niedrig und bei niedriger Geschwindigkeit ist die Verbundfestigkeit niedrig) kann die optimale Druckgeschwindigkeit bestimmt werden. Abschnitt 2.3 enthält experimentelle Ergebnisse verschiedener Betone, ermittelt mit dem Versuchsstand.

### 2.1.4 Auszeichnung mit *bauma Innovationspreis 2016*

Das CONPrint3D Team wurde für seine innovative Idee im Verbund mit der synergetischen Herangehensweise, die zudem die Nachhaltigkeit fördert, mit dem "Innovationspreis" in der Kategorie "Forschung" auf der *bauma 2016* in München ausgezeichnet. Die *bauma* ist die weltweit führende Messe für Baumaschinen und mit einer 605.000 m<sup>2</sup> großen Ausstellungsfläche die weltweit größte Handelsmesse überhaupt.



Abbildung 2.12: Das CONPrint3D Team vor dem 3D-Drucker an der TU Dresden, Alfred-Hütter-Labor (von links nach rechts: R. Schach, M. Krause, V. N. Nerella, M. Näther, G. Kunze, V. Mechtcherine)

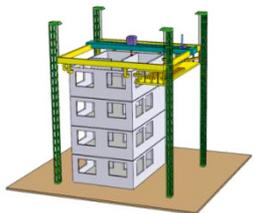
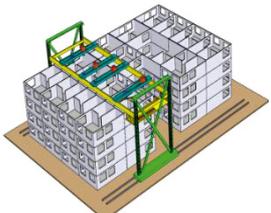
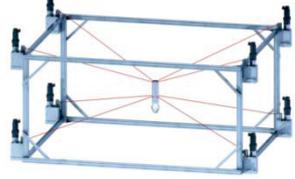
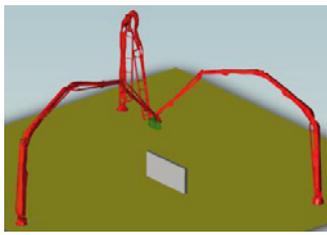
## 2.2 Ergebnisse Professur für Baumaschinen

### 2.2.1 Bestimmung und Untersuchung geeigneter Mechanismen

#### 2.2.1.1 Konzepte für den Großraummanipulator

Auf Basis der vielseitigen Quellen (vgl. Abschnitt 2.1.1) wurden bestehende Konzepte des 3D-Drucks (bzw. anderer additiver Fertigungsverfahren) analysiert und deren Übertragbarkeit auf die angestrebte Technologie des Beton-3D-Druckverfahrens geprüft. FE1 legte dabei den Fokus besonders auf die Varianten der maschinellen Umsetzung. Ein Auszug möglicher Maschinenkonzepte im Sinne eines Großraummanipulators ist in Tabelle 2.3 zusammengestellt.

Tabelle 2.3: Auszug möglicher Maschinenkonzepte für den Großraummanipulator

Konzept	Bewertung*	Darstellung / Beispiel
Portalroboter (feststehend)	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ hohe Steifigkeit</li> <li>+ einfache Steuerung</li> <li>- große Stellfläche</li> <li>- Überspannen der Haushöhe</li> <li>- Transport- u. Montageaufwand</li> <li>- voraussichtl. Sonderkonstruktion</li> </ul>	 <p style="text-align: right;">[PPT01]</p>
Portalkran (einachsrig fahrbar)	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ hohe Steifigkeit</li> <li>+ einfache Steuerung</li> <li>- große Stellfläche</li> <li>- Schienensystem Untergrund</li> <li>- Überspannen der Haushöhe</li> <li>- Transport- u. Montageaufwand</li> <li>- voraussichtl. Sonderkonstruktion</li> </ul>	 <p style="text-align: right;">[PPT01]</p>
Paralleler Seilroboter	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ hohe Positioniergenauigkeit</li> <li>+ geringer Transport- und Montageaufwand</li> <li>- Robustheit</li> <li>- keine konventionelle Baumaschine</li> <li>o einfache Steuerung über G-Code</li> </ul>	 <p style="text-align: right;">[IPA10]</p>
Verteilmast einer Autobetonpumpe	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ hohe Reichweite</li> <li>+ handelsübliche mobile Arbeitsmaschine</li> <li>+ flexibel einsetzbar</li> <li>+ integrierte Frischbetontechnologie</li> <li>- geringe Steifigkeit des Mastes</li> <li>o komplexe Steuerung / Regelung</li> </ul>	
Zusammenschluss dreier Verteilmaste	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ höhere Steifigkeit</li> <li>+ höhere Nutzlast</li> <li>- größerer Bauraum</li> <li>- höhere Kosten</li> <li>o steigender Regelungsaufwand</li> </ul>	
*): +...gut   o...mittel   -...schlecht		

Auf Grundlage des von FE3 erarbeiteten Szenarienkataloges zu möglichen Anwendungsbereichen sowie der bauspezifischen Anforderungen konnten im weiteren Projektfortschritt die Anforderungen an den Großraummanipulator eingegrenzt werden. In Anbetracht dieser maschinenseitigen Anforderungen und unter Abwägung der zuvor erarbeiteten Eigenschaften verschiedener Maschinenkonzepte wurde im Rahmen des Arbeitstreffens im Februar 2015 entschieden, die weiteren Untersuchungen auf die Getriebestruktur eines Betonpumpen-Verteilermastes zu konzentrieren.

### 2.2.1.2 Mathematische Beschreibung des Betonpumpen-Verteilermastes

Als perspektivische Zielstellung wird angestrebt, durch alleinige Vorgabe der Bewegungskordinaten des Druckkopfes den Verteilermast einer Autobetonpumpe so anzusteuern, dass der Druckkopf mit der geforderten Genauigkeit entlang der vorgegebenen Bahnkurve verfahren wird. Für die automatische Steuerung muss die Mastkinematik exakt mathematisch beschrieben werden. Die Analyse des Auslegermechanismus und die mathematische Beschreibung der kinematischen Kette sowie die Entwicklung eines Steueralgorithmus zur Bewegung des TCP entlang vorgegebener Bahnen waren deshalb wesentliche Arbeitsinhalte. Die Vorgehensweise zur Berechnung soll in den nachfolgenden Abschnitten kurz erläutert werden.

#### Problemstellung:

Der Betonpumpen-Verteilermast wird vorerst vereinfacht als ebene, serielle Kinematik betrachtet (vgl. Abbildung 2.15). Bekannt sind die Längen der Mastarme 1-5 und die Grenzen der Gelenkwinkel in den Gelenken A – E. Das Problem der inversen Kinematik (Rückwärtskinematik) ist für diesen Fall ohne Einschränkungen nicht eindeutig lösbar. Wird die Position  $(x, z)$  des TCP vorgegeben, gibt es theoretisch unendlich viele Möglichkeiten, mit verschiedenen Gelenkwinkelkombinationen diese Position des TCP zu erreichen. Ziel ist es, durch Lösen des inversen Problems für die Vorgabe einer festgelegten Bahn und Orientierung des TCP die passende Winkelkombination im Armpaket zu finden.

#### Lösungsansatz:

Zur Lösung des inversen Problems wird das Beispiel des planaren Dreigelenk-Manipulators herangezogen [SCI05]. Im Falle dieses Manipulators gibt es eine eindeutige analytische Lösung für die beiden Gelenkwinkel  $\theta_1$  und  $\theta_2$ , wenn die Koordinaten  $P_x$  und  $P_y$  sowie die Orientierung  $\phi$  des Endpunktes P vorgegeben sind (Abbildung 2.13).

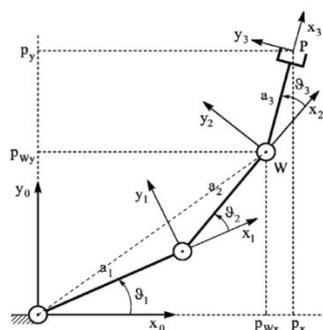


Abbildung 2.13: Planarer Dreigelenk-Manipulator [SCI05]

#### Definition der geometrischen Verhältnisse am 5-Arm-Verteilermast:

Soll am TCP des Verteilermastes eine beliebige Raumkurve abgefahren werden, ist es sinn-

voll, den TCP, ausgehend von einem festen Bezugskoordinatensystem, in Zylinderkoordinaten zu beschreiben. Dafür ist die Kenntnis des Drehradius  $r$ , der Höhe  $h$  des TCP zur horizontalen Ebene sowie der Drehwinkel  $\beta$  maßgeblich. Der Drehwinkel  $\beta$  ist durch den Drehantrieb der Maschine definiert. Der Radius  $r$  und die Höhe  $h$  ergeben sich aus der Kombination der einzelnen Gelenkwinkel des Mastes (Abbildung 2.14).

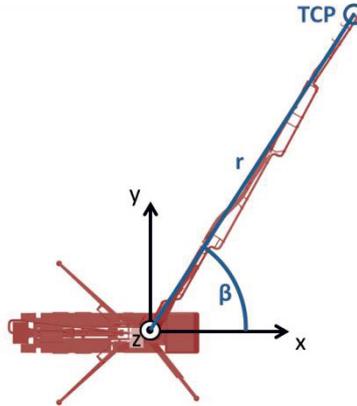


Abbildung 2.14: Bewegungskoordinaten des Verteilermastes

Zur Berechnung des Drehradius  $r$  wird, vereinfachend die Mastkrüpfung vernachlässigt, der Mast als vollständig ebene Kinematik angenommen und die Mastebene in die  $x$ - $z$ -Ebene gedreht. Die Mastgeometrie wird demnach allgemein anhand der folgenden Skizze beschrieben:

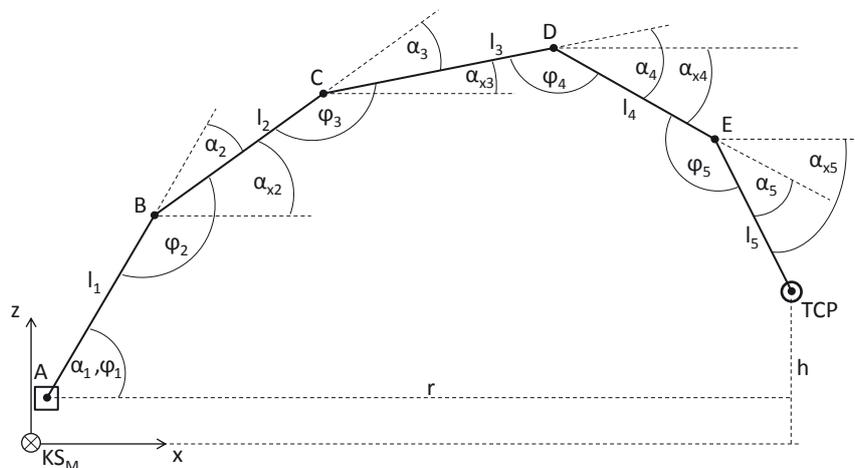


Abbildung 2.15: Kinematische Skizze des 5-Arm-verteilmastes

#### Inverse Kinematik des Verteilermastes:

Zur Beschreibung der Gelenkwinkel wird der Relativwinkel  $\alpha$  genutzt. Die Winkel  $\alpha_x$  und  $\phi$  sind Hilfsgrößen und können aus  $\alpha$  abgeleitet werden. Die inverse Berechnung der Gelenkwinkelkombination für eine beliebige Position des TCP wird anhand des zuvor beschriebenen Ansatzes durchgeführt. Die Lagekoordinaten  $TCP_x$  und  $TCP_z$  sowie die Orientierung  $\alpha_{x5}$  des TCP bezüglich der horizontalen Ebene sind durch die Bewegungsbahn vorgegeben. Weiterhin wird vorgegeben, dass sich der Mast stets in einer Bogenkonfiguration befinden soll (alle  $\alpha < 0^\circ$ ). Auf analytischem Weg ließe sich keine eindeutige Lösung des inversen Problems berechnen, da die Anzahl der Freiheitsgrade des gesamten Mastes ( $\alpha_{1...5}$ ) die Anzahl der Vorgabekoordinaten am TCP übersteigt. Daher werden jeweils zwei Gelenkwinkel des BP-Mastes als unveränderlich betrachtet und die übrigen drei Gelenkwinkel analytisch

errechnet. So können innerhalb gewisser Grenzen stets eindeutige Gelenkwinkelkombinationen ermittelt werden. Um einen möglichst großen Bewegungsbereich abdecken zu können, sollten trotz der rechnerischen Einschränkungen alle Gelenke des Mastes angesteuert werden. Dies wird erreicht, indem nacheinander unterschiedliche Kombinationen aus zwei bis drei Gelenkwinkeln geändert werden. Dabei werden die äußeren Mastarme bevorzugt bewegt. Hat das einzustellende Gelenk die Grenzen seines Winkelbereiches erreicht, so wird die Bewegung durch die Änderung der anderen Gelenkwinkel fortgeführt. Die Priorisierung erfolgt dabei nach einem festgelegten Schema.

#### Umrechnung der TCP-Sollkoordinaten bei vorhandener Mastkröpfung:

Der bisher beschriebene Berechnungsansatz ging von der Annahme aus, dass alle Mastglieder und Gelenke in einer Mastebene liegen, die entlang des ersten Mastarmes verläuft. In Realität sind Betonpumpenmaste jedoch gekröpft, um sie zusammenfallen zu können. Deshalb liegt der TCP um einen gewissen Abstand versetzt neben der Mastebene. Basis für die Betrachtungen in der Mastebene bildet das Koordinatensystem  $KS_M$  (vgl. Abbildung 2.15). Dessen Ursprung ist deckungsgleich mit dem des globalen Koordinatensystems  $KS_0$ , jedoch ist es dem gegenüber um den Winkel  $\beta'$  um die z-Achse verdreht (Abbildung 2.16). Damit der oben beschriebene Berechnungsansatz trotzdem angewandt werden kann, müssen die vorgegebenen TCP-Koordinaten umgerechnet werden, in dem der TCP in die Mastebene projiziert wird.

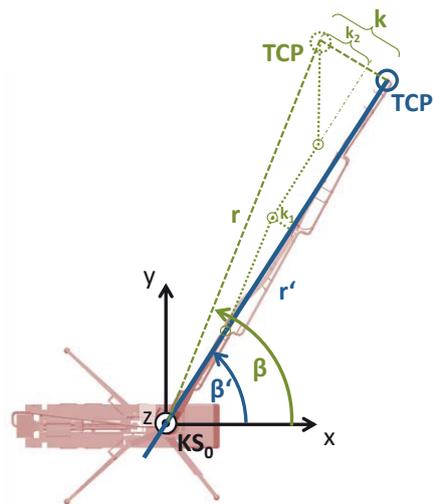


Abbildung 2.16: Mastkröpfung und Mastebene

#### Umrechnung zwischen Gelenkwinkeln und Länge der Armzylinder:

Prinzipiell reicht es aus, zur Beschreibung der Mastbewegung die Gelenkwinkel zwischen den einzelnen Mastarmen heranzuziehen. An der realen Maschine werden diese Winkel jedoch über die Hübe der Armzylinder eingestellt. Um das gewünschte Bewegungsverhalten (Winkelbereich, Übersetzung) zu erzielen, werden an den Armgelenken des Verteilmastes spezielle Umlenkinematiken eingesetzt. Mit Hilfe von Koppelgetrieben wird die lineare Bewegung der Armzylinder in eine Drehbewegung der Mastarme um die jeweiligen Gelenkpunkte umgewandelt. Das geforderte Übertragungsverhalten wird über die Abmessungen der einzelnen Getriebeglieder eingestellt. Berechnen lässt sich die Übertragungsfunktion der Umlenkinematik mit Hilfe einer erweiterten Betrachtung der Gleichungen für das allgemeine Viergelenkgetriebe nach [MOD12]. Durch eine Längenänderung des Armzylinders ( $c$ ) wird die Schwinne ausgelenkt. Die Bewegung wird über die Koppel auf den angrenzenden Mast-

arm übertragen und so die Verstellung des Gelenkwinkels  $\gamma$  erzielt (Abbildung 2.17 und Abbildung 2.18).

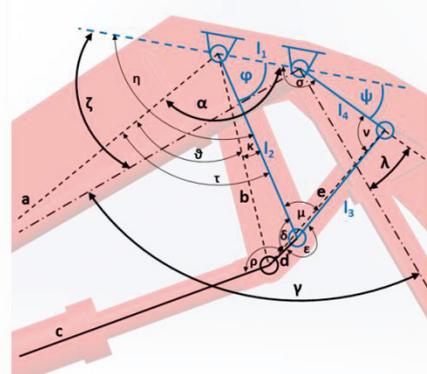
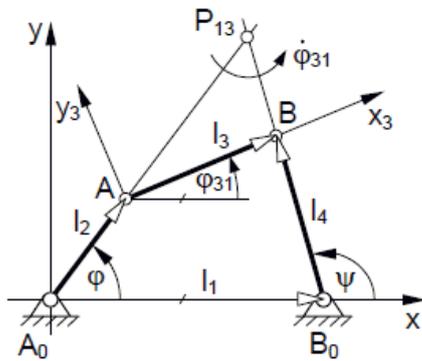


Abbildung 2.17: Viergelenkgetriebe nach [MOD12]    Abbildung 2.18: Kinematische Skizze der Umlenkkinematik

Der Gelenkinnenwinkel (hier  $\gamma$ ) entspricht in den vorangestellten Betrachtungen zur inversen Mastkinematik dem Winkel  $\phi_{1...5}$  jedes Armgelenkes. Somit können die in den Berechnungen zur inversen Kinematik ermittelten Gelenkwinkel, falls erforderlich, direkt zur Berechnung der zugehörigen Zylinderlängen herangezogen werden.

#### Implementierung des Steueralgorithmus in Berechnungs- und Simulationsprogramme:

Als Testumgebung für den entwickelten Algorithmus wurde das Rechenprogramm PTC Mathcad gewählt. Hierin wurden die einzelnen Teilrechnungen auf Korrektheit überprüft und anschließend in Form des gesamten Algorithmus zusammengeführt. Eine beliebige Raumkurve kann im Programm (nach vorheriger Prüfung des Arbeitsraumes der Mastkonfiguration) vorgegeben werden. Als Ergebnis der Berechnungen werden alle relevanten kinematischen Größen sowie eine sowohl statische als auch animierte grafische Darstellung des Verteilmastes ausgegeben.

Außerdem wurde in der Simulationsumgebung Dymola ein Mehrkörpermodell des Demonstrators entwickelt, mit dessen Hilfe sich die Bewegung des Verteilmastes simulieren lässt. Die Berechnungen lassen sich sowohl am Starrkörpersystem als auch in einem Modell mit flexiblen Körpern durchführen. Besonders in die Parametrierung des flexiblen Mehrkörpermodells ist spezielles Expertenwissen eingeflossen. Mit Hilfe dieses Modells lassen sich die Steifigkeitseigenschaften der Mastarme und damit verbunden das dynamische Verhalten des gesamten Armpaketes sehr realitätsnah abbilden. Durch die Implementierung der beschriebenen Algorithmen zur inversen Kinematik in das Simulationsmodell ist es möglich, in der virtuellen Umgebung das Verhalten des Verteilmastes bei bestimmten Bewegungs- oder Anregungssituationen zu untersuchen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse können künftig für die Weiterentwicklung der Steuer- bzw. Regelungssoftware genutzt werden.

#### Umsetzung des beschriebenen Algorithmus in der Maststeuerung:

Mit Hilfe des beschriebenen Algorithmus kann für eine beliebig vorgegebene Bewegungsbahn des TCP eines 5-Arm-Betonpumpenmastes eine passende Gelenkwinkelkombination errechnet werden, solange die Bewegungsbahn innerhalb des Arbeitsraumes verläuft und die Bogenkonfiguration des Mastes eingehalten wird. Diese Algorithmen können genutzt werden, um die Mastbewegung zu automatisieren. Für die Steuerung des Mastes kommt z. B. eine Bahnsteuerung mit Linearinterpolation in Frage. Hierbei werden Start- und Endkoordinaten sowie die Sollgeschwindigkeit und -beschleunigung vorgegeben. Die resultierende Bewegung wird dann anhand einer Interpolationsrechnung durch die Steuerung bestimmt und die entsprechenden Steuersignale an die Aktuatoren (Armzylinder) weitergegeben.

[WEB09]. Möglicherweise ist hier eine Schwachstelle des bisher beschriebenen Algorithmus zu erkennen: Durch „harte“ Auswahlkriterien bei der Auswahl der bewegten Armgelenke entstehen Geschwindigkeitssprünge in den Gelenken, die sich in Realität aufgrund der Trägheit des Systems so nicht umsetzen lassen. Beim Umschalten des Zustandes, also beim Stopp der einen und Start der anderen Gelenkbewegung, wird eine „unendlich hohe“ Beschleunigung vorausgesetzt, die die Antriebe natürlich nicht umsetzen können. Dadurch können Fehler entstehen, die sich auf die Positionierungsgenauigkeit am TCP auswirken.

### 2.2.1.3 Praktische Tests am Betonpumpen-Verteilmast

#### l) Durchführung der Versuche

Um den beschriebenen Steueralgorithmus zu testen und damit die Positioniergenauigkeit einer konventionellen Autobetonpumpe (ABP) zu ermitteln, wurden in Zusammenarbeit mit DG1 praktische Versuche durchgeführt. Die Versuche fanden im Zeitraum vom 09. bis 13.05.2016 auf dem Testgelände der Firma PUTZMEISTER in Aichtal statt. Zur Verfügung stand eine Autobetonpumpe „M38-5“. Die Maschine wies gegenüber der Serienvariante lediglich folgende Modifikationen auf:

- Sonderkonstruktion des fünften Mastarmes: Nachbildung des Druckkopfes als Dummy-Bauteil
- Externe Steuerung der Maschine über Steuer-PC.

Ziel der Versuche war die automatisierte Steuerung der Maschine zur Bewegung der Mastspitze entlang einer vorgegebenen Bahn und die gleichzeitige Erfassung der Position der Mastspitze, um einen Soll-Ist-Abgleich durchführen zu können und somit den Ist-Zustand herkömmlicher ABP hinsichtlich der erreichbaren Positioniergenauigkeit feststellen und bewerten zu können.

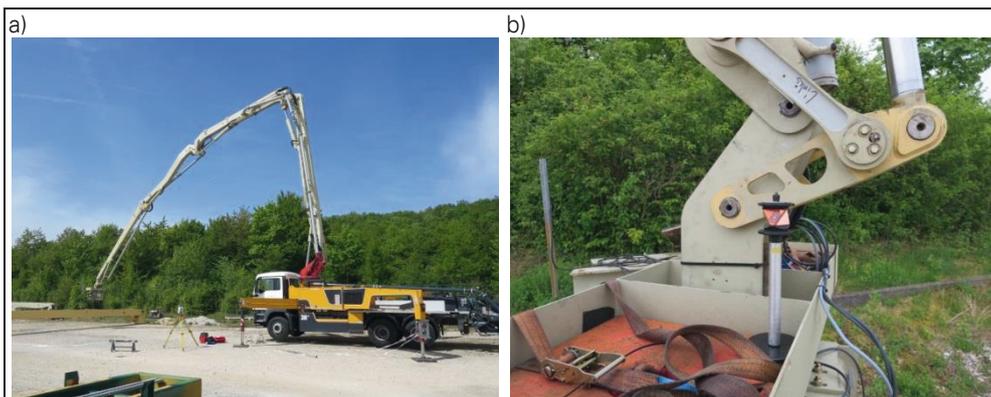


Abbildung 2.19: a) Versuchsmaschine M38-5 auf dem Testgelände; b) Arm 5 gekürzt, mit Druckkopf-Dummy

Zur Simulation des Druckkopfes bei Beton-Druck-Anwendungen wurde der fünfte Mastarm durch einen „Druckkopf-Dummy“ mit einer Masse von ca. 630 kg ersetzt. Die Positionserfassung erfolgte über das zielverfolgende Tachymeter „Leica Nova MS60“, bereitgestellt durch das Geodätische Institut der TUD. Das Tachymeter ermöglicht die hochgenaue Erfassung der Position eines beliebigen Messpunktes, der durch ein Reflektor-Prisma gekennzeichnet ist (3D-Messgenauigkeit im Tracking-Modus < 5 mm). Das Prisma wurde auf dem Druckkopf-Dummy angebracht, wie in Abbildung 2.19 b dargestellt.

Zur Orientierung und Beschreibung der Position der Objekte auf dem Testgelände wurden im Vorfeld verschiedene Koordinatensysteme definiert, die in Abbildung 2.20 skizzenhaft dargestellt sind. Die Vorgabe und Beschreibung der Bewegungsbahnen erfolgt in den nachfolgenden Ausführungen stets auf Basis des Fahrzeug-Koordinatensystems „ $KS_0$ “.

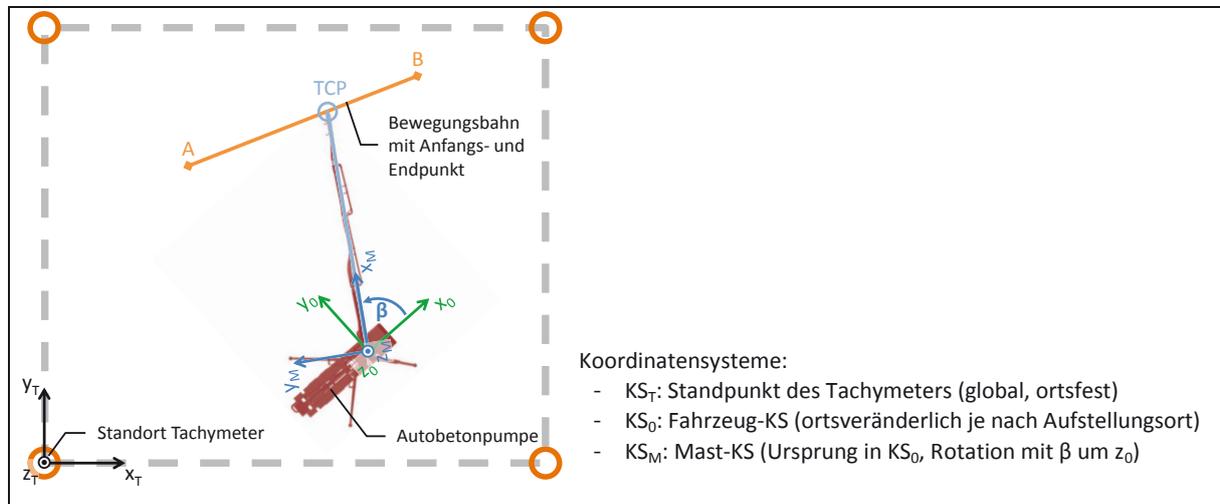


Abbildung 2.20: Definition der Koordinatensysteme auf dem Testgelände

Die Maschine änderte im gesamten Versuchszeitraum ihre Position nicht. Während der Versuche wurden die jeweils vorgegebenen Bahnen mit dem ABP-Mast abgefahren. Dazu wurden im Vorfeld die Zeitverläufe der Mastgelenks- und Drehwerkswinkel entsprechend der in Abschnitt 2.2.1.2 beschriebenen Algorithmen berechnet und als Sollsignale den Lagereglern der jeweiligen Antriebsglieder aufgeprägt. An Mast und Drehwerk wurden diese Signale in entsprechende Bewegungen umgesetzt. Für die spätere Auswertung wurden währenddessen mehrere Messgrößen aufgezeichnet. Die relevantesten sind:

- Tachymeter-Reflektor-Position (MP) in kartesischen Koordinaten  $(x, y, z)$  des  $KS_0$
- Gelenkwinkel  $\alpha$  an den Mastgelenken A bis E, (Neigungssensoren an den Mastarmen)
- Drehwerkswinkel  $\beta$
- Steuersignale der Antriebe.

Über den Versuchszeitraum wurde eine Vielzahl von Messungen durchgeführt, die fortlaufend nummeriert wurden. Für die Auswertung hinsichtlich der Positionsgenauigkeit reicht die genauere Betrachtung ausgewählter Versuche aus. Inhaltliche Schwerpunkte liegen dabei auf der Untersuchung, welchen Einfluss

- Maststellung und -verformung
- die relative Lage der Bewegungsbahn bezüglich der ABP
- die Bewegungsgeschwindigkeit

auf die erreichbare Positioniergenauigkeit haben. Inhalt und Ergebnisse dieser Versuche sind tabellarisch in Anlage 2.1 zusammengefasst.

## II) Nachbearbeitung der Vorgabe- und Messdaten

Aufgrund von geometrischen Abweichungen der im Versuchsaufbau festgelegten Messpunkt-Position gegenüber der in der theoretischen Bahnberechnung definierten TCP-Position musste der Verlauf der vorgegebenen Bewegungsbahn nachträglich korrigiert werden.

Dadurch ergeben sich für die korrigierten Vorgabe-Bahnkoordinaten „unrunde“ Verläufe, die aber dem theoretischen Verlauf des Tachymeter-Messpunktes entsprechen und bei der weiteren Auswertung zum Vergleich herangezogen werden können. In Abbildung 2.22 ist das an der Differenz zwischen den beiden Kurven „TUD Vorgabe“ und „TUD Vorgabe korrigiert“ sehr gut zu erkennen. Bei den Vorgabedaten musste nachträglich eine weitere Korrektur vorgenommen werden, um die Zeitachsen der unterschiedlichen Datenquellen zu synchronisieren (vgl. Abbildung 2.21). Auch bei den Messdaten des Tachymeters war eine nachträgliche rechnerische Korrektur nötig, hauptsächlich um die bei der Kalibrierung nicht erfassten Einflüsse zu eliminieren. Für die weitere Auswertung werden daher nur die korrigierten Messdaten betrachtet.

### III) Allgemeine Auswertung der Messdaten am Beispiel der Messung 19a

#### III a) Verlauf der Gelenkwinkel am ABP-Mast

Voraussetzung für die automatisierte Steuerung des Betonpumpenmastes ist, dass die vorgegebenen Winkelverläufe an den Mastgelenken von der Maschine auch tatsächlich realisiert werden. Um die vorgegebenen Winkelverläufe umsetzen zu können wurde durch DG1 für die einzelnen Gelenke Regler implementiert. Am Beispiel der Messung 19a sind die Winkelverläufe an den Gelenken in Abbildung 2.21 dargestellt. Die Diagramme zeigen im zeitlichen Verlauf eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Vorgabewerten und den von den Winkelsensoren gemessenen Gelenkwinkeln. Dies ist auch bei einem Großteil der anderen Messungen der Fall. Ausnahmen bilden die Momente, in denen die vorgegebene Winkeländerung an einem Gelenk zu groß ist und deshalb nicht schnell genug an der Maschine umgesetzt werden kann (vgl. Gelenk D nach ca. 10 s). Der entstandene Fehler wird allerdings durch die Regler relativ schnell wieder ausgeglichen.

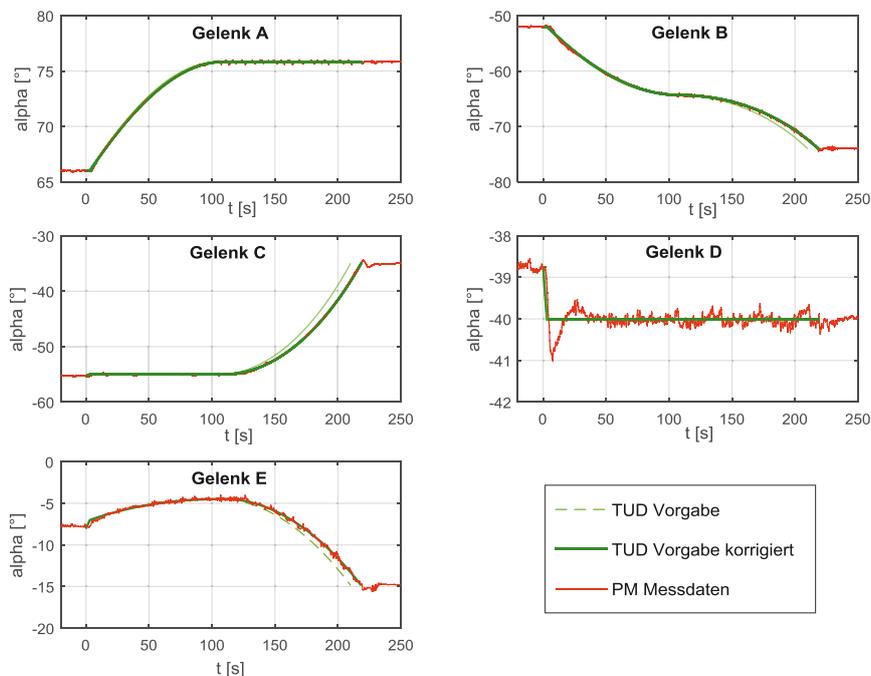


Abbildung 2.21: Verläufe der Gelenkwinkel bei Messung 19a

### III b) Bewegungsbahn des Tachymeter-Messpunktes

Das Hauptaugenmerk der Messungen lag in der Verfolgung der Bewegungsbahn des TCP, bzw. in diesem Fall repräsentiert durch den Tachymeter-Reflektormesspunkt. In Abbildung 2.22 sind am Beispiel der Messung 19a die korrigierten Vorgabe-Bahnkoordinaten (grün) und die tatsächlich erreichte Bewegungsbahn (rot) in der horizontalen x-y-Ebene dargestellt. Die hellgrün gestrichelte Linie („TUD Vorgabe“) stellt die ursprünglich theoretisch vorgegebene Bahn dar. Auf der linken Seite des Bildes ist die Lage der Bahn bezüglich des Fahrzeug-KS dargestellt. Die rechte Seite zeigt die Messdaten in vergrößerter Ansicht. Es ist gut zu erkennen, dass der MP die Vorgabebahn verfolgt, sie aber nicht genau trifft. Dabei sind in x-Richtung maximale Abweichungen von 170 mm zu verzeichnen. Im Mittel liegt die x-Abweichung bei ca. 90 mm. Aufgrund der Schwingungen des Mastes ergibt sich in x-Richtung eine maximale Schwingweite<sup>1</sup> von 210 mm.

Bei Betrachtung der MP-Koordinaten im Zeitverlauf lassen sich die Einzelabweichungen noch deutlicher darstellen. In Abbildung 2.23 sind die eben beschriebenen Abweichungen der x-Koordinate wiederzuerkennen. Die Abweichungen in Querrichtung (y) betragen im Mittel 51 mm und können hier als „Vorweglaufen“ des Mastes gedeutet werden. Auffällig ist eine permanente Abweichung von der vorgegebenen Höhe (z) um im Mittel ca. 150 mm. Der MP „hängt“ also permanent etwas tiefer, als er theoretisch sollte. Diese Abweichung lässt sich bei allen Messungen beobachten.

Um die Richtigkeit der zuvor theoretisch berechneten Bahn zu überprüfen, wurde die gesamte Mastkonfiguration der Testmaschine inklusive des Druckkopf-Dummys als Starrkörpermodell im Simulationsprogramm Dymola abgebildet. Genau wie bei den Messungen an der realen Maschine wurden im Modell die Gelenkwinkel vorgegeben und dementsprechend eine Bewegungsbahn erzeugt. Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit der zuvor berechneten Bahn zeigte eine nahezu exakte Übereinstimmung, wodurch die kinematischen Berechnungen bestätigt sind.

---

<sup>1</sup> Als Schwingweite wird hier der Abstand zwischen zwei nah beieinander liegenden Minimal- und Maximalwerten des schwingenden Messsignals bezeichnet.

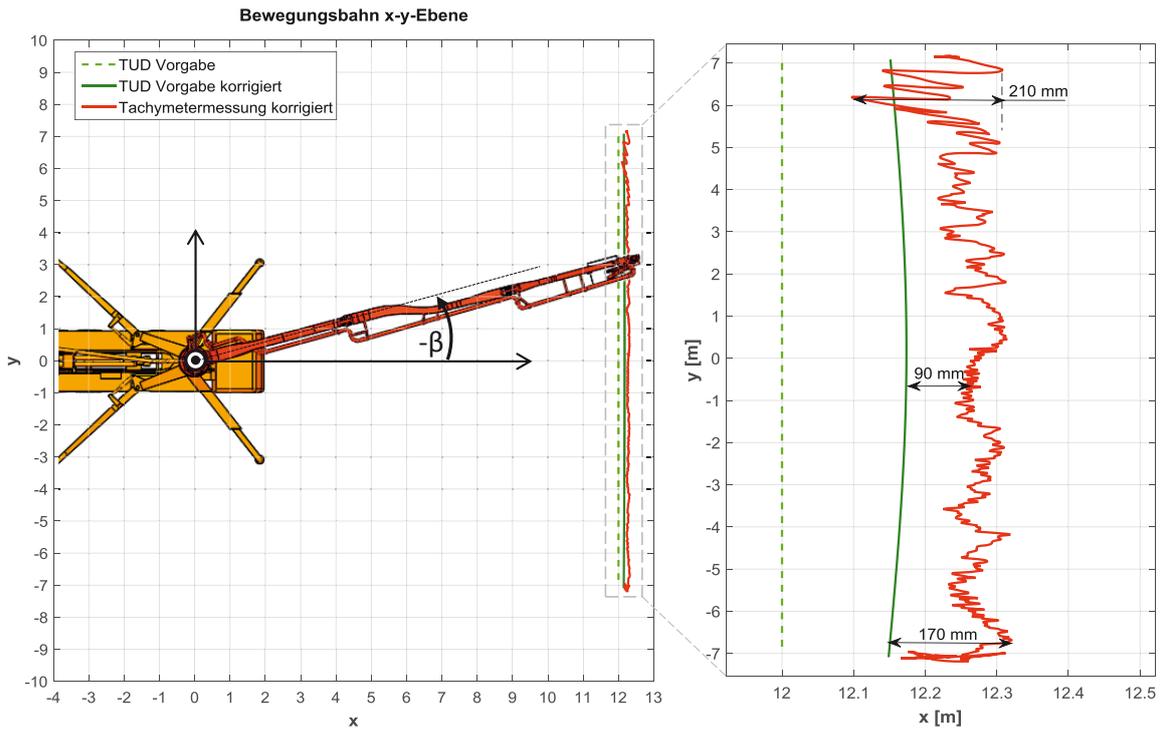


Abbildung 2.22: Bewegungsbahn des Messpunktes in der x-y-Ebene, Messung 19a

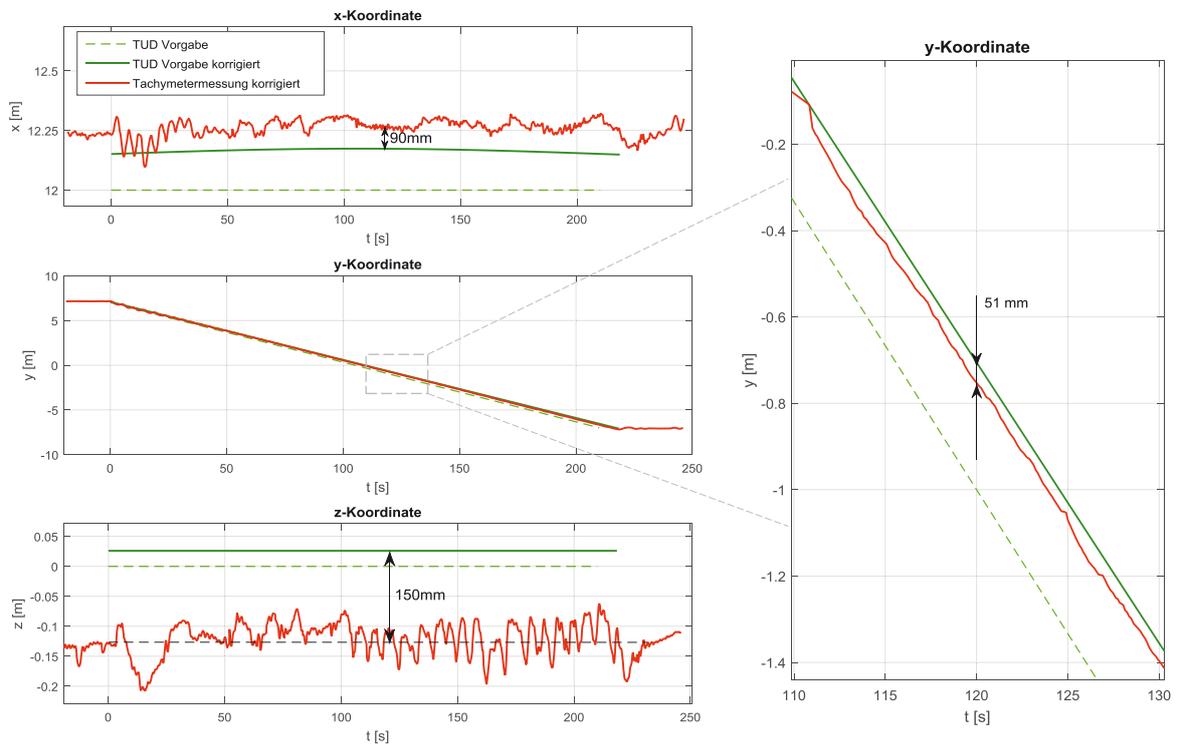


Abbildung 2.23: Messpunkt-Koordinaten im Zeitverlauf, Messung 19a

## IV) Auswertung ausgewählter Messungen

### IV a) Allgemeine Aussagen

Die Auswertung der Messdaten lässt allgemeine Aussagen über die Positioniergenauigkeit der in den Messungen verwendeten Autobetonpumpe zu. Es wurden mehrere Messungen ausgewertet, die sich hauptsächlich durch ihre Hauptbewegungsrichtung, die Mastkonfiguration oder die Verfahrgeschwindigkeit unterscheiden. Allgemein lässt sich festhalten, dass die vorgegebenen Bewegungsbahnen im Schnitt bei den Versuchen um ca. 200 mm verfehlt wurden. Der größte Einfluss ist dabei der Vertikalabweichung (z Koordinate) zuzuschreiben. Im Mittel lag die am MP erreichte Bahn ca. 150 mm unter der vorgegebenen Höhe. Die Abweichungen der x- und y-Koordinaten ist stark abhängig von der Hauptbewegungsrichtung und der Bahngeschwindigkeit, liegen im Mittel aber zwischen 60 und 110 mm. Auffällig bei einigen Messungen ist auch ein permanentes Schwingen der Mastspitze, wobei bei höheren Bahngeschwindigkeiten größere Schwingweiten zu beobachten sind.

### IV b) Einfluss von Mastkonfiguration und Vertikalsteifigkeit

Wie oben schon erwähnt wurde, ist bei jeder der Messungen zu beobachten, dass die Mastspitze und damit der Messpunkt etwas tiefer liegt, als durch kinematische Berechnung und Simulation vorgegeben. Dieser Effekt ist sehr einfach damit zu begründen, dass es sich im Gegensatz zu den theoretisch angenommenen Starrkörpern bei der realen Maschine um ein verformbares mechanisches System handelt. Aufgrund der Eigenmasse und der zusätzlichen Last durch den angebauten Druckkopf-Dummy verbiegen sich die einzelnen Arme des Betonpumpenmastes entsprechend ihrer spezifischen Steifigkeit. Durch die bogenförmige Konfiguration des Mastes ergibt sich dadurch zwangsläufig eine Verschiebung der Mastspitze nach unten und nach vorn (in vertikaler Mastebene betrachtet). Bei den Messungen 16a, 19a und 20a ist der Steifigkeitseinfluss besonders gut zu beobachten (siehe Anlage 2). Es ist anzunehmen, dass die Vertikalverschiebung umso größer ist, je weiter der Mast gestreckt ist, da sich hier die Biegeverformung der einzelnen Mastarme stärker auswirkt. Anhand der Messungen 19a und 20a wird das bestätigt. Bei Messung 19a mit einem mittleren Mastradius von 12,25 m liegt der MP ca. 125 mm unterhalb des Sollwertes. Bei Messung 20a mit ca. 18,25 m Mastradius ist die Differenz mit ca. 205 mm deutlich größer.

Durch Messung 16a wird der Steifigkeitseinfluss des Mastes auf die Positioniergenauigkeit in z-Richtung nochmals verdeutlicht (Anlage 2.3): hier wird der Mast über die Messzeit „steiler“ gestellt, sodass sich der Mastradius verkürzt. Dabei ist mit abnehmender x-Koordinate (18 m auf 10 m) auch eine Verringerung der mittleren Vertikalabweichung zu beobachten (von 150 mm auf 110 mm).

### IV b) Einfluss der Quersteifigkeit

Bei einem Großteil der Versuche war während der Messungen ein deutliches Schwingen des Mastes in Querrichtung zu beobachten. Diese Mastschwingung ist auch deutlich in den Messdaten zu erkennen. Vor allem in der Bewegungskordinate, die quer zur Mastebene liegt, ist meist ein sinusförmiges Schwingen mit nahezu konstanter Amplitude zu beobachten. Der Grund dafür ist die geringe Quersteifigkeit des Mastes. Kommt es zur Anregung durch die Drehwerksbewegung, wird der Mast in Schwingung versetzt. Man kann davon

ausgehen, dass die Querschwingungen bei den Versuchen hauptsächlich steuerungsbedingt durch die harte Vorgabe der Drehwerksbewegung zum Startzeitpunkt induziert wurden. In einigen Fällen kam es dadurch zu Resonanzerscheinungen im Zusammenspiel mit dem Drehwerksregler, sodass die Schwingung über die gesamte Versuchszeit bestehen blieb. Am Beispiel der Messung 12b ist dies sehr gut zu erkennen (Anlage 2.2). Die vorgegebene Bahn liegt diagonal zur ABP. Während der gesamten Bewegung schwingt der Mast in Querrichtung mit durchschnittlichen Schwingweiten von ca. 300 mm. In der Aufzeichnung der Messung 12b ist die Querschwingung aufgrund des diagonalen Bahnverlaufs zuerst in y-Richtung zu beobachten. Ab der Hälfte des Weges steigt dann der Einfluss auf die x-Koordinate. Auf die Höhe des MP (z) hat die Querschwingung keinen Einfluss.

#### IV b) Einfluss der Bewegungsgeschwindigkeit

Im Allgemeinen zeigen die Messergebnisse aller Versuche, dass der MP der vorgegebenen Bahn, abgesehen von den beschriebenen Abweichungen, gut folgt. Alle Messungen haben aber auch gemeinsam, dass zu bestimmten Zeitpunkten starke Abweichungen auftraten, die vor allem am Verlauf der Höhenkoordinate z zu erkennen sind. Dieses „Absacken“ des Mastes tritt vor allem zu den Zeitpunkten auf, an denen sich die Konfiguration der bewegten Mastgelenke ändert. Am Beispiel der Messungen 18a2 und 18b2 ist dieser Effekt deutlich zu erkennen (Anlage 2.4 und Anlage 2.5). Bei Messung 18a2 findet bei ca. 208 s ein Konfigurationswechsel der bewegten Mastgelenke von „ABE“ auf „BCE“ statt, wobei Gelenk A stoppt und Gelenk B einen Richtungswechsel erfährt. Der Wechsel erfolgt in der Vorgabe jedoch sehr abrupt, sodass es einige Sekunden dauert, bis die Regelung die Gelenkwinkel auf die vorgegebenen Werte einstellt. Die Abweichungen der Winkel betragen in dieser Phase ca.  $0,5^\circ$  bis  $1,0^\circ$ . Das reicht aus, um an der Mastspitze eine Absenkung um ca. 250 mm zu erzeugen. Bei höheren Bahngeschwindigkeiten sind auch die Drehgeschwindigkeiten in den Mastgelenken größer. Ändert sich die Konfiguration der bewegten Gelenke, wirkt sich das in größeren Winkelabweichungen aus. Bei Messung 18b2 z. B. wurde die Bahngeschwindigkeit gegenüber Messung 18a2 deutlich gesteigert (Faktor 2,7). Hier kommt es bei ca. 26 s zum Konfigurationswechsel von „BCE“ auf „ABE“. Die Abweichungen der Winkel sind zu diesem Zeitpunkt mit  $1,5^\circ$  bis  $2,0^\circ$  deutlich größer als bei Messung 18a2 und die Regelung braucht auch mehr Zeit, um den größeren Winkelfehler auszugleichen. Diese Fehlstellung verursacht an der Mastspitze eine starke Absenkung um 726 mm. Weiterhin war bei den Versuchen zu beobachten, dass sich höhere Bahngeschwindigkeiten auch dann auf die Mastbewegung auswirkten, wenn die Komponente der Drehwerksbewegung hoch war. Eine steile Änderung der Drehwerksgeschwindigkeit zu Bewegungsbeginn erzeugte eine stärkere Anregung des Mastes, sodass verstärkt Schwingungen in Querrichtung auftraten.

#### 2.2.1.4 Schlussfolgerungen zur Eignung der ABP als Großraummanipulator

Mit den durchgeführten Versuchen konnte gezeigt werden, dass ein ABP-Mast geeignet ist, um als automatisch gesteuerter Großraummanipulator eingesetzt zu werden. Aufgrund ihres großen Arbeitsraumes kann die ABP einen großen Bewegungsbereich abdecken und Bahnen in verschiedensten Positionen und Richtungen anfahren. Wie erwartet sind jedoch gewisse Einschränkungen hinsichtlich der Positioniergenauigkeit hinzunehmen, wenn an der Maschine keine konstruktiven Änderungen vorgenommen werden. Als Einflussfaktoren

können dabei hauptsächlich die Maststeifigkeit sowie steuerungs-/ regelungstechnische Aspekte genannt werden.

Mit den Versuchen konnte gezeigt werden, dass sich abhängig vom Bewegungsradius und der Mastkonfiguration in Höhenrichtung unterschiedliche Verformungen am Mast ergeben und sich an der Mastspitze infolge dessen eine bestimmte Abweichung der z-Koordinate einstellt. Geht man davon aus, dass die Zusatzmasse des Endeffektors an der Mastspitze konstant bleibt, könnte dieser Effekt in Zukunft durch einmalige „Kalibrierfahrten“ ausgeglichen werden. Ist nach der Kalibrierung die positionsabhängige Maststeifigkeit bekannt, können die Vorgabekoordinaten so angeglichen werden, dass der Verformungseinfluss letztendlich kompensiert wird.

Die erzielten Messergebnisse zeigen weiterhin deutlich, dass die Qualität der Steuerung bzw. Regelung der einzelnen Antriebsglieder einen großen Einfluss auf die Positioniergenauigkeit hat. Zum einen muss gewährleistet sein, dass das zugrundeliegende kinematische Modell des Mastes möglichst gut mit den realen Konstruktionsdaten des Mastes übereinstimmt. Zum anderen ist es wichtig, dass die von der Steuerung errechneten Gelenkwinkel möglichst genau an den Gelenken der Maschine eingestellt werden. Schon geringe Abweichungen an den einzelnen Gelenkwinkeln können großen Einfluss auf die Position der Mastspitze haben: beispielsweise kann bei einem Bewegungsradius von 18 m (vgl. Messung 19a) das Unterschreiten des vorgegebenen Winkels am A Gelenk um  $-1^\circ$  ein Absenken der Mastspitze um ca. 350 mm bewirken.

Die bei den Versuchen aufgetretenen Querschwingungen sind hauptsächlich auf die geringe Quersteifigkeit des Mastes und auf Anregungen aus dem Drehwerksantrieb zurückzuführen. Sollen am Mast keine konstruktiven Veränderungen vorgenommen werden, empfiehlt es sich, in Zukunft die Ansteuerung des Drehwerksantriebes zu überarbeiten. Die Signale für die Bewegungsvorgabe sollten insbesondere im Hinblick auf ein sanftes Anfahren sowie die Vermeidung von Resonanzerscheinungen während der Bewegung optimiert werden.

Mit den Versuchen konnte weiterhin gezeigt werden, dass der entworfene Algorithmus für die Steuerung des Mastes geeignet ist. Jedoch haben sich auch die zuvor erwähnten Schwachstellen bestätigt: durch das harte Umschalten zwischen den Bewegungskonfigurationen werden in den Vorgabesignalen Sprünge erzeugt, die die Regler der einzelnen Antriebe nur schwer ausgleichen können. Dadurch werden Winkelabweichungen in den Gelenken provoziert, die sich punktuell in größeren Abweichungen des Zielpunktes auswirken. Für künftige Anwendungen ist es deshalb ratsam den Algorithmus zur Maststeuerung hinsichtlich seiner Regelungsfreundlichkeit zu optimieren.

## 2.2.2 Untersuchungen zur Bestimmung eines geeigneten Druckkopfes

### 2.2.2.1 Bestandsaufnahme

Zur Erfassung des aktuellen Standes der Technik in Bezug auf den 3D-Druck mit Beton wurden umfangreiche Recherchen durchgeführt. Im Fokus stand die Suche nach serienreifen Lösungen für den Druckkopf, die am Markt erhältlich sind und mit denen der Beton-Druck technisch realisiert werden kann. Analysiert wurde unter anderem eine Vielzahl an Veröffentlichungen zu den bekannten Beton-Druck-Projekten (vgl. Abschnitt 2.1.1). Vom größten Teil der relevanten Projekte ist bekannt, dass sie auf der Extrusion eines eher feinkörnigen und ca. 30...50 mm breiten Beton-Stranges aus einer Düse basieren. Über die maschinelle Peripherie zum Mischen, Dosieren und Fördern des Betons werden allerdings wenige bis keine Details veröffentlicht.

Im Laufe der Projektes wurde mit Hinblick auf die angestrebten Anwendungsszenarien festgelegt, dass beim CONPrint3D<sup>®</sup>-Verfahren die Bauwerksstrukturen schichtenweise in der erforderlichen Wandbreite gedruckt werden, sodass das gesamte Wandprofil einer Schicht monolithisch ausgefüllt ist. Diesem Prinzip in gewisser Weise ähnlich, im Hinblick auf die Formgebung, ist die Errichtung monolithischer Bauwerke mittels Gleitschalungsfertigern. Namhafte Hersteller solcher Maschinen sind WIRTGEN und GOMACO. Eingesetzt werden diese Systeme z. B. zur Errichtung von Leitwänden oder Randsteinen an Fahrbahnen, bei Wasserrinnen und ähnlichen langgestreckten Bauwerken. In Bezug auf die Querschnittsformen sind diese Systeme sehr variabel, jedoch sind sie in der Regel auf eine Betonschicht beschränkt und nicht für den Hochbau ausgelegt.



Abbildung 2.24: Gleitschalungsfertiger der Fa. Wirtgen im Einsatz [WIR16]

Im Hochbau hingegen kommen bei sehr hohen Bauwerken Kletter- oder Gleitschalungssysteme zum Einsatz, die dem Prinzip des kontinuierlichen Betonierens nahe sind. Die Schalungssysteme werden dabei individuell an das Bauvorhaben angepasst. Im Projektverlauf werden die Systeme am wachsenden Bauwerk entlang nach oben mitgeführt. Die europäischen Hersteller DOKA und PERI zählen zu den Weltmarktführern beim Bau solcher Systeme.

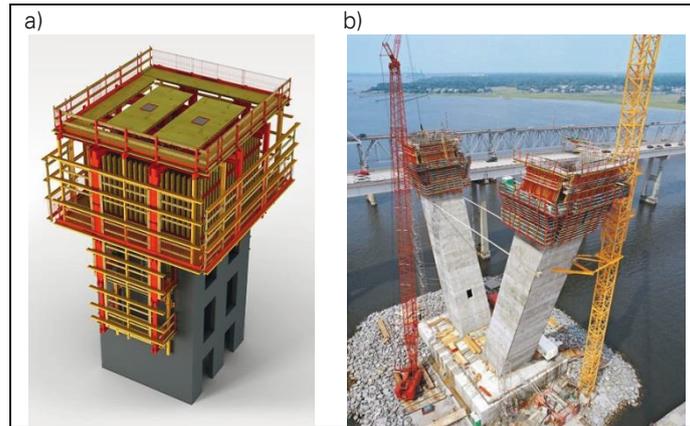


Abbildung 2.25: a: ACS Selbstklettersystem der Fa. PERI; b: ACS V beim Bau der Uddevalla Bron (SWE) [PER16]

Die genannten Systeme ermöglichen zwar einen nahezu kontinuierlichen Betoniervorgang, allerdings sind sie aufgrund ihrer geringen Flexibilität in der Formgebung kaum mit dem 3D-Druck vergleichbar. In einigen verfahrenstechnischen Aspekten wie z. B. der Verwendung von Gleitschalungen könnte bei der Druckkopfentwicklung auf die Erfahrungen aus diesen Bautechnologien zurückgegriffen werden.

Für die Extrusion von Beton im Sinne des Beton-Druckes sind keine aktuellen Anwendungen bekannt. Jedoch werden in anderen Industriezweigen Extrusionsverfahren mit betonähnlichen Materialien angewandt. Als Beispiel sei hier die Produktion von Tonziegeln oder Keramikbauteilen genannt.

Als Ergebnis der Rechercharbeiten lässt sich festhalten, dass es am Markt aktuell keine serienreifen technischen Lösungen gibt, die für die Verwendung als Beton-Druckkopf geeignet sind. Daher wird es in Zukunft notwendig sein für die CONPrint3D® Technologie einen eigenen, speziellen Druckkopf zu entwickeln.

### 2.2.2.2 Anforderungen an den Druckkopf

Der erste Schritt für die Entwicklung eines neuen technischen Systems ist, alle bekannten Anforderungen, die sich aus der Aufgabe ergeben, zusammenzutragen. In Bezug auf den Druckkopf kann man die Anforderungen in folgende Hauptgruppen untergliedern:

- Anforderungen von Seiten des Baustoffes
- Anforderungen von Seiten des Bauwerks
- anwendungsbezogene Anforderungen.

Die in Tabelle 2.4 aufgeführten Anforderungen gelten für die erste Entwicklungsstufe des Druckkopfes und können nach der erfolgreichen Umsetzung für anschließende Entwicklungsschritte beliebig erweitert werden.

Tabelle 2.4: Grundlegende Anforderungen an den Druckkopf

<u>Kriterium</u>	<u>Anforderung</u>
<b>Anforderungen von Seiten des Baustoffs</b>	
Baustoffeigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Beton mit Zuschlagstoff Kies (rund / gebrochen), Größtkorn 16 mm</li> <li>- Konsistenzklasse nach DIN 1045-2: F2 (plastisch)</li> <li>- Schnell erstarrend</li> </ul>
Austragmenge	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Variabel, je nach Abmessungen und Druckgeschwindigkeit</li> <li>- 10...400 l/min</li> </ul>
Vorhaltemenge	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 100 l</li> <li>- Zum Ausgleich von Schwankungen der Betonzufuhr</li> </ul>
Zugabe von Zusatzmittel	<ul style="list-style-type: none"> <li>- optional vorsehen</li> <li>- gute Durchmischung gewährleisten</li> <li>- max. 10 % der Betonfördermenge</li> </ul>
<b>Anforderungen von Seiten des Bauwerks</b>	
Einzelne Wand	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Breite variabel, 10...40 cm; Länge &gt; 2 m; Höhe ca. 3 m</li> <li>- zul. Ebenheitsabweichung an Oberflächen: 5 mm (DIN 18202)</li> <li>- zul. Grenzabweichung im Grund- und Aufriss: <math>\pm 10</math> mm (DIN 18202)</li> <li>- vorerst keine Bewehrung (Ersatz von Mauerwerksbau)</li> </ul>
Gesamtbauwerk	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Einhalten der vorgeschriebenen Festigkeitsanforderungen</li> <li>- Realisierung von Ecken, Freiräumen, Wandverbindungen, Wandabschlüssen</li> <li>- Optional: Realisierung von Decken</li> <li>- Optional: Ermöglichen neuartiger Bauwerksformen</li> </ul>
<b>Anwendungsbezogene Anforderungen</b>	
Druckprinzip	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Profil-Druck: Austragen der Betonschicht auf voller Wandbreite</li> </ul>
Konstruktive Rahmenbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- einfache Montage am Trägersystem, möglichst universelle Schnittstelle</li> <li>- geringes Gewicht (max. 600 kg inkl. Beton)</li> <li>- geringer Bauraum (max. 1,5x0,7x0,7 m)</li> <li>- Unempfindlichkeit gegen Staub, Strahlwasser, Erschütterung etc.</li> </ul>
Reinigung & Wartung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- einfache Montage und Demontage der Einzelkomponenten für Reinigungs- und Wartungsarbeiten</li> <li>- einfache Reinigung ermöglichen (gute Zugänglichkeit, glatte Flächen etc.)</li> </ul>
Feinpositionierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausgleich der Positioniergenauigkeit des Trägersystems</li> <li>- Auf Grundlage der Messungen am Putzmeister M38 und auf Basis der mittleren Schwingweiten laut Anlage 2.1: translatorische Ausgleichsbewegung in jede Richtung: <math>\pm 100</math> mm mittlere translatorische Beschleunigung: <math>0,16 \text{ m/s}^2</math></li> <li>- rotatorische Ausgleichsbewegung um mind. zwei Achsen bei Trägersystem Betonpumpenmast</li> </ul>
Antriebskonzept	<ul style="list-style-type: none"> <li>- elektrisch oder hydraulisch</li> </ul>

### 2.2.2.3 Hauptaufgaben und Lösungsprinzipien

#### 1) Fördern und Dosieren

Das Konzept der CONPrint3D® Technologie sieht vor, dass der Beton als fertig gemischter Frischbeton am Druckkopf bereitgestellt wird. Das kann beispielsweise über die Standard-Fördereinrichtung (Kolben- oder Rotorpumpe) der Autobetonpumpe erfolgen. Damit der Druckprozess möglichst unabhängig von der Betonbereitstellung ablaufen kann, ist vorgesehen, den eigentlichen Betonaustrag von der primären Betonförderung zu entkoppeln. Der Frischbeton wird über die Autobetonpumpe in einen Vorratsbehälter gefördert, der sich möglichst nah am Druckkopf befindet. Bei der Auslegung der primären Betonpumpe ist darauf zu achten, dass der Pumpvorgang möglichst gleichmäßig abläuft, um eine mechanische Anregung des Betonpumpenmastes zu vermeiden. Der Vorratsbehälter sollte so dimensioniert sein, dass der Druckvorgang bei mittlerer Geschwindigkeit eine ausreichende Zeitspanne weiterlaufen kann, auch wenn die primäre Betonzufuhr unterbrochen wird (z. B. beim Wechsel des Fahrmischers oder Störung). Demgegenüber steht die Obergrenze für die Zuladung am Betonpumpenmast und die zulässige Verweildauer des Betons im Behälter und den Leitungen. Aktuell wird ein Vorratsvolumen von ca. 100 Litern als angemessen erachtet. Damit kann bei Verwendung von Kolbenpumpen die Fördermenge eines Kolbenhubes aufgenommen bzw. bei Ausfall der Primärversorgung der Druckvorgang ca. 1,5 Minuten lang aufrechterhalten werden.

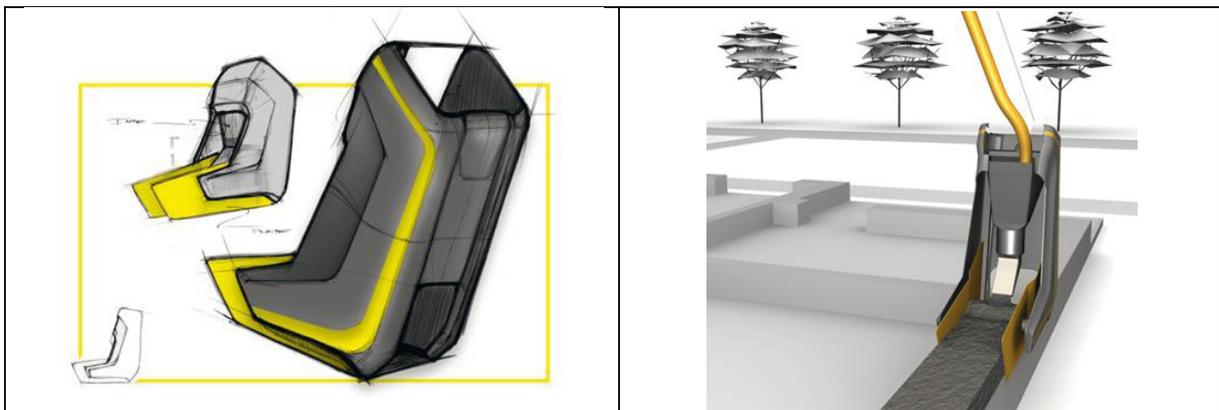


Abbildung 2.26: Designstudie des Druckkopfes [AUG16] und Prinzipdarstellung des Druckvorganges

Eine wesentliche Aufgabe des Druckkopfes ist das dosierte Austragen des Frischbetons. Die Abmessung der gedruckten Betonschicht und die Druckgeschwindigkeit bestimmen dabei die erforderliche Austragsmenge. Die Form des ausgedruckten Querschnittes wird durch die Austragsdüse eingestellt.

Für das Ausdrucken des Betons ist eine zweite Pumpe vorgesehen, die sich direkt am Druckkopf befindet und den Frischbeton aus dem Vorratsbehälter durch die Austrittsdüse befördert. Für die technische Umsetzung dieser Aufgabe kommen mehrere Pump- / Förderprinzipien in Frage, von denen einige nachfolgend kurz vorgestellt werden sollen.

Naheliegender ist, für diese Aufgabe die in der Betonfördertechnik etablierten Kolben- oder Rotorpumpen zu nutzen. Deren Funktionsweisen werden in Abschnitt 2.2.3 vorgestellt. Diese sind technisch ausgereift und speziell für das Fördern von Beton entwickelt. Große Nachteile ergeben sich jedoch vor allem bei Kolbenpumpen aus der diskontinuierlichen Arbeits-

weise, dem größeren Platzbedarf und der unzureichenden Durchmischung des Betons in der Förderstrecke.

Eine weitere Lösung wäre das Auspressen des Betons aus dem Vorratsbehälter mittels Druckluft. Dazu müsste der Behälter durch Luftzufuhr unter Druck gesetzt werden. Durch den Überdruck im Behälter wird der Beton durch die Austrittsöffnung gepresst. Vorteilhaft an diesem Prinzip ist, dass das eigentliche Förderorgan wegfällt und der Druckkopf damit leicht zu reinigen wäre. Nachteilig ist allerdings der höhere konstruktive und steuerungs-technische Aufwand.

Eine dritte Variante für den Betonaustrag am Druckkopf ist der Einsatz von Schneckenextrudern. Diese finden in den unterschiedlichsten Ausführungen hauptsächlich in der Verarbeitungstechnik Anwendung. Im Bereich des Bausektors werden mit solchen Verfahren z. B. Rohre oder Ziegel hergestellt. Charakteristisch für das Extrusionsverfahren ist das Auspressen eines fließfähigen bzw. plastifizierten Materials durch eine formgebende Düse (Matrize). Der dafür notwendige Druckaufbau wird durch die spezielle Formgebung der Extruderschnecke bzw. des umgebenden Gehäuses erreicht. Je nach Anwendungsfall kommen in der Praxis Extruder mit einer oder mehreren Schnecken zum Einsatz (Abbildung 2.27). Vor allem Einschneckenextruder zeichnen sich durch ihren einfachen Aufbau und damit verbunden durch geringe Anschaffungs- und Unterhaltskosten aus. Ein weiterer Vorteil ist, dass sich mit Schneckenextrudern eine sehr gute Mischwirkung erzielen lässt. Diese Eigenschaft kann beim Extrudieren von Beton gerade dann interessant sein, wenn in der Förderstrecke noch Zusatzmittel hinzugegeben werden soll. Nachteilig ist, dass ungünstige Materialeigenschaften oder Prozessparameter dazu führen können, dass Material an den Schneckenwindungen haften bleibt. Das kann Probleme bei der Reinigung oder den Totalausfall der Pumpe zur Folge haben. Ein weiterer Nachteil ist die prinzipbedingte hohe Verschleißanfälligkeit bei der Extrusion abrasiver Materialien. Die Nachfrage bei mehreren Herstellern von Extruderschnecken hat ergeben, dass Schnecken, wie sie für die Zwecke des 3D-Druckes benötigt würden, als Serienbauteil nicht erhältlich sind. Gerade die hohen Anforderungen bezüglich der Verschleißfestigkeit bei der Verwendung von Beton und die Größe der zu fördernden Gesteinskörnung würden einen erheblichen Entwicklungsaufwand mit sich bringen. Trotzdem ist es empfehlenswert, die Variante des Schneckenextruders für den Einsatz am Druckkopf weiterzuverfolgen und in Zukunft ggf. mit spezialisierten Unternehmen einen speziell an die Betonextrusion angepassten Schneckenextruder zu entwickeln.

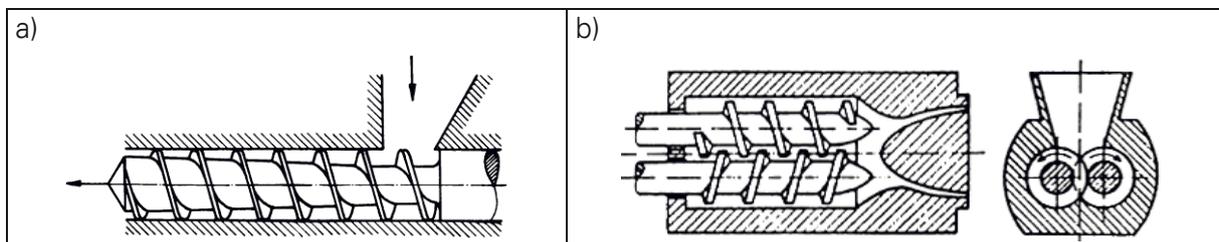


Abbildung 2.27: Prinzipdarstellung des Einschnecken- (a) und Zweisneckenextruders (b) [HAE16]

Eine dem Prinzip des Schneckenextruders ähnliche Möglichkeit zum Fördern von Beton ist die Verwendung von Exzentrerschneckenpumpen. Bei diesen Rotationsverdrängerpumpen dreht sich eine speziell geformte Spindel (Rotor) in einem Gehäuse (Stator) mit schraubenförmigem Hohlraum (Abbildung 2.28). Das Fördermedium im Hohlraum zwischen Rotor und Statorwand verschiebt sich beim Drehen des Rotors in axialer Richtung, woraus sich die Förderbewegung ergibt. Die spezielle Pumpengeometrie bedingt ein Pendeln der saug- bzw. druckseitigen Rotorenden in radialer Richtung. Deshalb werden die Rotoren meist über Ge-

lenkwellen angetrieben. Grundlegende Ansätze zur Auslegung dieser Pumpen sind in [POH84] aufgeführt. Mit Exzentrerschneckenpumpen können verschiedenste Medien eines großen Viskositätsbereiches pulsationsfrei gefördert werden. Die Fördermenge ist dabei, abgesehen von Schlupfverlusten, annähernd proportional zur Rotordrehzahl. Daraus lassen sich gute Dosiereigenschaften ableiten. Insbesondere die Tatsache, dass diese Pumpenbauart für abrasive Medien mit hohem Feststoffanteil geeignet ist, macht Exzentrerschneckenpumpen für die Anwendung im Bausektor sehr attraktiv. In Deutschland bieten z. B. die Firmen PUTZMEISTER, KNAUF PFT und eine Reihe anderer Hersteller eine Vielzahl an Maschinen zum Pumpen und Fördern von Putz, Estrich oder Feinbeton an, die auf dem Prinzip der Exzentrerschneckenpumpe beruhen. Die größtmöglich zu fördernde Korngröße richtet sich nach der Geometrie der Fördereinheit. PUTZMEISTER bietet aktuell Rotor-/ Stator-Einheiten an, mit denen Medien mit bis zu 10 mm Größtkorn gefördert werden können.

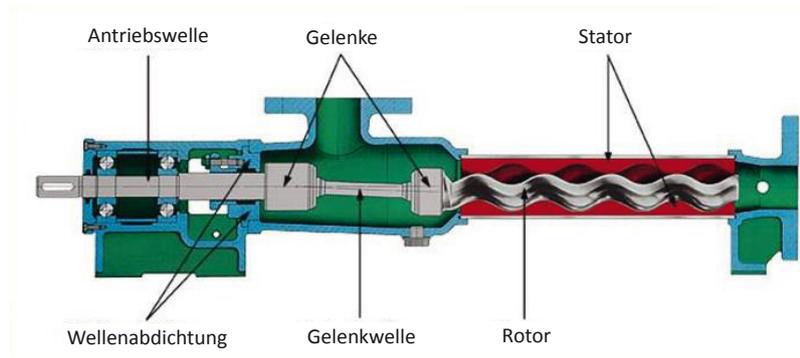


Abbildung 2.28: Exzentrerschneckenpumpe [STO16]

Aufgrund der vielen Vorteile der Exzentrerschneckenpumpe wird diese Variante auch am Druckkopf-Versuchsstand der TU Dresden eingesetzt (vgl. Abschnitt 2.1.3). Die aktuelle Planung sieht vor, in Zukunft Betone bis zu 16 mm Größtkorn zu drucken. Dafür ist voraussichtlich auch eine Sonderanfertigung bzw. Weiterentwicklung der Rotor-/ Stator-Einheiten notwendig. Diese Aufgabe muss künftig gemeinsam mit den spezialisierten Herstellern angegangen werden.

## II) Formen

Die nächste Stufe im Betondruck-Prozess ist durch die Formgebung gekennzeichnet. Im Gegensatz zum Prinzip des Contour Crafting zeichnet sich das CONPrint3D<sup>®</sup>-Verfahren dadurch aus, dass eine Betonschicht in voller Wandbreite gedruckt werden soll (Profil-Druck). Der aus der Druckseite der Exzentrerschneckenpumpe austretende Beton muss in die erforderliche Form gebracht werden. Im einfachsten Fall kann das allein durch die Geometrie der Austrittsdüse realisiert werden. Das ist dann möglich, wenn der Beton eine plastische Konsistenz und hohe Grünstandfestigkeit aufweist. Bei den am eigenen Versuchsstand durchgeführten Tests im kleinen Maßstab konnte diese einfache Art der Formgebung genutzt werden. Die Austrittsöffnung der Düse entsprach den Abmessungen der Modellwand und der Beton behielt nach dem Austritt aus der Düse diese Form (Abbildung 2.29).

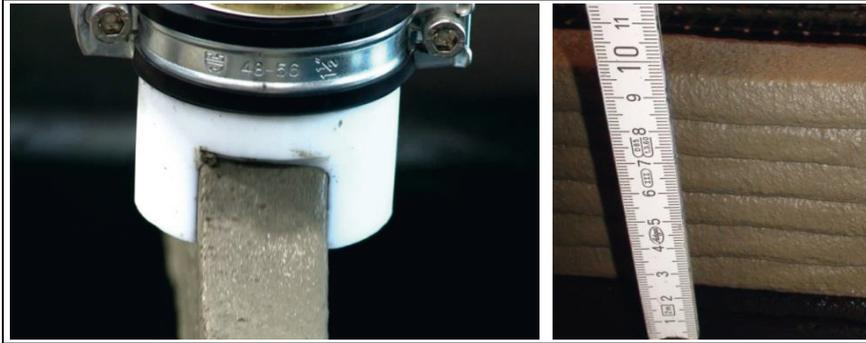


Abbildung 2.29: Drucken einer Betonschicht bei Laborversuchen

Bisher ist nicht praktisch nachgewiesen, dass die alleinige Formgebung über die Düsengeometrie auch bei größeren Wandquerschnitten und bei der Verwendung von Betonen mit größerer Gesteinskörnung gelingt. Nach dem Ausbau des bestehenden Versuchsstandes sollen zukünftige Tests Aussagen darüber zulassen (vgl. Abschnitt 4).

Eine alternative Variante der Formgebung ist angelehnt an die in Abschnitt 2.2.2.1 vorgestellten Gleitschalungsfertiger. Wie in Abbildung 2.26 schematisch dargestellt, tritt der Beton relativ frei aus der Austrittsdüse aus und verteilt sich auf der darunter liegenden Wand-schicht. Zwei speziell geformte Bleche werden beidseitig hinter der Düse nachgeführt und dienen als Gleitschalung. Die Bleche sind so gestaltet, dass der Beton beim „Durchziehen“ der Bleche in die gewünschte Form gezwungen wird (Abbildung 2.30). Wenn nötig, können am Schalblech angebrachte Vibratoren diesen Vorgang vereinfachen. Über einen quer angebrachten Abstreifer kann bei Bedarf die Oberseite der Betonschicht abgezogen oder mit einer speziellen Struktur versehen werden.

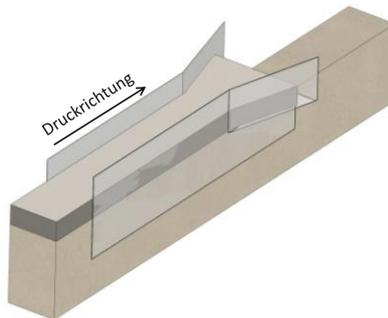


Abbildung 2.30: Prinzipskizze: Formung des Frischbetons durch mitgeführte Gleitschalungsbleche

Die Verwendung solch starrer Gleitschalungsbleche stößt allerdings an ihre Grenzen, wenn man die in Tabelle 2.4 genannten bauwerksseitigen Anforderungen beachtet. Mit starren Blechen lassen sich nur gerade Wände formen. Ecken oder Wandverbindungen sind damit nicht möglich. Sind die Schalbleche jedoch beweglich angeordnet, können auch diese Kriterien erfüllt werden. Nachfolgend sollen zwei der entwickelten Lösungskonzepte vorgestellt werden.

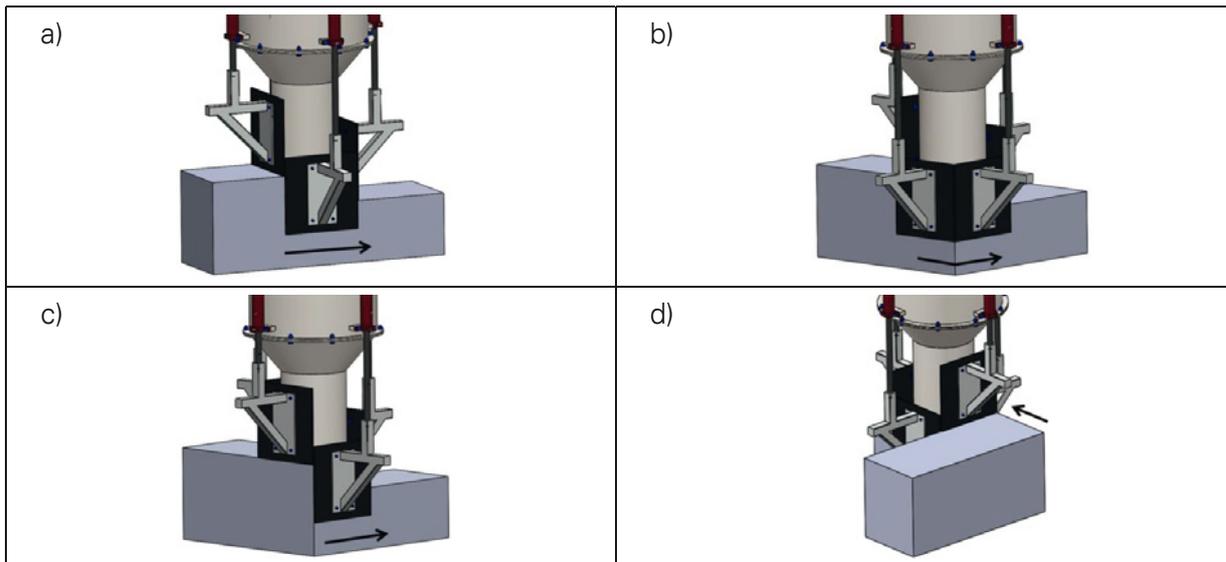


Abbildung 2.31: Konzept 1 zum Drucken von Ecken unter Verwendung verschiebbarer Schablenbleche

Bei Konzept 1 ist vorgesehen, mit vertikal verschiebbaren Blechen eine Art „gleitende Einhausung“ um die frisch gedruckte Betonschicht zu bilden. In Abbildung 2.31 ist dieses Konzept in verschiedenen Bewegungsphasen schematisch dargestellt. Abbildung a) zeigt die Stellung der Schieber bei Druck eines geraden Wandabschnittes. Die zur Wand seitlich angeordneten Bleche halten den ausgedruckten Beton in der geforderten Wandbreite. Der in Bewegungsrichtung gesehen hintere Schieber ist hochgefahren und bildet die Öffnung für die gedruckte Betonschicht. In den Abbildungen b) bis d) ist die Bewegungsabfolge dargestellt. Auf ähnliche Weise lassen sich mit diesem Konzept auch Wandverbindungen herstellen.

Ein weiteres Konzept zur Formung von Ecken und Wandverbindungen sieht vor, dass zwei Vierkantprofile horizontal beweglich am Druckkopffahmen angebracht sind. Die Größen von Rahmen und Vierkantprofilen sind auf die erforderliche Wandbreite abgestimmt. Der Beton wird im Zentrum des Rahmens aus einer Düse ausgebracht (Abbildung 2.32).

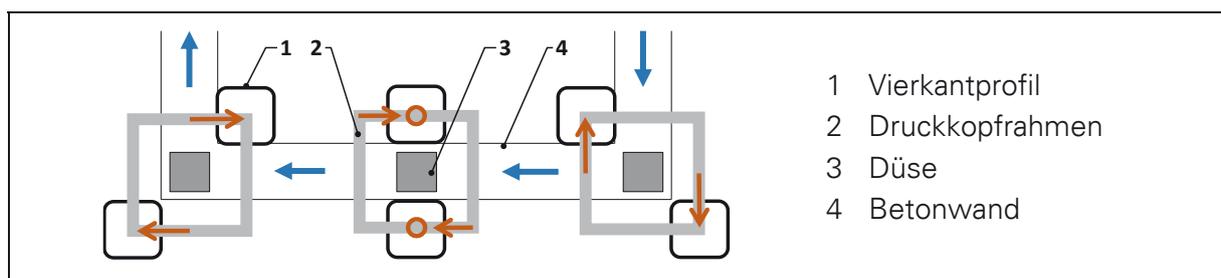


Abbildung 2.32: Konzept 2 zum Drucken von Ecken unter Verwendung von Vierkant-Formungselementen

### III) Positionieren

Die kinematischen Gegebenheiten am Trägersystem „Autobetonpumpenmast“ und die in den Versuchen festgestellten Positioniergenauigkeiten machen ein zusätzliches Bewegungssystem am Druckkopf erforderlich (Feinpositioniersystem). Wie in Tabelle 2.4 erwähnt, müssen am Druckkopf sowohl translatorische als auch rotatorische Ausgleichsbewegungen ausgeführt werden. Die maßgebliche Drehbewegung des Druckkopfes muss um die Druckkopf-Hochachse  $w$  erfolgen (vgl. Abbildung 2.33 a). Vor allem dann, wenn die Hauptbewegung des Gesamtsystems durch die Drehwerksbewegung der ABP dominiert ist, muss der

Druckkopf permanent nachgeführt werden, um ihn parallel zur Druckbahn auszurichten. Je nach Anordnung des Drehgelenkes am Druckkopf ist es ggf. notwendig, eine Drehdurchführung oder ausreichend Bewegungsspielraum für Leitungen etc. vorzusehen.

Translatorische Ausgleichsbewegungen sind am Druckkopf vor allem notwendig, um die Positioniergenauigkeiten des Trägersystems auszugleichen. Aufgrund der in Abschnitt 2.2.1.3 beschriebenen Effekte treten diese Positionsabweichungen in allen Hauptbewegungsrichtungen auf. Bei der Dimensionierung der Antriebe ist darauf zu achten, dass die für das Trägersystem typischen Anforderungen bzgl. Verfahrensweg und Dynamik eingehalten werden können (vgl. Tabelle 2.4).

Für die technische Realisierung der Ausgleichbewegungen kann auf unterschiedliche Konzepte aus der Robotik bzw. Automatisierungstechnik zurückgegriffen werden. Das Gesamtkonzept der CONPrint3D®-Technologie sieht vor, den Bewegungsausgleich über aktive Antriebe auszuführen. Dies kann durch serielle oder parallelkinematische Bewegungssysteme umgesetzt werden.

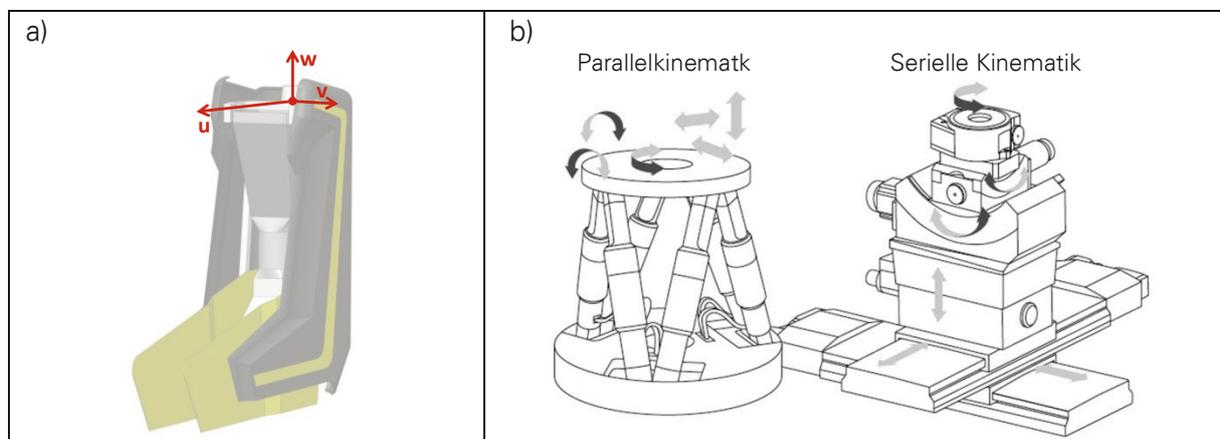


Abbildung 2.33: a) Bewegungssachsen am Druckkopf; b) Prinzipdarstellung Parallel- und serielle Kinematik [RE16]

Die Vorteile parallelkinematischer Systeme liegen in der kompakten Bauweise, der guten dynamischen Eigenschaften und der präzisen Bewegung aller sechs Achsen. Zur Realisierung des Feinpositioniersystems könnte die Formungseinheit des Druckkopfes am Endeffektor eines Hexapoden montiert werden. Damit ließen sich alle notwendigen Ausgleichsbewegungen durch ein kompaktes System realisieren. Die serielle Ausführung oder Mischformen sind ebenfalls möglich. Bei dieser Variante sind die einzelnen Gelenke und Antriebe sinnvoll zu positionieren. Vor allem ist bei der konstruktiven Gestaltung darauf zu achten, die bewegte Masse pro Achse möglichst gering zu halten. In diesem Zusammenhang ist es ratsam, die Betonbevorratung vom Feinpositioniersystem zu entkoppeln. So können die Einzelantriebe kleiner dimensioniert und Gewicht gespart werden.

Eine wichtige Aufgabe bei der Realisierung des Feinpositioniersystems ist die steuerungs- bzw. regelungstechnische Umsetzung des Bewegungsausgleiches. Dazu ist es erforderlich mit möglichst hoher Genauigkeit die Absolutposition des Druckkopfes zu bestimmen. Optische Messsysteme wie z. B. das in den Testreihen genutzte zielverfolgende Tachymeter (vgl. Abschnitt 2.2.1.3), 3D-Kameras oder Laserscanner, aber auch satellitengestützte Navigationstechnik wie z. B. DGPS-Empfänger erreichen bei entsprechender Konfiguration Messgenauigkeiten im unteren Millimeterbereich und sind für diese Aufgabe gut geeignet. Weiterhin muss die relative Lage der Druckkopf-Komponenten zueinander erfasst werden, um entsprechend der aktuellen Orientierung des Druckkopfes die Transformation der Be-

wegungskoordinaten der einzelnen Ausgleichsantriebe korrekt durchführen zu können. Dies kann durch die Bestimmung der Absolutposition zuvor definierter Fixpunkte am Druckkopf oder den Einsatz von Inkremental- bzw. Absolutwertgebern an den Einzelkomponenten geschehen. Durch den Abgleich der so gewonnenen Lageinformationen mit den Soll-Koordinaten der zu druckenden Betonschicht kann ein komplexes Regelungssystem die Korrektur der Bewegungsbahn vornehmen und den Druckkopf exakt positionieren.

### 2.2.3 Untersuchungen zur Bestimmung geeigneter Pumptechnik

Die Verwendung von stationären oder fahrbaren Betonpumpen zum Fördern von Beton hat sich heutzutage in vielen Bereichen des Hoch- Tief- und Ingenieurbau bewährt. Das Pumpen von Beton ist jedoch immer wieder eine Herausforderung, da sich die Eigenschaften der Betone je nach Anwendungsfall und Einsatzort teilweise gravierend unterscheiden. Deshalb ist bei der Wahl der Betonrezeptur von Fall zu Fall die Eignung für die jeweilige Pumptechnik zu überprüfen. Bei der Entwicklung der Betonrezeptur für die CONPrint3D®-Technologie ist die gute Pumpfähigkeit eine zentrale Eigenschaft. Trotzdem sind die Parameter der zur primären Förderung genutzten Betonpumpe auf die Eigenschaften des Frischbetons abzustimmen.

Hinsichtlich der benötigten Fördermenge (max. 24 m<sup>3</sup>/h) liegen die Anforderungen beim Beton-3D-Druck weit unter den technischen Möglichkeiten konventioneller Betonpumpen (bis zu 200 m<sup>3</sup>/h). Auch die aktuell angestrebte Gesteinskörnung von 16 mm Größtkorn lässt sich mit herkömmlichen Betonpumpen problemlos fördern. Im Vergleich zu konventionellen Betonen weist der druckbare Beton ggf. eine höhere Viskosität auf, weshalb sich gegenüber konventionellem Beton eventuell ein höherer Förderdruck ergibt. Mit maximal möglichen Förderdrücken von durchschnittlich 85 bar (und höher) können herkömmliche Pumpen aber auch diese Anforderung erfüllen [PMC16].

Zum Pumpen von Beton haben sich zwei Funktionsprinzipien durchgesetzt: die Kolbenpumpen und die Rotorpumpen. Kolbenpumpen sind in der Praxis in weitaus größerer Anzahl zu finden. Sie können als fahrbare Pumpen direkt am Rahmen eines LKW montiert sein oder als Stationärpumpen separat aufgestellt werden. Je nach Ausführung zeichnen sich Kolbenpumpen durch hohe erreichbare Förderdrücke (bis zu 400 bar möglich) und hohe Fördermengen (bis zu 200 m<sup>3</sup>) aus [PMA07] [PMC16]. Aktuelle Kolbenpumpen funktionieren nach dem Doppelkolbenprinzip. Dabei drücken zwei hydraulisch angetriebene und gegenläufig arbeitende Förderkolben jeweils abwechselnd den zuvor angesaugten Frischbeton aus dem Förderzylinder in die Förderleitung. Das Umschalten zwischen den Zylindern und der Druck- bzw. Saugseite wird über eine Rohrweiche realisiert (Abbildung 2.34). Durch Optimierung der Ansteuerung und konstruktiven Ausführung der Rohrweichen kann bei modernen Maschinen ein nahezu kontinuierlicher Betonfluss erreicht werden. Trotzdem kann es, vor allem bei hoher Förderleistung, beim Umschaltvorgang zur Anregung kommen, die zu Schwingungen am Verteilermast der Autobetonpumpe führen. Zur Anwendung beim Beton-3D-Druck ist die Größe der Kolbenpumpe deshalb so abzustimmen, dass Schwingungsanregungen beim Pumpen vermieden werden. Dies kann z. B. durch die Verwendung großer Zylinderdurchmesser bei geringen Pumpgeschwindigkeiten geschehen. Über den hydraulischen Pumpenantrieb lässt sich die Kolbengeschwindigkeit nahezu stufenlos einstellen.

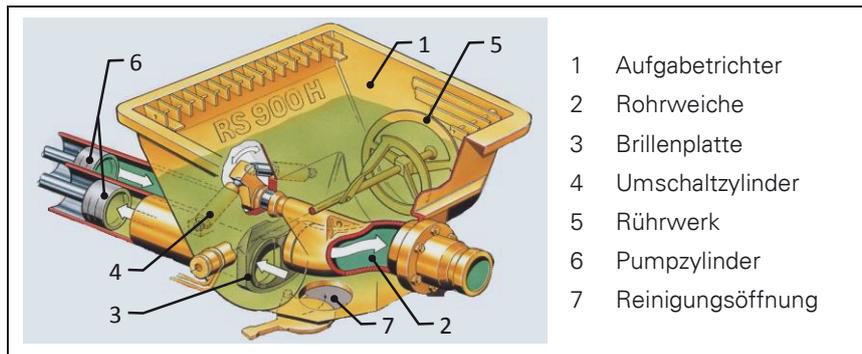


Abbildung 2.34: Grundlegender Aufbau einer Doppelkolbenpumpe [PMW08]

Die Verwendung von Rotorpumpen kommt für den Einsatz beim 3D-Druck mit Beton ebenfalls in Frage. Diese Art der Betonpumpen besteht durch einen einfachen und kompakten Aufbau: zwei im Pumpengehäuse rotierende Druckrollen quetschen den Rotorschlauch, in dem durch diese Rollbewegung der Beton von der Saugseite zur Druckseite befördert wird (Abbildung 2.35). Mit Rotorpumpen können zwar im Vergleich zu Kolbenpumpen nur geringere Drücke (bis 25 bar) und Fördermengen (bis 58 m<sup>3</sup>/h erzielt werden), aber diese Förderleistung reicht aus um den Anforderungen des Beton-3D-Drucks zu genügen. Auch die positiven Fördereigenschaften kommen den Anforderungen beim Betondrucken entgegen. Rotorpumpen zeichnen sich durch einen ruhigen Lauf und pulsationsarme Betonförderung aus. Weiterhin kann über die stufenlose Einstellung der Rotordrehzahl der Betonfluss sehr einfach dosiert werden. Auch bezüglich des Fördermediums sind Rotorpumpen sehr vielseitig: selbst schwer pumpbare Betone wie Faserbetone oder Medien mit einem hohen Feststoffanteil lassen sich mit ihnen Fördern [PMC09].

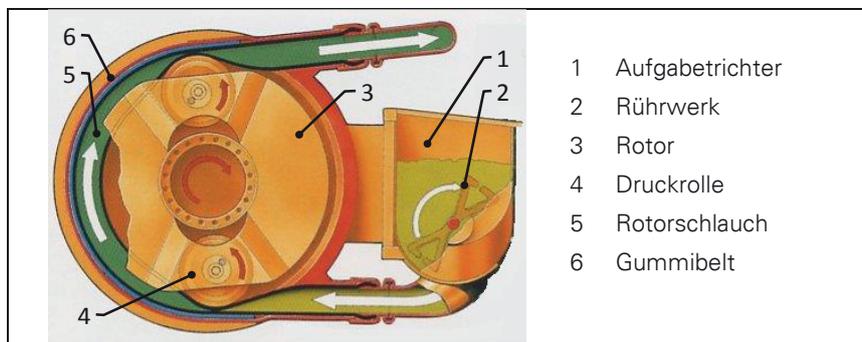


Abbildung 2.35: Grundlegender Aufbau einer Rotorpumpe [PMW08]

Abschließend lässt sich feststellen, dass für die primäre Betonförderung beim Beton-3D-Druck sowohl die Kolben- als auch die Rotorpumpen geeignet wären. Beide Varianten erfüllen die technischen Voraussetzungen und könnten in der serienmäßigen Ausführung genutzt werden. An den Maschinen müssten lediglich geringfügige steuerungstechnische Anpassungen vorgenommen werden, um die Fördermenge entsprechend der aktuellen Druckgeschwindigkeit zu regulieren. Dies lässt sich an modernen Maschinen ohne Weiteres umsetzen.

## 2.3 Ergebnisse Institut für Baustoffe

Zu Beginn des Projektes, innerhalb des Arbeitspaketes 1 und 2, wurden umfangreiche Literaturrecherchen und Patentstudien zum Stand der Wissenschaft und Technik in der additiven Fertigung im Bauwesen (in diesem Bericht als Beton-3D-Druck bezeichnet) durchgeführt. Die Ergebnisse dazu sind in den Abschnitten 2.1.1 und 2.1.2 zusammengefasst. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse und bestehender Erfahrungen zu den Themen Rheologie und Pumpbarkeit [MEC14, SEC14, NER15, NER15A], wurde im Rahmen des Arbeitspaketes 3.1 ein Bericht für die Auswahl der Ausgangsstoffe des Projektes erstellt. Desweiteren wurde in Kooperation mit den Projektpartnern FE3 und FE1 ein Katalog mit verschiedenen Szenarien für die additive Fertigung erarbeitet; siehe dazu Abschnitt 2.3.1. Nach Absprache mit dem Projektpartner wurde ein Vorzugsszenario gewählt und konkrete Zielvorgaben abgesteckt. Das Hauptarbeitspaket 3 wurde in mehreren Schritten ausgeführt. Als erstes wurden Mischungen für ausgewählte Materialien konzipiert. Dazu gehörten Untersuchungen zu den Prinzipien einer schnellen Betonerhärtung. Zwei verschiedene Beschleuniger wurden untersucht und der geeignetere Beschleuniger in seiner optimalen Dosis bestimmt. Details dazu in Abschnitt 2.3.2. Nach der Materialwahl wurden weitere Vorgehensweisen zur experimentellen Materialprüfung entwickelt. Dazu gehören die Extrudierbarkeitsprüfung, Abschnitt 2.3.3, und die Druck- und Biegezugfestigkeitsprüfung, Abschnitt 2.3.4. Die entwickelte ganzheitliche Vorgehensweise zur experimentellen Untersuchung, wurde validiert durch das Testen von Frisch- und Festbetoneigenschaften von druckbaren Feinbetonen (Grundmischung). Die Ergebnisse sind in Abschnitt 2.3.4 ausführlich dargestellt. In der finalen Phase wurden weitere Druckbetone mit verschiedenen Ausgangsstoffen entworfen und für verschiedene Anwendungsfälle charakterisiert, Abschnitt 2.3.5. Basierend auf den experimentellen Ergebnissen wurde ein Beton mit max. Korngröße 8 mm und ein faserverstärkter Feinbeton entworfen und in Abschnitt 4.1 vorgestellt. Diese Betone können nicht direkt auf Druckbarkeit und Extrudierbarkeit getestet werden, da der momentane Laborversuchsstand nicht auf faserverstärkte Betone und Korngrößendurchmesser größer als 2 mm ausgelegt ist. Trotzdem zeigen die bisher genannten Ergebnisse sehr deutlich, dass kontinuierliche, schalungsfreie Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton in Zukunft eine Möglichkeit sein könnten.

### 2.3.1 Materialwahlmöglichkeiten für 3D-druckbare Betone

Ziel: Entwicklung von Baustoffen, welche die gewünschten rheologischen Eigenschaften, Festigkeit und Dauerhaftigkeit für 3D-Druckanwendung besitzen.

Die Ausgangsmaterialien sollten so gewählt werden, dass der Beton im frühen Alter eine hohe Grünstandfestigkeit und eine schnelle Erhärtung aufzeigt, ohne dabei an Verarbeitbarkeit und Pumpbarkeit im frischen Zustand einzubüßen. Darüber hinaus sollten sie Anforderungen an die Beton-zusammensetzung sowie die Misch- und Drucktechnik erfüllen.

Das oben genannte Ziel verfolgend, wurden die Ausgangsmaterialien nach ihrem Einfluss auf die Verarbeitbarkeit, Pumpbarkeit, Grünstandfestigkeit etc. klassifiziert (+ für positiv, - für negativ und / für neutral bzw. k. A.) und in Tabelle 2.5 aufgelistet. Die Entscheidung über die Verwendung in den Versuchen ist farblich dargestellt. Die detaillierte Begründung der Wahl der Ausgangsstoffe ist in Anlage 3 dargestellt.

Tabelle 2.5: Wahl der Materialien und ihr Einfluss auf verschiedene Aspekte der Betontechnologie

Zement	Legende: '+' = positiv, '++' = sehr positiv, '-' = negativ, '--' = sehr negativ, '/' = neutral o. k. A.						Entscheidung
	Schnellbindend	Kompatibilität	Grünstandfestigkeit (<3h)	Festigkeit	Verfügbarkeit	Verfügbarkeit	
<b>CEM I 52,5 R (ft)</b>	+++	++	++	/	+	+	Ja
<b>CEM II/A-M (S-LL) 52,5 R</b>	++	+	+	/	/	/	Nein
<b>Zusatzstoffe</b>	Verarbeitbarkeit	Pumpbarkeit	Frühe Festigkeit (12 h)	Festigkeit	Verfügbarkeit	Verfügbarkeit	Entscheidung
<b>Ohne</b>							
<b>Flugasche</b>	+	+/-	/	+	Ok*	Ok*	
<b>Microsilika</b>	+	+	/	++	+	+	
<b>Gesteinsmehl</b>	+	/	/	/	/	/	Nein
<b>Schlacke</b>	+	/	/	+	/	/	Nein
<b>Gesteinskörnung</b>							
<b>Rundes Korn</b>	+	+	-	-	+	+	Ja
<b>Gebrochenes Korn</b>	-	-	+	+	+	+	Ein Parameter
<b>Zusatzmittel</b>							
<b>Fließmittel PCE</b>	++	++	--	+	+	+	Ja
<b>Fließmittel (traditionell)</b>	+	+	-	+	+	+	Nein
<b>Beschleuniger</b>	--	--	++	-	+	+	Ja
<b>Stabilisator</b>	-	/	+	/	+	+	Nein
<b>Bewehrung</b>							
<b>Polymerfasern</b>	-	-	++	+	+	+	Pilot-Tests
<b>Stahlfasern</b>	--	--	++	+	+	+	Nein

\* zurzeit verfügbar, zukünftige Verfügbarkeit nicht sichergestellt

Zusätzlich zu den Szenarien in Anlage 3 wurden weitere wichtige Aspekte untersucht, wie zum Beispiel die Zugabe von Beschleuniger an der Düse oder im Mischer oder dem Verhältnis von Wasser und Bindmittel (w/b-Wert) in der Mischung. In der Praxis variiert die Zeit zwischen der Wasserzugabe zur Betonmischung und dem Pumpvorgang zwischen 20 und 90 min. Die rheologischen Eigenschaften von Beton ändern sich in dieser Zeit (Schergrenze ( $\tau_0$ ) und plastische Viskosität ( $\mu$ ) steigen), daher ist eine zeitabhängige Untersuchung sehr wichtig. Wenn Beschleuniger der Mischung zugegeben wird, führt dies zu sehr schnellem Erstarren des Betons, wodurch die Gefahr von Blockaden im Pumpkreislauf steigt. Es wurde ein Beton entwickelt, der die für die Pumpbarkeit benötigten Verarbeitungseigenschaften bis zu einem Alter von 90 min beibehält. Beschleuniger wurde der Mischung erst an der Düse/ dem Druckkopf zugegeben.

Der w/b-Wert von Beton bestimmt wesentlich die Festigkeit und Verarbeitbarkeit sowie sonstige wichtige Betoneigenschaften. Ein niedriger w/b-Wert führt im Allgemeinen zu hohen Festigkeiten und einer besseren Steuerung der Erstarrungszeiten (mittels Beschleuniger und Fließmittel). Allerdings führt ein niedriger w/b-Wert zu einer schlechteren Pumpbarkeit und starkem innerer Austrocknung des Betons. Eine Mischung mit hohem w/b-Wert hat dagegen eine bessere Verarbeitbarkeit, niedrigere (Grünstand-)Festigkeit und niedrigerem autogenen Schwinden. Nachdem alle Vor- und Nachteile abgewogen wurden, soll im Projektraum der w/b-Wert der Betonmischungen zwischen 0,40 und 0,50 liegen.

Nach kritischer Auseinandersetzung mit den möglichen Variationen der Parameter und intensivem Austausch mit den Projektpartnern FE3 und FE1 wurden folgende Spezifikationen für die Entwicklung der Betonzusammensetzung festgelegt:

- gute Pumpbarkeit bis 90 Minuten nach Wasserzugabe
- Normalbeton, Normalmörtel
- Korngröße bis 16 mm
- unbewehrt
- schnelle Erstarrung durch Zugabe von Beschleuniger
- Expositionsklasse XC4, XF1

### 2.3.2 Vorversuche mit einer geeigneten Mörtelrezeptur für die Materialauswahl

Um geeignete Ausgangsstoffe für die Betonrezepturen auswählen zu können wurden Vorversuche durchgeführt. Die Erfüllung aller Anforderungen an 3D-druckbaren Mörtel (gute Pumpbarkeit, gute Verarbeitbarkeit, hohe Formbarkeit und schnelle Erstarrung) ist äußerst anspruchsvoll. Bestehende experimentelle Methoden wurden hierfür adaptiert und neue Methoden entwickelt.

Mittels Hägermann-Ausbreitmaß-Tests (HT) [DIN EN 1015-3] wurde die Konsistenz und Verarbeitbarkeit des Betons untersucht. Die Vicat-Tests (VT) [DIN EN 196-3] wurden zur Ermittlung der Erstarrungszeiten (Erstarrungsbeginn und Erstarrungsende) eingesetzt. Im ersten Schritt wurde eine vorläufige, einfache Mörtelkomposition ohne Zusätze wie Flugasche und Mikrosilika entwickelt, die damit für verschiedenste industrielle Anwendungen geeignet ist. Für die Entwicklung dieser Rezeptur wurden die im Labor verfügbaren Portlandzemente und ein PCE-Fließmittel verwendet. Im zweiten Schritt wurden diese Ausgangsstoffe mit den

neuen Schnellzementen von OPTERRA Zement GmbH, Werk Karsdorf und den kompatiblen Zusatzmitteln (Beschleuniger und Fließmittel) von MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG ersetzt und die Mischungs zusammensetzung angepasst.

Durch die Variation des Fließmittelgehaltes der Mischung wurde die Verarbeitbarkeit eingestellt. Aus 14 verschiedenen Rezepturen wurde mittels des Hägermann-Ausbreittisch die gewünschte Konsistenz bestimmt. Die Zielmaße wurden mit 12 cm Durchmesser im Hägermann-Ausbreit-Versuch (HT) ohne Stöße und 18 cm im HT mit 15 Stößen festgelegt. Die Einhaltung dieser Kennwerte liefert eine gute Eigenstabilität der Mischung in Ruhelage und gute Fließigenschaften unter Krafteinwirkung.

Tabelle 2.6: Grundrezeptur für druckbaren Mörtel 1

Ausgangsstoffe	Hersteller	kg/dm <sup>3*</sup>
CEM I/II**	OPTERRA Zement GmbH, Werk Karsdorf	0,6890
Sand 0/2 (Gesiebt)	Ottendorf	1,2310
Wasser		0,2900
FM (MCPF- 5100/5104)	MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG	0,0098
BE (CR- 650/640)	MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG	0,0000

\* unter der Annahme, dass keine Luftporen vorhanden sind

\*\* vollständige Bezeichnung, siehe Tabelle 2.7.

Nachdem die gewünschte Menge an Fließmittel für die Referenzkomposition bestimmt wurde, wurden HT und VT mit den nachfolgenden Parametern durchgeführt: Es wurden 1,4 % bzgl. Masse Zement (% v.Z.), was 9,75 g entspricht, Fließmittel MC Powerflow 5100 pro Liter verwendet.

Tabelle 2.7: Zemente und Beschleunigervarianten

Zement	Abkürzung
CEM I 52,5 R(ft)	I
CEM II/ A-M (S-LL) 52,5 R	II
<b>Beschleuniger</b>	
Centrament Rapid 650	650
Centrament Rapid 640	640

Insgesamt sind aus den in der Tabelle 2.7 genannten Parametern sechs verschiedene Mörtelrezepturen entstanden, wobei zwei Rezepturen keinen Beschleuniger enthalten um die Mörtelkonsistenz mittels HT zu überprüfen. Die HT wurden zu vier verschiedenen Zeitpunkten nach der Wasserzugabe, nach 15, 30, 60 und 90 min, an den Mörteln ohne Beschleuniger durchgeführt. Die VT wiederum wurden nach 15 und 30 min durchgeführt. Für den VT nach 15 min wurde der Mörtel nach Standardprogramm (bei allen Experimenten gleich) gemischt bis Minute 14. Zu diesem Zeitpunkt wird der Beschleuniger zugegeben und noch einmal für eine Minute gemischt, danach wurde der VT durchgeführt. Für den VT zum Zeitpunkt 30 min wurde der Mörtel wieder nach dem Standardprogramm bis Minute 14 gemischt. Danach wurde er bei geringer Geschwindigkeit weiter gemischt, bis bei Minute 29 der Beschleuniger hinzugegeben wurde. Danach wurde wiederum eine Minute gemischt und bei Minute 30 der VT durchgeführt. Die dabei ermittelten Ergebnisse sind in Tabelle 2.8 dargestellt.

Tabelle 2.8: Experimentelle Ergebnisse

Zement	Beschleuniger		Vicat Erstarrungszeit 15 min		Vicat Erstarrungszeit 30 min		Hägermann-Ausbreitmaß ohne Stöße (nach 15 Stößen)			
	Keiner	650 640 % v.Z.	Beginn	Ende	Beginn	Ende	15 min	30 min	60 min	90 min
I	-	-	-	-	-	-	12,95 (18,00)	13,45 (18,70)	14,10 (18,15)	14,10 (17,95)
I	8	8	2,5	6						
I	8	8			3,5	8				
I		8	12	29						
I		8			11,5	28				
II	-	-	-	-	-	-	10,95 (16,30)	11,65 (17,20)	12,95 (17,15)	13,10 (17,55)
II	8	8	3	19						
II	8	8			5	11				
II		8	15	31						
II		8			13	25				

**Beobachtungen:**

- 1) Beim Vergleich der Konsistenz fällt auf, dass CEM I fließfähiger ist als CEM II (größeres HT-Ausbreitmaß).
- 2) Beide Zemente zeigen durchgehend gute Verarbeitbarkeit.
- 3) Das HT-Ausbreitmaß steigt mit der Zeit. Diese Beobachtung gilt für beide Zemente und alle getesteten Zeitpunkte. Dies weist auf eine verzögerte Aktivierung des Fließmittels hin.
- 4) Der VT wurde zweimal an jedem Zement durchgeführt; einmal nach 15 min (AC-Zugabe nach 14 min) und einmal nach 30 min (AC-Zugabe nach 29 min). Dieses Vorgehen ist im Einklang mit realen Szenarien und der Entscheidung den Beschleuniger erst am Druckkopf zuzugeben.
- 5) Der Spritzbetonbeschleuniger CR 650 zeigt bessere Ergebnisse bei der Erhärtungsbeschleunigung gegenüber dem CR 640 bei beiden Zementen. Der CR 650 ist damit die präferierte Wahl.  
Für Mörtel mit CEM I bei Beschleunigerzugabe nach 15 Minuten liegt der Erstarrungsbeginn jeweils bei 2:30 Minuten für CR 650 und 12:00 Minuten für CR 640. Bei Mörteln mit CEM II liegt er jeweils bei 3:00 Minuten und 15:00 Minuten.

- 6) Bei Beschleunigerzugabe nach 30 Minuten liegt der Erstarrungsbeginn für CEM I-Mörtel bei 3:30 Minuten für CR 650. Für CEM II-Mörtel liegt er bei 5:00 Minuten. Dies zeigt, dass mit zunehmendem Zeitverlauf die Menge an Beschleuniger erhöht werden muss (in dieser speziellen Kombination), falls konstante Erhärtungszeiten gewünscht sind. Dieser Effekt entsteht durch die Zunahme des HT-Ausbreitmaßes mit der Zeit (Punkt 4)  
 Im Kontrast dazu verkleinert sich der Zeitraum bis zum Erstarrungsende größtenteils, wenn der Beschleuniger erst ab 30 Minuten zugegeben wird (Tabelle 2.8).
- 7) CEM I erreicht generell schneller den Erstarrungsbeginn und das Erstarrungsende als CEM II. Außerdem hat CEM I 52,5 R (ft) 95-100 % Klinkeranteil, während CEM II/ A-M (S-LL) 52,5 R zwischen 80 und 94 % Klinker enthält (nach EN 197-1). CEM I wird eine höhere Frühfestigkeit ausbilden.

Auf der Basis dieser Experimente und ihrer Ergebnisse wurde die Materialwahl abgeschlossen. Die gewählten Materialien sind in Tabelle 2.9 dargestellt.

Tabelle 2.9: Auswahl Zement und Zusatzmittel

Komponente	Material	Hersteller
<b>Zement</b>	CEM I 52,5 R (ft)	OPTERRA Zement GmbH, Werk Karsdorf
<b>Fließmittel</b>	MC Powerflow 5100	MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG
<b>Beschleuniger</b>	Centrament Rapid 650	MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG

### 2.3.3 Experimentelle Untersuchungen beim Extrudieren mit der Mörtelpumpe

Wie bereits in den vorangegangenen Abschnitten erwähnt gibt es keine Methode, mit der Extrudierbarkeit, Grünstandfestigkeit und 3D-Druckbarkeit von Beton geprüft werden kann. Es wurden eine neue Methode und Technik für diesen Test erarbeitet. Um das Material an den spezifischen Koordinaten zu extrudieren verfügt der Druckkopf über eine Förderschnecke und einen Materialcontainer. Der Druckkopf hat zwei Schlüsselaufgaben. Erstens extrudiert er den Mörtel mit spezifischen Durchflussgeschwindigkeiten an die gewünschten Koordinaten, zweitens gibt er den Beschleuniger gleichmäßig direkt an der Düse, kurz vor der Extrusion der Mischung zu. Eine Labor-Mörtelpumpe des Projektpartners FE2 wurde als geeigneter Druckkopf gewählt und wurde entsprechend modifiziert, um alle Anforderungen zu erfüllen. Für die Entwicklung der Zugabe des Beschleunigers wurden einige Vorversuche mit der Labormörtelpumpe durchgeführt. In diese experimentellen Phase wurden zwei verschiedene Aspekte untersucht: die Extrudierbarkeit der entwickelten Mörtel sowie verschiedene Versuchsaufbauten um die Dosierung sowie die Frischbetonfördergeschwindigkeit kurz vor der Extrusion zu prüfen. Dafür wurden jeweils 20 Liter des entsprechenden Mörtel in einem ELBA-Mischer hergestellt. HT und Extrudiertests mit der Mörtelpumpe bei fünf verschiedenen Fördermengen (Schneckendreh-Stufe) wurden durchgeführt. Drei Rezepturen mit variierendem Fließmittelgehalt (1,4 M% bzgl. Zement, 1,06 M% bzgl. Zement und 0,7 M% bzgl. Zement) wurden getestet. Die Ergebnisse zeigen, dass alle drei Mischungen extrudiert werden konnten, ohne dass das Material segregierte, blutete oder Blockaden entstanden. Das erste Ziel des Tests wurde damit erreicht.

Der zweite und bedeutendere Aspekt dieser Untersuchungen war der Versuchsaufbau für die Dosierung und die Zugabe des Beschleunigers. Im ersten sehr simpel angelegten Versuch wurde ein Stahlrohr senkrecht in den Mörteltrichter, kurz vor der Öffnung der Förderschnecke getaucht. Der Beschleuniger wurde manuell über das Stahlrohr zugegeben. Diese

manuelle Methode ist aber wie erwartet nicht ausreichend erfolgreich und reproduzierbar. Durch den hohen Druck im Mörtel, dringt diese am unteren Ende in das Stahlrohr ein und reagiert dort mit dem Beschleuniger. Im erhärtenden Zustand blockiert der Mörtel das Stahlrohr. Aus diesem Ergebnis schlussfolgernd muss der Beschleuniger mit hohem Druck in den Mörtel gepumpt werden, um Blockaden zu vermeiden und eine kontinuierliche Zugabe zu sichern.

Im nächsten Schritt wurde ein spezieller Adapter für die Beschleunigerzugabe gefertigt (Abbildung 2.36c), ein transparenter Schlauch mit einer aufgesetzten Spritze. Um nachzuweisen, dass das dosierte Fluid homogen im Mörtel verteilt wird, wurden verschiedene Farbkonzentrate verwendet und in den Mörtel gepumpt.



a) An die Mörtelpumpe angeschlossener Adapter



b) Spritze mit manueller Kontrolle der Einleitungsgeschwindigkeit



c) Adapter

Abbildung 2.36: Adapteraufbau zur Dosierung des Beschleunigers

Mit Hilfe des Adapter (Abbildung 2.36) konnte der Beschleuniger erfolgreich in den Mörtel eingebracht werden. Mit der Spritze kann ein Druck von bis zu 4 bar erreicht werden. Durch die Farbzugabe konnte nachgewiesen werden, dass die Verteilung in den extrudierten Mörtelschichten gleichmäßig und homogen ist (Abbildung 2.37a). Nach den Farbtests wurde Beschleuniger über die Spritze dosiert und der Einfluss auf die Erstarrung des Mörtels untersucht. Wie erwartet ist der Effekt sehr ausgeprägt. Der extrudierte Mörtel mit Beschleunigerzugabe ist sehr steif und hat eine hohe Grünstandfestigkeit (Abbildung 2.37b). Durch die manuelle Bedienung der Spritze ist jedoch keine konkrete Einstellung der Dosiergeschwindigkeit (z.B. 42 ml/min) möglich. Basierend auf diesen Erfahrungen wurde der Adapter für die Zugabe des Beschleunigers im weiteren Verlauf des Projektes weiterentwickelt und verbessert. Im aktuellen 3D-Druck-Laborversuchsstand wird nun eine computerkontrollierte Dosierpumpe, die Drücke bis zu 10 bar erreichen kann, verwendet.

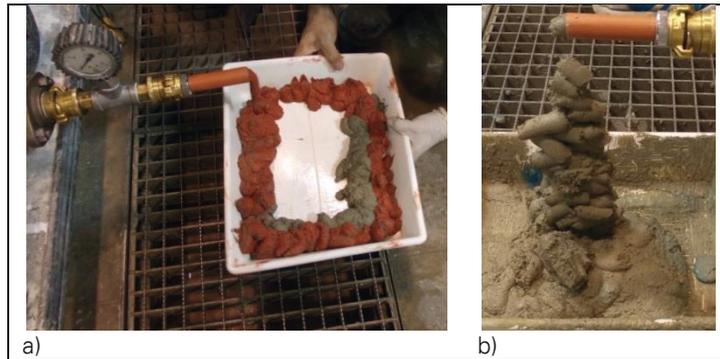


Abbildung 2.37: Ergebnisse der Mörtelpumpversuche mit Beschleunigerzugabe über den entwickelten Adapter: a) Extrusion mit Färbmittelzugabe über die Beschleunigerspritze, b) Extrudierter Mörtel ohne (ausgebreitetes Material in der Schale) und mit Zugabe von Beschleuniger (rechtes Bild)

### 2.3.4 Entwicklung der ganzheitlichen Vorgehen und experimentellen Untersuchungen beim Beton-3D-Drucken mit dem Laborversuchsstand

Der Prozess des 3D-Drucks zementgebundener Werkstoffe ist mit gegensätzlichen Anforderungen an den Baustoff verbunden, zum Beispiel seine Pumpfähigkeit und sein Austragsverhalten. Zum fachgerechten Transport des Betons über eine Autobetonpumpe (ABP) muss dieser fließfähig sein und eine relativ niedrige plastische Viskosität und Fließgrenze aufweisen. Für die Realisierung des nachfolgenden, schichtweisen Betonaustrags sind demgegenüber eine deutlich steifere Konsistenz sowie eine höhere Fließgrenze und plastische Viskosität erforderlich. Zur Beherrschung dieser und anderer Dualitäten sind Betonzusammensetzungen zu entwickeln, die sowohl in frischem als auch in erhärtetem Zustand über optimale Eigenschaften verfügen. Im laufenden Projekt wurde dazu ein ganzheitliches Vorgehen im Labormaßstab erarbeitet, welches mehrere Untersuchungsverfahren kombiniert. Wie zuvor beschrieben, mit Hilfe des Hägermann-Ausbreitmaßes [DIN 1015-3] kann die Konsistenz und Verarbeitbarkeit getestet werden. VT [DIN EN 196-3] werden zur Ermittlung der Erstarrungszeiten (Erstarrungsbeginn und Erstarrungsende) durchgeführt. Rheologische Parameter des Frischbetons, die für das Fließverhalten maßgebend sind, werden mit dem Haake-Mars-III-Rheometer ermittelt. Zudem wurden neue experimentelle Verfahren „Labor-Versuchsstand“ für den 3D-Druck mit Beton entwickelt (Abbildung 2.38a).

Auf der Basis dieses komplexen Vorgehens wurden unterschiedliche Feinbetonzusammensetzungen formuliert und untersucht. Im gleichen Maße wie die Eigenschaften des Frischbetons müssen auch die Festbetoneigenschaften der entwickelten Mischungen eingehend untersucht werden. Das Standartvorgehen, bei dem die Festigkeit des Materials an quadratischen Probekörpern getestet wird, könnte sich in diesem Fall als nicht ausreichend erweisen. Während des 3D-Drucks ist das Material völlig anderen Bedingungen ausgesetzt als im Probekörper (keine Vibration, Kontakt zu äußeren Einflüssen, etc...). Mit Hilfe des Laborversuchsstandes wurden daher 3D-gedruckte Probekörper für die Bestimmung von Druck- und Biegezugfestigkeit erzeugt. Dazu wurden prismenförmige Proben, die aus einer gedruckten, geraden, 1000 mm langen, 300 mm hohen und 38 mm dicken Wand herausgesägt (Abbildung 2.38 b und c) [NER16]. Die Druck- und Biegezugversuche wurden mit Belastungen parallel- und querverlaufend zur Berührungsebene ausgeführt (Abbildung 2.39). Diese Untersuchungen gaben auch Aufschluss über die Homogenität des gedruckten Materials

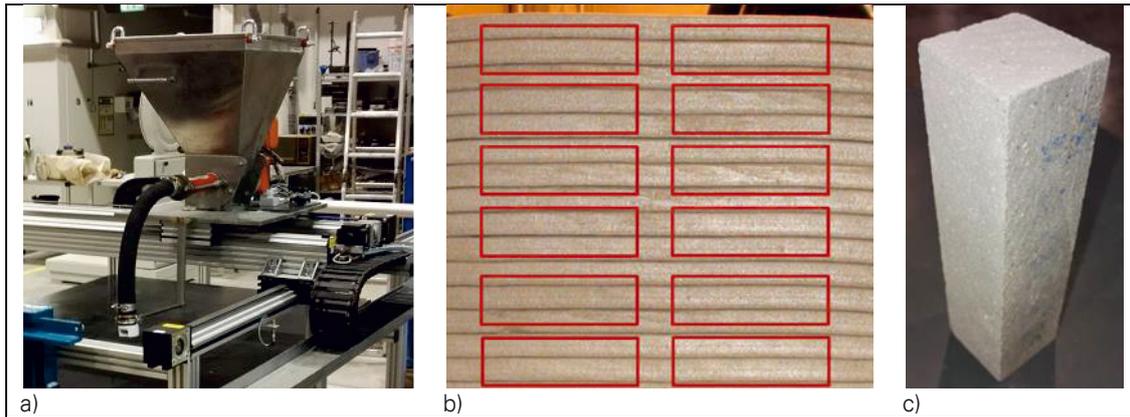


Abbildung 2.38: a) Labor-Versuchsstand, b) Ausschnitt einer gedruckten Wand und c) ausgesägte Probenprisma

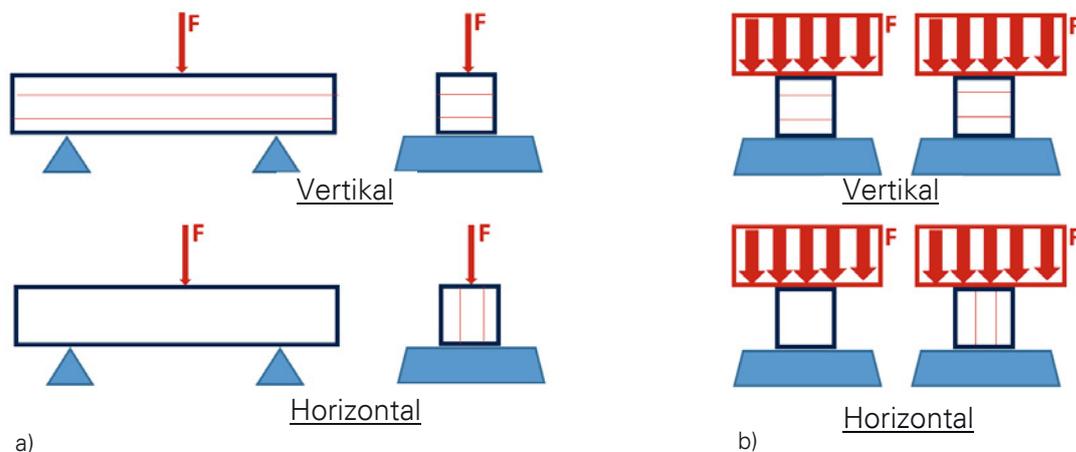


Abbildung 2.39: a) Darstellung der Biegezugfestigkeit Prüfung: vertikal (oben), horizontal (unten) und b) Druckfestigkeit Prüfung: vertikal (oben), horizontal (unten)

Ergebnisse der Druck- und Biegezugfestigkeitsversuche sind in der Tabelle 2.10 und der Abbildung 2.40 dargestellt. Der entwickelte Feinkornbeton, in diesem Beispiel „Grundmischung GM“ (siehe Tabelle A-1 in Anlage 4), weist bereits 3 Tage nach der Herstellung hohe Werte bezüglich Druck- und Biegezugfestigkeit auf. Im Alter von 21 Tagen erreichen die gedruckten Prismen eine Druckfestigkeit von mehr als 80 MPa. Dieser Baustoff kann damit als hochfester, druckbarer Feinkornbeton klassifiziert werden. Bei der Untersuchung des Verbundes zwischen den gedruckten Schichten wurden keine bedeutenden Unterschiede der Festigkeitswerte in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung festgestellt. Dies bestätigt die Qualität des Schichtenverbundes, welche sich durch ein weitgehend isotropes Materialverhalten widerspiegelt. Zusätzlich wurden konventionell hergestellte, geschalte Prismen (Normproben für Zementmörtel gemäß DIN EN 18555), ebenfalls im Alter von 21 und 28 Tagen untersucht, um prozessinduzierte Abweichungen im Materialverhalten festzustellen. Im Ergebnis weisen die gedruckten Proben im Vergleich zu den Normproben sogar höhere Festigkeiten auf. Die Hochdruckverdichtung im Innern des Extruderrörderers könnte der Grund hierfür sein. Es sind jedoch weitere Experimente nötig, um die Reproduzierbarkeit der beobachteten Effekte zu überprüfen und um den Einfluss unterschiedlicher Materialbestandteile auf die Druckbarkeit zu untersuchen.

Tabelle 2.10: Mechanische Eigenschaften gedruckter und herkömmlich hergestellter Probekörper (Standardabweichungen sind in Klammern angegeben)

Alter [Tag]	Gedruckte Proben				Normproben	
	Druckfestigkeit		Biegezugfestigkeit		Druckfestigkeit	Biegezugfestigkeit
	vertikal [N/mm <sup>2</sup> ]	horizontal [N/mm <sup>2</sup> ]	vertikal [N/mm <sup>2</sup> ]	horizontal [N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
3	49,7 (2,6)	45,9 (1,9)	4,3 (0,2)	4,8 (0,2)		
21	80,6 (2,1)	83,5 (4,5)	5,9 (0,4)	5,8 (0,2)	73,4 (3,5)	5,1 (0,4)
28	83,90 (4,2)	96,80 (2,6)	6,6 (0,6)	6,3 (0,5)	78,9 (1,1)	5,6 (0,6)

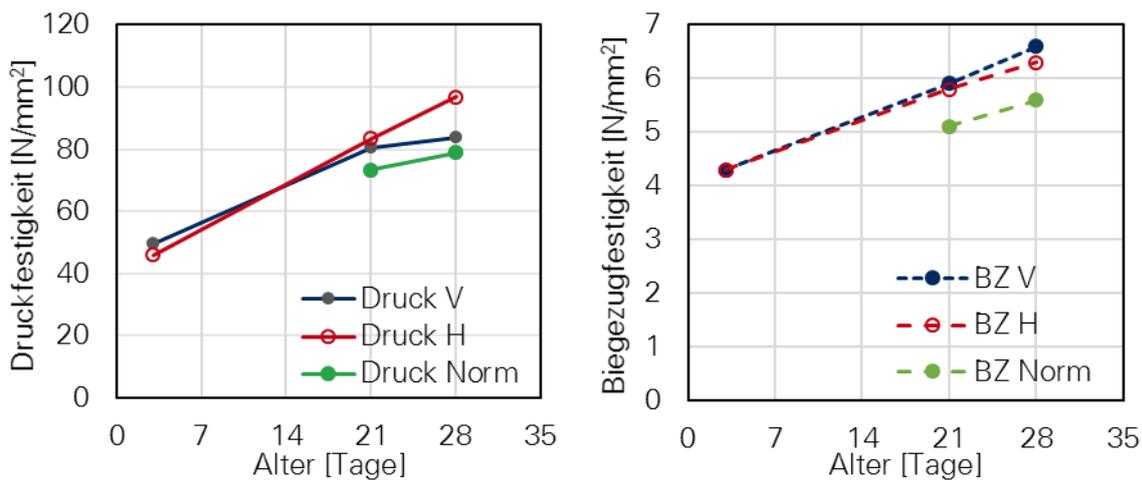


Abbildung 2.40: Ergebnisse von Druck- und Biegezugfestigkeitsversuchen

### 2.3.5 Entwicklung weiterer druckbarer Betone mit unterschiedlichen Ausgangsstoffen für verschiedene Anwendungsfälle

Ziel: Nach der erfolgreichen Entwicklung und Validierung von Testmethoden für 3D-Druck-Betone wurde eine Parameterstudie mit den nachfolgenden Zielen begonnen.

- 1) Die Entwicklung von Feinbetonrezepturen mit verschiedenen Ausgangsstoffen für verschiedene Anwendungen. Im Focus stehen druckbare, früh hochfeste Betone.
- 2) Erkenntnisse über den Einfluss der Betonkomponenten auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften im Hinblick auf den 3D-Druck. Daraus resultierend optimale Verhältnisse für Mischungsentwürfe, zum Bsp. optimales Bindemittelvolumen, Zusammensetzung der Kornfraktionen und Dosierung des Fließmittels.
- 3) Die Bereitstellung von grundlegenden Referenzmischungen, welche in zukünftigen Studien weiter optimiert werden können, zum Bsp. mit Blick auf betontechnologische Aspekte wie Schwinden, Dauerhaftigkeit, Zugfestigkeit, Duktilität, Verbundfestigkeit etc.

Materialien: Um die oben definierten Ziele zu erreichen, wurden die folgenden Materialparameter untersucht. Ausgangsmischung war dabei ein Feinbeton bestehend nur aus Zement, Sand, Wasser und Fließmittel.

- 1) Bindemittelvolumen (Bindemittel+Wasser+Fließmittel):
  - a) 45, b) 47,5, c) 50, d) 52,5, e) 55, f) 57,5 und g) 60
- 2) Zuschlagsverteilung (Sand in Variationen):
  - a) 0-2 mm
  - b) 0,06-0,2 Quarzsand, 0-1 mm Sand, 0-2 mm Sand zu gleichen Teilen
  - c) 0,06-0,2 Quarzsand, 0-1 mm Sand, 0-2 mm Sand im Verhältnis 20:20:60
- 3) Zementartige Materialien
  - a) Zement
  - b) 15% des Zements ersetzt durch Mikrosilika
  - c) 15% des Zements ersetzt durch Mikrosilika und 30% ersetzt mit Flugasche

Experimentelles Vorgehen: 45 Liter der gewünschten Betonmischungen wurden nach dem Mischungsprotokoll in Anlage 4. gemischt. Nach dem Mischen wurde der Beton aus dem Mischer entnommen. Zeitgleich, 15, 30, 45, 60 und 90 min nach Wasserzugabe, werden Hägermann-Ausbreitmaß- und Haake-Mars-Rheometer-Tests durchgeführt. Um später gedruckte Probekörper mit konventionellen Prüfkörpern zu vergleichen, werden außerdem Normprismen (4\*4\*16 cm) hergestellt. Parallel zu diesen Tests wird der Laborprüfstand mit frischem Beton gefüllt und drückt nacheinander 3 Wände. Jede Wand besteht aus 5 Schichten, jede Schicht ist 1000 mm lang, 3 cm breit und 2,5 cm hoch. Im Falle dass der Beton nicht übergangslos durch die Düse geht, wird er als nicht-extrudierbar eingestuft. Im nächsten Schritt wird die Verbaubarkeit des Betons geprüft, indem eine Wand bestehend aus 15 Schichten gedruckt wird. Zwischen jeder Schicht gibt es eine Verzögerung von 3 min. Wenn die unterste Schicht dem Gewicht standhält und die 15 Lagen erfolgreich gedruckt werden können, kann der Beton als verbaubar gelten. Der 15-Schichten-Wandtest beginnt immer 45 min nach Wasserzugabe damit alle Mischungen auf einer einheitlichen Zeitskala liegen. Nachdem das Drucken und alle weiteren Frischbetontests beendet sind, werden die gedruckten Probekörper mit einem feuchten Tuch und Plastikfolie abgedeckt, um Wasserverlust zu vermeiden. Nach 24 Stunden werden alle Probekörper beschriftet und für 7 Tage ins Wasser gelegt. Am 7. Tag werden die Probekörper dem Wasser entnommen und in einem klimatisierten Raum mit 65% Luftfeuchtigkeit und 20°C gelagert. Wie in Abschnitt 3.4 schon näher erläutert werden die Festbetoneigenschaften zum Zeitpunkt 1 Tag und 28 Tage an Prismen getestet, welche aus den gedruckten Wänden heraus gesägt werden.

Tabelle 2.11: Übersicht geprüfter Ausgangsstoffe und ihre experimentellen Ergebnisse in Bezug auf Extrudierbarkeit und Verbaubarkeit

			Leimgehalt [%]						
			45,0	47,5	50,0	52,5	55,0	57,5	60,0
<b>Ausgangsstoffe</b>	1	Z, W, FM, Sand 1	--	++	+				
	2	1 mit Sand 2	NN	++	+				
	3	1 mit Sand 3	NT	NT	-				
	4	3 mit MSS	NN	--	--	++			
	5	3 mit MSS+FA*	NN		++				
	6	2 mit MSS+FA*			NN	++			

Legende

Z	Zement
W	Wasser
FM	Fließmittel
Sand 1	0-2 mm Sand
Sand 2	0,06-0,2 Quarzsand, 0-1 mm Sand, 0-2 mm zu gleichen Teilen;
Sand 3	0,06-0,2 Quarzsand, 0-1 mm Sand, 0-2 mm Sand im Verhältnis 20:20:60
MSS	Mikrosilikasuspension
FA	Flugasche
++	Erfolgreich bestanden
+	Teilerfolg
-	Nicht ausreichende Verbaubarkeit
--	Nicht ausreichende Extrudierbarkeit
*	Zusätzliches Fließmittel musste hinzugefügt werden
NT	Nicht geprüft
NN	Prüfung nicht nötig

Tabelle 2.11 stellt die experimentellen Ergebnisse zu den verschiedenen, getesteten Materialmischungen mit unterschiedlichem Leimgehalt dar. Es ist zu beachten, dass alle vorgestellten Mischungen ein konstantes Wasser-zu-Bindemittel-Verhältnis von 0,42 haben. Alle Mischungen, bis auf jene die sowohl MSS als auch FA enthalten, sind mit 1,5% des Bindemittelgewichts als Fließmittel dosiert worden. Die Mischungen 5 und 6 enthalten 2% des Bindemittelgewichts als Fließmittel. Wie oben gezeigt, erweisen sich Mischungen mit grobem (Mischung mit Sand 1) und feinem (Mischungen mit Sand 2) mit einem Leimgehalt von 47,5% als extrudierbar bis zu 90 min und verbaubar bis zu 15 Lagen (siehe Experimentelles Vorgehen für Details). Die selben Mischungen mit 50% Leimgehalt sind auch extrudierbar, haben allerdings eine niedrigere Verbaubarkeit, da sie sehr viel fließfähiger sind. Im Falle von 45% oder mehr als 50% Leimgehalt sind die Mischungen zu steif bzw. zu flüssig um gedruckt zu werden. Als nächstes wurden die getesteten Mischungen weiter optimiert, indem der Zementgehalt reduziert wurde. Dieses Ziel wurde auf zwei Wegen erreicht: 1) 15% des Zements werden durch MSS ersetzt und 2) 45% des Zements werden durch 15% MSS und 30% Flugasche ersetzt. Beide Mischungen konnten weder mit 47,5% noch mit 50% Leimgehalt extrudiert werden. Eine mögliche Erklärung wäre die vergrößerte Oberfläche der Feststoffe, die durch den gestiegenen Gehalt an Feinstoffen zustande kommt und zusätzlich benetzt werden muss. Diese Mischungen sind bei einem Leimgehalt von 52,5% extrudierbar und verbaubar. Dieselben Mischungen sind auch noch einmal mit Sand 3 (weniger Oberfläche als bei Sand 2) getestet worden. Abschließendes Ergebnis der Untersuchungen sind fünf Mischungen, die eine gute Extrudier- und Verbaubarkeit besitzen. Diese

Mischungen bestehen aus unterschiedlichen Ausgangsstoffen und sind daher auch für unterschiedliche Anwendungsfälle geeignet. Tabelle 2.12 zeigt die gewählten, erfolgreichen Mischungen und ihre Kurznotation, die im Rest des Berichts verwendet wird.

Tabelle 2.12: Notation für die Mischungen, welche extrudierbar und verbaubar sind (links) und Mischungen, welche extrudierbar aber nicht verbaubar sind (rechts)

Misch.	Ausgangsstoffe	Leim [%]	Misch.	Ausgangsstoffe	Leim [%]
M1	C, W, FM, Sand 1	47.5	M1_PV50	C, W, FM, Sand 1	50.0
M2	M1 mit Sand 2	47.5	M2_PV50	M1 mit Sand 2	50.0
M4	M3+MSS	52.5	M3_PV50	M1 mit Sand 2	50.0
M5	M3+MSS+FA	52.5			
M6	M2+MSS+FA	52.5			

Das rheologische Verhalten aller oben genannten Betone wurde mit dem Hägermann-Ausbreitmaß (Abkürzung HT) und dem Haake-Mars-Rheometer erfasst. Obwohl alle HT erfolgreich waren, konnten nur wenige Mischungen sinnvoll mit dem Rheometer getestet werden. Der Grund ist die hohe Steifigkeit der Mischungen, welche zur Überlastung des Rotors im Rheometer führt. Es ist eine Folgestudie im November 2016 geplant, in der alle hier aufgeführten Mischungen mit dem ConTec Viscometer untersucht werden sollen. Das ConTec Viscometer ist für steifere Materialien ausgelegt als das Haake-Mars-Rheometer. Die erlangten Ergebnisse würden an anderer Stelle publiziert werden. In der Regel wird für den HT ein kegelstumpfförmiger Metallring mit Beton gefüllt, nach oben abgehoben und dann dem Material 15 Stöße hinzugefügt. Danach wird der Durchmesser des Betonkegels gemessen. Im aktuellen experimentellen Ablauf wird nicht nur der Durchmesser nach den Hubstößen (D2), sondern auch der vor den Hubstößen (D1) gemessen. Dadurch erhalten wir Aufschluss darüber wie sich das Material nur unter Eigengewicht verhält und wie es auf äußere Krafteinwirkung reagiert. Mischungen mit niedrigem D1 und hohem D2 sind optimal für den Beton-3D-Druck. Wie die Abbildung 2.41 zeigt, haben gut extrudierbare Mischungen einen D2 unter 16 cm, oft sogar unter 14 cm. Mischungen mit hohem Feinstoffanteil (M4-6) konnten sogar trotz niedriger Durchmesser von  $D1 < 12$  cm und  $D2 < 14$  cm extrudiert werden. Mischungen mit gröberen Bestandteilen dagegen (M1-3) waren nur bei höheren Ausbreitmaßen extrudierbar. Natürlich senkt das im Gegenzug die Verbaubarkeit. Dass wird besonders deutliche an den Mischungen M1\_PV50, M2\_PV50 und M3\_PV50, welche alle extrudierbar sind, aber nicht verbaubar. Wogegen feinkörnige Mischungen selbst mit einem Leimgehalt von 52,5% noch extrudierbar und verbaubar sind. Eine weitere wichtige Beobachtung ist die steigende Fließfähigkeit mit der Zeit. Ein wichtiges Detail ist dabei, dass sich bei erfolglosen Mischungen D1 und D2 beim HT stark vergrößern mit der Zeit. Erfolgreiche Mischungen dagegen zeigen nur einen geringen Anstieg von D1 und D2 mit der Zeit. In der Praxis bedeutet das, dass erfolgreiche Mischungen nur durch äußere Kräfte fließfähig werden sollten, egal zu welchem Zeitpunkt. Erfolgreiche Mischungen dagegen fließen ab einem gewissen Zeitpunkt allein, auch ohne äußere Krafteinwirkung. Der Effekt liegt wohl am Aufschluss des Fließmittels. Alle erfolglosen Mischungen haben einen hohen Zementgehalt und sind daher sehr anfällig für die Wirkung des Fließmittels. Daher empfiehlt es sich den Zementanteil optimal zu wählen, um hohe Grünstandfestigkeit zu erreichen ohne die Stabilität der Mischung zu verlieren.

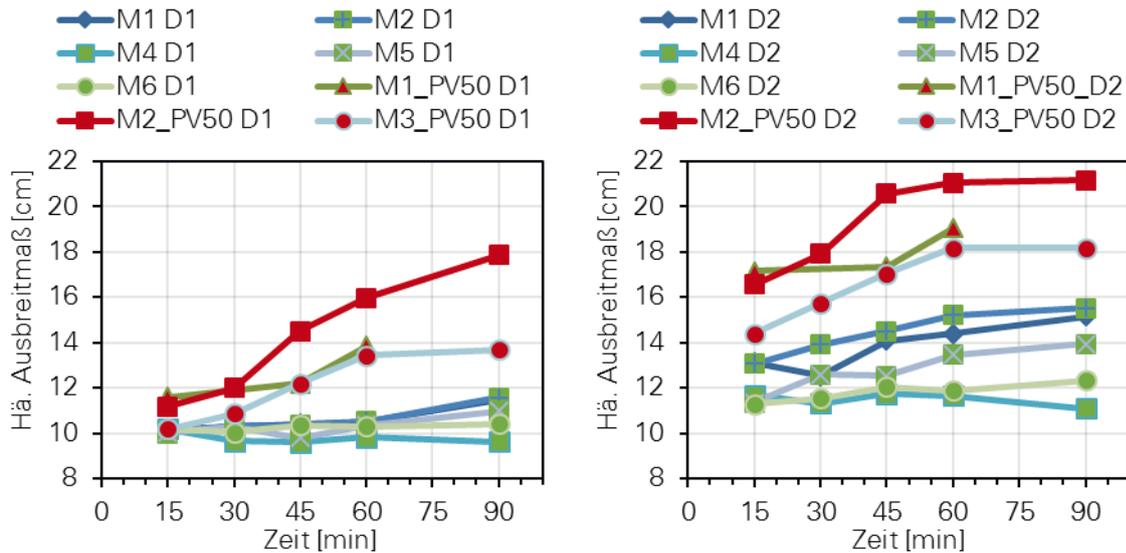


Abbildung 2.41: Hägermann-Ausbreitmaß-Ergebnisse: Vor den Stößen (links), nach 15 Stößen (rechts)

Die Ergebnisse der Druck- und Biegezugfestigkeitsversuche aller ‚erfolgreichen‘ Mischungen (siehe Tabelle 2.12) sind in der Abbildung 2.42 dargestellt. Alle gezeigten Ergebnisse stammen von Experimenten, die einen Tag nach der Herstellung der Probekörper durchgeführt wurden. An dieser Stelle ist anzumerken, dass für die gewünschte Anwendung (Mehrfamilienhaus, siehe Abschnitt 2.4.1) eine Normdruckfestigkeit von 25 MPa nach 28 Tagen gefordert ist. Erste Resultate aus den Druck- und Biegezugfestigkeitsversuchen deuten bei allen entwickelten Betonen auf eine gleiche oder höhere Druckfestigkeit als in der Norm gefordert hin, noch dazu innerhalb des kurzen Zeitraums von nur einem Tag. Der Grund dafür ist eine exakt optimierte Auswahl an Rohmaterialien, z.B. Zement CEM I 52,5R in einem optimalen Mischungsverhältnis. Dadurch erhalten zukünftige Anwender die Freiheit sich eine beliebige Gruppe an Materialien und die dazu passende Mischungszusammensetzung zu wählen, je nachdem welche Produkte auf dem Markt verfügbar sind, welche Expositions-klassen zu beachten sind oder welche Produktionsvorgaben zu beachten sind.

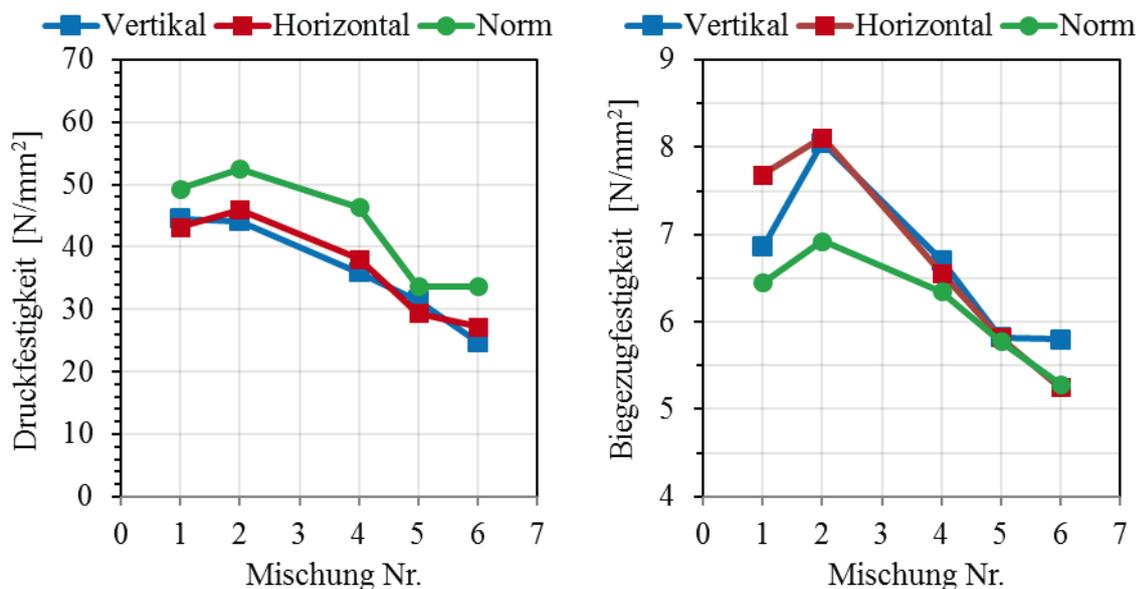


Abbildung 2.42: 1. Tag Druck- und Biegezugfestigkeitsergebnisse von unterschiedlichen Mischungen

In Abbildung 2.42 lässt sich eine sehr hohe Druck- und Biegezugfestigkeit von M1 und M2 erkennen, gefolgt von M4, M5 und M6, welche sehr gute Extrudierbarkeit und Verbaubarkeit gezeigt haben aber sie besitzen die niedrigste 1-Tages-Druckfestigkeit. Diese Ergebnisse erklären sich, wenn man die Menge an Zement in den verschiedenen Mischungen vergleicht. Sowohl M1 und M2 enthalten  $628 \text{ kg/m}^3$  Zement, M4 enthält  $580 \text{ kg/m}^3$  und M5 und M6 enthalten  $394 \text{ kg/m}^3$ . Eine größere Menge an schnellerhärtendem Zement führt zu der höheren 1-Tages-Druckfestigkeit. Mischungen die dagegen weniger Zement und mehr Mikrosilika und Flugasche enthalten, brauchen dementsprechend länger um ihre volle Druckfestigkeit zu erreichen. Trotzdem ist die Verwendung dieser Zusatzstoffe wichtig um thixotropisches Verhalten, Pumpbarkeit, Dauerhaftigkeit, Oberflächenqualität und vermindertes Schwinden, Temperaturspannungen und Porosität zu steigern. Ähnlich wie bei den in Abschnitt 2.3.4 vorgestellten Anfangsergebnissen, wurden keine bedeutenden Unterschiede der Festigkeitswerte in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung festgestellt. Dies bestätigt die gute Qualität des Schichtverbundes, die sich in einem weitgehend, isotropen Materialverhalten widerspiegelt. Bei den Biegeversuchen zeigte sich, dass die der Wand entnommenen Probekörper durchschnittlich eine 7.81% höhere Biegezugfestigkeit aufwiesen, als die nach Norm hergestellten Prismen. Im Kontrast dazu steht der Vergleich der Druckfestigkeiten, dessen Ergebnisse konträr zu den Anfangsergebnissen sind. Beim Vergleich von gedruckten und herkömmlichen Prismen liegt die Druckfestigkeit der herkömmlichen Prismen im Durchschnitt 15,57% über den aus der Wand entnommenen Proben. Während der anfänglichen Experimente (Abschnitt 2.3.4) wurden die Normprismen 30 Sekunden bei 50 Hertz gerüttelt. Im späteren Verlauf, als viele verschiedene Mischungen getestet wurden, folgte das Rütteln der Prismen entsprechend der Konsistenz des Mörtels. Die Vibrationen erfolgten so lange, bis an der Oberfläche des eingefüllten Betons keine Luftbläschen mehr sichtbar waren. Meist nach 2-3 Minuten, wenn keine Veränderung der Oberfläche mehr sichtbar war, wurde die Vibration gestoppt. Durch diese verlängerte Vibration kommt es in den herkömmlichen Proben zu einer stärkeren Verdichtung und niedrigeren Porosität. Dadurch erreichen die gerüttelten Proben eine höhere Druckfestigkeit als die gedruckten Proben, die keine Vibration erfahren. Doch die Ergebnisse zeigen, dass die gedruckten Prismen trotz geringerer Druckfestigkeit gegenüber herkömmlichen Prismen, immer noch eine Druckfestigkeit die über der geforderten Norm liegt. Damit bestätigt sich, dass alle Mischungen für die gewählte Anwendung geeignet sind. Womit das Ziel dieser Untersuchung, nämlich verschiedene Feinbetone mit unterschiedlichen Ausgangsstoffen zu entwickeln, erreicht ist.

## 2.4 Ergebnisse Institut für Baubetriebswesen

### 2.4.1 Definition von Anforderungskriterien und Anwendungsszenarien

Im Rahmen des Arbeitspaketes 1 wurde der Stand des Wissens durch umfangreiche Recherchearbeiten zum Thema „Beton-3D-Druck“ erarbeitet. Im Speziellen wurde seitens FE3 eine Grundlagenuntersuchung, aufbauend auf den Methoden „Contour Crafting“, „Concrete-Printing“ und „Freeform 3D Concrete Printing“, durchgeführt. Im Mittelpunkt stand dabei eine technologische Verfahrensuntersuchung. Ebenso wurden Stärken und Schwächen der einzelnen Methoden gegenüber dem angestrebten Beton-3D-Druckverfahren analysiert.

Anschließend konnten unter Einbeziehung des Praxispartners BAM Deutschland AG (DG4) anwenderseitige Anforderungskriterien definiert werden, denen das angestrebte Beton-3D-Druckverfahren gerecht werden soll. Die Festlegungen zu den spezifischen Randbedingungen können in drei Kategorien eingeteilt werden. Innerhalb der betontechnologischen Anforderungen wurden Festigkeitsklassen und Eigenschaften des zu verwendenden Betons bestimmt. Außerdem wurden geometrische Anforderungen definiert. Im Einverständnis mit den Projektbeteiligten wurde entgegen der Technologie des „Contour Craftings“ die Festlegung getroffen, dass im Rahmen des Projekts voll ausgefüllte Betonstrukturen untersucht werden sollen. Voll ausgefüllte Betonstrukturen ermöglichen es, die auftretenden Lasten und statisch einwirkenden Kräfte am effektivsten aufzunehmen oder weiterzuleiten. Deshalb soll das optisch einem Fachwerk ähnliche Betoniererergebnis des „Contour Craftings“ in diesem Projekt nicht weiter verfolgt werden. Mit dem angestrebten Beton-3D-Druckverfahren soll eine Wand schichtenweise in der erforderlichen Wandbreite gedruckt werden. Es ist daher notwendig, den Beton in Schichtbreiten von 10 cm bis 40 cm variabel regelbar auszutragen. Dies soll mit Hilfe einer verstellbaren Schleppschalung und angepassten Fördermenge erreicht werden. Es müssen außerdem Lösungen für die angestrebte Technologie entwickelt werden, um Wandecken und T-Verbindungen sowie Aussparungen und Öffnungen in Form von Fenstern, Türen und Leerrohren realisieren zu können. Für das Beton-3D-Druckverfahren sind die Toleranzen nach DIN 18202 einzuhalten. In der DIN 18202 sind Grenzabweichungen für Maße und Ebenheitsabweichungen geregelt. Für den Rohbau sind beispielsweise bei Bauteilen mit Längen von 1,0 m bis 3,0 m Grenzabweichungen von 12 mm zum Grundrissplan erlaubt. Da es sich bei der angestrebten Technologie um eine Ort betonbauweise handelt, sind auch baustellenrelevante Randbedingungen zu berücksichtigen. Von hoher Bedeutung sind dabei die einwirkenden Umwelt- und Temperaturbedingungen, die die Ausführungsqualität nur sehr bedingt beeinträchtigen dürfen. Der Anforderungskatalog zu den bauspezifischen Kriterien und Randbedingungen ist in Anlage 6 dargestellt.

Ein wichtiger und aufwendiger Teil der bisherigen Arbeit ist die Definition von möglichen Anwendungsszenarien und die Untersuchung der Machbarkeit verschiedener Bauteile mit dem angestrebten Beton-3D-Druckverfahren. Dies stellt die Grundlage für weitergehende Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen gegenüber konventionellen Bauverfahren und Analysen zum Marktpotenzial dar. Um mögliche Anwendungsszenarien zu definieren, wurde in Absprache mit DG4 ein Szenarienkatalog zu möglichen Anwendungen des Beton-3D-Druckverfahrens entwickelt. Der Szenarienkatalog befindet sich in Anlage 7. Darin wurden zuerst alle gegenwärtig vorhandenen Bauwerke nach der Bauwerksfunktion typisiert und aufgelistet. Danach wurde im Fall der Relevanz für das Projekt eine weitere Kategorisierung der Bauwerke vorgenommen. Weiterhin wurden bauwerkstypische Bauteile definiert und

diesen spezifische Abmessungen und Besonderheiten zugeordnet. Anschließend wurde die Umsetzbarkeit mit dem angestrebten Beton-3D-Druckverfahren geprüft. Die Realisierbarkeit ist abhängig von den gegebenen Restriktionen. Zur Übersicht wurde eine Ampelkennzeichnung vorgenommen. Eine grüne Kennzeichnung bedeutet dabei, dass die Bauteile mit der angestrebten Technologie umsetzbar sind. Gelb kennzeichnet eine bedingte Umsetzbarkeit. Es ist zum Beispiel denkbar, dass zur Betonage von plattenförmigen Bauteilen zuerst eine Randschalung mit einer standhaften Betonrezeptur gedruckt wird. Nach Einlegen der Stab- und Mattenbewehrung könnte die innere Fläche mit einer selbstverdichtenden, fließfähigen Rezeptur ausgefüllt werden. Die Farbe rot markiert Bauteile, die vorerst nicht umsetzbar sind. Maßgebende Restriktion ist dabei, dass bisher die Integration von Stahlbewehrungsstäben mit der angestrebten Technologie nicht möglich ist. Hochbewehrte Bauteile wie Unterzüge und Stützen sowie bewehrte Wände sind daher vorerst nicht realisierbar. Es besteht in dieser Hinsicht Forschungsbedarf zur Integration von Bewehrungsstrukturen. Das Problem kann innerhalb dieses Projektes allerdings nicht behandelt werden. Bei der Untersuchung der Anwendungsszenarien hat sich herausgestellt, dass bei einer Vielzahl von Bauwerken gleiche typische Bauteile existieren. Man kann Massivbauweisen ebenso in Wand-, Misch- und Skelettbauweise untergliedern. Bei Misch- und Skelettbauweisen sind erstrangig bewehrte Bauteile vorzufinden. Die meisten Anwendungen ergeben sich innerhalb der Wandbauweise. Die **Wandbauweise** wird vorrangig im Wohnungsbau, in reduziertem Maße auch bei Wohn- und Geschäftsgebäuden, Büro- und Hotelgebäuden **bis maximal 5-geschossig** angewendet. Bei einfachen Gebäudestrukturen dieser Kategorie werden die Wände in der Regel gemauert. Außerdem kommen unbewehrte Fundamente, u.a. in Form von Frostschrüben zum Einsatz. Diese beiden Anwendungsfelder können mit der angestrebten Beton-3D-Drucktechnologie realisiert werden. Im weiteren Projektverlauf wurde daher das Drucken von **unbewehrten Fundamenten und Wänden mit variabler Breite** als Hauptzielrichtung des Projekts verfolgt. Das angestrebte Beton-3D-Druckverfahren kann ein **Ersatz für den Mauerwerksbau** darstellen. Weitergehende Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen wurden anhand dieses Anwendungsfeldes durchgeführt.

Ein weiteres Anwendungsfeld wird in der Möglichkeit gesehen, **frei geformte Bauteile** schalungsfrei herzustellen. Dies wird speziell dem Architekten neue Möglichkeiten in der Gestaltung von Bauteilen eröffnen. Speziell für dieses Anwendungsfeld sind hohe Kostenreduktionspotenziale denkbar. Mit konventionellen Bauverfahren sind runde oder geschwungene Bauteilgeometrien nur mit Hilfe kostenintensiver Schalungen realisierbar. Mit den Beton-3D-Druckverfahren würde dieser Kostenanteil komplett entfallen.

Innerhalb des Arbeitspaketes 2 wurden umfangreiche Recherchen zu bestehenden Patenten durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 2.1.2 ausführlich beschrieben.

## 2.4.2 Datenstrukturen und Datenmanagement

In Arbeitspaket 6 sollten die erforderlichen Datenstrukturen und -formate für den Prozess zu analysiert werden. In Abbildung 2.43 werden die einzelnen Prozessschritte für die Aufbereitung der Daten zur Steuerung des Gesamtprozesses dargestellt.

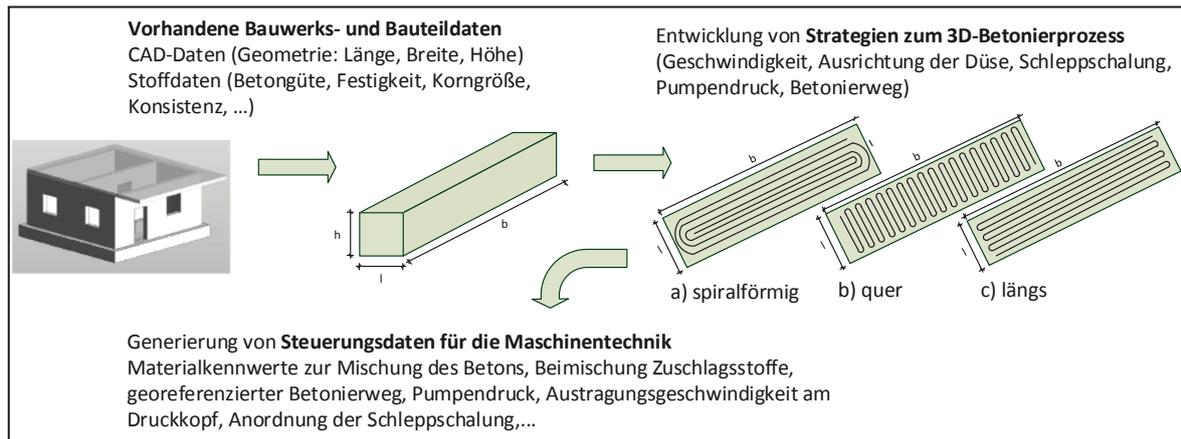


Abbildung 2.43: Aufbereitung der Daten zur Steuerung des Gesamtprozesses

Bauwerks- und Bauteildaten sind in Form von CAD-Daten (Geometrie) und Stoffdaten (Eigenschaften) vorhanden. Ähnlich der Schalungsplanung im konventionellen Betonbau ist das Bauwerk in sinnvolle Betonier- bzw. Druckabschnitte aufzuteilen. Es ist außerdem eine Reihenfolge dafür festzulegen, welche Bauteile nacheinander, gemeinsam oder nachträglich erzeugt werden. Um die Bauteile nachträglich zu drucken (erst Außenwände, dann Innenwände) sind wiederum Elemente erforderlich, die die Bauteile verbinden. Beim Druckprozess müssen gegebenenfalls erforderliche Ruhezeiten (Nachruhe von 22.00 Uhr bis 6.00 Uhr) beachtet werden, zu denen die Maschine nicht drucken darf. So müssen Vorgänge zu einem bestimmten Zeitpunkt abgeschlossen sein. Außerdem muss festgelegt werden, welchen Weg der Drucker abfährt um optimiert Bauteile drucken zu können. Sind unbewehrte Fundamente spiralförmig, längs oder quer zu drucken? Mit welcher Geschwindigkeit wird gedruckt? Aus diesen Überlegungen sind optimierte 3D-Druckstrategien zu entwickeln. Daraus müssen die erforderlichen Steuerungsdaten für die Maschinenteknik generiert und an die Maschine überführt werden.

Zur Untersuchung der erforderlichen Datenstrukturen und -formate wurden zunächst die bestehenden additiven Fertigungsverfahren des konventionellen 3D-Drucks analysiert. Es gibt eine Reihe von Technologien für die kleinformatische, additive Fertigung von 3D-Objekten. Laserbasierte Technologien nutzen die Energie des Lasers direkt zum Verfestigen von pulverigem Material. Dies kann zum Beispiel durch Schmelzen (SLM - Selective Laser Melting) oder Sintern (SLS - Selective Laser Sintering) erreicht werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, das Material durch Extrusion direkt abzulagern. Dabei werden meistens Thermoplaste oder Metalle verwendet, die als Schmelze durch eine schmale Düse ausgegeben werden. Diese Technologie wird „Fused Deposition Modelling“ (FDM) genannt und arbeitet vergleichsweise kosteneffizient, ist aber auf Konstruktionen mit weniger als 1 Kubikmeter Volumen begrenzt. Das Verfahren ähnelt dem angestrebten Beton-3D-Druckverfahren, da die Ausbringung des Materials durch Extrusion erfolgt und das Objekt so schichtenweise aufgebaut wird [ALW13]. Daher wurde dieser Prozess näher analysiert. In Abbildung 2.44 wird die Prozesskette der Datenaufbereitung für die FDM-Technologie dargestellt.

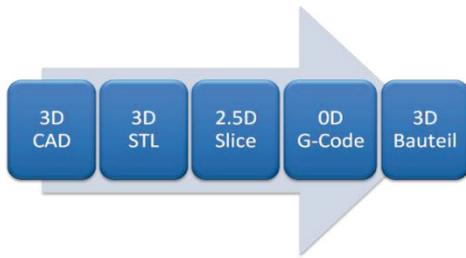


Abbildung 2.44: Prozesskette der Datenaufbereitung

Die geometrischen Daten des zu druckenden Objekts werden in einem CAD-Programm erstellt. Die CAD-Datei wird anschließend in das STL-Format umgewandelt. Im Anschluss wird die STL-Datei mit Hilfe eines Slicer-Programms in einzelne Schichten aufgeteilt. Daraus wird wiederum der Druckpfad für jede einzelne Schicht generiert und als G-Code ausgegeben. Der G-Code ist in der Maschinenteknik ein gängiges Format zur Übergabe von Daten an Maschinen. Er beschreibt dabei die Pfade und alle dazugehörigen Parameter, wie zum Beispiel Geschwindigkeiten, eines oder mehrerer Werkzeuge [BUS08]. Für den Umwandlungsprozess von CAD-Daten zu G-Code existieren eine Vielzahl von Programmen. Die meisten sind bereits zum kostenlosen Download im Internet erhältlich.

Um den Umwandlungsprozess genauer zu untersuchen, wurden innerhalb des Projekts Druckobjekte aus Gips und Kunststoff angefertigt. Die CAD-Daten wurden dabei im Programm „Autodesk Revit“ erstellt. Als Beispiel wurde eine Etage eines Einfamilienhauses modelliert. In Anlage 8 und Anlage 9 sind der Grundrissplan und eine 3D-Visualisierung des Modells angefügt. Für das Programm „Autodesk Revit“ existiert bereits eine Applikation „STL-Exporter“, die als Zusatzdownload auf der Autodesk Homepage abrufbar ist. Mit dieser Applikation konnten die CAD-Daten in das STL-Format umgewandelt werden. Bei der Umwandlung kann ein beliebiger Maßstab gewählt werden. In diesem Fall wurde als Maßstab 1:100 ausgewählt. Mit dem Programm „Netfabb“, das im Internet kostenlos zum Download erhältlich ist, wurde zunächst eine allgemein notwendige Überarbeitung der STL-Datei vorgenommen und anschließend mit Hilfe des Slicer-Programms der G-Code generiert. In der Regel besitzen die herkömmlichen 3D-Drucker eine separate Drucksoftware. Der G-Code wurde in das „Host“-Programm der beiden 3D-Drucker hineingeladen. Dort konnten weitere Einstellungen, beispielsweise an der Druckgeschwindigkeit und Schichtdicke, vorgenommen werden. Schlussendlich wurden die Modelle dreidimensional gedruckt. In Abbildung 2.45 und Abbildung 2.46 werden die Ergebnisse dargestellt.

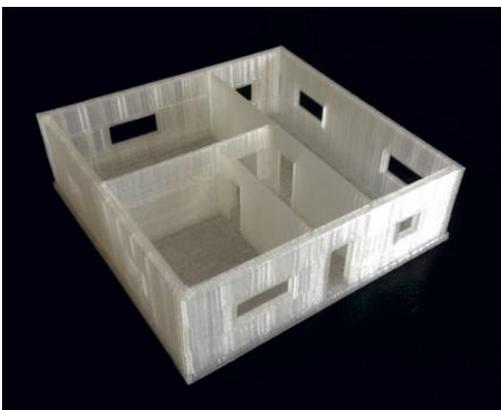


Abbildung 2.45: 3D-Druckobjekt aus Kunststoff

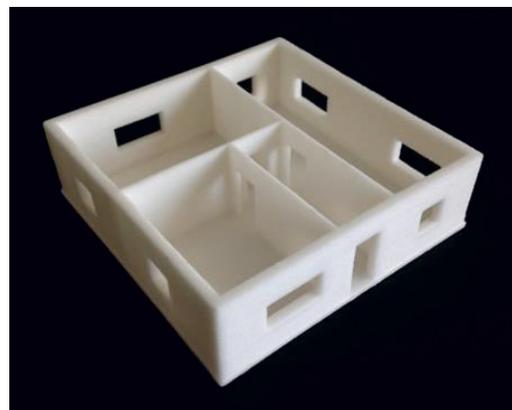


Abbildung 2.46: 3D-Druckobjekt aus Gips

Nach der Analyse der Datenstrukturen und -formate bestehender, kleinformatischer 3D-Druckverfahren kann geschlussfolgert werden, dass diese ebenso für großformatige Druck-

verfahren eingesetzt werden können. Die aus den CAD-Daten erstellten G-Codes müssen jedoch um weitere Parameter, die für den Erfolg des Beton-3D-Druckprozesses notwendig sind, ergänzt werden. Beispiele hierfür sind:

- Fördermenge des Betons,
- Geschwindigkeit des Druckkopfes,
- Schichtdicke,
- Anpassung der Druckabschnitte,
- Optimierte Druckpfade und -strategien
- Dosierung der Menge des verwendeten Beschleunigers.

### 2.4.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

In Medienberichten werden den Beton-3D-Druckverfahren regelmäßig hohe Einsparpotenziale hinsichtlich der erzielten Ausführungszeiten und Baukosten nachgesagt. Ein Beispiel dafür ist der Druck des ersten Bürogebäudes in Dubai (Vereinigte Arabische Emirate, vgl. Abschnitt 2.1.1) im April 2016. Das Gebäude soll eine Nutzfläche von 250 m<sup>2</sup> besitzen. Laut Angaben arabischer Nachrichtenmagazine dauerte der Druck 17 Tage. Nach Schätzungen der Initiative „3D Printing Strategy“ der Vereinigten Arabischen Emirate könnte die Produktionszeit um 50 % bis 70 % reduziert werden. Außerdem würden die Arbeitskosten um 50 % bis 80 % gesenkt und der Bauschutt um 30 % bis 60 % verringert werden. Die Initiative sieht vor, bis 2025 ein Viertel aller Gebäude mit dem 3D-Druckverfahren herzustellen. [ING16]

Um diese Aussagen zu werten und die Wirtschaftlichkeit der angestrebten 3D-Drucktechnologie zu überprüfen, wurden im Rahmen des Projektes die Ausführungszeiten und Baukosten von CONPrint3D<sup>®</sup> untersucht. Am Beispiel der Wandfertigung für die zuvor in „Autodesk Revit“ modellierten Etage eines Einfamilienhauses wurden kalkulatorische Verfahrensvergleiche gegenüber dem Mauerwerksbau durchgeführt. Ein einschlägiger Grundrissplan der Beispieltage ist in Abbildung 2.47 gezeigt.

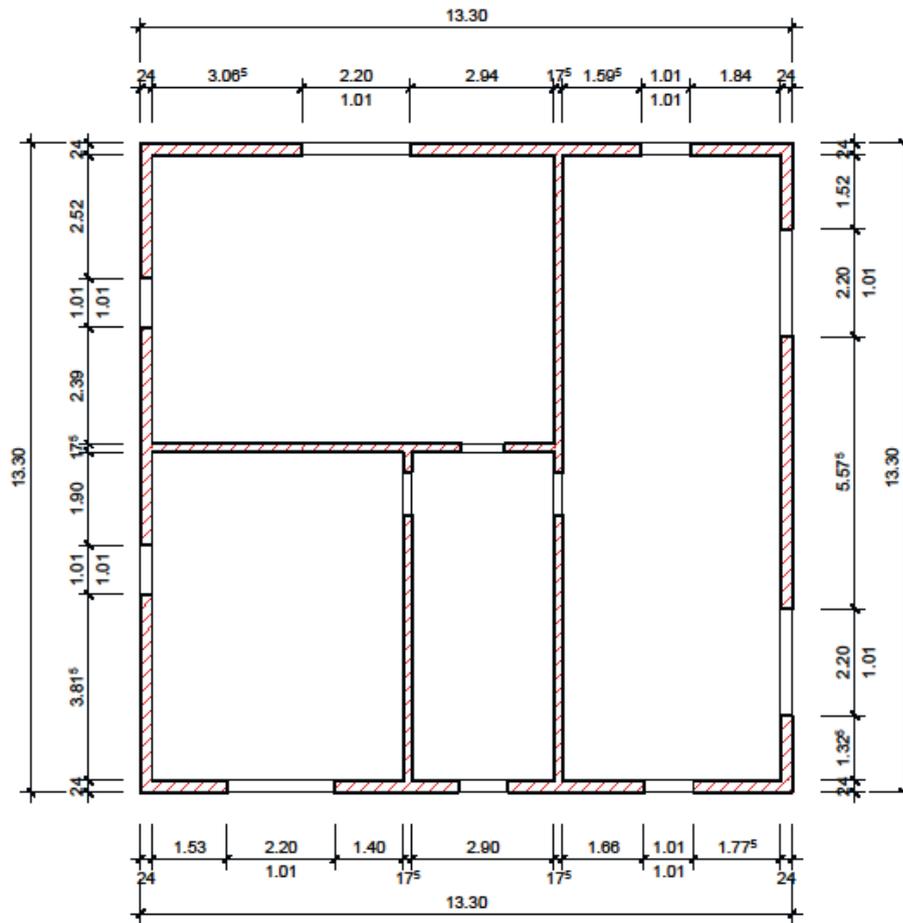


Abbildung 2.47: Grundrissplan der betrachteten Beispieltage eines Einfamilienhauses

Zunächst wurde eine Mengenermittlung für die Mauerwerksarbeiten durchgeführt. Dazu wurde eine Geschosshöhe von 3,0 m angenommen. Für die anschließende Ermittlung der Ausführungszeiten und Baukosten der Mauerwerksarbeiten wurden Kennwerte aus BKI<sup>2</sup> 2015 verwendet. Als Material wurden großformatige Kalksandsteine gewählt. Die Tabelle 2.13 zeigt die Ausführungszeiten und Baukosten für eine konventionelle Erstellung der Wände aus Kalksandstein-Mauerwerk.

Tabelle 2.13: Ausführungszeiten und Baukosten für die Mauerwerksarbeiten der Beispieltage

Position	Menge	ME	aus BKI h/ME	Zeit [h]	aus BKI €/ME <sup>3</sup>	Kosten <sub>gesamt</sub>
Außenwand KS L-R 24cm, tragend	156,90	m <sup>2</sup>	0,60	94,14	59,18	9.285,34 €
Innenwand KS L-R 17,5cm, tragend	82,49	m <sup>2</sup>	0,50	41,25	48,71	4.018,09 €
				<b>135,39 h</b>		<b>13.303,43 €</b>

<sup>2</sup> Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern

<sup>3</sup> Bei den BKI-Kennwerten handelt es sich um Baupreise inkl. Mehrwertsteuer. Die in Tabelle 2.13 angegebenen Werte sind Netto-Preise, die Mehrwertsteuer i. H. v. 19% wurde abgezogen. Die Gesamtbetrachtung erfolgt aus Bauherrensicht. Folglich werden die angegebenen Netto-Preise als Netto-Kosten angesehen werden.

Die Maurerarbeiten werden im Bereich des Einfamilienhausbaus in der Regel durch eine Maurerkolonne erledigt, die aus 3 Facharbeitern besteht. Die Maurerkolonne wird rund 5 bis 6 Arbeitstage (136h / (3 AK\*8,0 h)) benötigen, um diese Arbeiten auszuführen. Die Gesamtkosten betragen dabei netto rund 13.300,- €.

Nachfolgend wird zunächst auf die terminlichen Potenziale von CONPrint3D® eingegangen. Abbildung 2.48 zeigt eine mögliche Druckreihenfolge, nach der im CONPrint3D®-Verfahren Schicht für Schicht der Beton ausgebracht wird, bis die endgültige Höhe von 3,0 m erreicht ist.

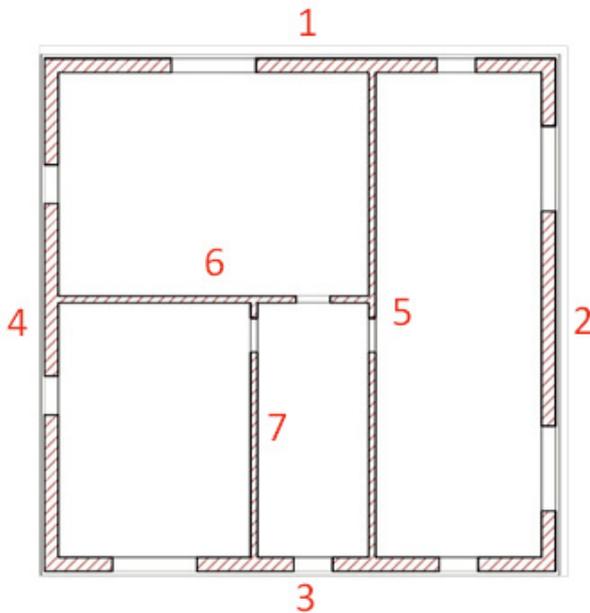


Abbildung 2.48: Mögliche Druckreihenfolge für die Beispieltage

Durch den CONPrint3D® Versuchsstand konnten im laufenden Projekt belastbare Eingangsparameter für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen definiert werden. So konnten beispielsweise Ausführungsgeschwindigkeiten und Schichthöhen abgesichert werden. Problemlos erreichbar sind Schichthöhen von 50 mm und Betoniergeschwindigkeiten von 150 mm/s.<sup>4</sup> Die Wände werden in der erforderlichen Dicke als Wandvollprofil erzeugt. Daraus ergibt sich beim CONPrint3D®-Verfahren eine Ausführungszeit für die gegebene Beispieltage von insgesamt 9,6 Stunden. Für die Berechnung wurden außerdem Annahmen für Umsetzzeiten, Wartezeiten und Justierzeiten integriert, die anhand von Vorversuchen am CONPrint3D®-Versuchsstand ermittelt wurden. Die Ausführungszeit könnte damit signifikant von 6 Arbeitstagen auf rund einen oder 1 ½ Arbeitstage einschließlich notwendiger Rüstzeiten (Positionierung, Kalibrierung, Justierung, etc.) und Reinigungszeiten gesenkt werden. Die Herstellzeit für die Wände eines Geschosses sind somit 4- bis 6-mal geringer. Durch die sehr schnelle Erstarrung des Betons sind die nachfolgenden Arbeiten (Geschossdecken und Rohbauarbeiten der weiteren Etagen) ohne Verzögerungen und Wartezeiten ausführbar. Die Projektbeteiligten sind davon überzeugt, dass weitere Reduzierungen der Ausführungszeit durch Erhöhung der Schichtdicke oder Betoniergeschwindigkeit realisierbar sind. Eine Verdopplung der Schichtdicke auf 10,0 cm würde eine Halbierung der Ausführungszeit zur Folge haben.

<sup>4</sup> 150 mm/s sind umgerechnet 9 m/min oder 540 m/h. Bei Schichthöhen von 0,05 m und Wanddicken von 0,24 m folgt eine mittlere Betoniergeschwindigkeit von rund 6,5 m<sup>3</sup>/h.

Anschließend wurden die Baukosten von CONPrint3D® am genannten Beispiel untersucht. Bei einer Schichthöhe von 5,0 cm und einer Betoniergeschwindigkeit von 150 mm/s ergibt sich eine Ausführungszeit von rund 10,0 h. Diese Ausführungszeit liegt der nachfolgenden Kostenbetrachtung zugrunde. Beim CONPrint3D-Verfahren fallen Lohn-, Geräte- und Materialkosten sowie Sonstige Kosten an. Die Lohnkosten werden gegenüber dem Mauerwerksbau signifikant gesenkt. Es ist lediglich eine Aufsichtsperson zur Überwachung und eventuell ein Helfer erforderlich. Bei den Gerätekosten sind Annahmen für die Investitionskosten der Gerätesteuerung und des Druckkopfes erforderlich. Mit den Ansätzen der Baugeräteliste (BGL 2015) wurden Kennwerte zur Abschreibung und Verzinsung (A+V) sowie der Reparatur (R) für die Maschine ermittelt. Auf der Basis einer Autobetonpumpe einschließlich zusätzlicher Kosten für den Druckkopf in Höhe von 50.000,- € und der Steuerung in Höhe von 100.000,- € ergeben sich anzusetzende Kosten für A+V+R von 140,- €/h. Im Bereich der Materialkosten (Kosten des Transportbetons) wurden Kostenannahmen getroffen, die mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit nicht überschritten werden. Der hohe Ansatz von 130,- €/m<sup>3</sup> (doppelte Kosten für Transportbeton der Festigkeit C25/30) ist mit dem erhöhten Einsatz von Zusatzmitteln (Fließmittel, Beschleuniger) zu begründen. Außerdem beinhaltet der Ansatz einen Zuschlag für die längere Wartezeit des Mischerfahrers. Die zuvor durchgeführte Mengenermittlung an der Beispieletage hat ein Gesamtbetonvolumen von 52,3 m<sup>3</sup> ergeben, vorausgesetzt die 3D-gedruckten Betonwände werden in der gleichen Dicke wie die Mauerwerkswände erstellt. Bei den Sonstigen Kosten kann eine Pauschale von circa 10 % der Gesamtkosten angenommen werden. In Tabelle 2.14 werden die Ergebnisse der Kostenbetrachtung vergleichend dargestellt.

Tabelle 2.14: Kostenvergleich am Beispiel der modellierten Etage eines Einfamilienhauses

Kostenart	Mauerwerksarbeiten Kosten netto	Mauerwerksarbeiten Ansatz	CONPrint3D® Kosten netto	Ansatz CONPrint3D®
Lohn	4.080,- €	136,0 h x 30,- €/h * <sup>5</sup>	700,- €	10,0 h x 26,- €/h + 10,0 h x 44,- €/h * <sup>6</sup>
Material	8.580,- €	(151,67 €/m <sup>3</sup> (Kalksandstein) + 12,38 €/m <sup>3</sup> (Kleber mit Mörtelschlitten)) * <sup>7</sup> x 52,3 m <sup>3</sup>	6.800,- €	52,3 m <sup>3</sup> x 130,- €/m <sup>3</sup> * <sup>8</sup>
Gerät	640,- €	Versetzkrane für MW-Arbeiten: 6 AT x 106,90 €/AT * <sup>9</sup>	1.700,- €	10,0 h *140,- €/h + 300,- € * <sup>10</sup>
SoKo			1.000,- €	≈ 10 % der Gesamtkosten
	<b><u>13.300,- €</u></b>		<b><u>10.200,- €</u></b>	

Die Kostenbetrachtung ergibt ein Einsparpotenzial von circa 25 %. Die größten Einsparungen werden im Bereich der Lohnkosten erzielt. Die erheblich verkürzte Bauzeit von CONPrint3D® hat auch zur Folge, dass die Kosten der Baustelleneinrichtung und deren Vorhaltung wesentlich verringert werden können. Ein weiterer Vorteil der Technologie ist es, dass der Rohbau im Prinzip ohne Gerüste und Hochbaukränen (mit Ausnahme des temporären

<sup>5</sup> Ansatz aus BKI 2015 (Nettowert) für Facharbeiter Maurer

<sup>6</sup> Ansatz aus BKI 2015 (Nettowert) für Helfer und Annahme für überwachende Person

<sup>7</sup> KS-L-R 8 DF 240 mm inkl. Lieferung (Kranzug entladen, verpackt) gemäß Preisliste KS-Original:  
36,40 €/m<sup>2</sup> / 0,24 m = 151,67 €/m<sup>3</sup>, 60 l/m<sup>3</sup> Mörtelbedarf

<sup>8</sup> Die längere Wartezeit des Mischerfahrers ist im Ansatz berücksichtigt.

<sup>9</sup> Aus BGL 2015: Kleinkran C.2.00.0007 für A+V+R (mittlerer Satz)

<sup>10</sup> Anfahrtspauschale von 300,- €; Vorhaltestunde ABP mit Druckkopf und Steuerung 140,- €/h

Einsatzes von Mobilkränen, zum Beispiel zur Verlegung von Halbfertigteildecken) errichtet werden kann. Diese Kostenminderungen blieben an diesem Beispiel noch unberücksichtigt.

#### 2.4.4 Anwendung und Marktpotenziale von CONPrint3D®

Innerhalb des Projekts wurden zu Beginn des Projekts Anwendungsszenarien von CONPrint3D® untersucht und definiert. Anschließend wurde eingrenzend festgelegt, dass innerhalb des Projekts vorerst die Fertigung von Mauerwerkswänden vertiefend betrachtet werden soll. Die Wandbauweise wird vorrangig im Wohnungsbau, in reduziertem Maße auch bei Wohn- und Geschäftsgebäuden, Büro- und Hotelgebäuden bis maximal 5-geschossig angewendet. Die tragenden Wände werden bei diesen Bauwerken in der Regel aus Mauerwerk hergestellt. Zur Analyse des Marktpotenzials wurden die Baugenehmigungen im Hochbau 2014 analysiert. Grundlage stellten die Kennwerte des Statistischen Bundesamtes dar. Analysiert wurden dabei die Neubauten von Wohngebäuden. Die spezifischen Kennwerte geben Aufschluss darüber, welche Baustoffe überwiegend verwendet wurden. In Tabelle 2.15 sind die Baugenehmigungen für das Jahr 2014 im Bereich Neubau / Wohngebäude, aufgeschlüsselt nach den überwiegend verwendeten Baustoffen, dargestellt.

Tabelle 2.15: Baugenehmigungen in Deutschland 2014: verwendete Baustoffe von Wohngebäuden

Genehmigungen Neubau / Wohngebäude gesamt	Überwiegend verwendete Baustoffe						
	Ziegel	Kalksand- stein	Porenbe- ton	Holz	Stahlbeton	Leichtbe- ton	Sonstige
111.610	34.683	24.898	20.334	16.823	8.891	4.108	1.873
100,0%	<b>31,1%</b>	<b>22,3%</b>	<b>18,2%</b>	15,1%	8,0%	<b>3,7%</b>	1,6%

Demnach werden circa 75,3 % der Wände im Wohnungsbau in Deutschland gemauert (in Tabelle fett gedruckte Werte: 31,1 % Ziegel, 22,3 % Kalksandstein, 18,2 % Porenbeton, 3,7 % Leichtbeton). Aus den Kennwerten der Baugenehmigungen<sup>11</sup> kann grob abgeschätzt werden, dass jährlich circa 40.000.000 m<sup>2</sup> tragende Wandfläche in Deutschland durch Mauerwerk erstellt wird. Diese Mauerwerksarbeiten können durch das CONPrint3D®-Verfahren ersetzt werden. Selbst wenn ideell davon nur 1,0 % ersetzt werden, ergeben sich bei 400.000 m<sup>2</sup> tragende Wandfläche aktuell Netto-Baukosten von circa 22.000.000 Euro. Diese Zahlen belegen, dass ein bedeutungsvolles Marktpotenzial allein für das Szenario „Ersatz von Mauerwerksbau“ besteht.

Ein weiteres Anwendungsfeld mit großem Marktpotenzial wird in der Möglichkeit gesehen, frei geformte Bauteile schalungsfrei herzustellen. Dies wird speziell den Architekten neue Möglichkeiten in der Gestaltung von Bauteilen und Bauwerken eröffnen. Speziell für dieses Anwendungsfeld sind hohe Kostenreduktionspotenziale denkbar. Mit konventionellen Bau-

<sup>11</sup> Die Statistiken der Baugenehmigungen 2014 ergeben, dass mit Hilfe der gemauerten Baustoffe jährlich eine Wohn- und Nutzfläche von 24.500.000 m<sup>2</sup> errichtet wird. An mehreren Grundrissen wurde daraufhin ermittelt, wie hoch der Anteil an tragender Wandfläche im Verhältnis zur Wohn- und Nutzfläche ist. Die Ergebnisse liegen bei 1,5 bis 1,7 m<sup>2</sup><sub>tr. Wandfl.</sub> / m<sup>2</sup><sub>Wohn- und Nutzfl.</sub>. Der Faktor ist ein selbst ermittelter Wert.

verfahren sind runde oder geschwungene Bauteilgeometrien nur mit Hilfe kostenintensiver Schalungen realisierbar.

Im laufenden Projekt konnten für CONPrint3D® eine signifikante Reduzierung der Ausführungszeit sowie Kosteneinsparungen i. H. v. circa 25 % gegenüber dem Mauerwerksbau aufgezeigt werden. Im Vergleich zum konventionellen Ortbetonbau sind noch größere Kosteneinsparungen zu erwarten, da erforderliche Gerüste und die Schalung (Gesamtkostenanteil von etwa 35% der Rohbaukosten) entfallen. Bei diesem Anwendungsfall ist jedoch der Einbau von Bewehrung beim CONPrint3D®-Verfahren noch zu klären. Das Bauwesen ist hinsichtlich der Einführung von Innovationen bedingt durch Fragen der Zulassung und Genehmigung, der Normen sowie wegen der Sicherheit und der Forderung, dass der Bauunternehmer die „anerkannten Regeln der Technik“ einzuhalten hat, eine eher konservative Branche. Sollten sich allerdings wirtschaftliche Einsparpotenziale ergeben, kann eine Eigendynamik entstehen, die ein Verfahren schnell marktzugänglich macht. Diese wirtschaftlichen Einsparpotenziale sind aus Sicht der Bearbeiter bei CONPrint3D in hohem Maß vorhanden.

### 3 Übersicht der Veröffentlichungen

#### 3.1 Tagungsbände

- [1] Krause, Martin:  
„Beton-3D-Druck: Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton“  
In: *Tagungsband zum 26. BBB-Assistententreffen, Fachkongress der wissenschaftlichen Mitarbeiter der Bereiche Baubetrieb, Bauwirtschaft und Bauverfahrenstechnik, 17. bis 19. Juni 2015, Universität Stuttgart, 2015, S. 135-149, ISBN: 978-3-9814355-7-3.*
- [2] Mechtcherine, Viktor; Nerella, Venkatesh Naidu  
“Formwork-free , continuous , monolithic construction using Concrete 3D Printing Feasibility study / Kontinuierliches , schalungsfreies Bauverfahren durch 3D-Druck mit Beton Machbarkeitsuntersuchung,”  
In: *BFT Int. (Proceedings 60. BetonTage, ULM), vol. 02, pp. 150–152, 2016.*

#### 3.2 Zeitschriften

- [1] Nerella, Venkatesh Naidu; Krause, Martin; Näther, Mathias; Mechtcherine, Viktor:  
“Studying printability of fresh concrete for formwork free Concrete on-site 3D Printing technology (CONPrint3D)”  
In: *25th Conference on Rheology of Building Materials, Conference Transcript, At Regensburg, Germany, Tredition GmbH, Hamburg, Regensburg, 236–246.*
- [2] Nerella, Venkatesh Naidu; Krause, Martin; Näther, Mathias; Mechtcherine, Viktor  
„CONPrint3D: 3D-Drucktechnologie für die Baustelle“  
In: *opusC, vol. 03, 2016.*
- [3] Nerella, Venkatesh Naidu; Krause, Martin; Näther, Mathias; Mechtcherine, Viktor  
„3D-Druck-Technologie für die Baustelle - Interdisziplinäres Forschungsprojekt der TU Dresden“  
In: *Concr. Plant Int. / Betonw. Int., vol. 4, 2016.*
- [4] Näther, M.; Weber, J.; Nerella, V.; Mechtcherine, V.; Krause, M.; Schach, R.:  
„Beton-3D-Druck – Wissenschaftler der TU Dresden entwickeln 3D-Druckverfahren mit Beton“  
In: *WISSENSPORTAL baumaschine.de, Ausgabe 1/2016*  
<https://www.baumaschine.de/baumaschine/2016-01.html>

#### 3.3 Vorträge

- [1] Mechtcherine, Viktor  
“Formwork-free , continuous , monolithic construction using Concrete 3D Printing Feasibility study / Kontinuierliches , schalungsfreies Bauverfahren durch 3D-Druck mit Beton Machbarkeitsuntersuchung,” *Proceedings 60. BetonTage, ULM, 23. - 25. Februar 2016*

- [2] Krause, Martin  
 „Beton-3D-Druck: Die Innovation im Ortbetonbau“  
 Präsentationen der VDMA Innovationspreisträger 2016, Preisträger in der Kategorie Forschung, *Vortrag im bauma FORUM, 11. April 2016, bauma Messe München 11. bis 17. April 2016*
- [3] Krause, Martin; Näther, Mathias; Nerella, Venkatesh Naidu  
 „CONPrint3D: 3D-Druck mit Beton als innovatives Ortbetonbauverfahren“  
*Vortrag im bauma FORUM, 13. April 2016, bauma Messe München 11. bis 17. April 2016*
- [4] Krause, Martin  
 „CONPrint3D: Beton-3D-Druck als Innovation im Ortbetonbau“  
*Vortrag zum 27. BBB-Assistententreffen, 19. Mai 2016, Fachkongress der wissenschaftlichen Mitarbeiter der Bereiche Baubetrieb, Bauwirtschaft und Bauverfahrenstechnik, 18. bis . 20. Mai 2015, Technische Universität Dresden*

### 3.4 Pressemitteilungen

Datum	Quelle	Titel & Link
11.04.16	Homepage der Fakultät MW, TU Dresden	TU Dresden räumt zwei Preise auf weltgrößter Messe für Baumaschinen ab <a href="https://tu-dresden.de/tu-dresden/newsportal/news/haeuser-werden-in-zukunft-3d-gedruckt-tu-dresden-raeumt-zwei-preise-auf-weltgroesster-messe-fuer-baumaschinen-ab">https://tu-dresden.de/tu-dresden/newsportal/news/haeuser-werden-in-zukunft-3d-gedruckt-tu-dresden-raeumt-zwei-preise-auf-weltgroesster-messe-fuer-baumaschinen-ab</a>
11.04.16	VDMA	bauma-Innovationspreis für sechs Unternehmen und Forschungseinrichtungen <a href="http://www.vdma.org/article/-/articleview/12874287">http://www.vdma.org/article/-/articleview/12874287</a>
11.04.16	Soll Galabau	bauma Innovationspreis - Die sechs Gewinner stehen fest <a href="http://www.soll-galabau.de/aktuelle-news/ansicht-aktuelles/datum/2016/04/11/bauma-innovationspreis-die-sechs-gewinner-stehen-fest.html">http://www.soll-galabau.de/aktuelle-news/ansicht-aktuelles/datum/2016/04/11/bauma-innovationspreis-die-sechs-gewinner-stehen-fest.html</a>
11.04.16	Tradelink Publications Ltd.	bauma Innovation Award- six winners chosen <a href="http://www.mqworld.com/2016/04/11/bauma-innovation-award-six-winners-chosen/">www.mqworld.com/2016/04/11/bauma-innovation-award-six-winners-chosen/</a>
11.04.16	Oiger.de	Häuser aus dem 3D-Drucker <a href="http://oiger.de/2016/04/11/haeuser-aus-dem-3d-drucker/159090">http://oiger.de/2016/04/11/haeuser-aus-dem-3d-drucker/159090</a>
11.04.16	Industry Europe	bauma Innovation Awards for six companies and research institutions <a href="http://www.industryeurope.net/Article/9517/bauma-Innovation-Awards-for-six-companies-and-research-institutions/">http://www.industryeurope.net/Article/9517/bauma-Innovation-Awards-for-six-companies-and-research-institutions/</a>
11.04.16	OEM Off-Highway	Winners Announced for bauma Innovation Awards <a href="http://www.oemoffhighway.com/news/12192957/winners-announced-for-bauma-innovation-awards">http://www.oemoffhighway.com/news/12192957/winners-announced-for-bauma-innovation-awards</a>
12.04.16	B&I – Betriebstechnik und Instandhaltung	Gewinner des bauma Innovationspreises <a href="http://www.b-und-i.de/index.php/gewinner-des-bauma-innovationspreises/">http://www.b-und-i.de/index.php/gewinner-des-bauma-innovationspreises/</a>
13.04.16	Logistik-Journal	Innovationspreis verliehen <a href="http://www.logistik-journal.de/index.cfm?pid=1667&amp;pk=164055#.VxD4DnovvHo">http://www.logistik-journal.de/index.cfm?pid=1667&amp;pk=164055#.VxD4DnovvHo</a>
13.04.16	Bauforum24	Preisverleihung des bauma Innovationspreises <a href="http://www.bauforum24.biz/news/bauma/fotostrecke-bauma-innovationspreis-2016-r6244/">http://www.bauforum24.biz/news/bauma/fotostrecke-bauma-innovationspreis-2016-r6244/</a>
14.04.16	For Construction Pros	Winners Announced for bauma Innovation Awards <a href="http://www.forconstructionpros.com/news/12194820/winners-announced-for-bauma-innovation-awards">http://www.forconstructionpros.com/news/12194820/winners-announced-for-bauma-innovation-awards</a>

17.04.16	Bayerischer Rundfunk: Rundschau	Fernsehbeitrag in der BR-Rundschau vom 17.04.16 <a href="http://www.br.de/mediathek/video/sendungen/nachrichten/sendung-vom-17042016_x-100.html">http://www.br.de/mediathek/video/sendungen/nachrichten/sendung-vom-17042016_x-100.html</a>
18.04.16	Springer Professional	3D-Druck von Beton direkt auf der Baustelle <a href="https://www.springerprofessional.de/baubetrieb/mauerwerksbau/3d-druck-von-beton-direkt-auf-der-baustelle/10016914">https://www.springerprofessional.de/baubetrieb/mauerwerksbau/3d-druck-von-beton-direkt-auf-der-baustelle/10016914</a>
19.04.16	3Druck.com	3D-Druck mit Beton: TU Dresden gewinnt bauma Innovationspreis <a href="https://3druck.com/pressemeldungen/3d-druck-mit-beton-tu-dresden-gewinnt-bauma-innovationspreis-0344106/">https://3druck.com/pressemeldungen/3d-druck-mit-beton-tu-dresden-gewinnt-bauma-innovationspreis-0344106/</a>
22.04.16	Ingenieurnachrichten	Häuser werden in Zukunft 3D-gedruckt <a href="http://ingenieurnachrichten.de/index.php/2016/04/22/haeuser-werden-in-zukunft-3d-gedruckt/">http://ingenieurnachrichten.de/index.php/2016/04/22/haeuser-werden-in-zukunft-3d-gedruckt/</a>
01.06.16	Nord Handwerk	Maurer erwartet digitale Konkurrenz <a href="http://www.nord-handwerk.de/region/nordhandwerk-themen/maurer-erwartet-digitale-konkurrenz">http://www.nord-handwerk.de/region/nordhandwerk-themen/maurer-erwartet-digitale-konkurrenz</a>

## 4 Ausblick

### 4.1 Baustoffentwicklung

Auf Grundlage der entwickelten, experimentellen Methoden und der erlangten Ergebnisse, beschrieben in Abschnitt 2, sind folgende weitere Schritte geplant:

Die Ausweitung CONPrint3D Technologie auf neue Materialien und Anwendungen, zum Bsp. 3D-Druck mit Schaumbetonen. Die schalungsfreie Formung von pumpbaren Konstruktions-Schaumbetonen soll die Herstellung von leichten, tragenden Gebäudewänden mit geringem Wärmedurchgang auf der Baustelle (oder auch im Fertigteilwerk) revolutionieren. Bisher werden derartige Wände diskontinuierlich in Handarbeit aus Mauerwerk (Hochlochziegel, Porenbetonsteine) gefertigt. Die weiterführende Studie dazu soll im Rahmen des beantragten „Zukunft Bau“ Folgeprojekt (Aktenzeichen: F20-16-1-095) mit dem Titel „CON-Print3D-Ultralight – Herstellung monolithischer, tragender Wandkonstruktionen mit sehr hoher Wärmedämmung durch schalungsfreie Formung von Schaumbeton“ ausgeführt werden. Mit Hilfe von gedrucktem Schaumbeton sollen Wände mit deutlich geringerem Personaleinsatz und niedrigeren Kosten kontinuierlich gefertigt werden können. Durch die gezielte Einstellung des Luftgehaltes im Schaumbeton sollen sowohl die Tragfähigkeit der Wand, als auch deren bauphysikalische Eigenschaften variiert werden, sodass diese den derzeitigen Mauerwerkstypen entsprechen.

Die Erweiterung des Versuchstandes sowie des Druckkopfes für Beton-3D-Druck mit einem Größtkorn von bis zu 16 mm. Diese Erweiterung soll in zwei Schritten stattfinden. Zunächst ist der Beton-3D-Druck mit einem Größtkorn von bis zu 8 mm geplant. Dieses Ziel sollte bis April 2017 erreicht werden. Die bisherige Einschränkung nicht mit einer Korngröße größer 2 mm drucken zu können, schränkte auch die Auswahl der bisher entwickelten Mischungen ein. Als Teil des aktuellen Projektes wurde, auf Grundlage der Ergebnisse der experimentellen Studien, die Basisrezeptur eines druckbaren Betons mit 8 mm Größtkorn entwickelt (siehe Tabelle A-1 in Anlage 4). Diese und weitere Mischungen werden nach der Erweiterung des Versuchsstandes intensiv getestet.

Geplant ist auch die Weiterentwicklung der Prüfmethoden, z. B. Zugfestigkeitsprüfung, quantitative Extrudierbarkeitsprüfung zur Materialcharakterisierung 3D-druckbarer Betone und experimentelle Untersuchungen zur Thixotropie des Frischbetons (siehe Anlage 5) mit dem ConTec Viscometer.

### 4.2 Maschinenentwicklung

Der Fokus künftiger Arbeiten auf maschineller Ebene liegt auf der Weiterentwicklung des Druckkopfes. In diesem Zusammenhang gilt es vor allem, optimierte Lösungen für die Extrusions- und Dosiertechnik für Betone mit unterschiedlichen und teilweise gegensätzlichen Eigenschaften zu erarbeiten (vgl. Abschnitt 4.1). Durch stufenweisen Um- und Ausbau des vorhandenen Versuchstandes sollen verschiedene Extrusions- bzw. Förderprinzipien getestet und optimiert werden. Mit großer Wahrscheinlichkeit ist diesbezüglich auch die Entwicklung von Sonderlösungen in Zusammenarbeit mit Komponentenherstellern erforderlich.

In weiteren Schritten ist die Entwicklung und Erprobung von Mechanismen für das Formungs- und Positioniersystem geplant. Dabei sollen ausgewählte Varianten zunächst in einfachen Versuchsaufbauten getestet und bewertet werden. Die inhaltlichen Schwerpunkte liegen auf folgenden Themen:

- Test geeigneter Sensorik für die Positionserfassung
- Erprobung und Optimierung des Bewegungsmechanismus
- Erprobung geeigneter Aktoren
- Optimierung der Formungssysteme im Zusammenspiel mit unterschiedlichen Betonrezepturen.

Mit der anschließenden Erprobung der bevorzugten Lösung am Versuchsstand soll die prinzipielle Eignung für die 3D-Drucktechnologie nachgewiesen werden.

### 4.3 Optimierte Druckstrategien und Datenmanagement

Der Planungsprozess im Bauwesen wird zunehmend digitalisiert. Die Methode des Building Information Modeling (BIM) gewinnt immer mehr an Bedeutung. Durch die Einführung von BIM erhofft sich die Fachwelt vor allem Verbesserungen im Informations- und Wissensmanagement sowie in der Planungstiefe und in der Kommunikation der Beteiligten. Als Basis einer BIM-basierten Planung wird immer ein 3D-Gebäudemodell erstellt. Dieses Modell kann dazu genutzt werden, um daraus die notwendigen Steuerungsdaten für das CONPrint3D<sup>®</sup>-Verfahren zu generieren. Eine effiziente Wertschöpfungskette wird damit sichergestellt. CONPrint3D<sup>®</sup> würde den ganzheitlichen Ansatz von BIM in einer besonderen Weise vervollständigen, da hiermit der wichtige Schritt von der digitalen Planung zur digitalen Fertigung im Bauwesen vollzogen werden kann. Bei der Überführung der Daten aus dem Gebäudemodell in druckfähige Maschinensteuerungsdaten ist der Prozess des „Slicing“ von wesentlicher Relevanz. Die Druckpfade, die Schicht für Schicht erzeugt werden, sind zur wirtschaftlichen Durchführung von CONPrint3D<sup>®</sup> zu optimieren. Dabei sind im Speziellen die Druck-, Pausen-, Justier- und Umsetzzeiten möglichst zu minimieren. Eckbereiche und Wandverbindungen sind kraftschlüssig herzustellen. Öffnungen, wie Fenster und Türen oder Aussparungen für die spätere Leitungsverlegung sind zu integrieren. Die Entwicklung und Optimierung von 3D-Druckstrategien und die Untersuchungen zum BIM-basierten Datenmanagement von CONPrint3D<sup>®</sup> stellen einen weiteren, wichtigen Teil nachfolgender Forschungsaktivitäten dar.

### 4.4 Praktischer Nachweis im Originalmaßstab

Mit dem aktuellen Projekt wurde die theoretische Basis für die neue Technologie geschaffen. Zudem konnten wichtige Schlüsselemente in Laborversuchen erprobt werden. Aus Sicht der Projektbeteiligten ist die Weiterführung der Forschungsarbeiten von CONPrint3D<sup>®</sup> unabdingbar. Ein langfristiges Ziel ist es, die entwickelten Lösungen und Konzepte in Form eines Druckkopf-Demonstrators praktisch umzusetzen. Der Demonstrator soll es ermöglichen 3D-gedruckte Betonbauteile im Originalmaßstab herzustellen. So sollen Betonbauteile und ganze Bauwerksabschnitte mit Wanddicken von 100 mm bis 400 mm gedruckt werden können. Im Abschnitt 2.4.3 wurden die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen und die besonderen Einsparpotenziale des CONPrint3D-Verfahrens aufgezeigt. Die darin ge-

troffenen Annahmen (Druckgeschwindigkeit, Wandbreite, erreichbare Schichtdicke etc.) und die Kostenrechnung sollen durch die praktischen Versuche nachgewiesen werden. Für den abschließenden Funktionsnachweis wird angestrebt, ein Versuchsbauwerk von den Abmessungen einer größeren Garage (ca. 5,0 m x 3,0 m x 3,0 m) unter Baustellenbedingungen mit der CONPrint3D®-Technologie zu errichten. Mit diesem Nachweis sollen interessierte Unternehmen überzeugt werden, in die neue Technologie zu investieren und CONPrint3D® zur Serienreife weiterzuentwickeln. Die Prozessoptimierung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist dabei von besonderer Bedeutung, um das Verfahren möglichst schnell marktfähig zu machen.

## Quellenverzeichnis

- [ALW13] Alwi, A./Karayiannis, S./Starkey, B./Gardner, M./Reodique, K./Varley, T.: Construction MegaScale 3D Printing – Group 1. University of Surrey, 2013.
- [AUG16] August – Raum für Design e. V.; Dresden, Jan. 2016
- [BUS07] Buswell, R. a., Soar, R. C., Gibb, a. G. F., & Thorpe, a. (2007). Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction. *Automation in Construction*, 16(2), 224–231. doi:10.1016/j.autcon.2006.05.002
- [BUS08] Buswell, R.A./Thorpe, A./Soar, R.C./Gibb, A.G.F. (2008): Design, data and process issues for mega-scale rapid manufacturing machines used for construction. In: *Automation in Construction*, 17 (8): 923–929, DOI: 10.1016/j.autcon.2008.03.001.
- [DIN15] Dini, E., & Monolite-UK-Ltd. (2015). D-Shape - steriolithography 3-D printing technology. Retrieved August 23, 2015, from <http://www.d-shape.com/cose.htm>
- [HAE16] Häberlein, M.: Übersicht Extruderbauarten; 15.09.2016; [www.mhaeberl.de](http://www.mhaeberl.de),
- [HEN16] Henke, K.: Additive Baufertigung durch Extrusion von Holzleichtbeton, Technische Universität München, 2016.
- [ING16] Internetquelle [www.ingenieur.de](http://www.ingenieur.de):  
<http://www.ingenieur.de/Themen/3D-Druck/Das-Buerogebaeude-3D-Drucker-steht-in-Dubai> (Meldung vom 27.05.2016, Stand: 14.09.16)
- [IMP16] Internetquelle [imprimere.ch](http://imprimere.ch)  
Imprimere AG.: <http://imprimere.ch/>. [Stand: 25.03.2016].
- [IPA10] Fraunhofer IPA: Paralleler Seilroboter zur Handhabung in allen Größen; Informationsblatt 06.09/05.10; Stuttgart 2010
- [KHO06] Khoshnevis, B., Hwang, D., Yao, K.-T., & Yeh, Z. (2006). Mega-scale fabrication by contour crafting. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 1(3), 301–320.
- [KHO07] Khoshnevis, B. (2007). Extruded wall with rib-like interior. 27. USA.
- [KHO09] Khoshnevis, B. (2009). Contour Crafting extrusion nozzles. 16. USA.
- [KHO13] Khoshnevis, B. Extrusion of cementitious material with different leveling characteristics. 14., Pub. L. No. US2013059025A1 (2013).
- [KHO16] Internetquelle [www.contourcrafting.org/](http://www.contourcrafting.org/)  
Khoshnevis: Contour Crafting. <http://www.contourcrafting.org/high-resolution-photographs/>. [Stand: 05.07.2016].
- [KRA15] M. Krause: Beton-3D-Druck: Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton; Fachbeitrag 26.BBB-Assistententreffen, 17.-19.06.2015 – Tagungsband; Universität Stuttgart, ISBN: 978-3-9814355-7-3
- [LE12] Le, T. T., Austin, S. a., Lim, S., Buswell, R. a., Gibb, a. G. F., & Thorpe, T. (2012). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials*

and Structures, 45(8), 1221–1232.

- [LE12A] Le, T. T., Austin, S. a., Lim, S., Buswell, R. a., Law, R., Gibb, a. G. F., & Thorpe, T. (2012). Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*, 42(3), 558–566.
- [LYN11] Lynch, M. J. (2011). Investigation of Chemical Admixture Interactions in the Development of Printable Concrete. *The UNSW Canberra at ADFA Journal of Undergraduate Engineering Research*, 4(1), 1–20.
- [MEC14] Mechtcherine, V., Nerella, V. N., & Kasten, K. (2014). Testing pumpability of concrete using Sliding Pipe Rheometer. *Construction and Building Materials*, 53, 312–323.
- [MOD12] K.-H. Modler: Umdruck zum Fach Getriebetechnik, TU Dresden, IFKM, Professur für Getriebelehre (2012)
- [NER15] Nerella, V. N., Secrieru, E. and Mechtcherine, V. (2015). “Experimental study on influence of lubricating layer on pumping pressure using Sliding Pipe Rheometer (SLIPER),” in 19th International Conference on Building Materials – ibausil, Weimar, 2015, pp. 1–1247–1254.
- [NER15A] Nerella, V. N., Secrieru, E. and Mechtcherine, V. (2015). “Rheological behaviour of fresh concrete in continuous pumping and circuit-breakdown cases. Part 1: Principals and experimental program,” *Concr. Plant Int.*, vol. 5, pp. 222–226, 2015.
- [NER16] Nerella, V. N., Krause, M., Näther, M., and Mechtcherine, V. (2016). “Studying printability of fresh concrete for formwork free Concrete on-site 3D Printing technology ( CONPrint3D ).” *25th Conference on Rheology of Building Materials, At Regensburg, Germany*, Tredition GmbH, Hamburg, Regensburg, 236–246
- [PER15] Perrot, A., Rangeard, D., & Pierre, A. (2015). Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Materials and Structures*.
- [PER15] Perrot, A., Rangeard, D., & Pierre, A. (2015). Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Materials and Structures*.
- [PER16] PERI GmbH, Weißenhorn: Internetauftritt Klettersysteme; 13.09.2016; <http://www.peri.com/de/produkte/ingenieurbauoesungen/klettersysteme/acs-selbstklettersystem.html>
- [PMA07] Putzmeister AG: Einsatzbericht Betonhochförderung am Burj Dubai; BP 3893; Aichtal 2007
- [PMC09] Putzmeister Concrete Pumps GmbH: RoLine Betonpumpe; BP 4271; Aichtal 2009
- [PMC16] Putzmeister Concrete Pumps GmbH: Autobetonpumpen – Die intelligenten Kraftpakete; BP 1700-24 DE; Aichtal 2016
- [PMW08] Putzmeister Concrete Pumps GmbH: Internetauftritt Pumpentechnik; 2008; [www.pmw.de](http://www.pmw.de)
- [POH84] Pohlenz, W.: Pumpen für Flüssigkeiten; 4. Aufl.; Verlag Technik; Berlin 1984
- [PPT01] University of Southern California: Contour Crafting - PowerPoint Präsentation “Robotics” (<http://www.contourcrafting.org/powerpoint-slides/>)

- [REI15] Reiter, L., Palacios, M., Wangler, T., & Flatt, R. J. (2015). Putting Concrete to Sleep and Waking It Up With Chemical Admixtures for Smart Dynamic Casting. In Eleventh International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete. Ottawa.
- [REI16] Reiff, E.-C.: Messaufbauten präzise positionieren; Onlinemagazin automationline.de; 19.09.2016;  
<http://www.automationline.de/messaufbauten-precise-positionieren>
- [RUZ85] Ruzicka, K. (1985). Einrichtung zur Herstellung von Bauteilen od. Gebaeuden mittels Rechengesteuerten Produktionsmaschinen- exn. 17. Germny.
- [SCH13] Schwarzer, K. (2013). Verfahren und Vorrichtung zum Schichtweisen Aufbau eines Formkorpers-exn. 59.
- [SCI05] L. Sciavicco, B. Siciliano: Modelling and Control of Robot Manipulators; 2. Aufl.; London, Springer-Verlag 2005
- [SEC14] Secieru, E., Butler, M., and Mechtcherine, V. (2014). "Prüfen der Pumpbarkeit von Beton – Vom Labor in die Praxis," Bautechnik, vol. 11, no. 91, pp. 797–811.
- [SHI14] Shilin, L. (2014). 3D printing method for building beam component-exn. 29.
- [STO16] Stocks, F.: Verlustarme Gülleausbringung, Folie 7; 16.09.2016; Präsentation veröffentlicht auf <http://slideplayer.org/slide/3971751>
- [TOT15] TotalKustom. (2015). "3D-Printed Hotel."  
<http://www.totalkustom.com/3d-printed-hotel-suite.html>> (Apr. 27, 2016).
- [TUE16] Internetquelle [www.tue.nl](http://www.tue.nl):  
TU Eindhoven starts using kingsize 3D concrete printer, 2016.  
<https://www.tue.nl/en/university/news-and-press/news/22-10-2015-tu-eindhoven-starts-using-kingsize-3d-concrete-printer/>. [Stand: 25.04.2016].
- [UNI13] University-of-Kassel. (2013). Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung eines Betonbauteiles, sowie ein nach dem Verfahren hergestelltes Betonbauteil-exn. 51. Germany.
- [WAN14] Wang, J., & Peng, Y. (2014). 3D printing composition as well as preparation method and applications-exn. 44.
- [WEB09] W. Weber: Industrieroboter; 2. Aufl.; München, Carl Hanser Verlag (2009)
- [WIE07] Wiedemann, T. (2007). Verfahren und Anordnung zur Erstellung von Bauwerken. 12. Germany.
- [WIN15] WinSun. (2015). 3D Printing Construction - Project web page. Retrieved August 23, 2015, from  
<http://www.yhbm.com/index.php?m=content&c=index&a=lists&catid=67>
- [WIR16] Wirtgen GmbH Windhagen: Internetauftritt Gleitschalungsfertiger; 13.09.2016;  
<http://www.wirtgen.de/de/produkte/gleitschalungsfertiger/offset-gleitschalungsfertiger/offset-fertiger.php>

## Anlagenverzeichnis

<b>Anlage 1</b>	<b>Urkunde zur Markenmeldung .....</b>	<b>82</b>
<b>Anlage 2</b>	<b>Positioniersuche: Ergebnisse ausgewählter Messungen .....</b>	<b>83</b>
Anlage 2.1	Tabellarische Übersicht ausgewählter Messergebnisse .....	83
Anlage 2.2	Messung 12b .....	84
Anlage 2.3	Messung 16a .....	85
Anlage 2.4	Messung 18a2 .....	86
Anlage 2.5	Messung 18b2 .....	87
Anlage 2.6	Messung 19a .....	88
Anlage 2.7	Messung 20a .....	89
<b>Anlage 3</b>	<b>Basis der Ausgangsstoffauswahl .....</b>	<b>90</b>
<b>Anlage 4</b>	<b>3D-Druckbare Betonzusammensetzungen .....</b>	<b>92</b>
<b>Anlage 5</b>	<b>Rheologische Untersuchungen zur Thixotropie Druckbarer Betone .....</b>	<b>93</b>
<b>Anlage 6</b>	<b>Anforderungskatalog für den Beton-3D-Druck aus Anwendersicht .....</b>	<b>94</b>
<b>Anlage 7</b>	<b>Szenarien katalog Anwendungen Beton-3D-Druck .....</b>	<b>96</b>
<b>Anlage 8</b>	<b>Grundriss Modell 3D-Druck .....</b>	<b>101</b>
<b>Anlage 9</b>	<b>Visualisierung Modell 3D-Druck .....</b>	<b>102</b>

## Anlage 1 Urkunde zur Markenmeldung

— Bundesrepublik Deutschland —

# Urkunde

über die Eintragung der  
Marke Nr. 30 2016 014 549

Az.: 30 2016 014 549.4 / 37

**CONPrint3D** 

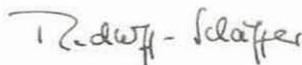
**Inhaber/Inhaberin**

Technische Universität Dresden, Körperschaft des öffentlichen Rechts, 01069 Dresden, DE

**Tag der Anmeldung:**  
13.05.2016

**Tag der Eintragung:**  
01.07.2016

Die Präsidentin des Deutschen Patent- und Markenamtes



Rudloff-Schäffer

München, 01.07.2016



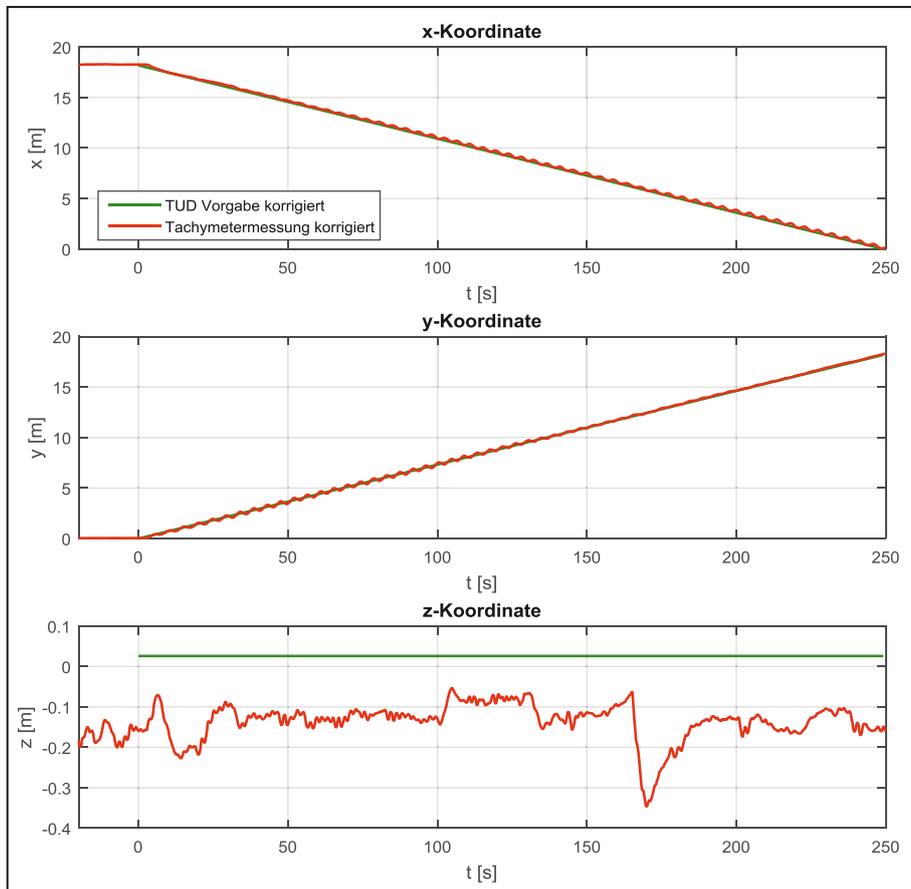
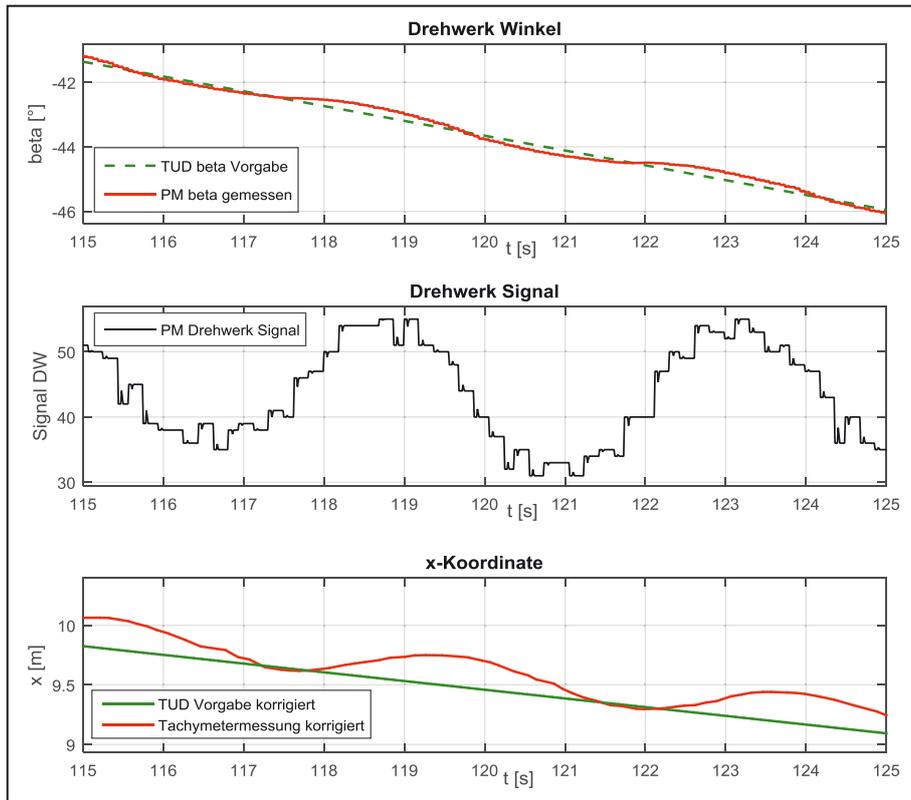
Den aktuellen Rechtsstand und Schutzzumfang nach dem Verzeichnis der Waren und Dienstleistungen entnehmen Sie bitte dem DPMAregister unter [www.dpma.de](http://www.dpma.de).

## Anlage 2 Positioniersversuche: Ergebnisse ausgewählter Messungen

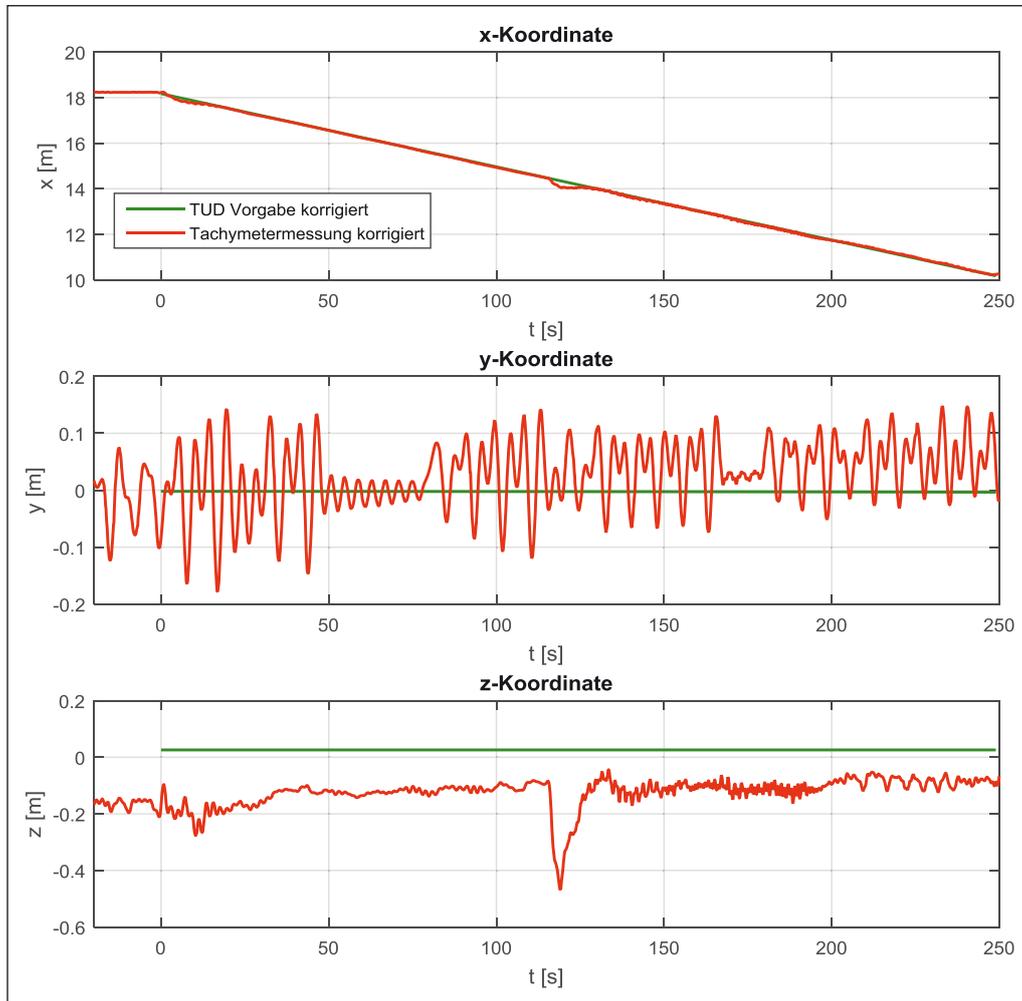
### Anlage 2.1 Tabellarische Übersicht ausgewählter Messergebnisse

Messung Nr.	Bahn		Abweichung max. [mm]			Abweichung mittel [mm]			Schwingsweite max. [mm]			Schwingsweite mittel [mm]			Zeitraum			Sollkoordinaten [m]			räuml. Abstand von Sollkoord. [mm]			Vektor
	von [m]	nach [m]	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	
<b>12b</b>	[18,0,0]	[0,18,0]	290	-236	-373	145	50	-178	290	395	286	270	332	88	110...120 s	9,824	8,421	0,026	123	50	-163	210		
<b>16a</b>	[18,0,0]	[10,0,0]	-290	-176	-494	-50	30	-134	290	320	424	70	186	55	146...156 s	13,320	-0,003	0,026	-20	26	-144	148		
<b>18a2</b>	[18,6,0]	[10,6,0]	-140	228	-370	60	54	-136	220	328	256	150	135	44	110...120 s	14,470	6,065	0,026	40	35	-155	164		
<b>18b2</b>	[10,6,0]	[18,6,0]	400	234	-796	210	70	-134	380	302	726	300	162	61	47...53 s	14,490	6,065	0,026	270	77	-124	307		
<b>19a</b>	[12,7,0]	[12,-7,0]	170	-172	-234	100	-69	-125	210	261	129	80	70	70	110...120 s	12,170	-0,382	0,026	90	-60	-106	151		
<b>20a</b>	[18,7,0]	[18,-7,0]	130	-199	-344	70	-121	-205	160	192	140	70	177	62	120...130 s	18,170	-1,025	0,026	60	-94	-226	252		
<b>Mittelwerte</b>			237	208	435	106	66	152	258	300	327	157	177	63					101	57	153	205		

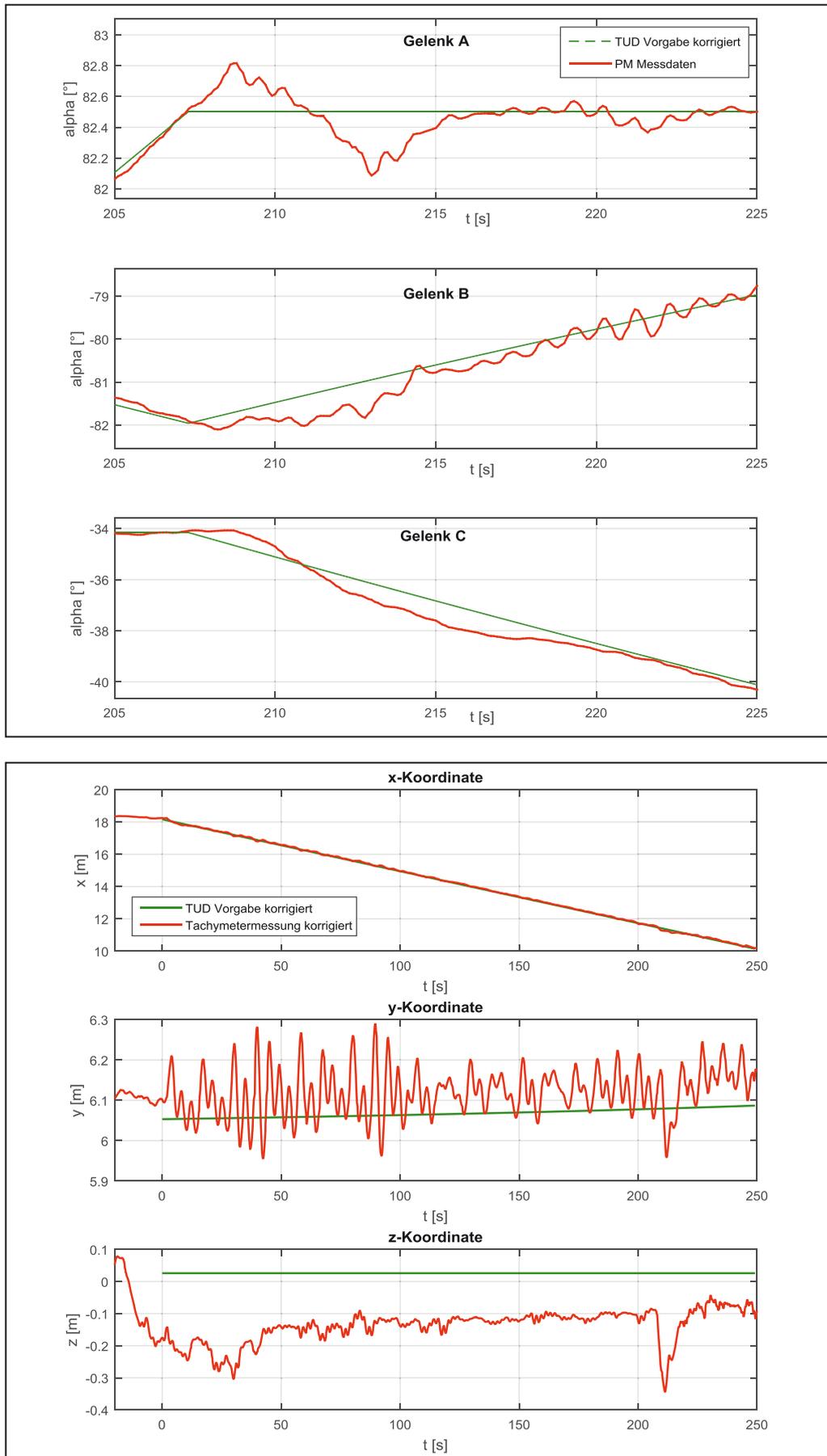
Anlage 2.2 Messung 12b



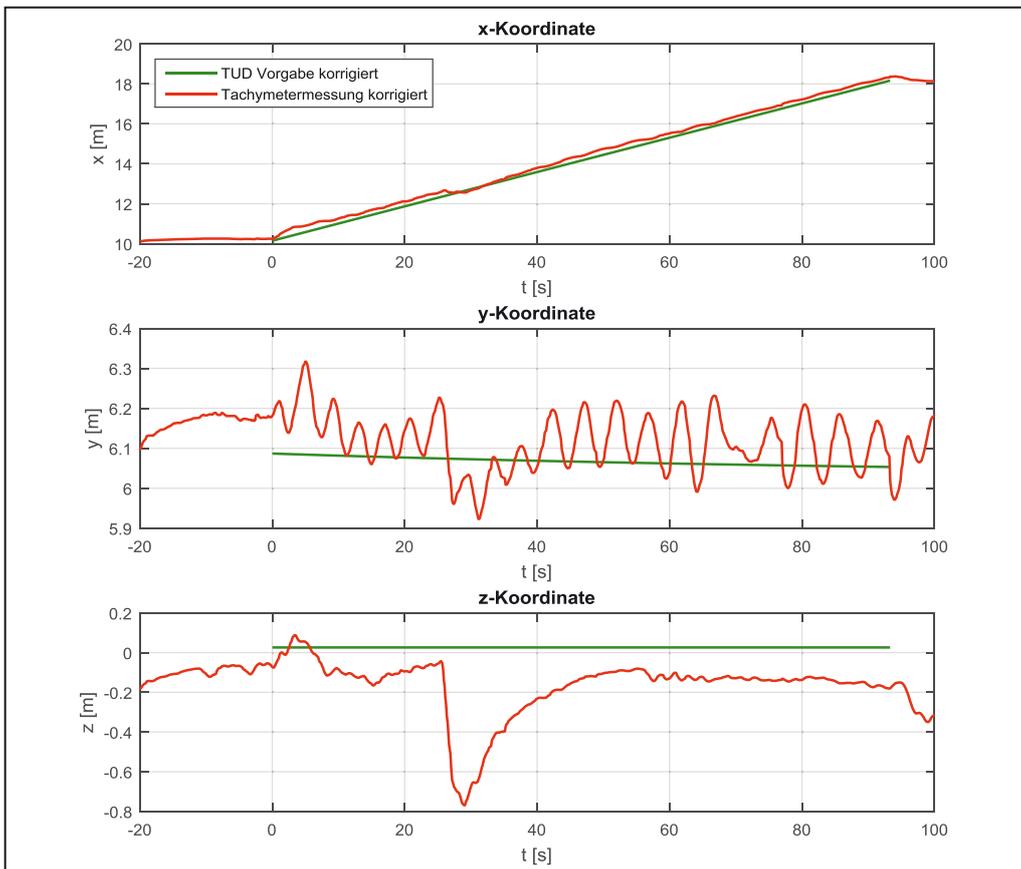
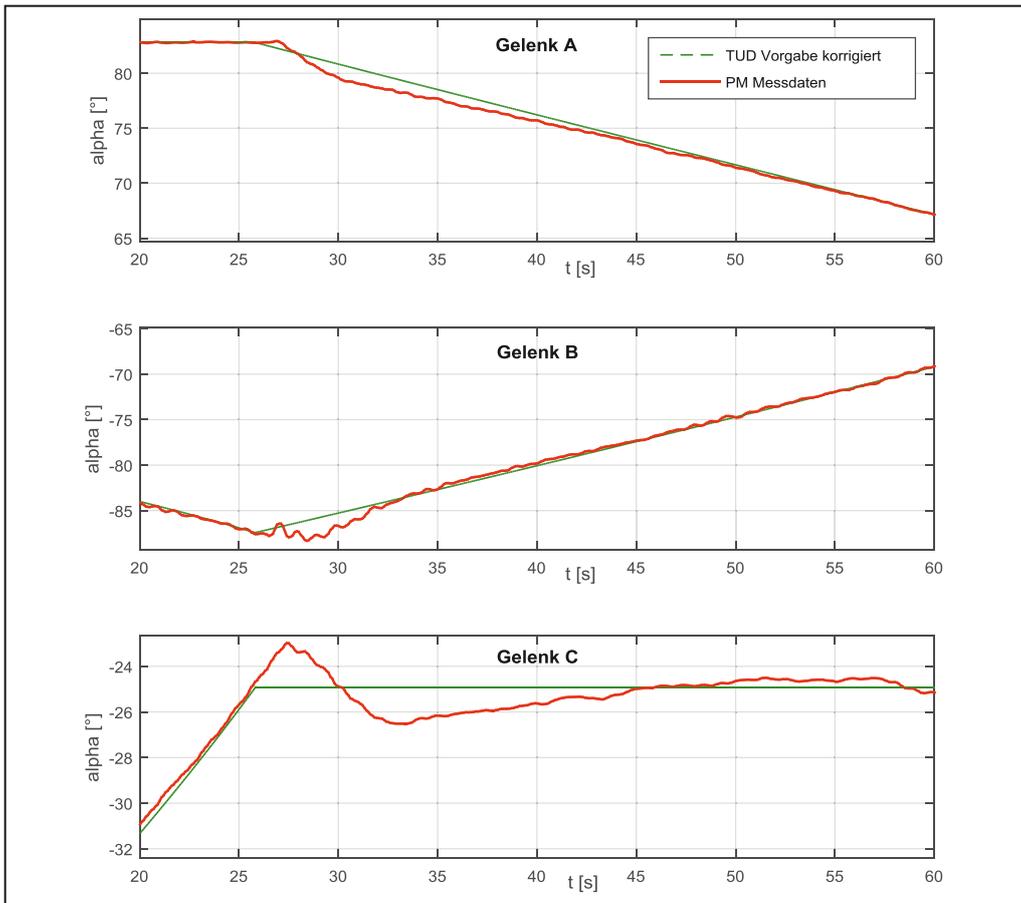
Anlage 2.3 Messung 16a



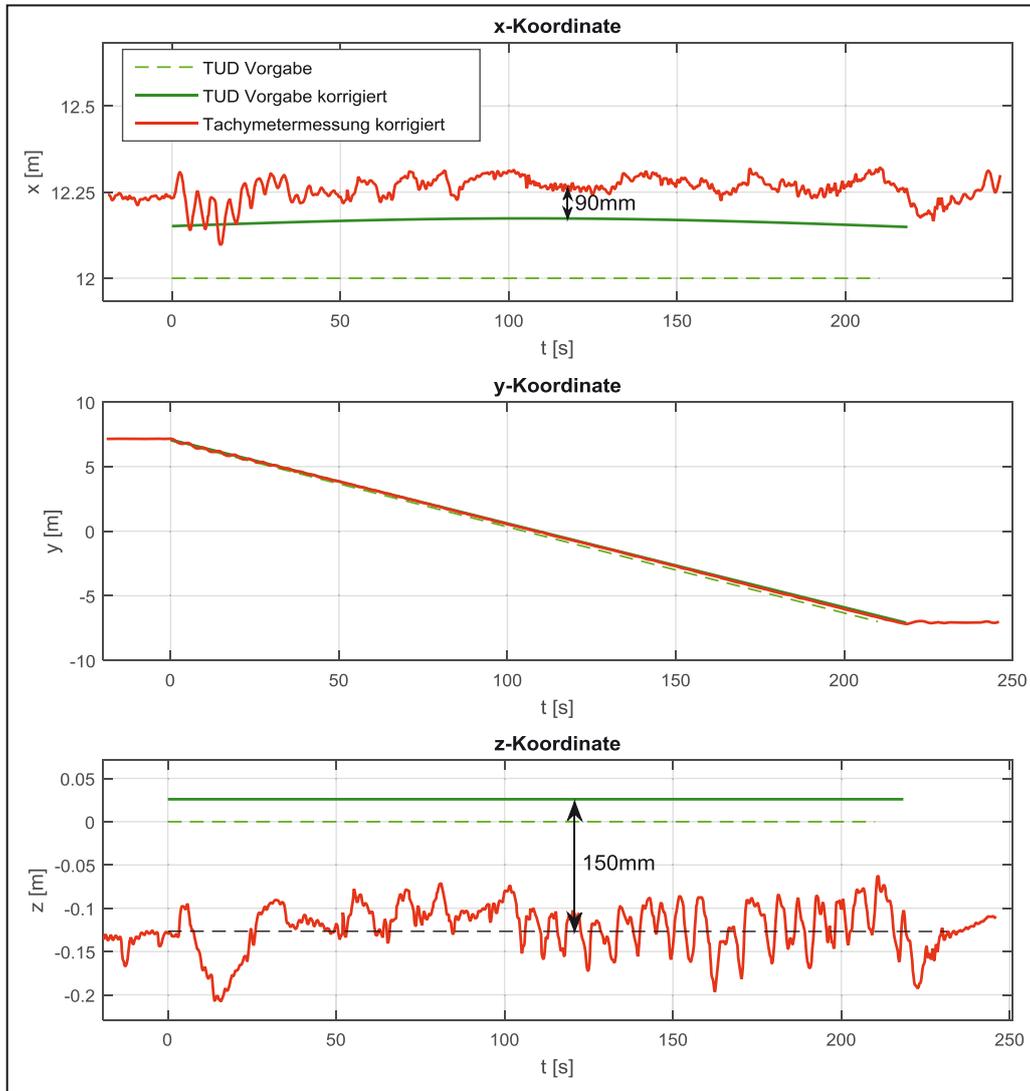
Anlage 2.4 Messung 18a2



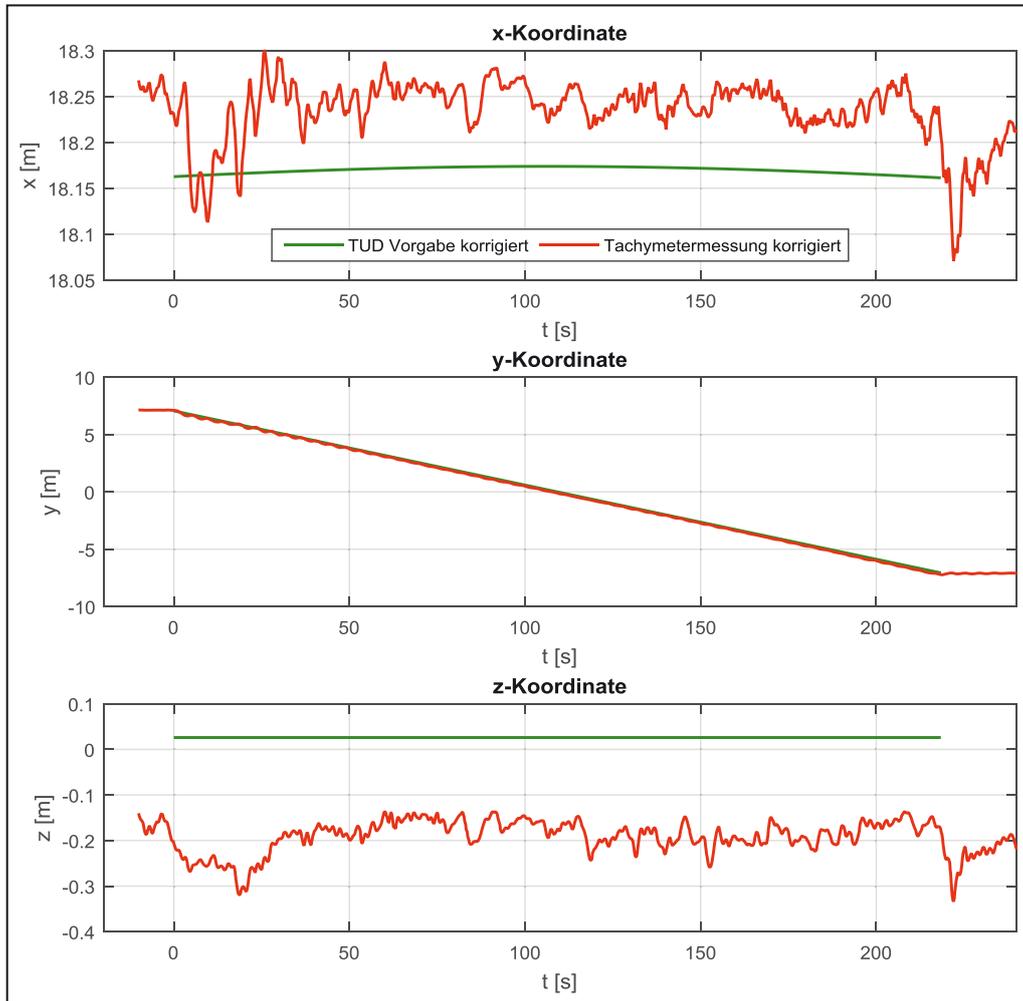
Anlage 2.5 Messung 18b2



Anlage 2.6 Messung 19a



Anlage 2.7 Messung 20a



## Anlage 3 Basis der Ausgangsstoffauswahl

Ausgangsstoff	Variante	Bemerkung
Zement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CEM I 52,5 R (ft)</li> <li>• CEM II/A-M (S-LL) 52,5 R</li> </ul>	<p>Portland Zement (CEM I), Komposit Zemente (CEM II) und andere Zementtypen wurden in Erwägung gezogen Der gewählte Zement sollte + Schnell erstarren, + Kompatibel mit Beschleuniger und Fließmittel sein, + Höhe Frühfestigkeit (R, von engl. rapid) haben</p> <p>Vorexperimente wurden zusammen mit Praxispartnern MC-Bauchemie Müller GmbH &amp; Co. KG und OPTERRA Zement GmbH, Werk Karsdorf durchgeführt. Entscheidung: nach Vorversuchen wurde CEM I 52,5 R (ft) ausgewählt</p>
Zusatzstoffe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine</li> <li>• Flugasche</li> <li>• Mikrosilika</li> </ul>	<p>+ Können als Füller wirken + Beeinflussen Rheologie, Pumpbarkeit + Beeinflussen Früh- und Langzeitfestigkeit, + Bessere Dauerhaftigkeit</p> <p>Notiz: Da das aktuelle Ziel (im diesem Projektrahmen) eine Wand ohne Bewehrung ist, wird keine hohe Festigkeit benötigt. Die Festigkeitserhöhung kann trotzdem für zukünftige Anforderungen nützlich sein.</p> <p>Entscheidung: Die Basisbetonzusammensetzung soll entweder Mikrosilika oder Flugasche enthalten. Ein Vergleich der Kompositionen mit verschiedenen Zusatzstoffen und Dosierungen wird zukünftig eine Aufgabe sein.</p>
Gesteinskörnung Form	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rundes Korn</li> <li>• Gebrochenes Korn</li> </ul>	<p>Rund: + gute Pumpbarkeit, + Verarbeitbarkeit, + niedrige Schergrenze (<math>\tau_0</math>), niedrige plastische Viskosität (<math>\mu</math>), niedrige Kosten beim Pumpen, - Niedrige Früh- und Langzeitfestigkeit, - niedrige Formstabilität</p> <p>Gebrochen: + Hohe Früh- und Langzeitfestigkeit, - Niedrige Pumpbarkeit, - Verarbeitbarkeit, - Verschleiß des Druckkopfes und der Pumpleitung</p> <p>Entscheidung: Die meisten Untersuchungen werden mit runder Gesteinskörnung vorgenommen. Splitt als Gesteinskörnung wird ein Parameter zur</p>

		Untersuchung der Grünstandfestigkeit sein.
Gesteinskörnung Größe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feinkornbeton (Korngröße bis 2 mm)</li> <li>• Normalbeton (Korngröße bis 16 mm)</li> </ul>	<p>Normalbeton + praxisnah, Standardanwendung, + wird spezifiziert von AG, + weniger Zementleim, dadurch kostengünstiger, - nicht anwendbar für dünne Elemente, - nicht anwendbar bei Verwendung kurzer Fasern, - niedrige Dauerhaftigkeit und Festigkeit</p> <p>Feinkornbeton + hohe Dauerhaftigkeit und Festigkeit, + anwendbar für dünne Elemente + Experimente können mit intern verfügbaren (FE2) Geräten (Mörtelpumpe) durchgeführt werden, - mehr Zementleim, Zusatzmittel benötigt, - praktisch relativ wenige Anwendungen</p> <p>Entscheidung: Zwei Kompositionen werden entwickelt. Zunächst wird ein Feinkornbeton mit 0-2 und anschließend ein Normalbeton mit 0-16 Gesteinskörnung entwickelt.</p>
Zusatzmittel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PCE Fließmittel</li> <li>• Beschleuniger</li> <li>• Stabilisator</li> </ul>	<p>Entscheidung: verschiedene Beschleuniger (BE) werden in Kombination mit Zementen und Fließmittel (FM) getestet. Die geeignetste Kombinationen wird verwendet werden und weiter entwickelt. Das Ergebnis soll folgendes beinhalten: Gute Pumpbarkeit (mit Hilfe von FM) bis zur Düse/ Druckkopf und schnelle Erhärtung nach Zugabe von BE. Die Basiskomposition wird ohne Stabilisator (SB) entwickelt. SB kann als in-situ-Lösung zur Stabilisierung beitragen.</p>
Bewehrung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine</li> <li>• Polymerfaser</li> <li>• Stahlfaser</li> </ul>	<p>Keine Faserbewehrung: + gute Pumpbarkeit, Verarbeitbarkeit, + weniger Reibung und Verschleiß, - niedriger Verbund zwischen den Schichten, - niedrige Zugfestigkeit, Dauerhaftigkeit</p> <p>Faserbewehrung: + Zugfestigkeit, Verbund zwischen den Schichten - Pumpbarkeit, Verarbeitbarkeit, kostenintensiver</p> <p>Entscheidung: Aufgrund der Entscheidung der AG wird bei den Basiskompositionen keine Bewehrung verwendet werden. Als Basis für zukünftige Forschung werden einige Pilot-Experimente zur Einarbeitung von Polymerfasern durchgeführt. Dabei werden Pumpbarkeit, Formstabilität sowie Zug- und Druckfestigkeit untersucht werden.</p>

## Anlage 4 3D-Druckbare Betonzusammensetzungen

Tabelle A-1: 3D-druckbare Feinbetonzusammensetzung zur Validierung der entwickelten Methode für die Druck- und Biegezugfestigkeitsbestimmung

Grundrezeptur			GM
<b>Volumen der Grundrezeptur</b>			[L] 1,00
<b>CEM I 52,5 R ft</b>	OPTERRA	[kg]	0,43
<b>SFA</b>	Safament HKV	[kg]	0,17
<b>MSS</b>	Woermann	[kg]	0,18
<b>Sand 0,06-0,2</b>	BCS 413	[kg]	0,43
<b>Sand 0-1</b>	Ottendorf gesiebt	[kg]	0,38
<b>Sand 0-2</b>	Ottendorf gesiebt	[kg]	0,43
<b>Wasser</b>		[kg]	0,18
<b>FM MCPF 5100</b>	MC-Bauchemie	[kg]	0,01
<b>BE CR 650</b>	MC-Bauchemie	[kg]	0,00

Tabelle A-2: 3D-druckbare Größkornbetonzusammensetzung

Grundrezeptur			C1
<b>Volumen der Grundrezeptur</b>			[L] 1,00
<b>CEM I 52,5 R ft</b>	OPTERRA	[kg]	0,39
<b>SFA</b>	Safament HKV	[kg]	0,21
<b>MSS</b>	Woermann	[kg]	0,21
<b>Sand 0,06-0,2</b>	BCS 413	[kg]	0,10
<b>Sand 0-1</b>	Ottendorf gesiebt	[kg]	0,10
<b>Sand 0-2</b>	Ottendorf gesiebt	[kg]	0,30
<b>Kies 2-4</b>	Ottendorf gesiebt	[kg]	0,38
<b>Kies 4-8</b>	Ottendorf gesiebt	[kg]	0,38
<b>Wasser</b>		[kg]	0,14
<b>FM MCPF 5100</b>	MC-Bauchemie	[kg]	0,01
<b>BE CR 650</b>	MC-Bauchemie	[kg]	0,00

Tabelle A-3: Mischungsprotokoll

	Z <sub>begin</sub>	Z <sub>ende</sub>	Mischregime	Geschwindigkeit [UpM]
<b>1</b>	-4	-1	Trockene Materialien mischen	25,00
<b>2</b>	-2	-2	Zugabe von Fließmittel zu Wasser	-
<b>3</b>	-1	0	Zugabe von Wasser+Fließmittel während dieser Zeit	-
<b>4</b>	0	1	Mischen aller Bestandteile	25,00
<b>5</b>	1	3	Mischen aller Bestandteile	45,00
<b>6</b>	3	4	Mischerinnenwand abkratzen	-
<b>7</b>	4	6	Mischen aller Bestandteile	45,00

## Anlage 5 Rheologische Untersuchungen zur Thixotropie Druckbarer Betone

Obwohl die in Abschnitt 2.3 dargestellte Methoden empirisch wirksam ist, sehen wir uns gezwungen, eine anspruchsvollere und im größeren Maße durchführbare Vorgehensweise zu entwickeln. Durch die Untersuchung der Thixotropie, kommen wir der Lösung dieses Problems ein Stück näher.

Die Abbildung zeigt, dass die statische Fließgrenze (SFg), die minimal erforderliche Scherspannung ist, die benötigt wird um das Material, aus der Ruhe heraus, in Bewegung zu versetzen. Die dynamische Fließgrenze (DFg) ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Abwärtskurve mit der Ordinate (graduelle Abnahme der Scherrate). Die Fläche zwischen der aufsteigenden und der abfallenden Kurve beschreibt den Grad der Thixotropie.

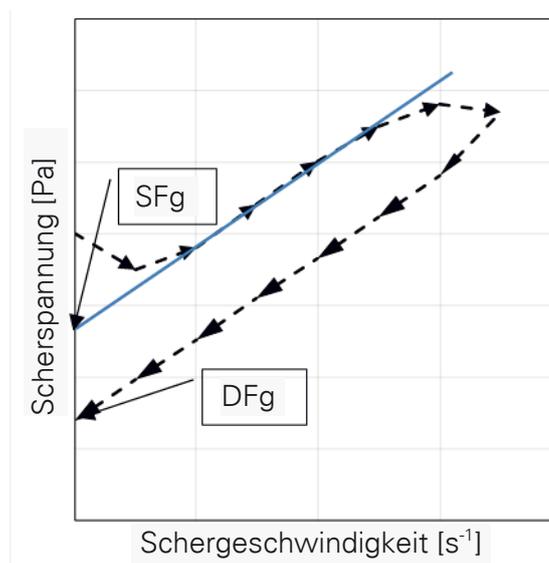


Abbildung: Scherspannungs-Scherraten-Kurve aus den Ergebnissen der rheometrischen Messungen (zeigen das thixotrope Verhalten)

SFg und DFg müssen für verschiedene Anwendungen adäquat betrachtet werden. Für die Abschätzung des Betonpumpendrucks ist es sinnvoll die statische Fließgrenze zu Beginn des Pumpvorgangs und die dynamische Fließgrenze während des laufenden Pumpprozesses zu nutzen. Um den Schalldruck zu kalkulieren, kann nur die SFg brauchbare Werte liefern. Um den Fokus wieder auf den 3D-Betondruck zu legen, müssen wir rheologische Untersuchungen an verschiedenen Mörteln durchführen. Hierfür dient uns die Thixotropie als wichtiges Werkzeug für die Auswahl, Entwicklung und Optimierung des Materials unter der nachfolgenden Philosophie.

*“Ein Material mit maximaler statischer und minimaler dynamischer Fließgrenze sollte das Optimum für die Druckanwendung sein.”*

Rheometertests liefern uns zudem Materialkennwerte, wie die Fließgrenze und die plastische Viskosität, welche für die Materialcharakterisierung sowie -modellierung von Bedeutung sind. Zusätzlich zu der rheologischen Analyse, sind weitere Experimente mit dem neuen Versuchsstand geplant, sobald dieser aufgebaut und kalibriert ist.

# Anlage 6 Anforderungskatalog für den Beton-3D-Druck aus Anwendersicht

## Forschungsprojekt Beton-3D-Druck

### Festlegung spezifischer Randbedingungen

**Hauptzielrichtung:** 3-D-Betondruckverfahren ersetzt Mauerwerkswände  
3-D-Betondruckverfahren für unbewehrte Fundamente

### Betontechnologische Anforderungen:

Außenbauteil: XC4, XF1  
Festigkeit: C25/30 (bedingt durch XC4, XF1)  
Betonart: zugelassen  
Bewehrung: unbewehrt  
Fließfähigkeit: pumpbar  
Erstarrung: schnelle Grünstandsfestigkeit

### Geometrische Anforderungen an eine Wand:

Höhe: 3,00m  
Länge: unterschiedlich je nach Bauwerkstypen  
Dicke: variabel regelbar von 10,0 - 40,0 cm  
Geometrie: glatte Wand (mit T-Verbindung oder Ecke)  
Ausbildung: voll ausgefüllte Betonwände  
Öffnungen: Tür: 1,01 x 2,135 m mit Sturz  
Fenster: 1,01 x 1,51 m ohne Anschlag mit Sturz  
Leerrohre: 3,0 x 3,0 cm horizontal und vertikal

**Toleranzen:** nach DIN 18202 Rohbau normale Anforderungen

Auszug aus DIN 18202, Tabelle 1 - Grenzabweichungen für Maße

**Tabelle 1 — Grenzabweichungen für Maße**

Spalte	1	2	3	4	5	6	7
Zeile	Bezug	Grenzabweichungen in mm bei Nennmaßen in m					
		bis 1	über 1 bis 3	über 3 bis 6	über 6 bis 15	über 15 bis 30	über 30 <sup>a</sup>
1	Maße im Grundriss, z. B. Längen, Breiten, Achs- und Rastermaße (siehe 6.3.1)	± 10	± 12	± 16	± 20	± 24	± 30
2	Maße im Aufriss, z. B. Geschosshöhen, Podesthöhen, Abstände von Aufstandsflächen und Konsolen (siehe 6.3.2)	± 10	± 16	± 16	± 20	± 30	± 30
3	Lichte Maße im Grundriss, z. B. Maße zwischen Stützen, Pfeilern usw. (siehe 6.3.3)	± 12	± 16	± 20	± 24	± 30	—
4	Lichte Maße im Aufriss, z. B. unter Decken und Unterzügen (siehe 6.3.4)	± 16	± 20	± 20	± 30	—	—
5	Öffnungen, z. B. für Fenster, Außentüren <sup>b</sup> , Einbauelemente (siehe 6.3.5)	± 10	± 12	± 16	—	—	—
6	Öffnungen wie vor, jedoch mit oberflächenfertigen Leibungen (siehe 6.3.5)	± 8	± 10	± 12	—	—	—

<sup>a</sup> Diese Grenzabweichungen können bei Nennmaßen bis etwa 60 m angewendet werden. Bei größeren Abmessungen sind besondere Überlegungen erforderlich.  
<sup>b</sup> Innentüren siehe DIN 18100.

Auszug aus DIN 18202, Tabelle 3 - Grenzwerte für Ebenheitsabweichungen

**Tabelle 3 — Grenzwerte für Ebenheitsabweichungen**

Spalte	1	2	3	4	5	6
Zeile	Bezug	Stichmaße als Grenzwerte in mm bei Messpunktabständen in m bis				
		0,1	1 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>	15 <sup>a b</sup>
1	Nichtflächenfertige Oberseiten von Decken, Unterbeton und Unterböden	10	15	20	25	30
2a	Nichtflächenfertige Oberseiten von Decken oder Bodenplatten zur Aufnahme von Bodenaufbauten, z. B. Estriche im Verbund oder auf Trennlage, schwimmende Estriche, Industrieböden, Fliesen- und Plattenbeläge im Mörtelbett	5	8	12	15	20
2b	Flächenfertige Oberseiten von Decken oder Bodenplatten für untergeordnete Zwecke, z. B. in Lagerräumen, Kellern, monolithische Betonböden	5	8	12	15	20
3	Flächenfertige Böden, z. B. Estriche als Nutzestriche, Estriche zur Aufnahme von Bodenbelägen, Bodenbeläge, Fliesenbeläge, gespachtelte und geklebte Beläge	2	4	10	12	15
4	Wie Zeile 3, jedoch mit erhöhten Anforderungen, z. B. selbstverlaufende Massen	1	3	9	12	15
5	Nichtflächenfertige Wände und Unterseiten von Rohdecken	5	10	15	25	30
6	Flächenfertige Wände und Unterseiten von Decken, z. B. geputzte Wände, Wandbekleidungen, untergehängte Decken	3	5	10	20	25
7	Wie Zeile 6, jedoch mit erhöhten Anforderungen	2	3	8	15	20

<sup>a</sup> Zwischenwerte sind den Bildern 5 und 6 zu entnehmen und auf ganze mm zu runden.  
<sup>b</sup> Die Grenzwerte für Ebenheitsabweichungen der Spalte 6 gelten auch für Messpunktabstände über 15 m.

**Baustellenrelevante Anforderungen**

Außenbedingungen: Wind (bis Windstärke 5), Sonne (bis mäßig), Regen (Nieselregen)  
 Temperaturen: 0°C bis 25°C

**Forschungsbedarf**

Lösungsansätze für Bewehrungstechnologie (Stahl, Carbon, Fasern)  
 Lösungsansätze für fertige Wandoberflächen (spachtelfähig, 0-3mm Ebenheitstoleranz)  
 Statische Untersuchungen zur Aufnahme der Zugkräfte in der unbewehrten Wand

# Anlage 7 Szenarienatalog Anwendungen Beton-3D-Druck

**Legende:**

mit Beton 3D-Druck umsetzbar?	ja	nein
bedingt	ja	nein
	bedingt	nein

Nr.	Bauwerkstypologie nach Funktion	Bauwerk	relevant für Projekt ja/nein	weitere Kategorisierung	typische Bauteile	Abmessungen			Volumen [m <sup>3</sup> ]	Szenarienentwicklung						
						Länge [m]	Breite [m]	Höhe [m]		Besonderheiten Einbauten/Öffnungen	Umsetzbarkeit					
1	Wohnen Wohngebäude	Ein- oder Zweifamilienhaus, freistehend	ja	1-2-geschossig	Streifenfundamente (unbewehrt)	12,00	0,40	0,50	2,40	Durchführung Grundleitungen/Futterrohr bis DN 300	ja					
					Streifenfundamente (bewehrt)	12,00	0,40	0,50	2,40	Durchführung Grundleitungen/Futterrohr bis DN 300	ja					
					Bodenplatte (bewehrt)	12,00	15,00	0,20	36,00	Durchführung Grundleitungen/Futterrohr bis DN 300	ja					
					Wände (unbewehrt)	12,00	0,24	3,00	8,64	Fensteröffnung 1,00m x 1,50m	ja					
					Wände (unbewehrt)	12,00	0,175	3,00	6,30	Türöffnung Bsp. 0,885 x 2,135m	ja					
					Wände (unbewehrt)	12,00	0,115	3,00	4,14	Türöffnung Bsp. 0,885 x 2,135m	ja					
					Wände (bewehrt)	12,00	15,00	0,20	36,00	Schachtöffnung, Treppentisch	ja					
					Deckenplatten (bewehrt)	12,00	15,00	0,20	36,00	Schachtöffnung, Treppentisch	ja					
					Attika (unbewehrt)	12,00	0,24	1,00	2,88	Falleitungen bis DN 200	ja					
					Attika (bewehrt)	12,00	0,24	1,00	2,88	Falleitungen bis DN 200	ja					
					Reihenhaus	ja	analog Wohngebäude 1-2-geschossig									
					Schloss, Villa, freistehend	nein										
					Geschosswohnungsbau	ja	3-5-geschossig (Wandbauweise)									
					2	Bildung Schulbauten, Kinderhorte	Kindergarten und -tagesstätte Internat Regelschulen (Haupt-, Realschulen,...) Ausbildungsschulen Gesamtgebäude (Volkshochschule, Universität,...) Seminar-, Hörsaalgebäude Forschungsinstitut Sternwarte Rechenzentrum Labore Technische Anlagen	nein		Blockfundamente (unbewehrt)	4,00	4,00	1,00	16,00	Durchführung Grundleitungen/Futterrohr bis DN 300	ja
										Blockfundamente (bewehrt)	4,00	4,00	1,00	16,00	Durchführung Grundleitungen/Futterrohr bis DN 300	ja
Streifenfundamente (unbewehrt)	25,00	0,60	1,00	15,00						Durchführung Grundleitungen/Futterrohr bis DN 300	ja					
Streifenfundamente (bewehrt)	25,00	0,60	1,00	15,00						Durchführung Grundleitungen/Futterrohr bis DN 300	ja					
Bodenplatte (bewehrt)	25,00	25,00	0,25	156,25						Durchführung Grundleitungen/Futterrohr bis DN 300	ja					
Wände (unbewehrt)	25,00	0,365	3,00	27,38						Fensteröffnung Bsp. 1,00m x 1,50m	ja					
Wände (unbewehrt)	25,00	0,240	3,00	18,00						Türöffnungen Bsp. 0,885 x 2,135m	ja					
Wände (unbewehrt)	20,00	0,175	3,00	10,50						Türöffnungen Bsp. 0,885 x 2,135m	ja					
Wände (unbewehrt)	20,00	0,115	3,00	6,90						Türöffnungen Bsp. 0,885 x 2,135m	ja					
Deckenplatten (bewehrt)	25,00	25,00	0,25	156,25						Schachtöffnung, Treppentisch	ja					
Untergie (bewehrt)	25,00	25,00	0,25	156,25						Schachtöffnung, Treppentisch	ja					
Stützen (bewehrt)	25,00	0,24	1,00	6,00						Falleitungen, Notüberläufe bis DN 200	ja					
Attika (unbewehrt)	25,00	0,24	1,00	6,00						Falleitungen, Notüberläufe bis DN 200	ja					
Attika (bewehrt)	25,00	0,24	1,00	6,00						Falleitungen, Notüberläufe bis DN 200	ja					
3	Heimbauten	Wohn- und Geschäftsgebäude Kinder-, Jugendheim Studentenwohnheim Alten-, Pflegeheim	nein							Blockfundamente (unbewehrt)	6,00	6,00	1,00	36,00	Durchführung Grundleitungen/Futterrohr bis DN 300	ja
					Blockfundamente (bewehrt)	6,00	6,00	1,00	36,00	Durchführung Grundleitungen/Futterrohr bis DN 300	ja					
					Streifenfundamente (unbewehrt)	30,00	0,60	1,00	18,00	Durchführung Grundleitungen/Futterrohr bis DN 300	ja					
					Streifenfundamente (bewehrt)	30,00	0,60	1,00	18,00	Durchführung Grundleitungen/Futterrohr bis DN 300	ja					
					Bodenplatte (bewehrt)	30,00	25,00	0,25	187,50	Durchführung Grundleitungen/Futterrohr bis DN 300	ja					
					Wände (unbewehrt)	30,00	0,240	3,00	21,60	Türöffnungen Bsp. 0,885 x 2,135m	ja					
					Wände (unbewehrt)	25,00	0,175	3,00	13,13	Fensteröffnung Bsp. 1,00m x 1,50m	ja					
					Wände (unbewehrt)	25,00	0,115	3,00	8,63	Türöffnungen Bsp. 0,885 x 2,135m	ja					
					Deckenplatten (bewehrt)	30,00	25,00	0,25	187,50	Schachtöffnung, Treppentisch	ja					
					Untergie (bewehrt)	30,00	25,00	0,25	187,50	Schachtöffnung, Treppentisch	ja					
					Stützen (bewehrt)	30,00	0,24	1,00	7,20	Falleitungen, Notüberläufe bis DN 200	ja					
					Attika (unbewehrt)	30,00	0,24	1,00	7,20	Falleitungen, Notüberläufe bis DN 200	ja					
					Attika (bewehrt)	30,00	0,24	1,00	7,20	Falleitungen, Notüberläufe bis DN 200	ja					
					4	Wohn- und Geschäftsgebäude	Wohn- und Geschäftsgebäude Kinder-, Jugendheim Studentenwohnheim Alten-, Pflegeheim	ja	analog Geschosswohnungsbau	Blockfundamente (unbewehrt)	4,00	4,00	1,00	16,00	Durchführung Grundleitungen/Futterrohr bis DN 300	ja
										Blockfundamente (bewehrt)	4,00	4,00	1,00	16,00	Durchführung Grundleitungen/Futterrohr bis DN 300	ja
Streifenfundamente (unbewehrt)	25,00	0,60	1,00	15,00						Durchführung Grundleitungen/Futterrohr bis DN 300	ja					
Streifenfundamente (bewehrt)	25,00	0,60	1,00	15,00						Durchführung Grundleitungen/Futterrohr bis DN 300	ja					
Bodenplatte (bewehrt)	25,00	25,00	0,25	156,25						Durchführung Grundleitungen/Futterrohr bis DN 300	ja					
Wände (unbewehrt)	25,00	0,365	3,00	27,38						Fensteröffnung Bsp. 1,00m x 1,50m	ja					
Wände (unbewehrt)	25,00	0,240	3,00	18,00						Türöffnungen Bsp. 0,885 x 2,135m	ja					
Wände (unbewehrt)	20,00	0,175	3,00	10,50						Türöffnungen Bsp. 0,885 x 2,135m	ja					
Wände (unbewehrt)	20,00	0,115	3,00	6,90						Türöffnungen Bsp. 0,885 x 2,135m	ja					
Deckenplatten (bewehrt)	25,00	25,00	0,25	156,25						Schachtöffnung, Treppentisch	ja					
Untergie (bewehrt)	25,00	25,00	0,25	156,25						Schachtöffnung, Treppentisch	ja					
Stützen (bewehrt)	25,00	0,24	1,00	6,00						Falleitungen, Notüberläufe bis DN 200	ja					
Attika (unbewehrt)	25,00	0,24	1,00	6,00						Falleitungen, Notüberläufe bis DN 200	ja					
Attika (bewehrt)	25,00	0,24	1,00	6,00						Falleitungen, Notüberläufe bis DN 200	ja					

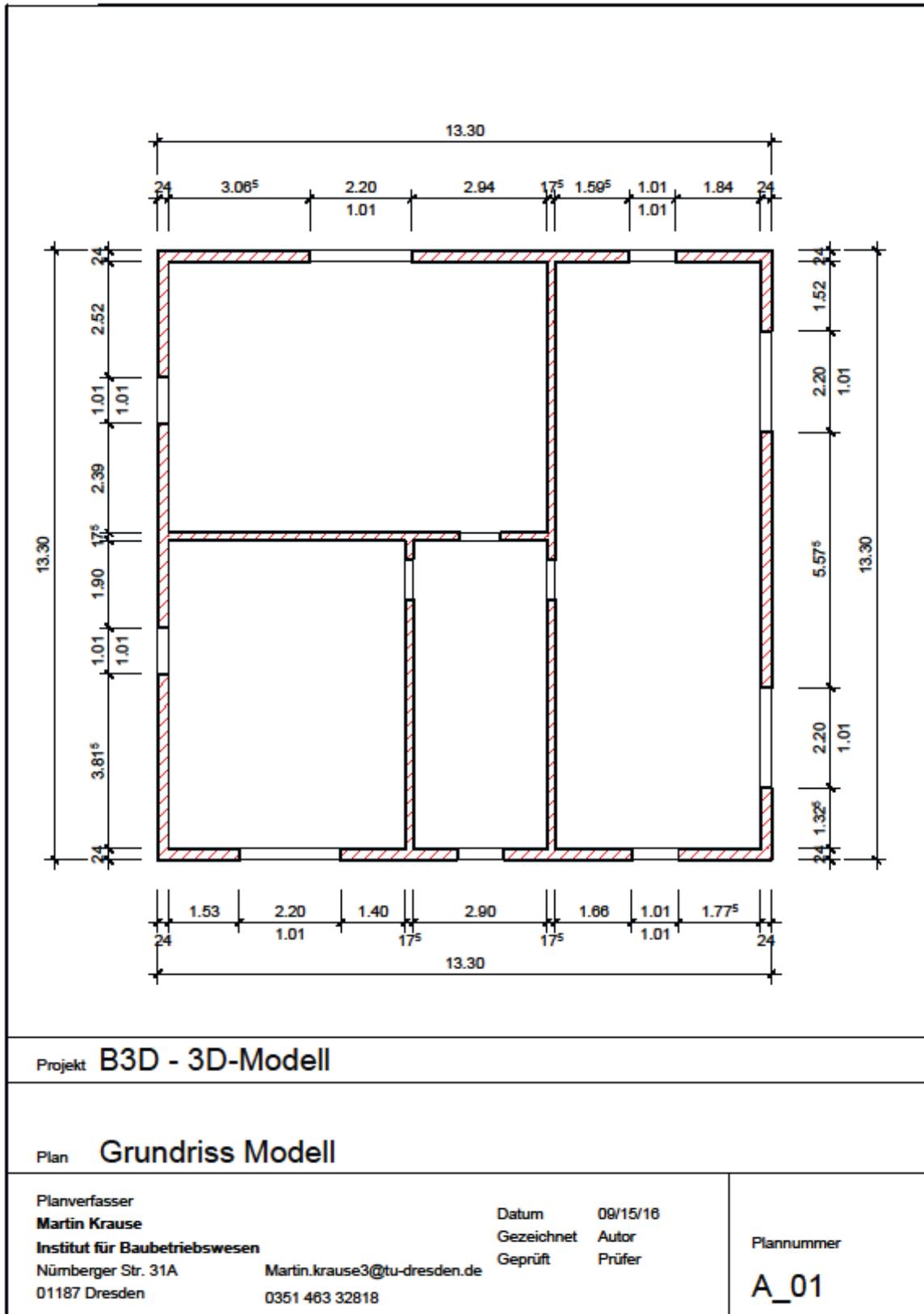




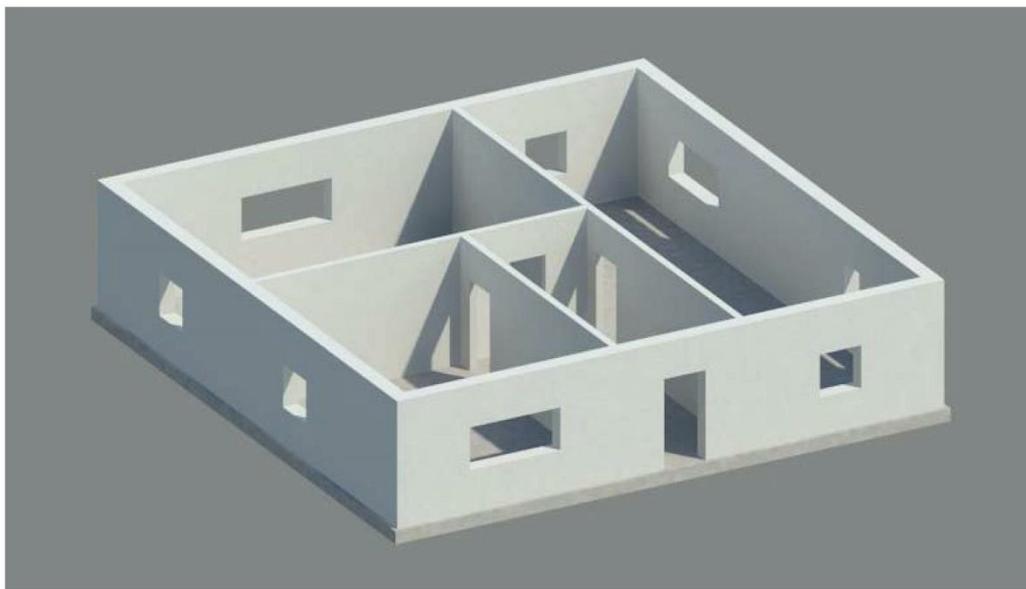




## Anlage 8 Grundriss Modell 3D-Druck



## Anlage 9 Visualisierung Modell 3D-Druck



Projekt **B3D - 3D-Modell**

Plan **3D-Modellansicht**

Planverfasser  
**Martin Krause**  
**Institut für Baubetriebswesen**  
Nürnberger Str. 31A  
01187 Dresden

Martin.krause3@tu-dresden.de  
0351 463 32818

Datum 18/05/15  
Gezeichnet Krause  
Geprüft

Plannummer  
**A\_02**