FORSCHUNGSINITIATIVE Zukunft BAU

F 3181

Viktor Mechtcherine, Jens Otto, Frank Will
Viacheslav Markin, Christof Schröfl, Venkatesh Naidu
Nerella, Martin Krause, Charlotte Dorn, Mathias Näther

# CONPrint3D-Ultralight – Herstellung monolithischer, tragender Wandkonstruktionen mit sehr hoher Wärmedämmung durch schalungsfreie Formung von Schaumbeton

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

Fraunhofer IRB Verlag

F 3181

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) 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 reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2020

ISBN 978-3-7388-0497-3

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

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

**Fakultät Bauingenieurwesen** Institut für Baustoffe

Technische Universität Dresden, 01062 Dresden

BBSR

Deichmanns Aue 31-37

53179 Bonn

Prof. Dr.-Ing.
Viktor Mechtcherine
Direktor des Instituts für Baustoffe

Bearbeiter: Dipl.-Chem. Dr. Christof Schröfl
Telefon: 0351 463-36311
Telefax: 0351 463-37268
E-Mail: i.baustoffe@tu-dresden.de
AZ: C3D-UL / SWD-10.08.18.7-17.07

Dresden, 15.08.2019

# Abschlussbericht „CONPrint3D-Ultralight – Herstellung monolithischer, tragender Wandkonstruktionen mit sehr hoher Wärmedämmung durch schalungsfreie Formung von Schaumbeton“

Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat

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

FORSCHUNGSINITIATIVE ZukunftBAU

Autoren: Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine, Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Jens Otto, Prof. Dr.-Ing. Frank Will, M.Sc. Viacheslav Markin, Dr. Christof Schröfl, Dr.-Ing. Venkatesh Naidu Nerella, Dipl.-Ing. Martin Krause, Dipl.-Ing. Charlotte Dorn, Dipl.-Ing. Mathias Näther

Laufzeit: 01.06.2017 – 01.06.2019

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert. Aktenzeichen SWD-10.08.18.7-17.07. Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt beim Autor.

_____

Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine, Projektleiter

# Inhalt

**Abbildungsverzeichnis** ..... **4**

**Tabellenverzeichnis** ..... **7**

**Formelverzeichnis** ..... **9**

**1 Einführung, Zusammenfassung** ..... **10**

**2 Baubetriebliche Aspekte** ..... **13**

2.1 Anforderungsprofil an druckbare Schaumbetone ..... 13

2.1.1 Anwendungsszenario ..... 13

2.1.2 Normative Anforderungen ..... 14

2.1.3 Geometrische Anforderungen ..... 27

2.1.4 Konstruktive Anforderungen ..... 31

2.1.5 Bauverfahrenstechnische Anforderungen ..... 33

2.2 Marktübliche Schäume und Schaumbetone ..... 35

2.2.1 Marktanalyse und Wirtschaftlichkeitsaspekte ..... 35

2.2.2 Wirtschaftlichkeitsaspekte ..... 43

2.3 Nachhaltigkeit ..... 45

2.3.1 Ökologie ..... 45

2.3.2 Ökonomie ..... 49

2.3.3 Soziologie ..... 49

2.3.4 Zusammenfassung ..... 50

2.4 Datenmanagement ..... 51

2.4.1 Digitale Prozesskette bei kleinformatigen 3D-Druckverfahren ..... 51

2.4.2 Datenaufbereitung beim Beton-3D-Druck ..... 52

**3 Baustoffliche und maschinentechnische Aspekte: Stand der Forschung und Technik** ..... **55**

3.1 Marktübliche Schäume und Schaumbetone ..... 55

3.1.1 Schaumbeton ..... 55

3.1.2 Schaum ..... 58

3.2 Technologien zur Schaumbetonherstellung ..... 62

**4 Konzepte und Methoden zur kontinuierlichen Schaumbetonherstellung** ..... **64**

4.1 Prozessgestaltung zur kontinuierlichen Herstellung von Schäumen ..... 64

4.1.1 Herstellung des vorgefertigten Schaumes ..... 64

4.1.2 Instabilität des vorgeformten Schaumes ..... 70

4.1.3 Umbau des Schaumgenerators ..... 72

4.1.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zur Schaumherstellung ..... 74

4.2 Prozessgestaltung zur Herstellung von Schaumbeton ..... 75

4.3 Fördern von Schaumbeton ..... 78

**5 Druckkopf für 3D-Druck mit Schaumbeton ..... 80**

**6 Stoffliche Entwicklung druckbarer Schaumbetone ..... 82**

6.1 Stoffliche Entwicklung der Feinmörtel ..... 82

6.1.1 Verwendete Materialien ..... 82

6.1.2 Bestimmung des Wasserbedarfs der Matrix ..... 83

6.2 Entwicklung und Herstellung druckbarer Schaumbetone ..... 84

6.2.1 Methoden zur Mischungsberechnung vom Schaumbeton ..... 84

6.2.2 Entwicklungskonzept für die Mischungsrezeptur druckbarer Schaumbetone ..... 85

6.2.3 Optimierung des Mischprotokolls ..... 87

6.2.4 Herstellung druckbarer Schaumbetone ..... 92

6.3 Untersuchungen zur Steuerung des Erstarrens ..... 102

6.4 Untersuchungen zur Rheologie vom frischen Schaumbeton ..... 104

6.5 Untersuchungen zur Festigkeitsentwicklung ..... 108

6.6 Wärmeleitfähigkeit der 3D-gedruckten Schaumbetone ..... 111

6.7 Formulierung von analytischen oder numerischen Ansätzen ..... 113

**7 Literaturverzeichnis ..... 116**

**Anhang ..... 124**

**A.1** Qualität des Schaumes ..... 124

**A.2** Mechanische Eigenschaften ..... 126

**A.3** Zusätzliche Informationen ..... 126

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schnitt Außenwand für CONPrint3D® UL-Wandkonstruktionen ..... 14

Abbildung 2: Definition des Begriffs Grenzabweichung (DIN 18202) ..... 15

Abbildung 3: Visuelle Verdeutlichung des Begriffs „Stichmaß“ (DIN 18202) ..... 16

Abbildung 4: Grenzwerte für Ebenheitsabweichungen für Wandflächen und Unterseiten von Decken (DIN 18202) ..... 17

Abbildung 5: Fiktiver Grundrissplan mit relevanten geometrischen Besonderheiten ..... 27

Abbildung 6: Stumpfstoß mit Flachanker im konventionellen Mauerwerksbau (Wessig 1998) ..... 33

Abbildung 7: Abtreppung als Verbindungsmöglichkeit einzelner Druckabschnitte ..... 34

Abbildung 8: Verbindungsmöglichkeit einzelner Druckabschnitte mittels Edelstahlankern ..... 34

Abbildung 9: Idealbild des Druckvorganges: Eine Schicht wird komplett in einem Durchgang erstellt. ..... 35

Abbildung 10: Aspekte der Betrachtung des Marktpotentials ..... 36

Abbildung 11: Übersicht der Bewertungskriterien für den Zielmarkt ..... 37

Abbildung 12: Ermittlung des GWP (kg $CO^2$ eq./$m^2$) für die Schaumbetonwand bezogen auf eine Nutzungsdauer von 100 Jahren; für Mischungsbezeichnungen siehe Tabelle 27 ..... 48

Abbildung 13: Prinzip des Slicings (Futurite 2016) ..... 51

Abbildung 14: Fehler in der Bauteilgeometrie (An 2018) ..... 53

Abbildung 15: Möglichkeiten der Modifizierung der Datenprozesskette mit BIM (Krause 2019) ..... 53

Abbildung 16: Methoden der Schaumbetonherstellung ..... 56

Abbildung 17: Einfluss der Dichte auf die 28 d Druckfetigkeit des Schaumbetons ..... 58

Abbildung 18: Beispiel einer Schaumdrainage ..... 61

Abbildung 19: a) Koaleszenz und b) Blasenvergrößerung (Hill 2017) ..... 62

Abbildung 20: Schaumgenerator ..... 64

Abbildung 21: Herstellung des vorgefertigten Schaumes mit tensidbasiertem Schaumkonzentrat SK155 ..... 65

Abbildung 22: Einfluss der Luftdruck-Einstellung auf die Stabilität des vorgeformten Schaumes ..... 66

Abbildung 23: Paramterkombinationen der Einstellungen des Schaumgenerators ..... 66

Abbildung 24: Einfluss der Durchflussrate auf die Qualität des Schaumes ..... 67

Abbildung 25: Stabilität des Schaumes hergestellt mit 20 % Lösung des Schaumkonzentrats SK155 und einem Druckluftdruck von 1,0 bar ..... 68

Abbildung 26: Stabilität des Schaumes hergestellt mit 20 % Lösung des Schaumkonzentrats Oxal PLB6 und einer Druckluftdruck von 1,0 bar ..... 69

Abbildung 27: PVC-Probekörper für die Bestimmung der Stabilität des Schaumes bei Belastung, Kontaktthermometer zur Temperaturmessung ..... 70

Abbildung 28: Temperatureinfluss auf die Stabilität des vorgefertigten Schaumes, Probekörper Typ A ..... 71

Abbildung 29: Temperatureinfluss auf die Stabilität des vorgefertigten Schaumes, Probekörper Typ B ..... 71

Abbildung 30: An der TU Dresden im Projektrahmen entwickelte und ausgeführte Belüftungsstrecke ..... 72

Abbildung 31: Qualität des Schaumes vor und nach der Modifizierung des Schaumgenerators ..... 74

Abbildung 32: Gegenüberstellung der proteinbasierten Schäume mit 30 %iger Schaumkonzentratlösung und 10 %iger Lösung, Druckluftdruck von 1,0 bar ..... 75

Abbildung 33: Methoden der Schaumbetonherstellung mit den Komponenten Schaumgenerator (SG), Mischer (M), Schaum (S), Bindemittelleim (BL), Schaumbeton (SB), Wasser ($H_2O$), Bindemittel (BM) und tensid- oder proteinbasierter Schaumbildner (T/P) ..... 76

Abbildung 34: Schaummischer BM der Fa. beba Technology GmbH & Co. KG (beba 2017) ..... 77

Abbildung 35: a) Pumpe „DURAPACT 406 S“, b) Förderversuch 5,5 m Förderhöhe ..... 78

Abbildung 36: Zum 3D-Druck von Schaumbeton verwendeter Druckkopf ..... 80

Abbildung 37: Formungssysteme des Druckkopfes: a) verschließbare Austrittsdüse für einfache Probekörper; b) vereinfachte Darstellung des komplexen Formungssystems mit Extrusionseinheit (1), Düse (2), Formungsblechen (3) und Verschluss (4) ..... 81

Abbildung 38: Testmethode für die Bestimmung des relativen Setzfließmaßes ..... 83

Abbildung 39: Ergebnisse der relativen Ausbreitmaßes: (a) Ergebnisse für A-0, (b) Ergebnisse für $\Gamma p > 1$ für A-0 und A-1 ..... 84

Abbildung 40: Konzept der Mischungsrezepturentwicklung für druckbare Schaumbetone ..... 86

Abbildung 41: Kniele KKM30 Gesamtansicht sowie Detailansicht des Mischwerks ..... 87

Abbildung 42: Einfluß des Mischprotokols auf die Homogenität des Schaumbetons: a) inhomogene Mischung mit Klumpen, b) homogene Mischung; frische Schaumbetonproben zwischen zwei Glasplatten eingebracht und sachte zusammengepresst ..... 89

Abbildung 43: Einfluss der einmaligen Schaumzugabe auf die Dichte des frischen Schaumbetons ..... 91

Abbildung 44: Veränderung der Frischbetondichte durch schrittweise Zugabe des vorgefertigten Schaumes ..... 91

Abbildung 45: HÄGERMANN-Ausbreitmaß: (a) Matrix, (b) Schaumbeton A1-S ..... 92

Abbildung 46: Einfluss des Schaumvolumens im Beton auf das HÄGERMANN-Ausbreitmaß ..... 93

Abbildung 47: Zeitliche Entwicklung des HÄGERMANN-Ausbreitmaßes der Schaumbetone ..... 94

Abbildung 48: Änderung der Schaumbetonrohdichte durch schrittweise Zugabe des vorgefertigten Schaumes und Grenzbereich der Homogenität des druckbaren Schaumbetons ..... 95

Abbildung 49: Abweichung der tatsächlichen Dichte von der Zielrodichte der Mischungsrezeptur A1-S4: (a) Entwicklung der Dichte, (b) Klumpenbildung ..... 96

Abbildung 50: Änderung der Dichte des Schaumbetons über die Höhe eines 3D-gedruckten, wandförmigen Probekörpers ..... 97

Abbildung 51: 3D-Druckversuche mit Schaumbeton in der CONPrint3D®-Anlage: Links ein kollabierter, rechts ein aufrecht stehender wandartiger Probekörper ..... 97

Abbildung 52: 3D-gedruckte wandartige Probekörper mit unterschiedlichen Schaumbetonrezepturen: (a) A1-S4; (b) A1-S; (c) A2-M; (d) A3-CN ..... 99

Abbildung 53: Oberflächenqualität einer 3D-gedruckten Schaumbetonwand der Rezeptur A3-CN ..... 99

Abbildung 54: 3D-gedrucktes Schaumbetonbauteil der Mischungszusammensetung A2-M ..... 100

Abbildung 55: Verarbeitungssequenz von Bildern für die Bestimmung der Porengrößenverteilung des Schaumbetons: (a) polierter Probekörper, (b) gefärbter Probekörper, (c) binäres Bild ..... 101

Abbildung 56: Steuerung des Erstarrens durch die Zugabe des Beschleunigers Fluresit Schnell ..... 104

Abbildung 57: Zeit- und Belastungsabhängigkeit der dynamischen Viskosität bei einer thixotropen Substanz: (B) Belastungsphase, (E) Entlastungsphase (Blask 2002) ..... 105

Abbildung 58: Scherspannung-Scherdehnungsverhalten in Abhängigkeit der Ruhezeit (Roussel 2018) ..... 105

Abbildung 59: Einfluss der Scherrate auf die zeitliche entwicklung der Schubspannung, Mischungsrezeptur A1-S ..... 107

Abbildung 60: Vier Versuchsergebnisse zur Zeitabhängigkeit statischen Fließgrenze, Schaumbetonrezeptur A2-M ..... 108

Abbildung 61: Umwandlung der zementbasierten Matrix (a) zu Schaumbeton (b) ..... 108

Abbildung 62: Einfluss der Nachbehandlung auf 28 d Druckfestigkeit des Schaumbetons A-0 ..... 110

Abbildung 63: Versuchsaufbauten für die Prüfung der (a) Biegezugfestigkeit und (b) Druckfestigkeit von 3D-gedruckten Schaumbetonprobekörpern ..... 110

Abbildung 64: Druck- und Biegezugfestigkeiten des 3D-gedruckten Schaumbetons A2-M in Abhängigkeit des Prüfalters ..... 111

Abbildung 65: Messung der Wärmeleitfähigkeit von 3D-gedruckten Schaumbetonprobekörpern ..... 111

Abbildung 66: Gegenüberstellung der Wärmeleitfähigkeit von 3D-gedrucktem normalschweren Beton und der entwickelten 3D-gedruckten Schaumbetone A1-S und A1-S4 ..... 113

Abbildung 67: Statische Fließgrenze vom Schaumbeton in Abhängigkeit vom Alter, Rezeptur A1-S ..... 114

Abbildung 68: Statische Schergrenze des Schaumbetons in Abhängigkeit vom Alter, Rezeptur A2-M ..... 115

Abbildung 69: Stabilität des tensidbasierten Schaumes mit einer 10 %igen Lösung des Schaumkonzentrates SK155; Drucklufthöhe 1,5 bar ..... 124

Abbildung 70: Stabilität des tensidbasierten Schaumes mit einer 20 %igen Lösung des Schaumkonzentrates SK155; Drucklufthöhe 1,5 bar ..... 124

Abbildung 71: Stabilität des tensidbasierten Schaumes mit einer 30 %igen Lösung des Schaumkonzentrates SK155; Drucklufthöhe 1,0 bar ..... 125

Abbildung 72: Stabilität des proteinbasierten Schaumes mit einer 10 %igen Lösung des Schaumkonzentrates Oxal PLB6; Drucklufthöhe 1,5 bar ..... 125

Abbildung 73: Stabilität des proteinbasierter Schaumes mit einer 10 %igen Lösung des Schaumkonzentrates Oxal PLB6, Drucklufthöhe 3,0 bar ..... 125

Abbildung 74: Gegenüberstellung der 30 %igen und 10 %igen Lösung des proteinbasierten Schaumes, hergestellt mit Drucklufthöhe 2,0 bar ..... 126

Abbildung 75: Fördermenge des Schaumgenerators ..... 126

Abbildung 76: Einstellung der Parameter beim Konusmischer Kniele KKN30: 1) Parametersatz, 2) angezeigten Rezeptparametersatz in Mischerparameter laden, 3) aktuellen Mischerparametersatz in Rezept einlesen ..... 126

Abbildung 77: Standardeinstellung des Mischers, Mischprotokoll R1 ..... 127

Abbildung 78: Standardeinstellung des Mischers, Leistung von Innen- und Außenmotor ..... 127

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Baufertigstellungen im Wohnungsneubau mit den verwendeten Baustoffen (Schach 2017) ..... 13

Tabelle 2: Grenzabweichungen für Maße (DIN 18202) ..... 15

Tabelle 3: Grenzwerte für Winkelabweichungen (DIN 18202) ..... 16

Tabelle 4: Grenzwerte für Ebenheitsabweichungen (DIN 18202) ..... 17

Tabelle 5: Rohdichteklassen und Festigkeitsklassen gängiger genormter Mauersteine (Schneider Bautab) ..... 20

Tabelle 6: Rechenwerte für die Druckfestigkeiten von Mauermörtel (Schneider Bautab) ..... 21

Tabelle 7: Charakteristische Druckfestigkeit in N/mm$^2$ aus Kalksandstein-Plansteinen und -Planelementen mit Dünnbettmörtel (Schneider Bautab) ..... 21

Tabelle 8: Charakteristische Druckfestigkeit in N/mm$^2$ aus Porenbeton mit Dünnbettmörtel (Schneider Bautab) ..... 21

Tabelle 9: Wärmeleitzahlen in Abhängigkeit der Wanddicke nach EnEV 2014 mit U = 0,28 W/(m$^2$K) (EnEV 2014) und EnEV 2016 mit U = 0,21 W/(m$^2$K) (EnEV 2016) ..... 23

Tabelle 10: Mindestdicke tragender, raumabschließender Wände am Beispiel von Porenbetonsteinen mit Dünnbettmörtel ..... 24

Tabelle 11: Anforderungen an das erforderliche Luftschalldämmmaß von Außenbauteilen nach DIN 4109 und VDI 4100 (Schneider Bautab) ..... 25

Tabelle 12: Anforderungen an den Schallschutz gegenüber Schallübertragung aus einem fremden Wohn- oder Arbeitsbereich nach DIN 4109 und DIN 4109 Beiblatt 2 (Schneider Bautab) ..... 26

Tabelle 13: Übersicht der baukonstruktiven Besonderheiten im Hochbau ..... 28

Tabelle 14: Nutzwertanalyse Zielmarkt ..... 41

Tabelle 15: Übersicht der möglichen Kunden ..... 41

Tabelle 16: Abgrenzung des Wettbewerbs ..... 42

Tabelle 17: Dimensionierung der Konstruktionsarten gemäß EnEV 2016 (EnEV 2016) ..... 46

Tabelle 18: Prozessmodule des Lebenszyklus (ZukunftBau 2017) ..... 47

Tabelle 19: Mögliche Exportdateiformate aus BIM (Krause 2019) ..... 52

Tabelle 20: Versuchsprogramm für die Bestimmung der optimalen Schaumgenerator-Parameter bei verschiedenen Schaumbildner-Konzentrationen ..... 67

Tabelle 21: Probekörper zur Bewertung der Temperaturbeständigkeit des vorgefertigten Schaumes ..... 70

Tabelle 22: Einstellungen am Schaumgenerator ..... 73

Tabelle 23: Festbestandteile der zementbasierten Matrix, Angaben in Volumenprozent ..... 83

Tabelle 24: Mischungsrezeptur für 20 L Schaumbetons zur Optimierung der Mischdauer und der Mischgeschwindigkeit ..... 88

Tabelle 25: Einstellungen des Mischers – Mischdauer ..... 89

Tabelle 26: Mischprotokoll für die Herstellung von druckbarem Schaumbeton im Mischverfahren R1 ..... 90

Tabelle 27: Entwickelte Schaumbetonrezepturen; Fließmittel: *MasterGlenium SKY 593 bzw. **MC-PowerFlow 5100 ..... 92

Tabelle 28: Maximale und minimale Werte des Hägermann-Ausbreitmaßes druckbarer Schaumbetone, mit denen die schichtenweise Ablage im CONPrint3D® UL Verfahren möglich ist .....94

Tabelle 29: Vergleich der Messergebnisse der Porositätserfassung anhand der kleineren (3 x 3 Einzelbilder) und größeren (6 x 6 Einzelbilder) zusammengesetzen Images; 3D-gedruckter Schaumbeton A1-S.....102

Tabelle 30: Porosität und Porenanzahl der untersuchten 3D-gedruckten Schaumbetone, ermittelt aus der Analyse binarisierter Lichtmikroskopbilder.....102

Tabelle 31: Ergebnisse zu den Testeinstellungen für die Referenzmischung.....106

Tabelle 32: Mechanische Eigenschaften der Matrix und des darauf basierenden Schaumbetons der Zusammensetzung A-0.....109

Tabelle 33: Ergebnisse der Messung der Wärmeleitfähigkeit, Standardabweichung < 0,04.....112

Tabelle 34: Druck- und Biegezugfestigkeit von gedruckten Schaumbetonprobekörpern .....126

Tabelle 35: Untersuchungsprogramm zur Bestimmung des optimalen Mischprotokolls.....127

# Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten U (Schneider Bautab).....22

Formel 2: Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten U für das gewählte Anwendungsszenario, Werte aus (Schneider Bautab).....23

Formel 3: Relatives Ausbreitmaß Гр.....83

Formel 4: Rheologisches Modell nach Roussel (Roussel 2006), welches auch für 3D-druckbare zementgebundene Werkstoffe anwendbar ist.....113

Formel 5: Rheologisches Modell nach Perrot et al. (Perrot 2016), welches auch für 3D-druckbare zementgebundene Werkstoffe Anwendung findet .....114

# 1 Einführung, Zusammenfassung

Ziel des Forschungsprojektes CONPrint3D® Ultralight (UL) war es, die Grundlagen einer Technologie zur Erstellung von tragenden Wände mittels CONPrint3D®-Verfahren aus Schaumbeton zu entwickeln. Dabei wurden neben den experimentell geprägten baustofflichen sowie maschinen- und verfahrenstechnischen Themen auch baubetriebliche Aspekte bearbeitet.

Beton-3D-Druck nach dem CONPrint3D®-Verfahren ist eine kontinuierliche, schalungsfreie Bautechnologie, die nach dem Prinzip der additiven Fertigung arbeitet. Sie ermöglicht die wirtschaftliche Errichtung von Betonbauteilen und Bauwerkstrukturen unter Baustellenbedingungen und bedient sich möglichst weitgehend konventioneller Maschinen- und Betontechnologien, die im Rahmen der Forschungsaktivitäten für die speziellen Belange des 3D-Drucks angepasst werden. Die Basis für die Entwicklung des CONPrint3D®-Verfahrens war das „Zukunft Bau"-Forschungsvorhaben „Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton" (AZ: SWD-10.08.18.7-14.07). Das vorliegende Projekt beschäftigte sich mit der Erweiterung des Verfahrens auf Schaumbeton.

Schaumbeton zeichnet sich durch geringe Rohdichte und gute Wärmedämmeigenschaften aus. Dies soll zu folgenden wesentlichen Vorteilen gedruckter Schaumbetonwände führen:

- Kontinuierliche und schalungsfreie Fertigung mit geringem Personalaufwand, schnellen Ausführungszeiten und niedrigen Baukosten (direkt auf der Baustelle oder im Fertigteilwerk);
- Verhältnismäßig geringer Masseeintrag in die Gebäudekonstruktion bei ausreichender statischer Tragfähigkeit der Schaumbetonwände;
- Einhaltung der gesetzlichen Regelungen des Wärmeschutzes: Bei hinreichender monolithischer Wandstärke Verzicht auf zusätzliche Wärmedämmung;
- Dadurch erheblich vereinfachtes Recycling nach dem Nutzungsende des Bauwerks.

Die wissenschaftlich-technische Zielstellungen waren:

- Entwicklung eines Schaumbetons, der 1) pumpbar ist bzw. direkt am Druckkopf geschäumt werden kann, 2) eine ausreichende Grünstand- und Frühfestigkeit für die schalungsfreie Ausformung aufweist bzw. 3) zum schnellen Erstarren angeregt werden kann, 4) weitgehend raumbeständig erhärtet, 5) im erhärteten Zustand hinreichend tragfähig für konstruktive Anwendungen im mehrgeschossigen Wohnungsneubau ist, und 6) eine geringe Wärmeleitfähigkeit aufweist;
- Entwicklung eines Druckkopfes zum 3D-Druck des Schaumbetons;
- Aufzeigen der Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit der Schaumbeton-Drucktechnologie.

Diese Projektziele wurden in folgenden Teilschritten erarbeitet:

- Entwicklung der druckbaren Schaumbetone: 1) Design hochfester Feinmörtel als mineralische Komponente für die Schaumbetonproduktion anhand granulometrischer Optimierung des Kornhaufwerks und Anpassung des Wasseranspruchs, 2) Entwicklung von Schäumen auf Basis eines synthetischen Tensids bzw. eines proteinbasierten

Schaumbildners, 3) Schaumproduktion und getrennte Mörtelherstellung mit anschließender Aufschäumung der mineralischen Matrix, 4) Steuerung von Ansteifen und Erstarren sowie der Erhärtungskinetik;

- Design und Umsetzung eines Druckkopfes für Schaumbetone;
- 3D-Druck von Schaumbetonen in der Laboranlage gemäß dem CONPrint3D®-Verfahren;
- Untersuchungen zum Schäumen des Feinmörtels direkt am Druckkopf, wobei eine grundsätzlich alternative Mischtechnik verwendet wurde;
- Rheologische Charakterisierung der frischen Schaumbetone, Prüfung der Stabilität der 3D-gedruckten Schaumbetonwände, Charakterisierung von physikalischen und mechanischen Eigenschaften der erhärteten Schaumbetone;
- Lebenszykluskostenanalyse zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und Life Cycle Analysis (LCA) zur Bewertung ökologischer und soziologischer Aspekte des Schaumbeton-3D-Drucks im Wohnungsbau.

Für die Herstellung von druckbaren Schaumbetonen wurden zwei Verfahren verwendet: Einmischverfahren und Mischverfahren. Das Einmischverfahren erwies sich als die Vorzugsvariante, bei der die fertig gemischte Matrix und unabhängig davon vorproduzierter Schaum zusammengemischt werden. Durch iterative Rezepturoptimierung wurde z. B. der Schaumbeton A3-CN mit einer Rohdichte von ca. 980 kg/m$^3$ hergestellt. Die Formstabilität des Materials ermöglicht eine zügige mehrschichtige Ablage der Filamente im 3D-Druckverfahren. Mit einer Druckfestigkeit von 8,3 N/mm$^2$ und einer Biegezugfestigkeit von 1,35 N/mm$^2$ des gedruckten Schaumbetons können daraus statisch tragende Wandelemente gebaut werden. Die Wärmeleitfähigkeit der entwickelten Schaumbetone betrug, je nach der Rohdichte, zwischen 0,17 und 0,35 W/mK, die Werte, die für gute wärmedämmende Eigenschaften stehen.

Die entwickelten Schaumbetone, technologischen und baustofflich-analytischen Prozesse und Verfahren, sowie die Maschinenelemente einschließlich deren Integration stellen elementare Grundlagen dar, die zur großtechnischen und baupraktischen Umsetzung von schalungsfreien Formgebungsverfahren mit Schaumbetonen notwendig sind. Die Projektergebnisse können von Baustoff- und Zusatzmittelherstellern, Baumaschinenherstellern sowie Baufirmen genutzt werden, um mit beschränktem Aufwand aus dem prototypisch nachgewiesenen 3D-Druck von Schaumbeton marktfähige Produkte und Technologien mit ausgeprägten Alleinstellungsmerkmalen weiterzuentwickeln. Die erfolgte positive Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Bauverfahrens stellt eine ausgezeichnete Grundlage für deren Überführung in die Baupraxis dar.

Die drei beteiligten Forschergruppen der Technischen Universität Dresden – Institut für Baustoffe, Stiftungsprofessur für Baumaschinen und Institut für Baubetriebswesen – wurden von Partnern aus der Industrie wie folgt unterstützt:

- BAM Deutschland AG, Dresden: Anwendungsszenarien im mehrgeschossigen Hausbau,

- Kniele GmbH, Bad Buchau: Mischtechnik, Einbringen eines Mischers in das experimentelle Programm,
- MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG, Bottrop: Schaumbildner, Schäumungstechnik,
- Opterra Zement GmbH, Werk Karsdorf: Bindemittel, Betontechnologie.

Aus dem Projekt gingen bzw. gehen folgende Publikationen hervor:

- Viktor Mechtcherine, Frank Will, Jens Otto, Viacheslav Markin, Mathias Näther, Martin Krause, Venkatesh Naidu Nerella, Christof Schröfl: „CONPrint3D-Ultralight – Herstellung monolithischer, tragender Wandkonstruktionen mit sehr hoher Wärmedämmung durch schalungsfreie Formung von Schaumbeton“, Deutsches Architektenblatt, 2019, angenommen
- Viktor Mechtcherine, Frank Will, Jens Otto, Viacheslav Markin, Mathias Näther, Martin Krause, Venkatesh Naidu Nerella, Christof Schröfl: „CONPrint3D-Ultralight – Herstellung monolithischer, tragender, wärmedämmender Wandkonstruktionen durch 3D-Druck mit Schaumbeton“, Beton- und Stahlbetonbau, 2019, eingereicht
- Viacheslav Markin, Genady Sakhmenko, Venkatesh Naidu Nerella, Mathias Näther, Viktor Mechtcherine: “Investigations on the foam concrete production techniques suitable for 3D-printing with foam concrete”, 4th International Conference “Innovative Materials, Structures and Technologies” (IMST 2019), 2019, angenommen
- Viacheslav Markin, Venkatesh Naidu Nerella, Christof Schröfl, Gyunay Guseynova and Viktor Mechtcherine: “Material Design and Performance Evaluation of Foam Concrete for Digital Fabrication”, Materials, 2019, 12, 2433; doi:10.3390/ma12152433
- Christof Schröfl: „CONPrint3D-Ultralight“, 10. Projektetage der Bauforschung, Bonn, 06.11.2018
- Jens Otto: „CONPrint3D-Ultralight“, 7. Projektetage der Bauforschung, Bonn, 08.11.2017

# 2 Baubetriebliche Aspekte

## 2.1 Anforderungsprofil an druckbare Schaumbetone

### 2.1.1 Anwendungsszenario

Im vorangegangenen Forschungsprojekt zu CONPrint3D® wurden Anwendungsszenarien und Marktpotenziale in Deutschland untersucht. Als Hauptanwendungsszenario war der „Ersatz von Mauerwerkswänden“ ausgewählt worden. Im Bereich Wohnungsneubau werden nach wie vor ca. 75 % der Wände gemauert (Schach 2017). Tabelle 1 fasst die Untersuchungsergebnisse im Wohnungsneubau zusammen.

*Tabelle 1: Baufertigstellungen im Wohnungsneubau mit den verwendeten Baustoffen (Schach 2017)*

| Neubau Wohngebäude | Ziegel | Poren-beton | Kalksand-stein | Holz | Stahl-beton | Leicht-beton | Sonstige |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 105.568 | 33.246 | 23.462 | 18.072 | 16.565 | 8.063 | 3.928 | 2.232 |
| 100,0 % | 31,5 % | 22,2 % | 17,1 % | 15,7 % | 7,6 % | 3,7 % | 2,1 % |

Die verschiedenen Mauerwerksbaustoffe haben jeweils unterschiedliche Vor- und Nachteile. Poren- und Leichtbetone werden dem Endprodukt von CONPrint3D® UL aufgrund der geringen Masse und der guten Wärmedämmeigenschaften ähneln. Der gedruckte Schaumbeton soll zusätzlich über verbesserte Eigenschaften der Tragfähigkeit verfügen, die beispielsweise einer mittelfesten Kalksandsteinwand entsprechen. Dies soll durch einen sehr guten Schichtverbund realisiert werden. Bei Mauerwerkswänden bildet die Mörtelschicht (Normalmörtel oder Dünnbettmörtel) eine Schwachstelle, die mit verminderten Festigkeitswerten der fertigen Wand einhergeht. Mittels gedruckter Schaumbetone, die sich monolithisch verhalten, sollen so als Hauptanwendung tragende und nichttragende Wände bei mittelhohen Wohngebäuden (bis fünfgeschossig) erstellt werden. Abbildung 1 zeigt einen Schnitt durch die geplante Außenwandkonstruktion.

Wandinnen- und -außenseite werden nachträglich mit Putz versehen. Im klassischen Massivbau muss zur Einhaltung der wärmetechnischen Anforderungen eine zusätzliche Wärmedämmung angeordnet werden. CONPrint3D® UL setzt sich zum Ziel, die energetischen Grenzwerte ohne zusätzliche Wärmedämmung zu erreichen, um weitere Kosten- und Zeitersparnisse bei der Ausführung zu realisieren.

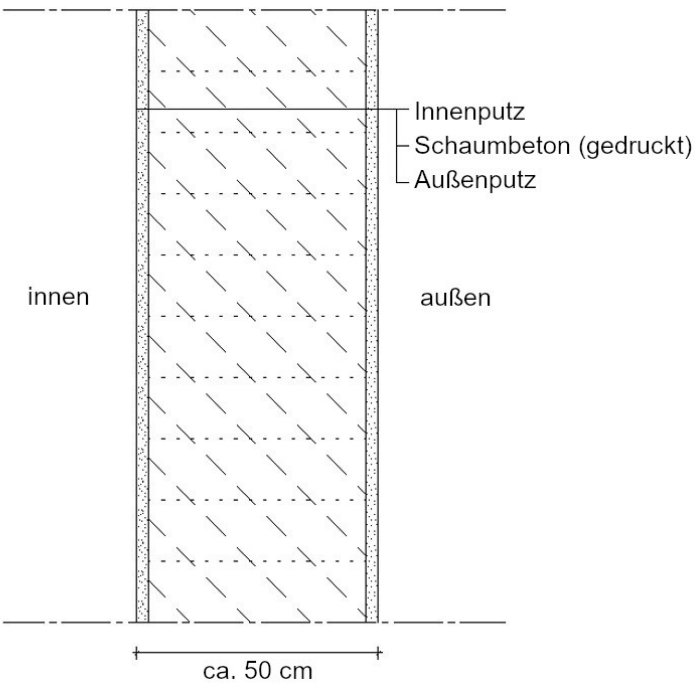



*Abbildung 1: Schnitt Außenwand für CONPrint3D® UL-Wandkonstruktionen*

Im vorliegenden Anforderungskatalog werden für CONPrint3D® UL die planungs- und ausführungsrelevanten Anforderungen im deutschen Bauwesen definiert. Die Anforderungsanalyse erfolgt anhand der Betrachtung folgender Schwerpunkte:

- Normen und Gesetze,
- Gebäudegeometrie,
- Baukonstruktion,
- Bauverfahrenstechnik.

### 2.1.2 Normative Anforderungen

**Ausführungstoleranzen**

Die DIN 18202 „Toleranzen im Hochbau – Bauwerke“ (DIN 18202) regelt die Ausführungsgenauigkeiten bei der Erstellung von Gebäuden. Diese Regelungen bilden die wesentlichen Anforderungen hinsichtlich der Ausführungstoleranzen des Druckprozesses in Deutschland. Relevant sind im Speziellen folgende Regelungen der DIN 18202, die Tabelle 2 im Überblick zulässiger Maßabweichungen gegenüber den Planunterlagen (Grundrisse, Aufrisse, lichte Maße etc.) zusammenfasst.

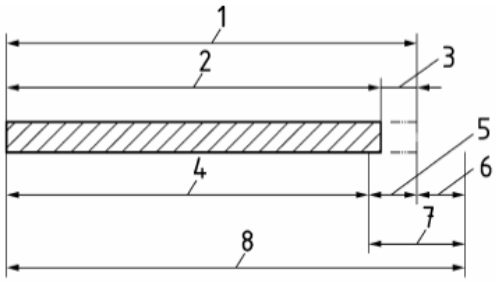
Die zulässigen Maßabweichungen richten sich nach den jeweiligen Nennmaßen der Bauteile. Beispielsweise sind bei Bauteilen mit einem Nennmaß von 1,0 m Maßabweichungen bis 10,0 mm (vergleiche rote Markierung in Tabelle 2) gegenüber dem Grundriss zulässig. Je größer das Nennmaß ist, desto größer sind die zulässigen Maßabweichungen. Der Begriff „Grenzabweichung“ wird in Abbildung 2 visuell verdeutlicht.

*Tabelle 2: Grenzabweichungen für Maße (DIN 18202)*

| 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[a] |
| 1 | Maße im Grundriss, z. B. Längen, Breiten, Achs- und Rastermaße (siehe 6.4.1 und 6.5.1) | ±10 | ±12 | ±16 | ±20 | ±24 | ±30 |
| 2 | Maße im Aufriss, z. B. Geschosshöhen, Podesthöhen, Abstände von Aufstandsflächen und Konsolen (siehe 6.4.1 und 6.5.1) | ±10 | ±16 | ±16 | ±20 | ±30 | ±30 |
| 3 | Lichte Maße im Grundriss, z. B. Maße zwischen Stützen, Pfeilern usw. (siehe 6.4.2) | ±12 | ±16 | ±20 | ±24 | ±30 | — |
| 4 | Lichte Maße im Aufriss, z. B. unter Decken und Unterzügen (siehe 6.4.2) | ±16 | ±20 | ±20 | ±30 | — | — |
| 5 | Öffnungen, z. B. für Fenster, Außentüren[b], Einbauelemente (siehe 6.4.3) | ±10 | ±12 | ±16 | — | — | — |
| 6 | Öffnungen wie vor, jedoch mit oberflächenfertigen Leibungen (siehe 6.4.3) | ±8 | ±10 | ±12 | — | — | — |

[a] Diese Grenzabweichungen können bei Nennmaßen bis etwa 60 m angewendet werden. Bei größeren Maßen sind besondere Überlegungen erforderlich.

[b] Innentüren siehe DIN 18100.




**Legende**

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | Nennmaß | 5 | Grenzabweichung (-) |
| 2 | Istmaß | 6 | Grenzabweichung (+) |
| 3 | Maßabweichung | 7 | Maßtoleranz |
| 4 | Mindestmaß | 8 | Höchstmaß |

*Abbildung 2: Definition des Begriffs Grenzabweichung (DIN 18202)*

Ein weiterer wichtiger Begriff zur Beurteilung der Maßhaltigkeit ist das „Stichmaß“, das bei der Ermittlung von zulässigen Winkelabweichungen und Ebenheitsabweichungen eine relevante Größe darstellt (Abbildung 3).

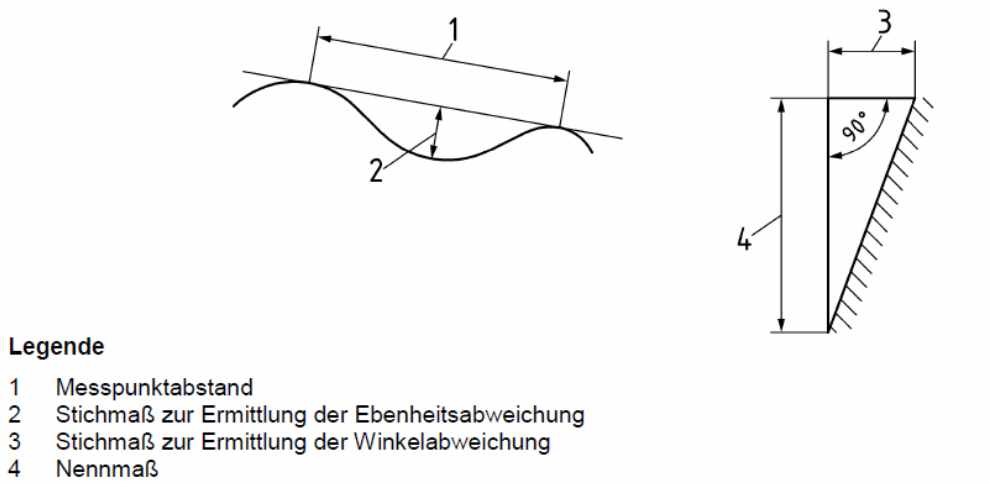



*Abbildung 3: Visuelle Verdeutlichung des Begriffs „Stichmaß“ (DIN 18202)*

Tabelle 3 gibt Auskunft über zulässige Winkelabweichungen. Beispielsweise ist es zulässig, dass eine Wand mit einer Höhe von 3,0 m bis 8,0 mm außer Lot steht.

*Tabelle 3: Grenzwerte für Winkelabweichungen (DIN 18202)*

| Spalte | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Zeile | Bezug | Stichmaße als Grenzwerte in mm bei Nennmaßen in m | | | | | | |
| | | bis 0,5 | über 0,5 bis 1 | über 1 bis 3 | über 3 bis 6 | über 6 bis 15 | über 15 bis 30 | über 30[a] |
| 1 | Vertikale, horizontale und geneigte Flächen | 3 | 6 | 8 | 12 | 16 | 20 | 30 |

[a] Diese Grenzabweichungen können bei Nennmaßen bis etwa 60 m angewendet werden. Bei größeren Maßen sind besondere Überlegungen erforderlich.

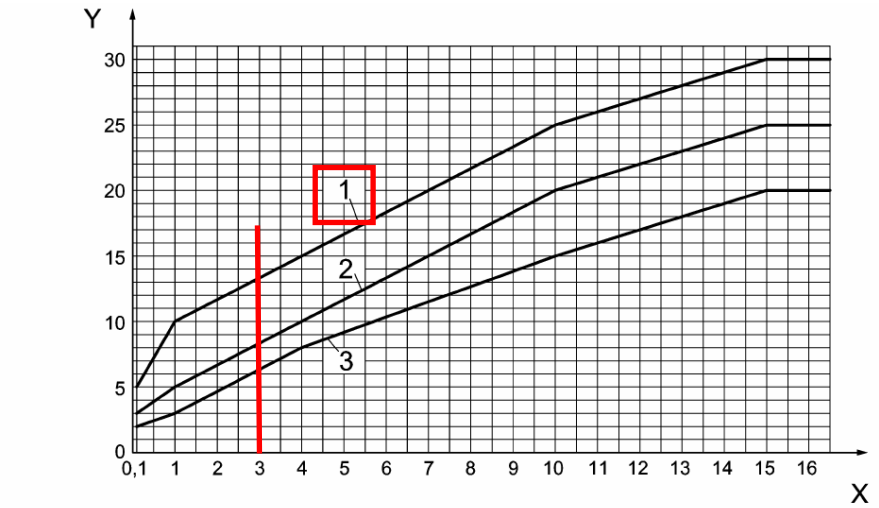
Außerdem definiert die DIN 18202 zulässige Ebenheitsabweichungen. In Tabelle 4 und Abbildung 4 sind die zulässigen Ebenheitsabweichungen für Wandflächen rot markiert. Bei Messpunktabständen von 10 cm liegen die zulässigen Ebenheitsabweichungen bei $Y \leq 5{,}0$ mm, bei Messpunktabständen von 3,0 m sind etwa $Y \leq 13{,}0$ mm einzuhalten.

*Tabelle 4: Grenzwerte für Ebenheitsabweichungen (DIN 18202)*

| Spalte | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Zeile | Bezug | Stichmaße als Grenzwerte in mm bei Messpunktabständen in m | | | | |
| | | bis 0,1 | 1[a] | 4[a] | 10[a] | 15[a,b] |
| 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 | 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 | 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 |

[a] Zwischenwerte sind Bild 6 und Bild 7 zu entnehmen und auf ganze Millimeter zu runden.

[b] Die Grenzwerte für Ebenheitsabweichungen der Spalte 6 gelten auch für Messpunktabstände über 15 m.




**Legende**

1 Zeile 5
2 Zeile 6
3 Zeile 7

X Abstand der Messpunkte (m)
Y Grenzwerte für Ebenheitsabweichungen (mm)

*Abbildung 4: Grenzwerte für Ebenheitsabweichungen für Wandflächen und Unterseiten von Decken (DIN 18202)*

In *Zusammenfassung* vorgenannter Kriterien ergeben sich für CONPrint3D® UL nachfolgende Anforderungen für das Anwendungsszenario einer Wand mit definierten Öffnungen und einer Höhe von bis zu 3,0 m:

| **Anforderungen an die Ausführungsgenauigkeit** | **[mm]** |
|---|---|
| Zulässige Maßabweichung gegenüber den Planunterlagen (Grund- und Aufriss) | **10** |
| Zulässige Maßabweichungen bei lichten Öffnungen (Fenster, Türen) | 10 |
| Zulässige Winkelabweichungen in der vertikalen und horizontalen Ebene | 8 |
| Zulässige Ebenheitsabweichungen in der vertikalen Ebene (Höhe bis 3,0 m) | 13 |
| Zulässige Ebenheitsabweichungen zwischen den Schichten (Höhe bis 0,1 m) | **5** |

**Tragfähigkeit**

Um die Anwendung von Mauerwerk in Deutschland zu vereinheitlichen, führte das Deutsche Institut für Normung erstmalig im Jahr 1937 die DIN 1053 ein (DIN 1053). Die Norm wurde anschließend mehrmalig angepasst. Mit der Einführung neuer Bemessungsregeln nach Eurocode 6 wurde die DIN EN 1996-1-1 zur maßgebenden Norm zur Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten (DIN EN 1996). Um Mauerwerkswände marktfähig durch CONPrint3D® UL zu ersetzen, müssen mindestens vergleichbare Bemessungskennwerte erreicht werden. Mauerwerk wird überwiegend bei druckbeanspruchten Bauteilen eingesetzt. Eine wesentliche Kenngröße ist die charakteristische Druckfestigkeit von Mauerwerk in Verbindung mit Normal-, Dünnbett- oder Leichtmörtel. Einflussgebend sind die eingesetzten Mauerwerkssteine mit genormten Steinfestigkeiten in Verbindung mit der verwendeten Mörtelgruppe. Zusammenfassende Übersichten zu den Druckfestigkeiten sind dem einschlägigen Werk der SCHNEIDER-Bautabellen zu entnehmen (Schneider Bautab).

Die Tabelle 5 zeigt die Rohdichte- und Festigkeitsklassen gängiger genormter Mauersteine. Die Festigkeitsklassen bezeichnen die kleinsten Einzelwerte der Druckfestigkeiten in N/mm$^2$. Die umgerechnete mittlere Mindestdruckfestigkeit des Mauersteins liegt im Mittel rund 20 % über dem angegebenen Wert. Beispielsweise besitzt die Druckfestigkeitsklasse 4 eine mittlere Mindestdruckfestigkeit von 5 N/mm$^2$, angegeben sind allerdings 4 N/mm$^2$. Die Rohdichteklassen bezeichnen die Dichte in kg/dm$^3$. Als Endprodukt von CONPrint3D® UL ist ein gedruckter Schaumbeton mit einer Dichte von bis zu 0,8 kg/dm$^3$ geplant.

Für die verwendeten Mörtel werden Druckfestigkeitsklassen mit der Bezeichnung M vergeben. In Tabelle 6 sind die Druckfestigkeitsklassen und zugehörigen Druckfestigkeiten für Normalmörtel (NM), Leichtmauermörtel (LM) und Dünnbettmörtel (DM) dargestellt.

Durch die vermörtelten Lagerfugen (und Stoßfugen) wird die Festigkeit der Mauerwerkswand im Vergleich zur Steinfestigkeit gemindert. In den (Schneider Bautab) Tafel 7.15 b, 7.15 c sowie 7.16 a bis 17.16 f sind die charakteristischen Druckfestigkeiten der verschiedenen Mauerwerksbaustoffe in Kombination mit unterschiedlichen Mörtelarten tabellarisch dargestellt. Im Anwendungsfeld des Wohnungsneubaus wird zunehmend mit großformatigen Plansteinen und

Dünnbettmörtel gemauert. Dies hat vor allem konstruktive Gründe, z. B. sind höhere Festigkeitswerte und eine bessere Dichtheit des Mauerwerkverbunds (durch weniger Fugenanteil) erreichbar, sowie wirtschaftliche Gründe, z. B. ist die Ausführung deutlich schneller. Tabelle 7 zeigt exemplarisch die charakteristischen Druckfestigkeiten von Kalksandstein-Plansteinen und Tabelle 8 die von Porenbeton jeweils in Kombination mit Dünnbettmörtel. Dabei sind die in der Praxis üblichen Festigkeiten rot markiert.

In einem ersten Entwicklungsschritt ist geplant, den Mauerwerksbau durch CONPrint3D® UL zu ersetzen. Im Anwendungsszenario „bis fünfgeschossiger Wohnungsbau“ wird aktuell sehr häufig mit großformatigen Plansteinen und Dünnbettmörtel gearbeitet. Während im Einfamilienhausbau die Tragfähigkeit von Porenbetonsteinen häufig ausreichend ist, wird in höhergeschossigen Gebäuden ein tragfähigeres Material wie Ziegel oder Kalksandstein gewählt um den statischen Nachweis zu erbringen.

*Tabelle 5: Rohdichteklassen und Festigkeitsklassen gängiger genormter Mauersteine (Schneider Bautab)*

| Bezeichnung | Rohdichte-klasse | Festigkeitsklassen | | | | | | | $G_M$ [1)] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2 | 4 | 6 | 8 | 12 | 20 | 28 | kN/m³ |
| **Mauerziegel** DIN V 105-100 bzw. DIN EN 771-1 und DIN V 20 000-401 | 0,6 | | ● | ● | ● | | | | 7 |
| | 0,65 | | ● | ● | ● | | | | 7,5 |
| Mz Vollziegel (1,6–2,0 kg/dm³) | 0,7 | | ● | ● | ● | ● | | | 9 |
| | 0,75 | | ● | ● | ● | ● | | | 9,5 |
| HLz Hochlochziegel (0,6–1,4 kg/dm³) | 0,8 | | ● | ● | ● | ● | | | 10 |
| KMz Vollklinker (2,0–2,2 kg/dm³) | 0,9 | | | ● | ● | ● | | | 11 |
| KHLz Hochlochklinker (1,6–1,8 kg/dm³) | 1,0 | | | | ● | ● | ● | | 12 |
| VHLz Hochlochziegel, frostbeständig (1,0–1,4 kg/dm³) | 1,2 | | | | ● | ● | ● | | 14 |
| | 1,4 | | | | | ● | ● | ● | 15 |
| VMz Vollziegel, frostbeständig (1,6–1,8 kg/dm³) | 1,6 | | | | | ● | ● | ● | 17 |
| | 1,8 | | | | | ● | ● | ● | 18 |
| | 2,0 | | | | | ● | ● | ● | 20 |
| **Kalksandsteine** DIN V 106 bzw. DIN EN 771-2 u. DIN V 20 000-402 | 1,2 | | | | | ● | | | 14 |
| KS Vollsteine (1,6–2,2 kg/dm³)<br>KS L Lochsteine (1,2–1,6 kg/dm³)<br>KS Vm Vormauersteine (1,8–2,0 kg/dm³)<br>KS Vb Verblender (1,8–2,0 kg/dm³)<br>KS VmL Vormauersteine, gelocht (1,4–1,6 kg/dm³)<br>KS VbL Verblender, gelocht (1,4–1,6 kg/dm³) | 1,4 | | | | | ● | ● | | 16 |
| | 1,6 | | | | | ● | ● | ● | 16 |
| | 1,8 | | | | | ● | ● | ● | 18 |
| | 2,0 | | | | | ● | ● | ● | 20 |
| | 2,2 | | | | | | ● | ● | 22 |
| **Porenbetonsteine** DIN V 4165-100 bzw. DIN EN 771-4 und DIN V 20 000-404 | 0,35 | ● | | | | | | | 4,5 |
| | 0,4 | ● | | | | | | | 5 |
| PP Porenbeton-Plansteine<br>PPE Porenbeton-Planelemente | 0,5 | ● | | | | | | | 6 |
| | 0,55 | | ● | | | | | | 6,5 |
| | 0,6 | | ● | | | | | | 7 |
| | 0,65 | | | ● | | | | | 7,5 |
| | 0,7 | | | ● | | | | | 8 |
| | 0,8 | | | | ● | | | | 9 |
| **Leichtbeton und Beton** | 0,45 | ● | ● | | | | | | 6,5 |
| Hbl Leichtbeton-Hohlblocksteine DIN V 18 151-100 (0,45–1,6 kg/dm³) | 0,5 | ● | ● | ● | | | | | 7 |
| | 0,6 | ● | ● | ● | | | | | 8 |
| | 0,7 | ● | ● | ● | | | | | 9 |
| Vbl, V Vollblöcke und Vollsteine aus Leichtbeton DIN V 18 152-100 (0,45–2,0 kg/dm³) | 0,8 | ● | ● | ● | | | | | 10 |
| | 0,9 | ● | ● | ● | ● | | | | 11 |
| | 1,0 | ● | ● | ● | ● | | | | 12 |
| Hbn Mauersteine aus Beton DIN V 18 153-100 (0,8–2,4 kg/dm³) | 1,2 | ● | ● | ● | ● | | | | 14 |
| | 1,4 | ● | ● | ● | ● | | | | 16 |
| | 1,6 | | | ● | ● | ● | | | 16 |
| | 1,8 | | | ● | ● | ● | ● | | 18 |
| Es können auch DIN EN 771-3 und DIN V 20 000-403 verwendet werden. | 2,0 | | | ● | ● | ● | ● | | 20 |
| | 2,2 | | | ● | ● | ● | ● | ● | 22 |
| | 2,4 | | | ● | ● | ● | ● | ● | 24 |

***Hinweis:*** *Neben den genormten Mauersteinen gibt es weitere Steine auf Grund von Zulassungen des Deutschen Instituts für Normung.*

[1)] $G_M$: Eigenlast des Mauerwerks bei Verwendung von Normalmörtel.

*Tabelle 6: Rechenwerte für die Druckfestigkeiten von Mauermörtel (Schneider Bautab)*

| Mörtelart | Druckfestigkeits-klasse nach DIN EN 998-2 | Mörtelgruppe nach DIN V 20000-412 oder DIN V 18580 | Anforderungskategorien nach DIN EN 998-2 | Druckfestigkeit N/mm² |
|---|---|---|---|---|
| Normalmauermörtel | M 2,5 | II | Zusätzlich zu den Anforderungen an die Druckfestigkeit sind alle weiteren für die jeweilige Mörtel-gruppe in DIN V 20000-412 enthaltenen Anforderungen zu erfüllen. | 2,5 |
| | M 5 | IIa | | 5,0 |
| | M 10 | III | | 10,0 |
| | M 20 | IIIa | | 20,0 |
| Leichtmauermörtel | M 5 | LM 21, LM 36 | | 5,0 |
| Dünnbettmörtel | M 10 | DM | | 10,0 |

*Tabelle 7: Charakteristische Druckfestigkeit in N/mm² aus Kalksandstein-Plansteinen und -Planelementen mit Dünnbettmörtel (Schneider Bautab)*

| Steinfestigkeitsklasse | Planelemente | | Plansteine | |
|---|---|---|---|---|
| | KSXL | KSXL-N, KSXL-E | KSP | KSL-P |
| 4 | 2,9 | 2,9 | 2,9 | 2,9 |
| 6 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 3,7 |
| 8 | 5,0 | 5,0 | 5,0 | 4,4 |
| 10 | 6,0 | 6,0 | 6,0 | 5,0 |
| 12 | 9,4 | 7,0 | 7,0 | 5,6 |
| 16 | 11,2 | 8,8 | 8,8 | 6,6 |
| 20 | 12,9 | 10,5 | 10,5 | 7,6 |

KSP KS-Planstein mit einem Lochanteil ≤ 15%
KSL-P KS-Planstein mit einem Lochanteil > 15%
KSXL KS-Planelement ohne Längsnut, ohne Lochung
KSXL-N KS-Planelement mit Längsnut, ohne Lochung
KSXL-P KS-Planelement ohne Längsnut, mit Lochung

*Tabelle 8: Charakteristische Druckfestigkeit in N/mm² aus Porenbeton mit Dünnbettmörtel (Schneider Bautab)*

| Steinfestigkeitsklasse | Dünnbettmörtel |
|---|---|
| 2 | 1,8 |
| 4 | 3,0 |
| 6 | 4,1 |
| 8 | 5,1 |

In *Zusammenfassung* vorgenannter Kriterien ergeben sich für CONPrint3D® UL nachfolgende Anforderungen:

Als Projektziel wird für tragende Wände eine mittlere Druckfestigkeit der gesamten Wandkonstruktion von 8 N/mm$^2$ festgelegt.

Bei nicht tragenden Wänden kann die Druckfestigkeit reduziert werden. Aus statischer Sicht wäre eine Druckfestigkeit < 1 N/mm$^2$ denkbar. Der Schaumbeton wäre allerdings in diesem Zustand sehr porös und damit nicht gebrauchstauglich. Die Gebrauchstauglichkeit ist ab einer Druckfestigkeit > 3 N/mm$^2$ für den Druckprozess und die Nachbearbeitung gegeben.

**Wärmeschutz**

In Deutschland stellt seit 2002 die Energieeinsparverordnung (EnEV) die maßgebende Norm für die Einhaltung des Wärmeschutzes dar. Die energiepolitischen Ziele der Bundesregierung sehen vor, bis zum Jahr 2050 einen klimaneutralen Gebäudebestand zu erreichen. Dazu werden die Anforderungen nach EnEV schrittweise angehoben. Aktuell gelten die Anforderungen der EnEV 2014 (EnEV 2014). Zusätzlich sind zum 01.01.2016 Änderungen in Kraft getreten, die eine weitere Absenkung des Jahres-Primärenergiebedarfs um 25 % bei Neubauvorhaben vorschreiben (EnEV 2016). Der Jahres-Primärenergiebedarf ist nach DIN V 18599 (12.2011) sowie den Änderungen DIN V 18599-5 Ber. 1 (05.2013) und DIN V 18599-8 Ber. 1 (05.2013) gebäudespezifisch zu ermitteln (DIN V 18599). Mit EnEV 2014 wurde ein Referenzgebäude mit bauteilspezifischen Wärmedurchgangskoeffizienten U definiert. Mit diesen Kennwerten wird eine Vergleichsberechnung für das betreffende Bauwerk durchgeführt. Für das gewählte Anwendungsszenario der Außenwand (siehe Abbildung 1) gibt das Referenzgebäude nach EnEV 2014 einen Wärmedurchgangskoeffizienten von U = 0,28 W/(m$^2$K) vor. Multipliziert mit dem Faktor 0,75 (aus Vorgabe EnEV 2016), ergibt sich U = 0,21 W/(m$^2$K), was durch die Außenwandkonstruktion zu gewährleisten ist. U berechnet sich nach Formel 1. Für das gewählte Anwendungsszenario ergibt sich Formel 2. Durch Vorgabe verschiedener Wanddicken $d_s$ kann die Anforderung hinsichtlich der zu erreichenden Wärmeleitzahl des Schaumbetons berechnet werden (Tabelle 9).

*Formel 1: Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten U (Schneider Bautab)*

$$U = \frac{1}{R_T} \; mit \; R_T = R_{si} + \sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{\lambda_i} + R_{se}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| *U …* | *Wärmedurchgangskoeffizient* | *$R_T$ …* | *Wärmedurchgangswiderstand (Wdwst)* |
| *$R_{si}$ …* | *Wdwst innen* | *$R_{se}$ …* | *Wdwst außen* |
| *d …* | *Dicke in m* | *λ …* | *Wärmeleitzahl in W/(m$^2$K)* |

*Formel 2:* *Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten U für das gewählte Anwendungsszenario, Werte aus (Schneider Bautab)*

$$U = \frac{1}{0{,}13 + \frac{0{,}015}{0{,}70} + \frac{d_s}{\lambda_s} + \frac{0{,}015}{1{,}0} + 0{,}04}$$

*Wdwst innen* *Innenputz* *Schaumbeton* *Außenputz* *Wdwst außen*

*Tabelle 9:* *Wärmeleitzahlen in Abhängigkeit der Wanddicke nach EnEV 2014 mit U = 0,28 W/(m²K) (EnEV 2014) und EnEV 2016 mit U = 0,21 W/(m²K) (EnEV 2016)*

| $d_s$ in cm | $\lambda_s$ in W/(m²K) gemäß (EnEV 2014) | $\lambda_s$ in W/(m²K) gemäß (EnEV 2014) |
|---|---|---|
| 36 | 0,107 | 0,079 |
| 38 | 0,113 | 0,083 |
| 40 | 0,119 | 0,088 |
| 42 | 0,125 | 0,092 |
| 44 | 0,131 | 0,097 |
| 46 | 0,137 | 0,101 |
| 48 | 0,143 | 0,105 |
| 50 | 0,149 | 0,110 |
| 52 | 0,155 | 0,114 |
| 54 | 0,160 | 0,119 |
| 56 | 0,166 | 0,123 |
| 58 | 0,172 | 0,127 |
| 60 | 0,178 | 0,132 |

Da der einzuhaltende Jahres-Primärenergiebedarf durch viele „Stellschrauben“ innerhalb der Berechnungsmethodik erreicht werden kann, wurden beide Tabellenspalten dargestellt. Der rot markierte Wert der EnEV 2014 ist dabei als Mindestwert und der Wert nach EnEV 2016 als Richtwert zu verstehen. In der Tabelle ist der zu erreichende Zielwert für eine Wanddicke von 50 cm gemäß Anwendungsszenario markiert.

In *Zusammenfassung* vorgenannter Kriterien ergeben sich für CONPrint3D® UL die Anforderung $\lambda_s$ = 0,11 W/(m²K).

**Brandschutz**

Tragende Wandkonstruktionen müssen nach Musterbauordnung (MBO) im Brandfall ausreichend lange einer Brandausbreitung widerstehen, ohne die Tragfähigkeit zu verlieren. Der gedruckte Schaumbeton ist nach jetzigem Kenntnisstand in die Kategorie der Baustoffklasse A1 nach DIN 4102-1 einzuordnen, also als „nicht brennbar“ einzustufen (DIN 4102). Dies ist im Sinne des Brandschutzes vorteilhaft, da bereits relativ geringe Wanddicken einen guten Brandschutz gewährleisten. Im Hochbau bilden Brandwände einen Qualitätsanspruch, der beispielsweise bei Wänden in Treppenräumen notwendig ist. Eine Brandwand trägt die Bezeichnung F 90-A, d. h. die Wand besteht aus nicht brennbarem Material und hält einer einseitigen Brandbelastung für mindestens 90 Minuten Stand. Um das Brandverhalten des Endprodukts von CONPrint3D® UL vorab abzuschätzen, sind zum Vergleich in Tabelle 10 die Mindestdicken tragender, raumabschließender Wände (= Feuerwiderstandsklasse REI) aus Porenbeton mit entsprechendem Feuerwiderstand in Minuten aufgelistet.

*Tabelle 10: Mindestdicke tragender, raumabschließender Wände am Beispiel von Porenbetonsteinen mit Dünnbettmörtel*

| Materialeigenschaften | Mindestwanddicke $t_F$ in mm zur Einstufung in die Feuerwiderstandsklasse REI in Minuten | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 30 | 60 | 90 | 120 | 180 |
| Porenbetonsteine nach DIN EN 771-4 in Verbindung mit DIN 20000-404; nach bauaufsichtlicher Zulassung: Planelemente, Mauertafeln und unbewehrte Wandtafeln, Rohdichteklasse ≥ 0,4, unter Verwendung von Dünnbettmörtel (DIN EN 771, DIN 20000) | | | | | |
| Ausnutzungsfaktor $\alpha_{6,fi} = 0{,}15$ | 115 (115) | 115 (115) | 115 (115) | 115 (115) | 150 (115) |
| Ausnutzungsfaktor $\alpha_{6,fi} = 0{,}42$ | 115 (115) | 115 (115) | 150 (115) | 150 (150) | 175 (175) |
| Ausnutzungsfaktor $\alpha_{6,fi} = 0{,}70$ | 115 (115) | 150 (115) | 175 (150) | 175 (175) | 200 (200) |

*Die ()-Werte gelten für Wände mit beidseitigem Putz.*

Die gedruckten Schaumbetonwände mit beidseitigem Putzauftrag sollen die Anforderungen an eine Brandwand erfüllen. In der Tabelle 10 sind dazu die Mindestdicken rot markiert. Der Ausnutzungsfaktor $\alpha_{6,fi}$ ist dabei eine statisch bedingte Größe, die aus dem Standsicherheitsnachweis des Gebäudes abgeleitet werden kann. Der gedruckte Schaumbeton kann in die Baustoffklasse A1 „nicht brennbar“ eingestuft werden. Wanddicken von 11,5 cm sollten bereits ausreichend sein, um Wände der Feuerwiderstandsklasse F90 zu erzeugen. Bei nicht tragenden Wänden kann die Wanddicke aus brandschutztechnischer Sicht reduziert werden, da die Anforderung einer F90 Wand nicht gegeben ist.

In *Zusammenfassung* vorgenannter Kriterien ergeben sich für CONPrint3D® UL nachfolgende Anforderungen hinsichtlich Brandschutz:

Mit dem Regelquerschnitt ist die Einhaltung der geltenden Brandschutzanforderungen durch den Baustoff Schaumbeton gegeben. Gegenüber anderen Wandsystemen besitzt der Baustoff Schaumbeton hier deutliche Vorteile, da keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich sind.

**Schallschutz**

Für den öffentlich-rechtlichen Nachweis des Schallschutzes sind die Anforderungen nach DIN 4109 relevant (DIN 4109). Auf Basis verschiedener Gerichtsurteile ist allerdings zu schlussfolgern, dass besonders im privatrechtlichen Bereich zum Teil deutlich höhere Anforderungen an den Schallschutz zu erbringen sind. So sieht es beispielsweise ein „gehobener" Baustandard vor, dass erhöhte Schallschutzmaßnahmen vorzusehen sind. Die DIN 4109 Beiblatt 2 und die VDI 4100 geben Auskunft über erhöhte Schallschutzanforderungen, die dem heutigen Stand der Technik entsprechen (DIN 4109, VDI 4100). Für das gewählte Anwendungsszenario gibt es einerseits relevante Anforderungen an Außenbauteile und andererseits an verschiedene Trennwände im Bauwerksinneren. Tabelle 11 stellt die Mindestanforderungen hinsichtlich des Luftschalldämmmaßes von Außenbauteilen dar. Tabelle 12 fasst die Anforderungen an Trennwände im Bauwerksinneren zusammen.

*Tabelle 11: Anforderungen an das erforderliche Luftschalldämmmaß von Außenbauteilen nach DIN 4109 und VDI 4100 (Schneider Bautab)*

| Lärmpegel bereich | Maßgeblicher Außenlärm in db (A) | Bettenräume in Kranken-anstalten und Sanatorien | Aufenthaltsräume in Wohnungen, Übernachtungsräume in Beherbergungsstätten, Unterrichtsräume u. Ä. | | Büroräume u. Ä. |
|---|---|---|---|---|---|
| | | DIN 4109 | DIN 4109 | VDI 4100 | DIN 4109 |
| **I** | ≤ 55 | 35 | 30 | 35 | - |
| **II** | 56 bis 60 | 35 | 30 | 35 | 30 |
| **III** | 61 bis 65 | 40 | 35 | 40 | 30 |
| **IV** | 66 bis 70 | 45 | 40 | 45 | 35 |
| **V** | 71 bis 75 | 50 | 45 | 50 | 40 |
| **VI** | 76 bis 80 | separat festzulegen | 50 | 55 | 45 |
| **VII** | > 80 | separat festzulegen | separat festzulegen | separat festzulegen | 50 |

*Tabelle 12: Anforderungen an den Schallschutz gegenüber Schallübertragung aus einem fremden Wohn- oder Arbeitsbereich nach DIN 4109 und DIN 4109 Beiblatt 2 (Schneider Bautab)*

| **Bauteil** | **Anforderung (in db)** | |
|---|---|---|
| | **DIN 4109 (normal)** | **DIN 4109 Beiblatt 2 (erhöht)** |
| | **Luftschalldämmmaß erforderlich** | **Luftschalldämmmaß erforderlich** |
| ***Geschosshäuser mit Wohnungen und Arbeitsräumen*** | | |
| Wohnungstrennwände und Wände zwischen fremden Arbeitsräumen | 53 | ≥ 55 |
| Treppenraumwände und Wände neben Hausfluren | 53 | ≥ 55 |
| Wände neben Durchfahrten, Einfahrten von Sammelgaragen, etc. | 55 | - |
| Wände von Spiel- oder ähnlichen Gemeinschaftsräumen | 55 | - |
| ***Einfamilien-Doppelhäuser und Einfamilien-Reihenhäuser*** | | |
| Haustrennwände | 57 | ≥ 67 |
| ***Beherbergungsstätten*** | | |
| Wände zwischen Übernachtungsräumen sowie Fluren und Übernachtungsräumen | 47 | ≥ 52 |
| ***Krankenanstalten und Sanatorien*** | | |
| Wände zwischen a) Krankenräumen, b) Fluren und Krankenräumen, c) Untersuchungs- und Besprechungszimmern etc. | 47 | ≥ 52 |
| ***Schulen und vergleichbare Unterrichtsbauten*** | | |
| Wände zw. Unterrichts- und ähnlichen Räumen sowie Fluren | 47 | |
| Wände zwischen Unterrichts- und ähnlichen Räumen und Treppenhäusern | 52 | |
| Wände zwischen Unterrichts- und ähnlichen Räumen und besonders lauten Räumen (z. B. Sporthallen, Musikräume, Werkräume) | 55 | |

Aufgrund der geringeren Dichte und Masse des Schaumbetons wird der erzielte Schalldämmwert deutlich unter dem des Normalbetons liegen.

In *Zusammenfassung* vorgenannter Kriterien ergeben sich für CONPrint3D® UL nachfolgende Anforderungen hinsichtlich Schallschutz:

Als projektrelevanter Zielwert kann allgemein ein Luftschalldämmmaß von 55 db definiert werden. Es ist aktuell noch nicht abschätzbar, bei welcher Wanddicke dieser Wert erreicht werden kann. Hier ergibt sich weiterer Forschungsbedarf über das vorhandene Forschungsvorhaben hinaus. Eine umfangreiche bauphysikalische Prüfung von Probekörpern ist in nachfolgenden Forschungsprojekten durchzuführen.

### 2.1.3 Geometrische Anforderungen

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, alle in einem Grundrissplan theoretisch vorkommenden Wände mit den typischen geometrischen Besonderheiten durch CONPrint3D® UL monolithisch zu erstellen. Der Druckkopf soll in der Lage sein, Wände in der aus statischer Sicht erforderlichen Wanddicke zu drucken. D. h. der Druckkopf soll variabel Wanddicken von etwa 10 cm bis 40 cm erzeugen können. Außerdem soll es möglich sein, alle geometrischen Besonderheiten, wie z. B. verschiedene Wandverbindungen oder Aussparungen, umzusetzen. In Abbildung 5 ist ein fiktiver Grundrissplan mit den relevanten geometrischen Besonderheiten dargestellt.

In Tabelle 13 sind die relevanten geometrischen Besonderheiten sowie die erforderlichen Bauteilinformationen, Beispiele und deren Benennung in einer Übersicht zusammengefasst. Der Druckkopf muss maschinentechnisch so konzipiert sein, dass er in der Lage ist, den Beton präzise auszubringen, um diese geometrischen Besonderheiten realisieren zu können.

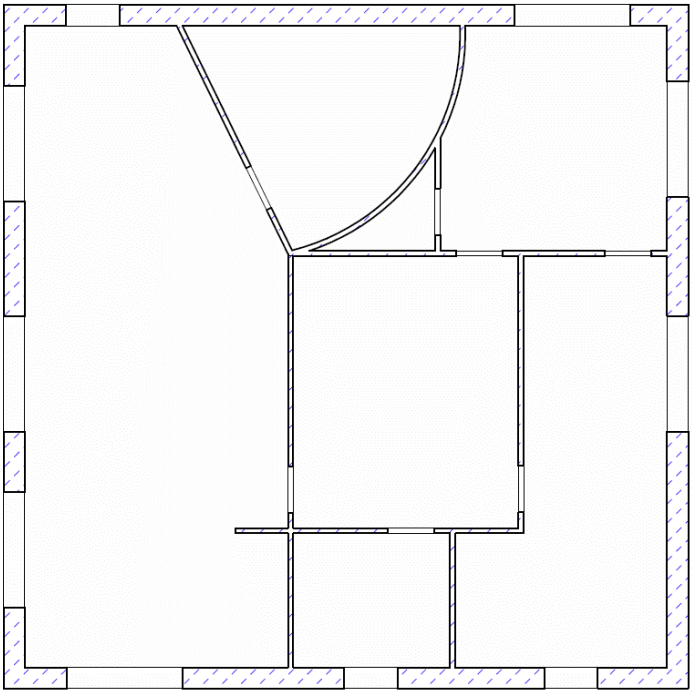
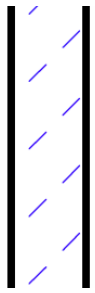
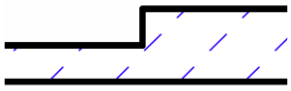
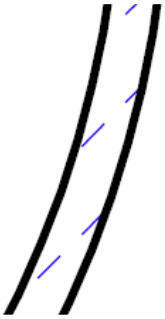
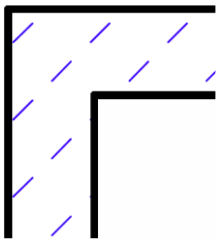
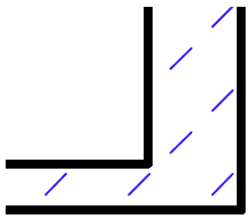
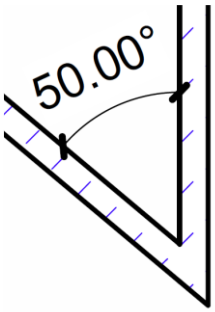
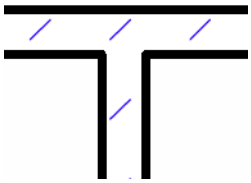
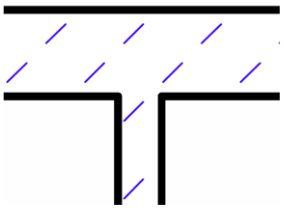
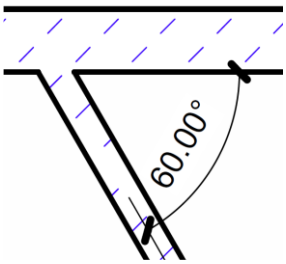
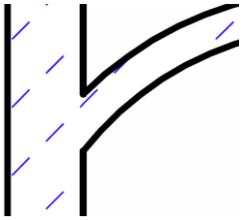
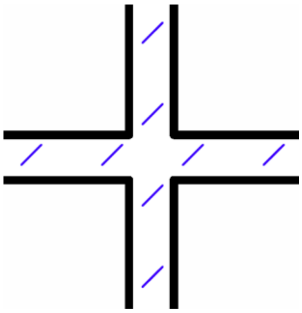
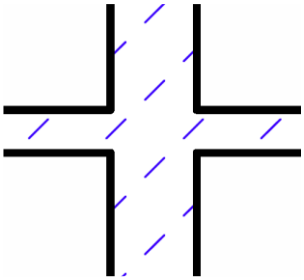
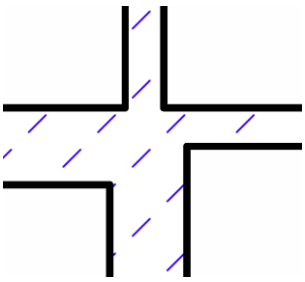


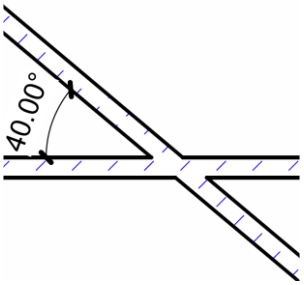
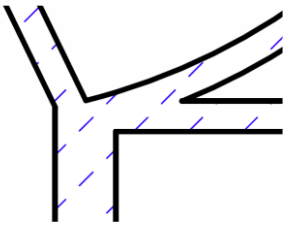
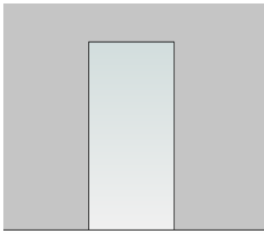
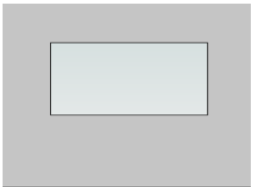
*Abbildung 5: Fiktiver Grundrissplan mit relevanten geometrischen Besonderheiten*

*Tabelle 13: Übersicht der baukonstruktiven Besonderheiten im Hochbau*

| **Baukonstr. Besonderheit** | **Bauteil-informa-tionen** | **Beispiel** | | |
|---|---|---|---|---|
| | | **Planauszug** | **Kurz-form** | **Erläuterung** |
| Wand gerade | Außenwand, Innenwand, tragend oder nichttragend, Wanddicke, Länge, Anfangs- und Endpunkt |  | W g-AW(40) | W … Wand<br>g … gerade<br>AW … Außenwand<br>(40) … Dicke 40 cm |
| Wand gerade, Verjüngung | Außenwand, Innenwand, tragend oder nichttragend, Wanddicke 1, Wanddicke 2, Länge, Anfangs- und Endpunkt |  | W g-AW(20/40) | W … Wand<br>g … gerade<br>AW … Außenwand<br>20 … W-Dicke 1: 20 cm<br>40 … W-Dicke 1: 40 cm |
| Wand, rund | Außenwand, Innenwand, tragend oder nichttragend, Wanddicke, Länge, Anfangs- und Endpunkt, Radius und Mittelpunkt |  | W r-IW(20) | Wand … Wand<br>r … rund<br>IW … Innenwand<br>(20) … W-Dicke: 20 cm |
| Wandeck-verbindung, 90° | Außenwand, Innenwand, tragend oder nichttragend, Winkel, Wanddicke 1, Wanddicke 2 |  | E 90-AW(40) | E … Ecke<br>90 … Winkel 90 °<br>AW … Außenwand<br>(40) … W-Dicke: 40 cm |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Wandeck-verbindung, 90°, Wanddicke verschieden | Außenwand, Innenwand, tragend oder nichttragend, Winkel, Wanddicke 1, Wanddicke 2 |  | E 90-IW(20)-IW(40) | E … Ecke<br>90 … Winkel 90 °<br>IW … Innenwand<br>(10/20) …<br>W-Dicke 1: 10 cm<br>W-Dicke 2: 40 cm |
| Wandeck-verbindung, < 90° | Außenwand, Innenwand, tragend oder nichttragend, Winkel, Wanddicke 1, Wanddicke 2 |  | E 50-IW(10) | E … Ecke<br>50 … Winkel 50 °<br>IW … Innenwand<br>(10) … Dicke 10 cm |
| Wandeck-verbindung, > 90° | Außenwand, Innenwand, tragend oder nichttragend, Winkel, Wanddicke 1, Wanddicke 2 | | E 154-IW(10) | E … Ecke<br>154 … Winkel 154 °<br>IW … Innenwand<br>(10) … Dicke 10 cm |
| Wand-T-Verbindung, 90 ° | Außenwand, Innenwand, tragend oder nichttragend, Winkel, Wanddicke |  | T 90-IW(20) | T … Wand-T-Verbindung<br>90 … Winkel 90 °<br>IW … Innenwand<br>(20) … Dicke 20 cm |
| Wand-T-Verbindung, 90 °, Wanddicke verschieden | Außenwand, Innenwand, tragend oder nichttragend, Winkel, Wanddicke |  | T 90-AW(40)-IW(20) | T … Wand-T-Verbindung<br>90 … Winkel 90 °<br>(rechtwinklig)<br>AW… Außenwand<br>(40) … Dicke 40 cm<br>IW … Innenwand<br>(20) … Dicke 20 cm |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Wand-T-Verbindung spitz- oder stumpf-winklig, Wanddicke verschieden | Außenwand, Innenwand, tragend oder nichttragend, Winkel, Wanddicke 1, Wanddicke 2 |  | T 60-AW(40)-IW(20) | T … Wand-T-Verbindung<br>60 … Winkel 60 °<br>(spitz- oder stumpfwinklig)<br>AW… Außenwand<br>(40) … Dicke 40 cm<br>IW … Innenwand<br>(20) … Dicke 20 cm |
| Wand-T-Verbindung komplex (Anschluss runde Wand), Wanddicke verschieden | |  | T K-AW(40)-IW(20) | T … Wand-T-Verbindung<br>K … komplex<br>AW… Außenwand<br>(40) … Dicke 40 cm<br>IW … Innenwand<br>(20) … Dicke 20 cm |
| Wand-kreuzung, 90° | Außenwand, Innenwand, tragend oder nichttragend, Winkel, Wanddicke |  | K 90-IW (20) | K … Wandkreuzung<br>90 … Winkel 90°<br>IW … Innenwand<br>(20) … Dicke 20 cm |
| Wand-kreuzung, 90°, Wanddicken verschieden (gerade) | Außenwand, Innenwand, tragend oder nichttragend, Winkel, Wanddicke 1, Wanddicke 2, gerade |  | K 90--IW (20/40) | K … Wandkreuzung<br>90 … Winkel 90°<br>IW … Innenwand<br>(20/40) …<br>Dicke Wand 1: 20 cm<br>Dicke Wand 2: 40 cm |
| Wand-kreuzung, 90 °, Wanddicken verschieden, nicht gerade | Außenwand, Innenwand, tragend oder nichttragend, Winkel, Wanddicke 1, Wanddicke 2, nicht gerade |  | K 90-AW(40)-IW(20) | K … Wandkreuzung<br>90 … Winkel 90°<br>AW… Außenwand<br>(40) … Dicke 40 cm<br>IW … Innenwand<br>(20) … Dicke 20 cm |

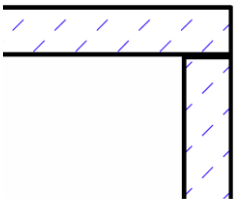
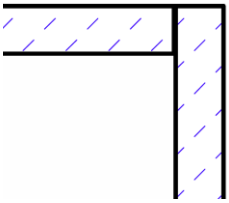
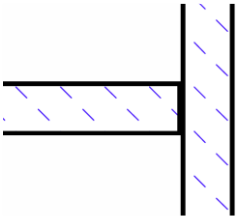
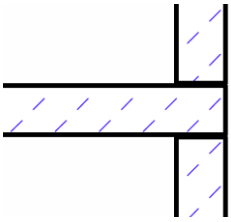
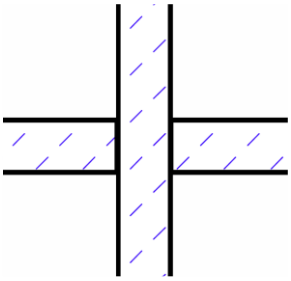
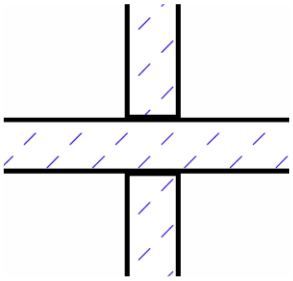
| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Wand-kreuzung, spitzwinklig | Außenwand, Innenwand, tragend oder nichttragend, Winkel, Wanddicke 1, Wanddicke 2 |  | K 40-IW(20) | K … Wandkreuzung<br>40 … Winkel 40°<br>IW … Innenwand<br>(20) … Dicke 20 cm |
| Wand-kreuzung, komplex, Wanddicken verschieden | Außenwand, Innenwand, tragend oder nichttragend, Wanddicke 1, Wanddicke 2, Wanddicke 3, Wanddicke 4 |  | K K-IW (40/20/20/20) | K … Wandkreuzung<br>K … Komplex<br>IW … Innenwand<br>(40/20/20/20) … Dicke Wand 1: 40 cm<br>Dicke Wand 2 bis Wand 4: je 20 cm |
| Freies Wandende | Außenwand, Innenwand, tragend oder nichttragend, Winkel, Wanddicke | | FW-IW(20) | FW … freies Wandende<br>IW … Innenwand<br>(20) … Dicke 20 cm |
| Öffnung, Türen | Tür, Länge, Höhe |  | Ö T-101-213 | Ö … Öffnung<br>T … Tür<br>100 … Länge 101 cm<br>213 … Höhe 213 cm |
| Öffnung, Fenster | Öffnung, Länge, Höhe, Brüstungs-höhe |  | Ö F-220-101-90 | Ö … Öffnung<br>T … Tür<br>220 … Länge 220 cm<br>213 … Höhe 101 cm<br>90 … Brüstungs-höhe 90cm FFB |

### 2.1.4 Konstruktive Anforderungen

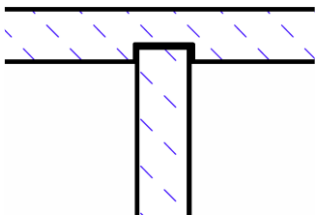
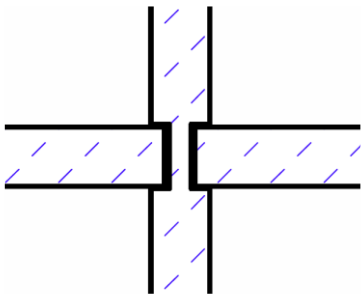
Um Wandverbindungen kraftschlüssig herzustellen, gibt es bereits konventionelle Lösungen im Mauerwerksbau, die auf CONPrint3D® UL übertragen werden können. Aus der Untersuchung der geometrischen Anforderungen ergab sich, dass prinzipiell in drei verschiedene Kategorien von Wandverbindungen unterschieden werden kann: Eckverbindungen, T-Verbindungen und Kreuzungen.

Um diese Wandverbindungen kraftschlüssig zu erzeugen, werden nachfolgend drei Lösungsansätze aufgeführt, die nach ihrer Umsetzungsreihenfolge aufgelistet werden. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes wurde auf Variante 1) Verzahnung durch alternierende Schichtenanordnung fokussiert; alle Wandverbindungen sollen miteinander verzahnt werden.

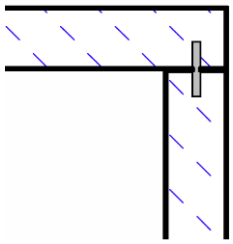
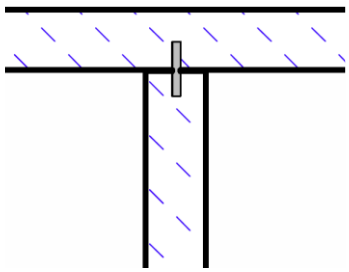
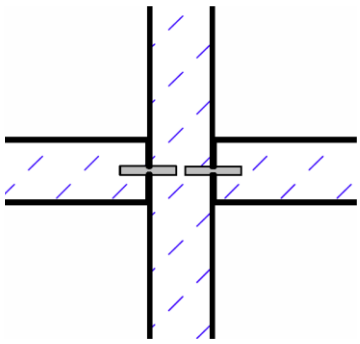
*1) Verzahnung durch alternierende Schichtenanordnung*

| | | |
|---|---|---|
| Eckverbindung | Layer 1  | Layer 2  |
| T-Verbindung | Layer 1  | Layer 2  |
| Kreuzung | Layer 1  | Layer 2  |

*2) Einfassung der anzuschließenden Wände (Einbindungslänge: 1/3 der Wanddicke; > 5 cm)*

| | |
|---|---|
| T-Verbindung |  |
| Kreuzung |  |

*3) Stumpfstoß mit Edelstahl-Flachankersystem (vgl. dazu auch Abbildung 6)*

| | |
|---|---|
| Eckverbindung |  |
| T-Verbindung |  |
| Kreuzung |  |

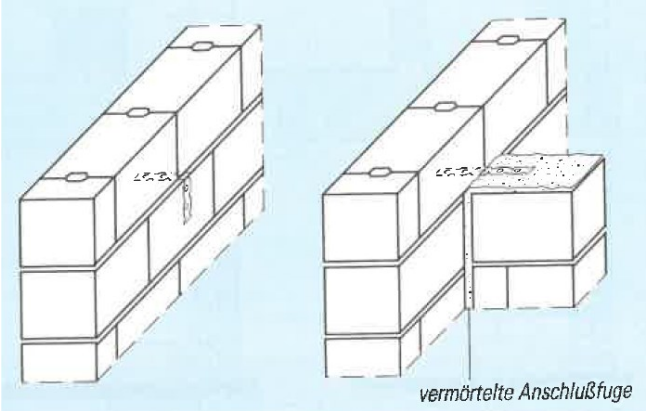



*Abbildung 6: Stumpfstoß mit Flachanker im konventionellen Mauerwerksbau (Wessig 1998)*

### 2.1.5 Bauverfahrenstechnische Anforderungen

**Druckabschnitte definieren und verbinden**

Bei größeren Projekten, die nicht innerhalb eines Tages gedruckt werden können, wird es unerlässlich sein, einzelne Druckabschnitte zu definieren. Um die Tragfähigkeit nicht zu beeinträchtigen, sollten die Druckabschnitte so geplant werden, dass die Wände stets in der fertigen Höhe abgeschlossen werden. Damit wird vermieden, dass sich horizontale Fugen ausbilden, die

zur Reduzierung der Festigkeit der Wand führen. Diese Arbeitsfugen werden auch als „kalte Fugen“ bezeichnet. Es kann, beispielsweise innerhalb eines Störfalls, dazu kommen, dass der Druckvorgang bei der Hälfte der Wandhöhe stoppen muss. In diesen Fällen sollte die letzte Schicht zumindest aufgeraut werden, um den nachträglichen Schichtenverbund zu verbessern.

Falls die Reichweite der Baumaschine nicht ausreicht oder das Bauwerk nicht innerhalb eines Tages erzeugt werden kann, ist eine vertikale Teilung des Grundrisses unerlässlich. Unweigerlich entstehen hier Arbeitsfugen. Die geplanten Druckabschnitte sind möglichst kraftschlüssig miteinander zu verbinden. Dazu sind folgende Ausführungsvarianten denkbar:

*1) Verbindung mittels Abtreppung*

Zur Verbindung einzelner Druckabschnitte wird in Abbildung 7 die Möglichkeit mittels Abtreppung gezeigt. Die Oberseite der Schichten ist aufzurauen. Der nächste Druckabschnitt würde dann an dieser Abtreppung anschließen und die Schichtenfolge ergänzen.

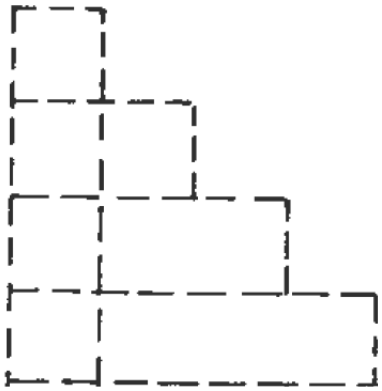


*Abbildung 7: Abtreppung als Verbindungsmöglichkeit einzelner Druckabschnitte*

*2) Ankersysteme*

Die Verbindung kann auch über ein Ankersystem hergestellt werden (Abbildung 8).

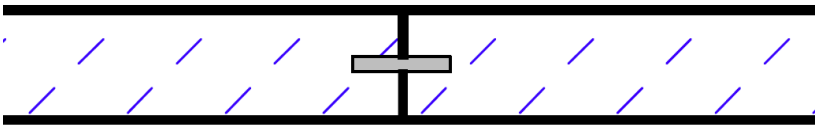


*Abbildung 8: Verbindungsmöglichkeit einzelner Druckabschnitte mittels Edelstahlankern*

**Probleme durch bereits verbauten Raum**

Die Druckabschnitte sind so zu planen, dass die Schichten stets „frisch-in-frisch“ aufeinander gedruckt werden. Damit kann ein guter Schichtenverbund sichergestellt werden, der maßgebend für die Tragfähigkeit der erstellten Betonbauteile ist. Bedingt durch die schnellen Erhärtungszeiten des Betons kann es vorkommen, dass die Wände eines gesamten Bauraums nicht innerhalb eines Druckabschnitts erstellt werden können. Demzufolge werden einige Wände

bereits in kompletter Höhe gefertigt sein, andere müssen nachträglich kraftschlüssig an die bestehenden Wände angeschlossen werden. In Abhängigkeit von der Maschinenstellung ist darauf zu achten, dass zuerst die Wände gedruckt werden, die am weitesten von der Maschine entfernt sind. Damit wird weitgehend vermieden, dass bereits gedruckte Wände ein Hindernis für den Auslegermast darstellen.

Die Probleme des verbauten Raums können umgangen werden, wenn stets eine komplette Schicht eines Bauraums hergestellt wird (Abbildung 9) bevor die nächste Schicht folgt.

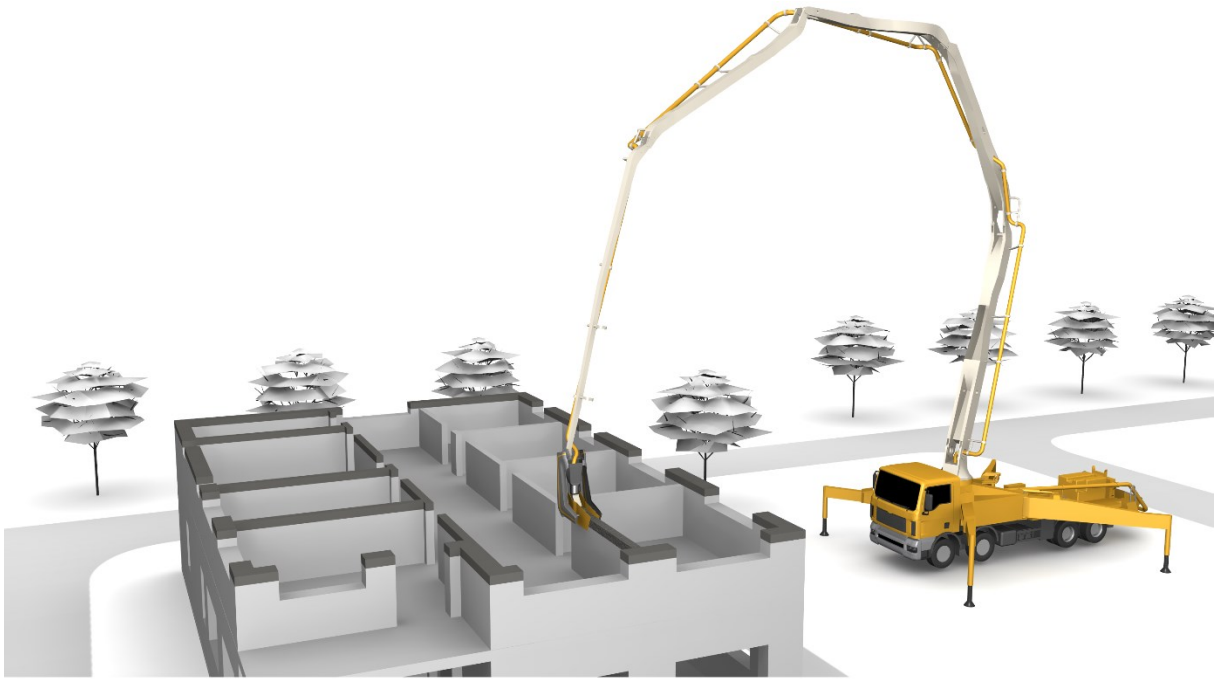


*Abbildung 9: Idealbild des Druckvorganges: Eine Schicht wird komplett in einem Durchgang erstellt.*

## 2.2 Marktübliche Schäume und Schaumbetone

### 2.2.1 Marktanalyse und Wirtschaftlichkeitsaspekte

**Methodik**

Das Marktpotenzial beschreibt die Aufnahmefähigkeit eines Marktes im Hinblick auf die mögliche Absatzmenge desselben für ein bestimmtes Produkt (Gabler 2019a). Die Betrachtung des Marktpotenzials gliedert sich in mehrere Unteraspekte, welche es zu berücksichtigen gilt. Diese sind in Abbildung 10 dargestellt.

Die Produktbetrachtung beinhaltet die Zusammenstellung der wesentlichen Eigenschaften und Merkmale des zu vertreibenden Produktes – hier CONPrint3D® UL. Neben den anfallenden Kosten sind die Vorteile und Hindernisse in ihrer Gesamtheit zu erfassen. Auf eine Produktanalyse wird an dieser Stelle bezüglich CONPrint3D® UL verzichtet. Maßgeblich ist die Untersuchung des Zielmarktes. In diesem Schritt sind ein oder mehrere Zielmärkte zu definieren. Die Märkte sind anhand vorab bestimmter Kriterien zu betrachten.

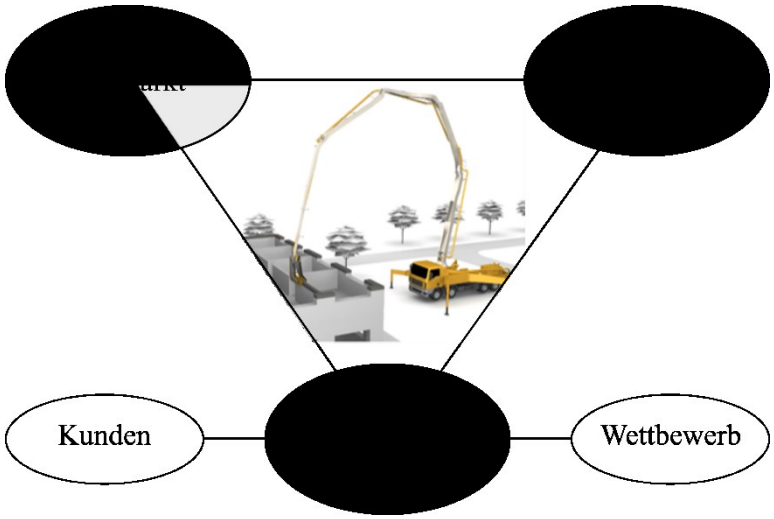



*Abbildung 10: Aspekte der Betrachtung des Marktpotentials*

Das Absatzpotenzial ist eng verbunden mit der Kundenanalyse und der Wettbewerbsanalyse. Die Betrachtung der Kunden umfasst das Geschäftsfeld, die möglichen Abnehmer, die Anforderungen die von den Kunden an das Produkt gestellt werden und den Nutzen, welcher für den Kunden entsteht. Darüber hinaus ist der bestehende Wettbewerb zu untersuchen. In einem ersten Schritt sind alle möglichen konkurrierenden Unternehmen zu erfassen. Das gewählte Produkt und dessen Eigenschaften sind mit den Produkten der Konkurrenzunternehmen in ihren technischen, funktionalen und wirtschaftlichen Eigenschaften zu vergleichen. Dazu ist ein Rückgriff auf die Produktanalyse notwendig. Zu ermitteln ist, ob sich das Produkt gegen seine Konkurrenz durchsetzen kann.

Diese Betrachtungen werden zusammengefasst und um den Faktor Zeit erweitert, sodass keine Momentaufnahme entsteht, sondern eine gesamtheitliche Betrachtung des Marktpotenzials. Der Faktor Zeit beinhaltet die künftige, mögliche Entwicklung des Marktes und der Konkurrenz. Die verschiedenen Szenarien sind mit Wahrscheinlichkeiten zu versehen, sodass die mögliche Entwicklung einigermaßen genau abgebildet werden kann. In Kombination mit den Betrachtungen des Produkts, der Kunden, des Zielmarktes und der Konkurrenz ergibt sich das Marktpotenzial. Es können Aussagen über die Marktfähigkeit des Produktes getroffen werden.

**Zielmarktanalyse**

Die Betrachtung des Zielmarktes erfolgt anhand vorab definierter Kriterien. Diese sind den Überbegriffen „Markteigenschaften“ und „äußere Faktoren“ zuzuordnen. Als Markteigenschaften werden jene Kriterien verstanden, welche den Markt an sich beschreiben. Hierzu zählen das Marktvolumen der entsprechenden Branche, der Bedarf, den ein bestimmtes Produkt deckt, die Bereitschaft einer Branche in eine neue Technologie zu investieren und eine sich aus den vorangegangenen Informationen ergebene Einschätzung des Absatzpotenzials. Die äußeren Faktoren umfassen jene Kriterien, welche der gewählten Branche nicht unmittelbar untergeordnet werden können. Ihr Einfluss auf die Markteigenschaften ist jedoch nicht zu vernachlässigen. Eine Übersicht der Bewertungskriterien kann Abbildung 11 entnommen werden.

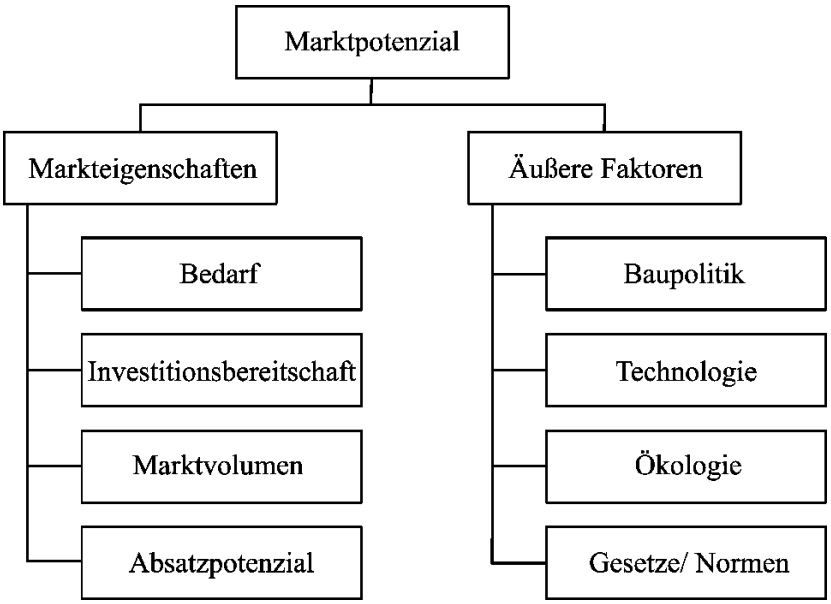



*Abbildung 11: Übersicht der Bewertungskriterien für den Zielmarkt*

Bevor eine Betrachtung der genannten Kriterien erfolgen kann, sind mehrere Randbedingungen festzulegen. Betrachtet wird der branchenspezifische Zielmarkt, welcher für CONPrint3D® UL das Baugewerbe ist. Berücksichtigt werden alle zum aktuellen Zeitraum zur Verfügung stehenden Informationen und Kennzahlen. Um eine breit aufgestellte Betrachtung vorzunehmen, werden typische Zielmärkte in verschiedenen Ländern mit unterschiedlichen Marktsituationen untersucht. Gewählt werden exemplarisch 1) Deutschland als Industrieland, 2) Indien als BRICS-Staat und 3) Ghana als Entwicklungsland. Es ist davon auszugehen, dass die genannten Länder repräsentativ für die drei Märkte sind. Eine vergleichbare Gegenüberstellung der gewählten Zielmärkte ist mit einer vereinfachten Nutzwertanalyse sichergestellt. Der Methodik liegt ein kardinales Skalierungsniveau zugrunde. Das Bewertungssystem umfasst eine Skala von 1 (niedrig, negativ) bis 3 (hoch, positiv). Abstufungen in Kommazahlen sind unzulässig.

*1) Industrieland Deutschland:*

Der Bedarf an innovativen, technischen Lösungen ist als mittelmäßig einzuschätzen. Dies begründet sich vor allem durch die etablierten konventionellen Verfahren, welche eine starke Konkurrenz für die adaptiven Fertigungsverfahren darstellen. Die Investitionsbereitschaft ist ebenfalls als mittelmäßig zu bewerten. Zu begründen ist dies durch die relative Zurückhaltung in Bezug auf neue Technologien.

Positiv ist das Marktvolumen der Bauwirtschaft zu bewerten. Im Jahr 2017 betrug der Anteil des Bauvolumens rund 9,9 Prozent des gesamten Bruttoinlandprodukts. Der maßgebliche Anteil des Bauvolumens ist dem Wohnungsbausektor zuzuordnen, mit einem Anteil von 61,1 %. Die aktuelle Wirtschaftslage führt zu einer hohen Zahl an erteilten Baugenehmigungen, sodass eine Vielzahl an Projekten realisiert wird. Das hieraus resultierende starke Angebot steht einer ebenso starken Nachfrage entgegen. Diese Aussage ist zu begrenzen, denn es ist nicht unerheblich, welche Schnittmenge die von der Nachfrage gestellten Anforderungen und das

tatsächliche Angebot teilen. Speziell bezieht sich dies auf die Höhe der Mietpreise. Insbesondere die Nachfrage an bezahlbarem Wohnraum ist in den letzten Jahren gestiegen. Im Gegenzug sinkt das Angebot an preiswerten Wohnungen, während der Mietpreisindex in vielen deutschen Städten ansteigt (Statista 2019a, Tagesspiegel 2017, SWP 2017). Ein zukünftig steigendes Interesse an der Schaffung preiswerten Wohnraums kann angenommen werden.

Hinzu kommt, dass der aktuell niedrige Leitzins mittelfristig ansteigen wird, sodass die Kosten der Entwicklung und Realisierung neuer Projekte zunehmen werden.

Die vorhergehenden Informationen zeigen, dass sich für CONPrint3D® UL in der deutschen Baubranche durchaus Absatzpotenzial ergibt. Die Bauwirtschaft birgt ausreichend finanzielle Möglichkeiten für Neuinvestitionen. Zusätzlich verzeichnete die Baubranche in den letzten Jahrzehnten nur eine geringe Effizienzsteigerung. Zwischen 1991 und 2016 ist die preisbereinigte Produktivität je Erwerbsstunde bezogen auf das Arbeitsvolumen in allen Wirtschaftsbereichen um 42 % gestiegen. Die Bauwirtschaft kann in demselben Zeitraum nur einen Anstieg von einem Prozent verzeichnen (Kuntze 2018). Das Potenzial zur Effizienzsteigerung ist durchaus gegeben, sodass innovative Technologien wie CONPrint3D® UL notwendig sind. Die Problematiken der Baubranche gehen jedoch mit den offenen Potenzialen einher. So wird der Branche nachgesagt, sich bevorzugt in den bekannten und bewährten Mustern zu bewegen und sich nur langsam auf neue Strategien einzulassen. Dies zeigt die Einschätzung des Bedarfs und der Investitionsbereitschaft. Diese Markteigenschaften ergeben zusammen mit den stark etablierten konventionellen Verfahren eine mittelmäßige Einschätzung für das Absatzpotenzial für den deutschen Markt.

Die Betrachtung der äußeren Faktoren beginnt mit der Betrachtung der politischen Lage in Bezug auf die Baubranche. Von Bedeutung sind insbesondere das Interesse und die Investitions- bzw. Subventionsbereitschaft der Politik in innovative Technologien. Die deutsche Baupolitik signalisiert durchaus Interesse an der Entwicklung neuer Bauweisen, bietet Förderungen für Projekte und ist daher positiv zu bewerten. Auch der technologische Aspekt ist hoch zu bewerten. Aufgrund des hoch entwickelten Standards verfügt die Baubranche durchaus über die technologischen Möglichkeiten und das Knowhow zur Verwirklichung von CONPrint3D® UL.

Ökologisch betrachtet bieten die adaptiven Fertigungsverfahren entscheidende Vorteile. Materialien wie Zement tragen mit ca. 8 % maßgeblich zur weltweiten $CO_2$-Emission bei. CONPrint3D® UL ermöglicht die Reduzierung von Zement- und Flugascheanteilen im Beton. Positiv zu erwähnen ist ebenso die Wärmedämmfähigkeit des eingesetzten Materials Schaumbeton, welcher als leistungsstarke Wärmedämmung dient, was zu Einsparungen anderer Ressourcen führt. Die Thematik der Nachhaltigkeit wird in Abschnitt 2.3 tiefergehend erläutert und soll daher an dieser Stelle nicht weitergehend vertieft werden.

Weniger vorteilhaft ist die rechtliche Lage in Deutschland zu bewerten. Die Gesetze und Normen, die neue Technologien und Bauweisen zu erfüllen haben um eine Zulassung zu erhalten, stellen ein hohes Anforderungsprofil an die Innovation. Zudem ist der Genehmigungsprozess mit einer hohen zeitlichen Investition verbunden, weshalb das Kriterium niedrig bewertet ist.

Die Betrachtung für Deutschland ergibt einen Score von 18 aus 24 möglichen Punkten (Tabelle 14).

*2) BRICS-Staat Indien:*

Der Bedarf in Indien kann deutlich positiv bewertet werden. Der anstehende Mangel an Wohnraum ist vor allem durch die rasant wachsende Bevölkerung zu begründen. Ein von der Regierung ins Leben gerufene Projekt „Housing for All“ soll bis 2022 Wohnraum für jede indische Familie geschaffen werden (Maiervidorno 2016, India 2018, Maiervidorno 2017). Besonders gefragt sind in diesem Zuge nachhaltige Wohnkonzepte deren Umsetzung unter Verwendung moderner Technologien erfolgt und deren Qualität und Baugeschwindigkeit deutlich erhöht wird (Maiervidorno 2016). Die Investitionsbereitschaft kann dem folgend als positiv eingestuft werden. Auch die Marktwirtschaft ist hoch einzuschätzen. Bis 2025 wird Indien den drittgrößten Markt der globalen Bauindustrie haben. Bereits jetzt hält der Bausektor einen Anteil von 11 % am Bruttoinlandsprodukt. Insbesondere infrastrukturelle Projekte werden zukünftig gefördert. Diese Marktsituation birgt ein großes Absatzpotenzial für CONPrint3D® UL. Bedarf und finanzielle Möglichkeiten treten gemeinsam auf, sodass das Absatzpotenzial als hoch eingeschätzt wird.

Die Baupolitik unterstützt dieses Bild. Neben dem bereits genannten Vorhaben „Housing for All“ hat sich die Regierung als Ziel gesetzt, den Wohnraum nachhaltiger zu gestalten. Die Kampagne soll dazu beitragen, dass die Klimaziele Indiens, welches der drittgrößte Emittent von Treibhausgasen ist, durchgesetzt werden können. Dabei wird ein besonderer Fokus auf den Bausektor gelegt, da dieser einen bedeutenden Anteil der Emissionen zu verantworten hat. Weiterhin ist das Interesse der Regierung an ausländischen Investoren zu erwähnen. Das Kriterium Technologie ist neutral zu bewerten. Das durchaus vorhandene und erlernbare Knowhow wird durch die zum Teil mangelhaften, infrastrukturellen Verhältnisse erschwert. Die gesetzlichen Anforderungen an die Zulassung einer neuen Technologie sind gering, weshalb das Kriterium Gesetze/ Normen als positiv eingeschätzt werden kann.

Die Betrachtung für Indien ergibt einen Score von 22 aus 24 möglichen Punkten (Tabelle 14).

*3) Entwicklungsland Ghana:*

Der Bedarf an Lösungswegen, wie CONPrint3D® UL sie bietet, steht in Ghana (und weiteren Entwicklungsländern) in starker Abhängigkeit zum Standort. So ist der Bedarf in größeren Städten wie Accra verhältnismäßig gering aufgrund des hohen Leerstandes der bestehenden Gebäude (Gtai 2019). In den ländlichen Regionen und Randbezirken großer Städte wie Accra zeigt sich ein anderes Bild. Hier besteht eine regelrechte Wohnungsnot, der Bedarf liegt bei ca. 120.000 Wohneinheiten jährlich in ganz Ghana. Dieser Umstand lässt sich zu Teilen auf die schnell wachsende Bevölkerung, zum anderen auf die Baustruktur der bestehenden Gebäude zurückführen (Dandc 2013). Traditionell werden eine Vielzahl der Gebäude aus Lehm oder Baustoffen mit Lehmanteil hergestellt. Der Zustand dieser Gebäude ist vielerorts besorgniserregend, aufgrund der Witterung erodieren die Fundamente, wodurch die Tragfähigkeit gefährdet werden kann. Es besteht großer Bedarf an der Schaffung von standsicherem Wohnraum.

Die maßgebliche Schwierigkeit bergen die finanziellen Aspekte. Aufgrund der wirtschaftlichen Lage, ist der oben betrachtete Bedarf weiterhin dahingehen zu spezifizieren, dass Wohnraum zu möglichst günstigen Konditionen benötigt wird. Darin begründet sich die als mittelmäßig

eingestufte Investitionsbereitschaft. Die finanziellen Möglichkeiten von Privatpersonen mit mittlerem oder niedrigem Einkommen sind eingeschränkt, sodass die Herstellungskosten für neue Projektentwicklungen möglichst gering gehalten werden sollten. Bei einem Großteil der Investoren, welche in Ghana Projekte realisieren, handelt es sich um ausländische Geber. Es ist anzumerken, dass privates Kapital zu großen Teilen in Infrastrukturprojekte investiert wird, wie beispielsweise die Häfen von Tema oder die Kraftwerke in Takoradi. Der Anteil des Bauvolumens betrug 2011 rund 9,2 % des gesamten Bruttoinlandprodukts (Dreberis 2013), das im selben Jahr bei rund 53,65 Milliarden US-Dollar lag (Statista 2019b). Der Bausektor wuchs seither stark an, um bis zu 20,0 % im Jahr 2011. Seit 2018 ist jedoch ein Rückgang des Wachstums zu verzeichnen. Realisiert werden hauptsächlich Großprojekte mit Bezug auf den wachsenden Ölsektor in Küstennähe (Portalfarika 2019). Zu erwähnen sind die ansteigenden Schwierigkeiten der Wasserversorgung. Die Ressource ist für den Bau notwendig, jedoch ist ihre Verfügbarkeit aufgrund der klimatischen Gegebenheiten und häufig auftretenden extremen Wetterlagen zunehmend eingeschränkt (Baublatt 2019).

Die vorhergehenden Informationen zeigen, dass sich für CONPrint3D® UL in der ghanaischen Baubranche durchaus Absatzpotenzial ergibt. Im Vergleich zur deutschen Baubranche zeigt sich ein gespiegeltes Bild. Der Bedarf innovativer Technologien, wie CONPrint3D® UL, ist gegeben, die Umstände in finanzieller und materieller Hinsicht wirken sich einschränkend auf das Absatzpotenzial aus.

Die Baupolitik kann positiv eingeschätzt werden. Aufgrund des bestehenden Bedarfs besteht ein Interesse der öffentlichen Stellen an Lösungsmöglichkeiten. Besonders negativ ist das Kriterium Technologie zu bewerten. Dies begründet sich durch die allgemein unzureichende Ausbildung der Arbeitskräfte und das daraus resultierende fehlende Knowhow, sowie die mangelhaften infrastrukturellen Verhältnisse. Dies erschwert den Transport von Material erheblich. Die gesetzlichen Anforderungen an die Zulassung einer neuen Technologie sind gering, weshalb das Kriterium Gesetze/ Normen als positiv eingeschätzt werden kann.

Die Betrachtung für Ghana ergibt einen Score von 18 aus 24 möglichen Punkten (Tabelle 14).

Die Untersuchung zeigt, dass die verschiedenen Zielmärkte Potenzial für CONPrint3D® UL bieten. Insbesondere der BRICS-Staat Indien birgt aufgrund seines Bedarfs, dem Innovationsinteresse und der wirtschaftlichen Kraft ein hohes Potenzial. Der deutsche Markt erreicht aufgrund der gesetzlichen Lage, des geringeren Bedarfs und der großen Vertretung von konventionellen Verfahren einen geringeren Nutzwert. Ghana weist zwar einen hohen Bedarf auf, aufgrund der wirtschaftlich eingeschränkten Möglichkeiten erreicht jedoch auch dieser Markt einen etwas geringeren Nutzwert.

*Tabelle 14: Nutzwertanalyse Zielmarkt*

| Kriterium | Deutschland | Indien | Ghana |
|---|---|---|---|
| Bedarf | 2 | 3 | 3 |
| Investitionsbereitschaft | 2 | 3 | 2 |
| Bauwirtschaft | 3 | 3 | 2 |
| Absatzpotenzial | 2 | 3 | 2 |
| Baupolitik | 3 | 3 | 3 |
| Technologie | 3 | 2 | 1 |
| Ökologie | 2 | 2 | 2 |
| Gesetze/ Normen | 1 | 3 | 3 |
| Score | 18 | 22 | 18 |

**Absatzpotenzial**

*Kundenanalyse*

Die möglichen Kunden sind als Vertreter unterschiedlicher Sparten der Baubranche zu identifizieren. Neben den klassischen ausführenden Bauunternehmen gehört eine große Gruppe der möglichen Kunden den Dienstleistern an. Hierzu zählen beispielsweise Baumaschinenhersteller, Baumaschinenvermieter, Baustoffkonzerne und Transportbetonunternehmen. Zu hinterfragen sind die Vertriebsoptionen der Kunden, die Tabelle 15 zusammenfasst.

*Tabelle 15: Übersicht der möglichen Kunden*

| Kunde | Verkauf | Vermietung | Bauleistung | Lizenzen |
|---|---|---|---|---|
| Maschinenhersteller | X (Gerät) | (X) | (X) | X |
| Bauunternehmen | | | X | |
| Maschinenvermieter | | X | | |
| Baustoffkonzern | X (Beton) | | | X |
| Transportbetonunternehmen | X (Beton) | X | | |

*X ... Hauptgeschäftsfeld* *(X)... ergänzendes Geschäftsfeld*

*Wettbewerbsanalyse*

Es ist zunächst zu konstatieren, dass es bisher weltweit nur wenige Konkurrenten im Bereich des Beton-3D-Drucks gibt. Allerdings entwickeln sich die Forschungs- und Entwicklungs-

arbeiten stark. Betrachtet werden das Unternehmen Apis Cor aus Russland, welches einen mobilen Roboter mit einem 360 Grad schwenkbaren Arm zur Fertigung eines kleinen Hauses nutzt, das Unternehmen WinSun aus China, welches größere Gebäude aus additiv hergestellten Fertigteilen errichtet und der Contour Crafting Corporation aus den USA, welche als Vorreiter dieser Technologie gelten. Die Unternehmen werden hinsichtlich mehrerer Kriterien bewertet. Die Bewertung erfolgt ebenfalls anhand einer Nutzwertanalyse mit einer ordinalen Bewertungsskala – hierbei handelt es sich um eine Begrifflichkeit aus der Statistik, die die Rangfolge und interpretierbaren Abstände einer Bewertungsskala definiert – in den Grenzen 1 (am geringsten bewertet) bis 4 (am höchsten bewertet). Betrachtet wird die qualitative Abgrenzung zu anderen Wettbewerbern, der Stand der Entwicklung, das wirtschaftlichen Potenzial, die Flexibilität und Mobilität und die Investitions- und Betriebskosten. Die Ergebnisse der Untersuchung sind Tabelle 16 zu entnehmen.

*Tabelle 16: Abgrenzung des Wettbewerbs*

| | 10 % | 20 % | 30 % | 15 % | 25 % | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Wettbewerber | Abgrenzung Wettbewerber | Stand d. Entwicklung | Wirtsch. Potenzial | Flexibilität/ Mobilität | Kosten | | Score |
| | | | | | Investition | Betrieb | |
| CONPrint3D® | 4 | 1 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3,28 |
| Apis Cor | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3,00 |
| Contour Crafting | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2,00 |
| WinSun | 1 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,60 |

Die Ergebnisse zeigen, dass CONPrint3D® UL sich stark von seinen Konkurrenten abgrenzen kann und im Vergleich ein positiveres wirtschaftliches Potenzial, eine höhere Flexibilität und geringere Investitionskosten vorweist. Es kann geschlossen werden, dass CONPrint3D® UL sich gegen seine Mitwettbewerber durchsetzen kann.

**Zusammenfassung**

Zusammenfassend kann das Marktpotenzial von CONPrint3D® UL positiv bewertet werden. Die Eigenschaften und Alleinstellungsmerkmale der Technologie ermöglichen dem Produkt Zugang zu verschiedenen Zielmärkten, sprechen eine Vielzahl von möglichen Kunden an und grenzen die Technologie effizient von den Konkurrenzprodukten ab.

In Industrieländern, wie z. B. Deutschland, sind die Randbedingungen für die Markteinführung von Innovationen in der Regel geeignet. Allerdings sind die gesetzlichen Regelungen, insbesondere bei der Einführung eines neuen Bauverfahrens oder neuen Bauprodukts sehr stringent. Die Nachweisführung und Zulassung nimmt viel Zeit in Anspruch. Dies muss unternehmerisch einkalkuliert werden. Werden die spezifischen Markteigenschaften von Deutschland betrachtet, so ist aktuell eine außerordentlich gute Baukonjunktur zu konstatieren. Trotzdem ergibt sich

nur ein mittelmäßiger Bedarf an Innovationen infolge guter Auslastung und demzufolge eine mittelmäßig zu bewertende Investitionsbereitschaft der ansässigen Bauunternehmen. Die konventionellen Bauverfahren stehen in den Industrieländern in starker Konkurrenz zum innovativen Ansatz. Markteintrittsbarrieren durch die Schalungs- und Ziegelindustrie sind zu erwarten. Um eine erfolgreiche Markteinführung in den Industrieländern zu erreichen, sind maßgebliche Kosten- und Zeitersparnisse erforderlich (vgl. Abschnitt 2.2.2).

In den Entwicklungsländern gibt es einen hohen Bedarf an standsicherem, günstigem Wohnraum. Im Vergleich zu den Industrieländern sind die Anforderungen an die Bauqualität bedeutend niedriger, vor allem hinsichtlich der erforderlichen Wärmedämmung und der Ausführungsgenauigkeit. Durch Privatinvestoren werden aktuell einige Großprojekte im Siedlungsbau finanziert. Projekte im Bausektor ein- und zweigeschossiger Gebäude könnten in Entwicklungs- und Schwellenländern eine gute Möglichkeit für einen schnellen Markteintritt darstellen.

### 2.2.2 Wirtschaftlichkeitsaspekte

Bei der Betrachtung der wirtschaftlichen Potenziale gegenüber konventionellen Bauverfahren sind allgemeine Vorteile des automatisierten Verfahrens CONPrint3D® und darüber hinaus zusätzliche Vorteile durch das innovative Druckmaterial Schaumbeton zu bewerten. In den nachfolgenden Abschnitten werden beide Aspekte behandelt. Gegenstand der Betrachtung ist der Lebenszyklus (Lebenszykluskostenanalyse) der herzustellenden Bauteile, wobei vorrangig die Prozesse der Herstellung und der Entsorgung fokussiert werden. Die Nutzungsphase ist an dieser Stelle aufgrund der ähnlichen, konstruktiv erreichten Wärmedämmeigenschaften nicht weiter betrachtet worden.

Konventionelle Betonbauverfahren sind sehr arbeits- und zeitintensiv. Als besonders aufwendig gelten die Schalungsarbeiten, die maßgeblich die Ausführungszeit und die Baukosten bestimmen. Die Kosten für die Schalungsarbeiten betragen im Mittel ca. 25 % der Gesamtkosten des Rohbaus eines Gebäudes (Schmitt 2001). Um die Baukosten gering zu halten, wird möglichst wenig Schalungsmaterial auf der Baustelle vorgehalten. So sind bei der Erstellung der Wände mehrere kleine Betonierabschnitte zu bilden, die ein häufiges Umsetzen der Schalung zur Folge haben. Die Hebezeuge werden dadurch stark ausgelastet. Beton-3D-Druckverfahren können es ermöglichen, die Bauprozesse wesentlich zu verschlanken, indem Betonbauteile schalungsfrei und kontinuierlich erstellt werden. Der alleinige Wegfall der Schalung und aller damit verbundenen Arbeiten impliziert eine logistische Vereinfachung des Bauprozesses sowie Einsparpotenziale hinsichtlich der Lohn- und Materialkosten. Dies wirkt sich positiv auf die Baukosten und die Ausführungszeit aus. Medienberichte zu Beton-3D-Druckverfahren weisen beispielsweise die Reduzierung der Ausführungszeit von Betonbauarbeiten um 50 % bis 70 % und der Arbeitskosten um 50 % bis 80 % aus (Ingenieur 2016). Diese Werte sind allerdings kritisch zu betrachten. Der erste Entwicklungsschritt von CONPrint3D® sieht vor, unbewehrte Betonwände zu drucken. Die Betonrezeptur kann technologisch angepasst werden, um verschiedene Arten von Mauerwerkswänden zu ersetzen. Studien zur Wirtschaftlichkeit von CONPrint3D® ergaben ein Kosteneinsparpotenzial in Höhe von 25 % und

deutlich geringere Ausführungszeiten im Vergleich zur traditionellen Ziegelbauweise (Schach 2017).

Die Stärke einer Rohbaukolonne zur Erstellung von Massivwänden beträgt in der Regel vier Facharbeiter. Die automatisierte Bauweise von CONPrint3D® ermöglicht es, die Anzahl der auf der Baustelle tätigen Fachkräfte auf zwei Arbeiter zu reduzieren – einen Maschinenführer und einen Facharbeiter, der verschiedene Hilfsarbeiten (z. B. Ausbesserung und Nachbehandlung des Betons, Einlegen der Fertigteilstürze) ausführen wird. Dadurch können a) die Lohnkosten signifikant gesenkt, b) die Menge des „Outputs“ pro gewerblicher Fachkraft erhöht und c) Bauleistungen mit einer deutlich reduzierten Anzahl an qualifizierten Fachkräften ausgeführt werden. Dies wird zukünftig, insbesondere vor dem Hintergrund des Rückgangs gewerblicher Baufachkräfte, auch in Deutschland überaus bedeutsam sein.

Mit jährlich ca. 55 gemeldeten Arbeitsunfällen pro 1.000 Vollzeitarbeitern (DGUV 2018) ist die Zahl der Arbeitsunfälle im Bauwesen 2,5-fach höher im Vergleich zum Durchschnittswert über alle Berufsgruppen. Dies ist vor allem auf die ständig verändernde Baustellenumgebung, die komplexen, Gewerke übergreifenden Bauabläufe und Arbeiten unter Lasten und in Höhen zurückzuführen. Eine automatisierte Fertigung verstetigt den Bauablauf, macht ihn „planbarer“ und reduziert das Potenzial unfallanfälliger Arbeiten. So können viele Unfälle, die auf Unachtsamkeit oder Improvisation zurückzuführen sind, vermieden werden. Hinzu kommen die erleichterten Arbeitsbedingungen durch Einführung automatisierter Fertigungsverfahren. Langzeiterkrankungen der Arbeiter, wie chronische Erkrankungen des Muskel-Skelettsystems, die durch Überbelastung hervorgerufen werden, können signifikant reduziert werden. Diese positiven soziologischen Effekte werden sich auch wirtschaftlich für die Unternehmen lohnen, indem weniger Ausfallzeiten durch Unfälle oder Langzeiterkrankungen entstehen.

Die präzise und schichtenweise Erzeugung der Bauteile mit CONPrint3D® wird dazu führen, dass auf Baustellen nahezu keine Abfälle entstehen. Der kontinuierliche Aufbau der Wandstrukturen bewirkt, dass nur die für das Bauteil benötigte Materialmenge verbraucht wird. Im konventionellen Bauprozess werden die Restmaterialien in unterschiedlichen Containern gesammelt und abgefahren. Die Folge sind kostenpflichtige Entsorgungsfahrten mit transportbedingten Emissionen. Die Reduzierung von Abfällen verbessert die Nachhaltigkeit und führt zu Kosteneinsparungen im Bauprozess.

Das innovative Druckmaterial Schaumbeton hat einen hohen Luftporengehalt und verfügt über gute Wärmedämmeigenschaften. Damit könnte der üblicherweise angewendete zweischalige Wandaufbau, zusammengesetzt aus einer Tragkonstruktion mit vorgesetzter Dämmschicht, z. B. Wärmedämmverbundsystem (WDVS), ersetzt werden. Die Einsparung der Wärmedämmschicht als separater Arbeitsschritt impliziert einerseits zusätzliches Kosten- und Zeitreduktionspotenzial. Andererseits führt es zu einem ökologisch nachhaltigen Wandaufbau, da die Recyclierbarkeit von Schaumbeton gegeben ist. Die ökologisch bedenkliche Produktion sowie sortenreine Trennung und Entsorgung des Wärmedämmmaterials sowie des zugehörigen Klebers würde entfallen.

## 2.3 Nachhaltigkeit

Die Frage der Nachhaltigkeit ist eine Thematik, welche in den vergangenen Jahren immer weiter an Bedeutung gewonnen hat. Durch die rasante Steigerung der weltweiten Emissionen rückte die Entwicklung nachhaltiger Konzepte immer weiter in den Fokus. Nachhaltigkeit wird als zukunftsbedachtes Handeln verstanden. Derzeitige Bedürfnisse werden befriedigt, ohne jedoch den nachfolgenden Generationen zu schaden. Maßnahmen hierfür, wie die Verminderung des Ressourcenverbrauchs und der ausgestoßenen Emissionen, können beispielhaft genannt werden (Gabler 2019b). Die Nachhaltigkeit basiert auf einem Drei-Säulen-Modell, unterschieden werden die drei Wirkungsbereiche: Ökologie, Ökonomie und Soziologie. Im Folgenden sollen diese nähergehend erläutert werden.

### 2.3.1 Ökologie

Der ökologische Wirkungsbereich ist für die Baubranche hoch relevant, da diese maßgeblich zur weltweiten Treibhausemission beiträgt. Jährlich verursacht der Gebäudesektor rund 30 % der weltweiten $CO_2$-Emission, wobei sich acht Prozent nur auf die Zementherstellung zurückführen lassen. Des Weiteren verantwortet die Baubranche knapp 40 % des Endenergieverbrauches (Bauforumstahl 2013). Die weit etablierte Stahlbetonbauweise verfügt über einen hohen Bedarf endlicher Ressourcen, beispielhaft seien Sand, Metall, fossile Stoffe und Trinkwasser aufgeführt. Insbesondere Sand ist als kritische Ressource einzustufen. Der Bedarf an Sand und Kies ist in den vergangenen Jahren stark angestiegen, die jährlich geförderte Menge wird von der UN-Umweltorganisation UNEP auf 47 bis 59 Milliarden Tonnen geschätzt (Europa 2014). Neben der Endlichkeit der Ressource hat die Förderung von Sand Auswirkungen auf die Biodiversität und das Wasser. Zusätzlich verursachen der Abbau und Transport $CO_2$-Emissionen.

Weiterhin zu berücksichtigen ist das in der Bauindustrie entstehende Abfallaufkommen, welches mit 34,7 % des EU-weiten und 53,3 % des deutschen Aufkommens maßgeblich zur Abfallproduktion beiträgt. Obwohl die deutsche Bauabfallproduktion zu Beginn des 21. Jahrhunderts stark sank, ist sie in den vergangenen Jahren erneut angestiegen, von 184,9 Mio. Tonnen im Jahr 2005 auf 222,8 Mio. Tonnen im Jahr 2016 (UmweltBA 2018). Problematisch zu bewerten ist, dass ein Großteil der produzierten Abfälle nicht recycelt wird.

Um dieser Entwicklung entgegenzuwirken definierte die Europäische Union Ziele zur Senkung der Emissionen. Konkret ist eine Reduzierung der $CO_2$-Emissionen um 30 % bis 2030 gegenüber der $CO_2$-Emission aus dem Jahr 1990 angestrebt. Der prognostizierte Energieverbrauch für 2020 soll um 20 Prozent gesenkt werden, zusätzlich soll die Recycling- und Verwertungsquote für Bau- und Abbruchabfälle auf 70 % steigen, ebenfalls bis 2020. Die im Zuge dessen festgelegten Teilziele sind die Reduzierung des Primärenergiebedarfes und die verpflichtende Nutzung erneuerbarer Energien.

Unter Berücksichtigung der angestrebten Ziele werden im Folgenden die ökologischen Eigenschaften des CONPrint3D® UL untersucht. Vordergründig berücksichtigt werden die im Zuge des CONPrint3D® UL entwickelten Schaumbetonrezepturen mit unterschiedlichen Zuschlägen. Da die Technologie zunächst nur Mauerwerksbauten ersetzen soll, werden unterschiedliche

Ausführungsarten von Mauerwerk aus Ziegel-, Porenbeton- und Kalksandstein sowie herkömmlicher Ortbeton vergleichend herangezogen. Der erste Untersuchungsschritt dient der Dimensionierung des Bauteiles. Es ist sicherzustellen, dass die gesetzlichen Anforderungen an den Wärmeschutz eingehalten werden. Im zweiten Sschritt erfolgt die Bestimmung der Ökobilanz im Rahmen einer Life-Cycle-Analysis (LCA) über den gesamten Lebenszyklus.

Die Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen an den Wärmeschutz wird anhand der Untersuchung des Wärmedurchgangskoeffizienten sichergestellt. Der sogenannte U-Wert zeigt den Wärmestrom an, welcher in Abhängigkeit der Fläche und der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen durch ein Bauteil entweicht. Rechtlich werden die zulässigen Grenz-werte für Neubauten und Bestandsgebäude in der Energieeinsparverordnung verankert. Der zulässige Grenzwert für vertikale Außenbauteile von Wohngebäuden liegt nach EnEV 2014 Anlage 1 Tabelle 1 bei U = 0,28 W/m$^2$K. Seit dem 01.01.2016 ist der Wert um 25 % abzumindern, sodass eine Überschreitung des Grenzwertes von 0,21 W/m$^2$K für die zu prüfenden Konstruktionsarten nicht zulässig ist (siehe dazu auch Abschnitt 2.1.2, Tabelle 9). Für den im Rahmen des Projektes entwickelten Schaumbeton, sowie die weiteren Konstruktionsarten Ziegel, Kalksandstein, Porenbeton, sind die Wärmedurchgangskoeffizienten ermittelt worden. Die zugehörige Wärmeleitfähigkeit λ ist den Schneider Bautabellen Tafel 10.43 nach DIN 4108-4 entnommen (Schneider Bautab). Tabelle 17 stellt die notwendige Dimensionierung der Konstruktionsarten im Hinblick auf die Einhaltung der Anforderungen gemäß EnEV 2016 dar.

*Tabelle 17: Dimensionierung der Konstruktionsarten gemäß EnEV 2016 (EnEV 2016)*

| **Konstruktionsart** | **Material** | **Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]** | **Dicke [m]** |
|---|---|---|---|
| CONPrint3D® UL | Schaumbeton | 0,110 | 0,500 |
| | Putz | 1,000 | 0,030 |
| Vollziegel | Ziegel | 0,680 | 0,175 |
| | Dämmung | 0,035 | 0,151 |
| | Putz | 1,000 | 0,030 |
| Kalksandstein | KSS | 0,790 | 0,175 |
| | Dämmung | 0,035 | 0,153 |
| | Putz | 1,000 | 0,030 |
| Porenbeton | Porenbeton | 0,120 | 0,547 |
| | Putz | 1,000 | 0,030 |
| Beton C 50/60 | Beton | 1,350 | 0,200 |
| | Dämmung | 0,035 | 0,150 |
| | Putz | 1,000 | 0,030 |

Der zweite Untersuchungsabschnitt befasst sich mit der Bestimmung der Ökobilanz bzw. der Life-Cycle-Analysis der verschiedenen Schaumbetonrezepturen. Das Ziel einer LCA ist die Zusammenstellung und Bewertung der Input- und Output-Flüsse eines Produktes hinsichtlich seines ökologischen Einflusses bezogen auf den gesamten Lebenszyklus. Betrachtet werden die verschiedenen Phasen des Lebenszyklus eines Wandbauteilabschnitts in der Größe 1 $m^2$, beginnend ab der Herstellung der einzelnen Baustoffe bis hin zum Abbruch und der Verwertung. Grundlage der Ermittlung ist eine Lebensdauer von 100 Jahren. Die Unterteilung des Lebenszyklus in Prozessmodule fasst Tabelle 18 zusammen. Die Module gliedern sich in die übergeordneten Teilphasen Herstellung (A1 bis A3), Errichtung (A4 und A5), Nutzung (B1 bis B7), Entsorgung (C1 bis C4) und eventuelle Gutschriften und Lasten (D). Nicht betrachtet werden die tatsächliche Nutzung (B1) sowie der betriebliche Einsatz von Energie (B6) und Wasser (B7). Begründet wird dies durch die Annahme, dass für diese Teilphasen bei einer Wandkonstruktion keine Emissionen entstehen. Als funktionale Einheit wird das relative Treibhauspotential (GWP: Global warming potential) in der Einheit kg $CO_2$eq gewählt. So wird das GWP für die Komponenten der unterschiedlichen Wandabschnitte für die Lebenszyklusphasen ermittelt bestimmt und zu einem Gesamttreibhauspotential der jeweiligen Baukonstruktionsart summiert. Das $CO_2$-Äquivalent wird der Datenbasis Umweltproduktdeklaration (EPD) und den Datenbanken Ökobaudat und GaBi entnommen.

*Tabelle 18: Prozessmodule des Lebenszyklus (ZukunftBau 2017)*

| Herstellungsphase | | | Errichtungsphase | | Nutzungsphase | | | | | | | Entsorgungsphase | | | | Gutschriften und Lasten |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | C1 | C2 | C3 | C4 | D |
| Rohstoffbereitstellung | Transport | Herstellung | Transport | Bau / Einbau | Nutzung | Instandsetzung | Reparatur | Ersatz | Umbau, Erneuerung | Betrieblicher Energieeinsatz | Betrieblicher Wassereinsatz | Abbruch | Transport | Abfallbewirtschaftung | Deponierung | Wiederverwendungs-Rückgewinnungs-Recyclingpotential |

Die Ermittlung des GWP erfolgt je Teilnutzungsabschnitt. Die Nutzungsphasen B2 – B5 üben einen verschwindend geringen Einfluss auf die Bewertung aus und werden bei der Untersuchung der Schaumbetone vernachlässigt. Begründet ist dies durch die grundlegende Annahme, dass keine Instandsetzungsmaßnahmen, Reparaturen oder Umbauten stattfinden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 12 dargestellt.

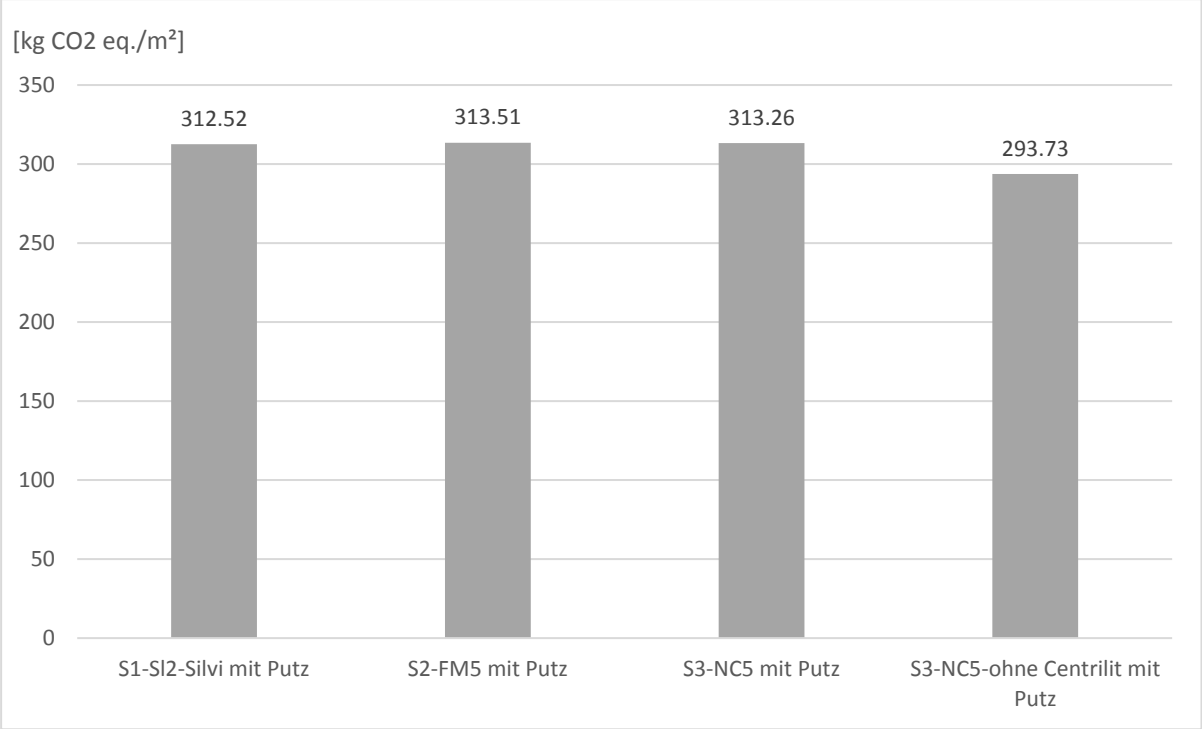



*Abbildung 12: Ermittlung des GWP (kg $CO^2$ eq./$m^2$) für die Schaumbetonwand bezogen auf eine Nutzungsdauer von 100 Jahren; für Mischungsbezeichnungen siehe Tabelle 27*

Die Berechnungen des $CO_2$-Äquivalents der Schaumbetonwände zeigen, dass die vier unterschiedlichen Rezepturen ein ähnliches Treibhauspotential aufweisen, welches zwischen 293,73 bis 313,51 kg $CO_2$ eq./m² liegt. Die Mischung S3-NC5, welche kein Centrilit NC enthält, weist das niedrigste Potential auf und ist somit zu bevorzugen (Mischungsbezeichnungen siehe Tabelle 27).

Im Vergleich mit den anderen aufgeführten Konstruktionsarten fällt das Treibhauspotential von Schaumbeton höher aus. Vor dem Hintergrund der Produktionsumstände einiger Komponenten des Schaumbetons, entspricht das Ergebnis den gesetzten Erwartungen. Insbesondere Zement, welcher den größten stofflichen Anteil der Betonrezepturen markiert, sowie Silicastaub und die eingesetzten Fließmittel weisen ein hohes $CO_2$-Äquivalent in der Herstellungsphase auf.

In der Betrachtung des Treibhauspotentials kommen wichtige ökologische Aspekte nicht zur Berücksichtigung, welche für die Wirkungsabschätzung der ökologischen Nachhaltigkeit eines Baustoffes relevant sind. Hinsichtlich der Reduzierung des Ressourcenverbrauches ist CONPrint3D® UL positiv zu bewerten, da aufgrund der Werkstoffeigenschaften eine zusätzliche Dämmung nicht notwendig ist. Konventionelle Wandkonstruktionen aus Ziegel oder Kalksandstein benötigen diese jedoch. Darüber hinaus ist der Wandaufbau, bestehend aus Tragschicht, Klebstoff, Dämmung und Putz, beim Abbruch des Bauteils nicht sortenrein trennbar. Die Baustoffe sind somit nicht einer geeigneten Wiederverwendung zuführbar. Die Möglichkeit der Wiederverwendung des mineralischen Materials Schaumbeton besteht hingegen grundsätzlich und trägt zur ökologischen Nachhaltigkeit bei. So könnte abgebrochener Schaumbeton u. U. als Zuschlag für neue Betone oder als schüttfähiges Dämmgut eingesetzt

werden. Hier ergibt sich weiterer Forschungsbedarf im Hinblick auf die Einsatzmöglichkeiten von recyceltem Schaumbeton.

### 2.3.2 Ökonomie

„Die ökonomische Nachhaltigkeit beschreibt die Maximierung des ökonomischen Ertrags bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der benötigten Eingangsressourcen“ (Gabler 2019c). Sie verfolgt das Ziel eines dauerhaft funktionierenden Wirtschaftssystems. Maßgeblich hierfür sind: ein hoher Beschäftigungsgrad, konstante Preisstabilität und ein außerwirtschaftliches Gleichgewicht, welches sicherstellt, dass die benötigten Ressourcen weiterhin in gleicher Qualität und Quantität verfügbar sind.

Die maßgeblichen Vorteile des CONPrint3D® UL, welche im Rahmen der ökonomischen Nachhaltigkeit als positiv zu bewerten sind, spiegeln sich in der Fertigungsgeschwindigkeit und der Unabhängigkeit menschlicher Einflüsse. Die hohe Fertigungsgeschwindigkeit ermöglicht es ein Regelgeschoss eines kleinen Einfamilienhauses innerhalb eines Arbeitstages herzustellen (Schach 2017). Die Verkürzung der Bauzeit hat einen positiven Einfluss auf die Baukosten. Die Herstellung erfolgt maschinell und auf Grundlage eines digital zur Verfügung gestellten Gebäudemodells. Der geringere potentielle Einfluss menschlicher Fehler in der Ausführung sorgt für eine gleichmäßige Qualität und die Reduzierung der Lohnkosten. In Zusammenhang mit der Bauzeitverkürzung kann davon ausgegangen werden, dass die Baukosten für ein Gebäude in einer additiven Herstellungsart nur geringen monetären Schwankungen unterliegen. Das Ziel der konstanten Preisstabilität kann erreicht werden.

Weiterhin positiv zu bewerten ist der Einfluss, den die Einführung einer neuen Technologie, wie der additiven Gebäudefertigung, auf die Wirtschaft haben kann, denn neue Innovationen führen oft zu einem Wirtschaftswachstum aufgrund der Verschiebung der Konkurrenzsituation.

### 2.3.3 Soziologie

Der Begriff der sozialen Nachhaltigkeit kann bislang nicht einheitlich definiert werden. Viele Definitionsansätze beziehen sich auf die nachhaltige Sicherung der Existenz der Menschen durch eine „bewusste Organisation sozialer und kultureller Systeme“ (Gabler 2019d). Neben der Berücksichtigung der Grundbedürfnisse oft genannt werden in diesem Zusammenhang Sozialressourcen, Chancengleichheit und Partizipation. Einen weiteren Definitionsaspekt bietet die Agenda 21. Das im Rahmen der Konferenz für Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro im Jahr 1992 beschlossene Aktionsprogramm setzt Leitlinien zur nachhaltigen Entwicklung im 21. Jahrhundert. Die zentralen Ziele sind die nachhaltige Sicherung der Existenzgrundlage aller Bevölkerungsgruppen, die Bekämpfung der Armut, der Schutz und die Förderung der menschlichen Gesundheit und die Gleichberechtigung von Mann und Frau. Zur Erfüllung dieser Ziele sind einige Unteraspekte zu nennen, insbesondere hervorzuheben ist die Befähigung aller Menschen ihren Lebensunterhalt auf erträgliche Weise zu verdienen und der Zugang zu Bildung und weiteren Ressourcen.

Der zentrale Aspekt, der im Rahmen der Untersuchung der sozialen Nachhaltigkeit von CONPrint3D® UL diskutiert wurde, ist die Automatisierung. Die Automatisierung von Arbeitsvorgängen geht einher mit der Reduzierung von Arbeitsplätzen, was dem Prinzip der sozialen Nachhaltigkeit im Allgemeinen entgegensteht und als negativ angesehen werden kann. Die spezifische Situation der Baubranche ist jedoch zu berücksichtigen. In den vergangenen Jahren wuchs der bestehende Mangel an Fachkräften im Baugeschäft stetig. Dieser ist unter anderem auf den demographischen Wandel zurückzuführen. Auch die steigende Anzahl der Absolventen der gymnasialen und universitären Ebene trägt zum Fachkräftemangel bei. Die vielfältigen Karrieremöglichkeiten, aufgrund des hieraus resultierenden großen Angebots offener Ausbildungsplätze, mindern die Attraktivität eines körperlich stark fordernden Berufsfeldes. Die Folge ist ein stetiger Rückgang des Interesses junger Menschen an dem Beruf des Maurers oder einer Ausbildung im Baugeschäft. Eine Änderung dieser Tendenz ist auch in der Zukunft nicht absehbar. Es ist zu folgern, dass die Automatisierung die Arbeitssituation erleichtert.

Ein weiterer Aspekt ist die gesundheitliche Unversehrtheit des Menschen. In der Baubranche ereignen sich im Verhältnis zur Gesamtzahl der Arbeitnehmer deutlich mehr meldepflichtige Arbeitsunfälle als in anderen Branchen (DGUV 2018). So kamen 2017 rund 134 meldepflichtige Arbeitsunfälle auf 1.000 Vollarbeitskräfte, bei einem Durchschnittswert von 22,87 Arbeitsunfälle je 1.000 Vollarbeiter aller Berufsgruppen (DGUV 2017). Der Einsatz einer Technologie wie CONPrint3D® birgt das Potential der Reduzierung von Arbeitsunfällen durch die geringere Anzahl notwendiger Arbeitskräfte und den reduzierten Kontakt der Arbeitnehmer mit Gefahrensituationen. Die Automatisierung erleichtert zudem die Schwere der körperlichen Arbeit. Maurer sind besonders gefährdet durch die Bewältigung schwerer Lasten, die das Risiko auf Muskel- und Skeletterkrankungen steigern. Der Wegfall der stark körperlich beanspruchenden Arbeiten wirkt sich positiv auf die gesundheitliche Verfassung der Arbeitnehmer aus.

### 2.3.4 Zusammenfassung

Die drei Wirkungsfelder Ökologie, Ökonomie und Soziologie bilden die Grundlage des Nachhaltigkeitsbegriffs. Zur Bewertung der Nachhaltigkeit eines Produktes sind die soeben beschriebenen Einzelbetrachtungen der Wirkungsfelder jedoch nicht ausreichend. Zusätzlich ist die Beziehung der Grundbegriffe zu berücksichtigen, denn die Nachhaltigkeit bezieht sich ebenso auf das Gleichgewicht der drei Säulen (Nachhaltigkeit 2015).

Die Verbindung der drei Wirkungsfelder zeichnet ein gemischtes Bild der Nachhaltigkeit des CONPrint3D® UL. Die Untersuchung der Life-Cycle-Analysis im Rahmen der ökologischen Nachhaltigkeit zeigt die bisherigen Vor- und Nachteile der Technologie auf. Im direkten Vergleich mit einer Mauerwerkskonstruktion hat eine Schaumbetonwand ein höheres Treibhauspotential und einen dementsprechenden größeren Einfluss auf die Umwelt. Die bestehenden Potentiale des CONPrint3D® UL sind erst im Vergleich mit einer konventionell errichteten Betonwand ersichtlich. Besonders hervorzuheben seien die materiellen Einsparnisse aufgrund der Beschaffenheit des Werkstoffes, welcher keine zusätzliche Dämmung benötigt, sowie aufgrund der additiven Verfahrensweise, welche die Verwendung einer Schalung einspart.

Die ökonomische und soziale Nachhaltigkeit hingegen ist positiv zu bewerten, die in den entsprechenden Wirkungsfeldern aufgeführten Vorteile, wie die Verkürzung der Bauzeit, die verminderte Fehleranfälligkeit, die Verbesserung der Arbeitsbedingungen und dem Entgegenwirken des Fachkräftemangels, fördern einen erstrebenswerten, gleichmäßigen Bau- und Lebensstandard.

Diese Vorteile in Kombination mit den aufgeführten Potentialen geben Anreiz zur Erforschung der Möglichkeiten zum Ausgleich der Nachteile der ökologischen Nachhaltigkeit. Insbesondere die Integration von Bewehrung ist als relevantes Themenfeld einzuschätzen, da es den Einsatz von CONPrint3D® UL als Alternative zu konventionellen Stahlbetonbauwerken ermöglicht.

## 2.4 Datenmanagement

### 2.4.1 Digitale Prozesskette bei kleinformatigen 3D-Druckverfahren

Bezogen auf die kleinformatige, additive Fertigung von 3D-Objekten existiert eine große Anzahl unterschiedlicher Technologien. Wesentliche Teile davon sind verfahrensunabhängig. Dies wird als erheblicher Vorteil der additiven Fertigung gegenüber konventionellen Verfahren gesehen. Zunächst werden die geometrischen Daten des zu druckenden Objekts in einer CAD-Software erstellt oder mittels 3D-Laserscannverfahren in CAD-Modelle implementiert. Die dreidimensionale CAD-Datei wird anschließend als STL-Datei exportiert. Danach erfolgt der Slicing-Prozess (Abbildung 13).

*Abbildung 13: Prinzip des Slicings (Futurite 2016)*

Innerhalb des Slicings werden folgende Prozesse ausgeführt:

- Teilung der 3D-Objekte in einzelne Schichten mit vorgegebenen Schichthöhen,
- Generierung des Druckpfades in jeder einzelnen Schicht nach definierten Druckstrategien,
- Festlegung wichtiger Druckparamater, wie Druckgeschwindigkeit, Strukturfüllgrad, auszutragenden Filamentmenge, etc. und
- Ausgabe aller relevanten Maschinensteuerungsbefehle in einem druckfähigen G-Code.

Der G-Code ist in der Maschinentechnik ein gängiges Dateiformat zur Übergabe von Daten an Maschinen. Der G-Code wird dann in eine Host-Software des 3D-Druckers eingelesen. Je nach Druckvorgang sind noch letzte spezifische Einstellungen zur Prozessumgebung und Prozessoptimierung auszuführen. Einige Host-Softwareprogramme, sog. All-In-One-Programme, verfügen über einen integrierten Slicer. Viele additive Verfahren benötigen zur Endfertigstellung eine ergänzende „Nachbearbeitung“ des gedruckten Bauteils.

### 2.4.2 Datenaufbereitung beim Beton-3D-Druck

Zur ganzheitlichen Realisierung von Bauprojekten etabliert sich aktuell BIM als neue Methodik, um die komplexen Planungs- und Ausführungsprozesse erfolgreich zu koordinieren. Die digitale Prozesskette von BIM hin zum maschinenlesbaren G-Code kann aktuell noch nicht sicher und fehlerfrei umgesetzt werden.

Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden mögliche BIM-Exportdateiformate untersucht. In Tabelle 19 werden die aktuell möglichen Exportdateiformate bei bekannten BIM-Softwareprogrammen übersichtlich zusammengefasst.

*Tabelle 19: Mögliche Exportdateiformate aus BIM (Krause 2019)*

| | Angewandte Dateiformate im 3D-Druck | | | | | | Neue 3D-Druckformate | | | BIM |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | STL | FBX | IGES | STEP | OBJ | VRML | AMF | 3MF | SLC | IFC |
| Revit | Plugin | ✓ | Plugin | ✕ | Plugin | ✕ | ✕ | ✕ | ✕ | ✓ |
| Allplan | ✓ | ✕ | ✕ | ✕ | Plugin | ✓ | ✕ | ✕ | ✕ | ✓ |
| ArchiCAD | ✓ | ✓ | ✕ | ✕ | ✓ | ✓ | ✕ | ✕ | ✕ | ✓ |
| Vectorworks | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✕ | ✕ | ✕ | ✕ | ✓ |
| Rhinoceros | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | Plugin |

✕ … Export ist nicht möglich ✓… Export ist möglich

Am effizientesten erscheint der Datenaustausch über das BIM-Standardformat IFC. Allerdings gibt es noch keine Slicing-Software, die IFC als Importformat akzeptiert. Als Austauschformat muss aktuell noch STL genutzt werden. Außerdem muss auf die gängigen Slicing-Programme zurückgegriffen werden, die nicht an die Randbedingungen von CONPrint3D® UL angepasst sind. In Abbildung 14 werden diese Defizite deutlich. Bei mittig angeordneter Druckdüse entstehen Fehler in der Bauteilgeometrie.

Viele der aktuell auf dem Markt befindlichen Slicing-Softwarelösungen sind „open source“ und dienen der Umsetzung des FDM-Verfahrens. Es ist zu konstatieren, dass weitreichende Ein-

griffe in die Programmierung erforderlich sind, um diese Softwareprogramme an die Randbedingungen von CONPrint3D® UL anzupassen.

Um die Prozesskette zukünftig durchgängig und prozesssicher ausführen zu können, sind verschiedene Varianten denkbar. Abbildung 15 zeigt Möglichkeiten, wie die aktuelle Datenprozesskette modifiziert werden kann.

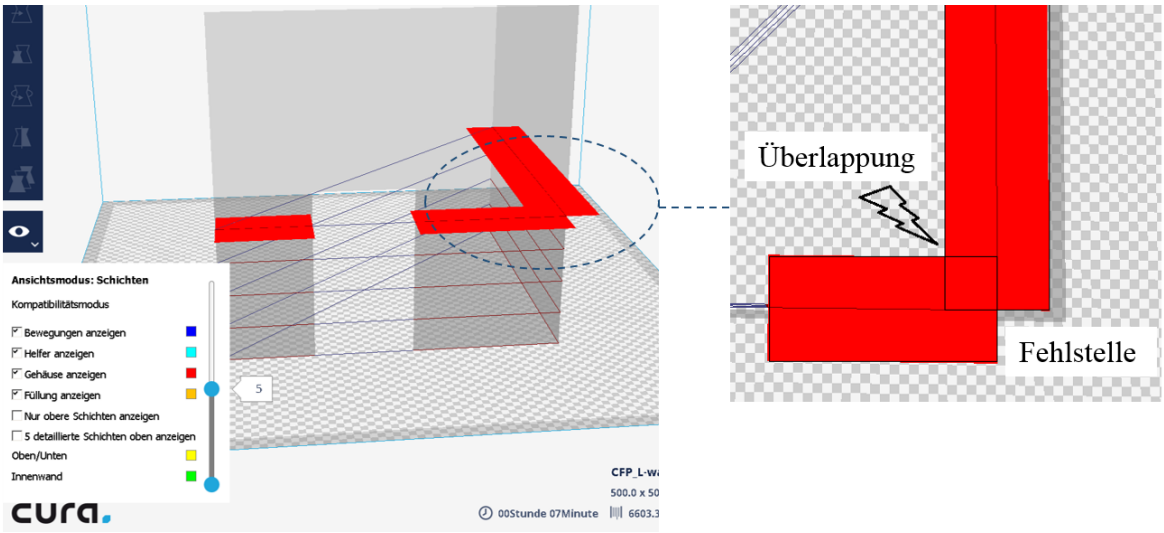



*Abbildung 14: Fehler in der Bauteilgeometrie (An 2018)*

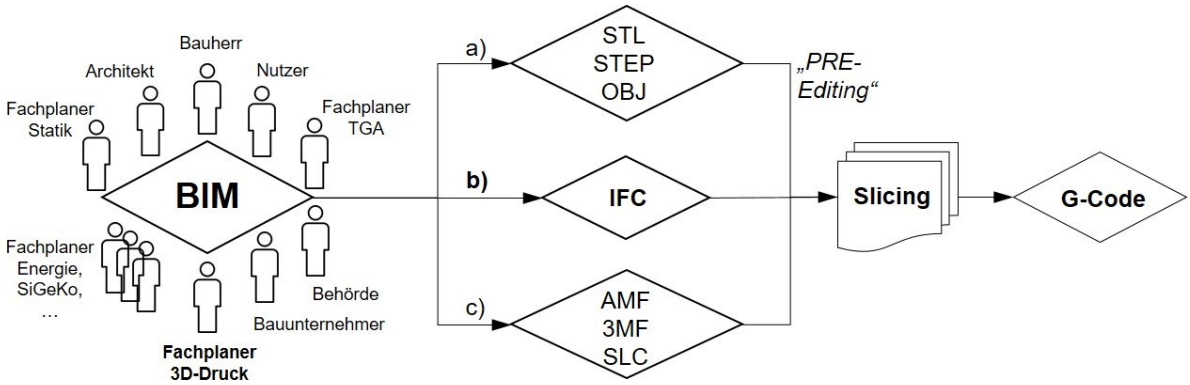



*Abbildung 15: Möglichkeiten der Modifizierung der Datenprozesskette mit BIM (Krause 2019)*

Eine mögliche Variante a) orientiert sich dabei an den aktuellen Exportdateiformaten im kleinformatigen 3D-Druck. Es werden lediglich geometrische Daten aus BIM extrahiert. In einem „PRE-Editing“-Vorgang können druckrelevante Daten ergänzt und anschließend in eine angepasste Slicing-Software überführt werden. Eine Variante b) sieht vor, das BIM-Standardaustauschformat IFC zu exportieren. Dadurch können theoretisch alle druckrelevanten Daten direkt in eine Slicing-Software überführt werden. Diese Möglichkeit ist vielversprechend, da sich IFC als BIM-Format zukünftig etablieren wird. Aktuell können allerdings weder spezielle Druckparameter in BIM konfiguriert werden noch gibt es Slicing-Softwareprogramme, die IFC-Dateien lesen können. Variante c) nutzt die neuen 3D-Druck-formate, mit denen

geometrische Daten und ausgewählte Stoffdaten überführt werden können. Bisher können diese Dateiformate nur aus der Software „Rhinoceros“ exportiert werden. Es ist zukünftig sehr wahrscheinlich, dass andere Softwareanbieter die Exportdateiformate dahingehend erweitern werden (Krause 2019).

# 3 Baustoffliche und maschinentechnische Aspekte: Stand der Forschung und Technik

## 3.1 Marktübliche Schäume und Schaumbetone

### 3.1.1 Schaumbeton

**Begriffsbestimmung und aktueller Stand des Wissens**

Schaumbeton ist ein zementbasiertes Material mit hohem Porengehalt, das durch das Aufschäumen von Mörtel oder Zementleim hergestellt wird. Es kann eine Dichte im Bereich von 200 bis 1900 kg/m³ aufweisen, wobei Schaumbeton mit einer Dichte von weniger als 400 kg/m³ nur zur Verfüllung von Hohlräumen verwendet wird, d. h. wenn keine hohen mechanischen Eigenschaften gefordert sind. Schaumbeton zeichnet sich durch üblicherweise sehr hohe Fließfähigkeit, Selbstverdichtbarkeit, geringen Zement- und Zuschlagstoffgehalt, relativ geringe Festigkeit und hervorragende Wärmedämmung aus (Ramamurthy 2009, Jones 2005, Jones 2005, Brady 2001).

Die hohe Fließfähigkeit von Schaumbeton ermöglicht es, schwer zugängliche und unregelmäßige Hohlräume auszufüllen. Die hierfür verwendete Zusammensetzung des Schaumbetons ist typischerweise so konzipiert, dass nur geringe Druckfestigkeiten erreicht werden, meistens zwischen 1 und 10 MPa (Jones 2005). Schaumbeton kann über große Strecken gepumpt werden. Das geringe Gewicht ermöglicht die Reduzierung von Eigenlasten, was seinen Einsatz in konstruktiven Anwendungen vorteilhaft macht. Das geringe Gewicht vom Schaumbetonwänden ermöglicht z. B. im Wohnungsbau die Abmessungen der Fundamente und den Stahlbewehrungsbedarf zu verringern. Darüber hinaus können bei der Herstellung vom Schaumbeton große Mengen an Flugasche und anderen Sekundär- und recycelten Materialien verwendet werden, was bei herkömmlichem Normalbeton schwierig oder oftmals unwirtschaftlich ist (Jones 2005). So wird Schaumbeton als vielseitiger Baustoff anerkannt, der umweltverträglich und relativ einfach handzuhaben ist.

Das Erreichen hoher Druckfestigkeiten bei der Verwendung von Schaumbeton ist oftmals problematisch. Daher wird Schaumbeton selten für tragende Bauteile eingesetzt (Jones 2005). Darüber hinaus ist Schaumbeton trotz seiner Anwendung in vielen Ländern nicht in Normen geregelt. In Deutschland decken weder DIN EN 206-1 noch DIN 1045-2 Schaumbeton ab (DIN EN 206, DIN 1045). Trotzdem wurde das Potenzial von Schaumbeton für konstruktive Anwendungen von vielen Wissenschaftlern erkannt (Tan 2014, Yang 2015); es wurden zahlreiche Forschungsprojekte zur Verbesserung der Eigenschaften vom Schaumbeton, insbesondere seiner Druckfestigkeit, durchgeführt (Ramamurthy 2009, Amran 2015).

Um ein klares Verständnis für das Material zu erhalten, werden nachfolgend Definitionen zum Thema Schaumbeton und Schaumbetonherstellung erläutert. Manchmal wird zur Bezeichnung des Schaumbetons der Begriff „Porenbeton“ verwendet, was zu Verwirrung führen kann, weil die Begriffe unterschiedliche Definitionen haben. Nach NEVILLE und BROOKS können Leichtbetone nach ihrer Produktionsmethode in drei Gruppen eingeteilt werden (Neville 2008, Neville 2011):

1. Leichtbetone, bei deren Herstellung eine leichte, poröse Gesteinskörnung verwendet wird;
2. Betone, in deren zementbasierte Matrix Luftporen (Porenbeton, Schaumbeton und Gasbeton) eingebracht werden;
3. Haufwerksporige Leichtbetone, bei denen in der Mischungszusammensetzung im Allgemeinen eine grobe Gesteinskörnung ohne Feinanteile verwendet wird, so dass eine große Anzahl von Hohlräumen erzeugt wird.

Schaumbeton gehört in dieser Klassifizierung zur zweiten Gruppe. Alle in dieser Gruppe genannten Betontypen weisen eine zelluläre Struktur auf und können demnach auch als zelluläre Betone bezeichnet werden. In der Terminologie des American Concrete Institute (ACI) wird „Porenbeton“ als ein Produkt mit geringer Dichte definiert, das aus Portlandzement und puzzolanischen Zusatzstoffen besteht und eine homogene Hohlraum- oder Zellstruktur besitzt, die mit gasbildenden Chemikalien oder Schäumungsmitteln erreicht wird (ACI CT-13).

**Herstellungsmethoden**

Grundsätzlich existieren nur zwei Methoden zur Einbringung von Luftporen in Beton: Verwendung gasbildender Chemikalien (i. d. R. Aluminiumpulver) oder von Schäumungsmitteln. Aluminiumpulver reagiert chemisch mit Calciumhydroxid und anderen durch Zementhydratation freigesetzten Alkalien unter Gasbildung (Brady 2001). Produkte sind die Gas- bzw. Porenbetone.

Die Methoden der Schaumbetonherstellung zeigt Abbildung 16 schematisch. Schaumbildner, gewöhnlich auf petrochemisch-synthetischer oder auf Proteinbasis, werden verwendet, um Schaumbeton entweder durch das *Mischverfahren* (engl.: *mixed-foaming*) oder das *Einmischverfahren* (engl.: *pre-foaming*) zu erzeugen. Beim *Einmischverfahren* werden die Matrix und der vorproduzierte wässrige Schaum getrennt produziert. Anschließend wird der Schaum in die zementbasierte Matrix eingemischt. Beim *Mischverfahren* wird das Schäumungsmittel oder Schaumkonzentrat zusammen mit der Matrix bei hoher Geschwindigkeit gemischt, was zur Aufschäumung und Ausbildung der Zellstruktur führt.

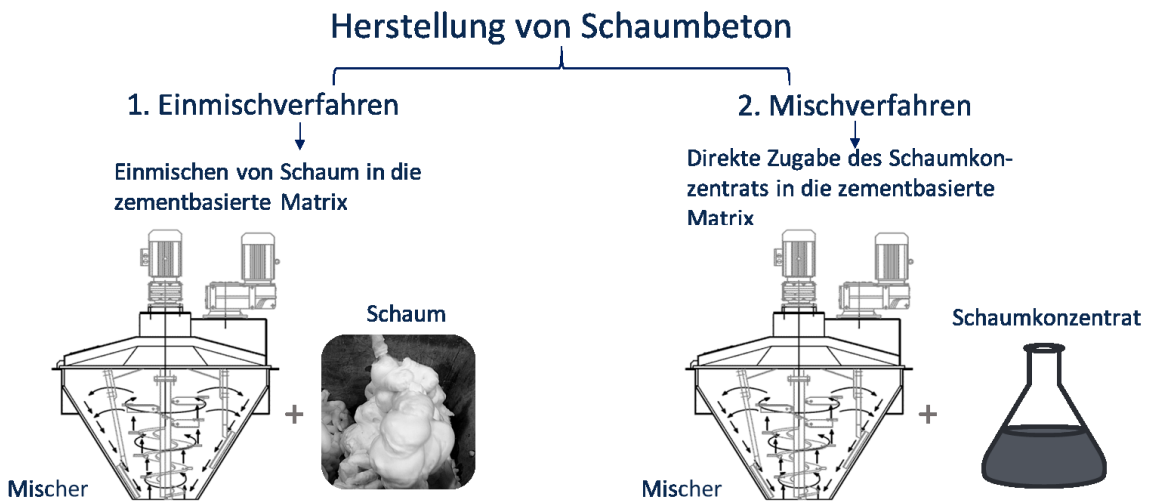



*Abbildung 16: Methoden der Schaumbetonherstellung*

**Zusammensetzung von Schaumbeton**

Die Bindemittelmatrix für Schaumbeton basiert in der Regel auf Portlandzement häufig in der Kombination mit Sand und puzzolanischen Stoffen wie Silicastaub bzw. anderen Nebenprodukten industrieller Herstellungsprozesse, z. B. Hochofenschlacke und Flugasche. Um die Abbindezeit zu verkürzen und die Frühfestigkeit zu verbessern wird schnellhärtender Portlandzement Calcium-Sulfo-Aluminatzement (CSA-Zement) oder Tonerdezement verwendet (Kearsley 2001, Jones 2005, Chen 2013, Amran 2015).

Flugasche kann der Bindemittelmatrix auf zwei Arten zugesetzt werden: als teilweiser Zementersatz oder als Ersatz für feine Zuschläge, d. h. als Füllstoff. Die Zugabe von Flugasche als partieller Ersatz von Zement führt zu Verbesserung der Verarbeitbarkeit, geringerem Wasserbedarf und verringerter Wärmeentwicklung. Weitere Effekte sind die langsamere chemische Reaktion und eine längere Hydratationszeit, die zu längeren Abbindezeiten führen. Hoher Flugaschegehalt führt zu niedrigeren Frühfestigkeiten, wobei sich die Langzeitfestigkeit jedoch verbessert. Es können bis zu 75 % des Zements durch Flugasche ersetzt wurden (Kearsley 2002). Die Verwendung von Flugasche kann als wirtschaftlich und ökologisch angesehen werden.

Silicastaub kommt ebenfalls bei der Herstellung von Schaumbeton als partieller Zementersatz mit bis zu 15 % des Gesamtbindemittelgewichts zum Einsatz (Zulkurnain 2011, Bing 2012). Je nach Zugabemenge erhöht Silicastaub den Wasserbedarf, weshalb häufig Fließmittel verwendet werden, um die Verarbeitbarkeit aufrechtzuerhalten. Obwohl Silicastaub während der Hydratation ungefähr die gleiche Wärmemenge wie Portlandzement beiträgt, ist sein Festigkeitsbeitrag viel höher (Holland 2015). Daher kann die Hydratationswärme durch Ausbalancieren der Anteile von Portlandzement und Silicastaub durch Hinzufügen von Flugasche verringert werden. Darüber hinaus kann die Zugabe von Silicastaub die Geschwindigkeit der Festigkeitszunahme erhöhen (Bing 2012).

Neben den oben erwähnten mineralischen Zusatzstoffen wird aktuell umfangreiche Forschung zur Verwendung alternativer anorganischer Bindemittel ohne Portlandzement betrieben. Ziel der Entwicklung neuer Bindemitteltypen ist die Verkürzung der Abbindezeiten und die Verbesserung der Materialeigenschaften (Ramamurthy 2009).

Der Prozess der Zementherstellung ist ökologisch bedenklich. Deswegen wurde im vorliegenden Forschungsvorhaben die Verwendung von sekundären Stoffen im Schaumbeton angestrebt. Der Grund für den Einsatz solcher Stoffe ist jedoch auch die vorteilhafte Wirkung auf die Schaumbetoneigenschaften, d. h. Verbesserung von Konsistenz, Langzeitfestigkeit und Dauerhaftigkeit.

**Einfluss der Dichte und der Mischungszusammensetzung auf die Festigkeit**

Die Erhöhung der Druckfestigkeit des Schaumbetons war das Ziel vieler Forschungsprojekte. Die Mischungszusammensetzung hat einen großen Einfluss auf die physikalischen und mechanischen Eigenschaften vom Schaumbeton (Ramamurthy 2009, Amran 2015). Aus der Literatur ist bekannt, dass der vollständige Ersatz von Sand durch Flugasche und die Zugabe von

Silicastaub und Polypropylenfasern (PP-Fasern) zur Verbesserung der Druckfestigkeit des Schaumbetons beitragen (Bing 2012). Darüber hinaus erhöht der Zusatz von PP-Fasern die Spaltzugfestigkeit und die Volumenbeständigkeit des Schaumbetons erheblich. YANG und LEE stellten Schaumbetone mit Dichten zwischen 400 und 650 kg/m³ und einer Druckfestigkeit nach 28 Tagen im Bereich von 2 bis 7 MPa her (Yang 2015). Das Bindemittel war wie folgt konzipiert: Der Glühverlust von gewöhnlichem Portlandzement wurde auf 1,5 % eingestellt, es wurden 3 % wasserfreier Gips zugesetzt; der Gehalt an Polyethylenglycol (PEG) im Fließmittel auf Polycarboxylat-Basis (PCE) wurde auf 28 % modifiziert. Abgesehen von der Möglichkeit zur Steuerung der Feststoffparameter des Schaumbetons durch Zugabe von Zusatzstoffen und durchdachten Auswahl an Rohrstoffen hat die Dichte des Schaumbetons einen primären Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften.

Die Mischungsrezeptur normalschwerer Betone hängt von der geforderten Anwendung, gewünschten Druckfestigkeit und Konsistenz ab und wird überwiegend über den Wasser/Zementwert (w/z-Wert) gesteuert. Zum Einstellen der Eigenschaften des Schaumbetons ist jedoch die Änderung des w/z-Wertes nicht ausreichend, weil die Druckfestigkeit des Schaumbetons primär von der Dichte beeinflusst wird. Abbildung 17 zeigt 28 d Druckfestigkeiten unterschiedlicher Schaumbetone.

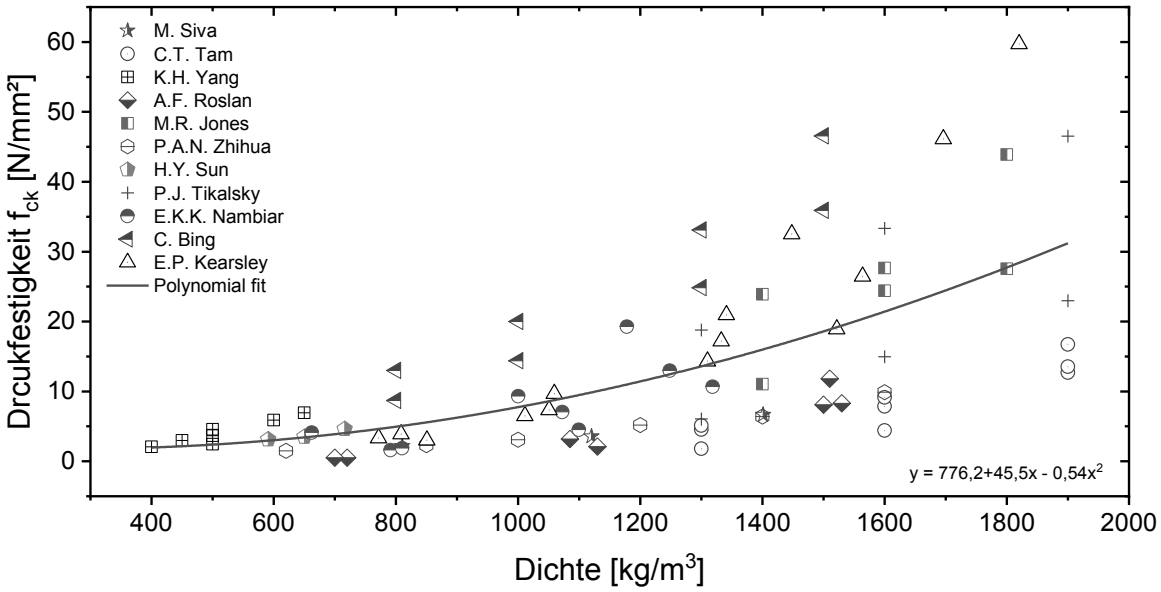



*Abbildung 17: Einfluss der Dichte auf die 28 d Druckfetigkeit des Schaumbetons*

## 3.1.2 Schaum

**Definition und Arten des Schaumbildners**

Bei der Schaumbetonherstellung werden üblicherweise synthetische Tenside oder proteinbasierte Schaummittel verwendet (Panesar 2013). Generell werden Tenside zur Produktion von Wasch- und Reinigungsmitteln, Proteine in lebensmittelbezogenen Anwendungen eingesetzt (Saint-Jalmes 2005). Im Allgemeinen ist ein Schaummittel eine Substanz, die die Grenzflächen-

spannung einer Flüssigkeit, üblicherweise Wasser, herabsetzt. Gleiches gilt auch für die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit durch Adsorption an der Grenzfläche.

Tenside sind amphiphile Verbindungen, das heißt sowohl hydrophile als auch hydrophobe Teile sind gleichzeitig im selben Molekül vorhanden. In wässrigen Lösungen neigen Tenside dazu sich an der Wasser-Luft-Grenzfläche (d. h. Luftblasenoberfläche) durch hydrophobe Wechselwirkungen zu aggregieren und so anzuordnen, dass die Schäumbarkeit der Lösung durch Verringern der Oberflächenspannung verbessert wird (Chen 2017). Ohne die Verringerung der Oberflächenspannung kann eine Flüssigkeit nicht von ihrem ursprünglichen Zustand in einen Schaum umgewandelt werden (Hill 2017). Die Fähigkeit eines Tensids als Schaumbildner zu wirken hängt in erster Linie von seiner Wirksamkeit bei der Verringerung der Oberflächenspannung in der Lösung, seiner Diffusionscharakteristik und seinen elastischen Eigenschaften ab (Hill 2017). Beispielsweise können ionische Tenside zur Schaumbildung und -stabilisierung beitragen, während nichtionische Tenside im Allgemeinen weniger Ausgangsschaum produzieren, der auch weniger stabil ist. Im Allgemeinen resultiert für die meisten klassischen Tenside die Stabilität des Schaumes aus der elektrostatischen Abstoßung zwischen den mit Tensiden bedeckten Blasenoberflächen, was zu hohen Trenndrücken führt (Saint-Jalmes 2005).

Schaumbildner auf Proteinbasis werden hauptsächlich aus natürlich vorkommenden, hydrolysierten Proteinen hergestellt (Hill 2017). Diese werden mit Schaumstabilisatoren, Bakteriziden, Korrosionsinhibitoren, Frostschutzadditiven und Lösungsmitteln kombiniert, um den biologischen Abbau zu verhindern und die Leistung zu verbessern. Proteine sind ebenfalls amphiphil. Um effektiv als Schaumbildner wirken zu können, muss das Protein zunächst löslich sein (Moro 2001, Hill 2017). Proteine können an der Wasser-Luft-Grenzfläche angeordnet werden und die Oberflächenspannung von Wasser senken (Prins 1998). In Lösung adsorbieren die Proteinmoleküle an Grenzflächen in sehr geringen Konzentrationen. Es besteht die Möglichkeit, dass mehr als nur eine Monolage von Proteinmolekülen adsorbiert wird, was einen deutlichen Unterschied zu typischen ionischen Tensiden darstellt (Hill 2017). Nach der Adsorption der Proteinmoleküle folgt die Denaturierung, d. h. das Proteinmolekül verändert seine Struktur irreversibel (Saint-Jalmes 2005). Der Stabilisierungseffekt in Proteinschäumen basiert auf dem GIBBS-MARANGONI-Effekt, der den Stoffübergang entlang einer Grenzfläche aufgrund eines Gradienten der Grenzflächenspannung bezeichnet (Hill 2017). In einem plötzlich gedehnten Film ist die Proteinkonzentration niedrig und die lokale Oberflächenspannung hoch. Dieser Gradient der Oberflächenspannung induziert einen Flüssigkeitsstrom, der die Destabilisierung im Schaum verzögert (vgl. Kapitel 4.1.2). In einigen proteinstabilisierten Schäumen können intermolekulare Wechselwirkungen zwischen den Proteinmolekülen auftreten (Hill 2017).

Synthetische Schaumbildner sind für Schaumbetonanwendungen leichter zu handhaben und weniger anfällig für Temperaturänderungen als proteinbasierte. Weiterhin sind synthetische Schaummittel i. d. R. länger lagerbar (Ranjani 2010). Darüber hinaus sind sie meistens kostengünstiger und benötigen erheblich weniger Energie um hochwertige Schäume herzustellen (Aldridge 2005). Trotzdem können synthetische Tenside aufgrund der größeren Blasengröße und weniger isolierter Zellen, die zu geringeren Betonfestigkeiten führen, nicht die Leistung von Schaummitteln auf Proteinbasis erreichen (Mohammad 2011).

Die auf Proteinbasis hergestellten Schäume zeichnen sich durch eine geringere Größe der Luftblasen, eine höhere Stabilität (d. h. eine geringere Drainage) und eine stärker isolierte Blasenstruktur aus im Vergleich zu Schäumen, die mit synthetischen Schaummittel hergestellt werden (Ramamurthy 2009, Panesar 2013, Amran 2015). Es wurde auch erkannt, dass Schaumbeton, der unter Verwendung von Tensiden auf Proteinbasis hergestellt wurde, ein um 50 % bis 100 % höheres Verhältnis von Festigkeit zu Dichte aufweist als Schaumbeton der unter Verwendung eines synthetischen Schaummittels erzeugt wurde.

Es steht eine große Auswahl an Schaumbildnern zur Verfügung. Die Auswahl eines für eine bestimmte Anwendung am besten Geeigneten ist jedoch schwierig, da die Leistung des Schaummittels bei verschiedenen Bindemitteln variiert. Darüber hinaus muss die Verträglichkeit des Schaummittels und anderer in der Schaumbetonrezeptur vorhandener Zusatzmittel (z. B. Fließmittel) berücksichtigt und geprüft werden. Derzeit basiert die Auswahl eines geeigneten Schaumbildners auf einer empirischen Herangehensweise.

**Schaumstabilität**

Die Schaumstabilität beeinflusst stark die Eigenschaften des Schaumbetons. Vorgeformter Schaum wird hergestellt, indem ein Schaummittel oder Schaumkonzentrat in bestimmten Anteilen in Wasser verdünnt und diese Lösung durch einen Generator geleitet oder über ein Netz gesprüht wird. Verschiedene Arten von Schaumkonzentraten haben unterschiedliche Schäumbarkeitseigenschaften, was als „Schaumkapazität“ bezeichnet wird.

Schaumkonzentratlösungen haben normalerweise ein Verhältnis vom Schaummittel zu Wasser zwischen 1:5 und 1:40. Das optimale Verhältnis hängt von den technischen Eigenschaften des Schaumgenerators und den Umgebungsbedingungen ab (Brady 2001).

Der vorgeformte Schaum wird in erster Linie durch die Dichte charakterisiert. Im Nachhinein wird die Angabe zur Dichte des Schaumes für die Berechnung des Volumens in der Mischungszusammensetzung verwendet. Gemäß der Literatur liegt die Dichte des vorgeformten Schaumes typischerweise zwischen 30 und 80 kg/m$^3$ (ACI 523). Die Schaumdichte wird gemessen indem der Schaum in einem Behälter mit bekanntem Volumen gewogen wird.

Unter Instabilität des Schaumes wird der Blasenbruch im Schaum(beton) und eine einhergehende Entmischung verstanden. Die Instabilität des Schaumes kann die Dauerhaftigkeit des Schaumbetons und die Reproduzierbarkeit der Materialeigenschaften insgesamt maßgebend beeinträchtigen. Der Schaum muss stabil genug sein, um das Einmischen in den Zementleim und die chemische Umgebung des Betons unbeschadet zu überstehen. Die Stabilität des Schaumes kann auch durch äußere Einflussfaktoren wie Vibration, Wind, Verdunstung und Temperatur beeinträchtigt werden. Deshalb ist ein gewisser Abbau des Schaumes unvermeidlich (Brady 2001). In der Literatur werden drei Prozesse, die den Zerfall von Schäumen bestimmen illustriert: Drainage, Blasenvergrößerung oder Koaleszenz (Hill 2017):

1) *Drainage* ist ein Prozess, bei dem Flüssigkeit durch Blasenmebranen über Plateauränder (das sind Kanäle, in denen drei benachbarte Blasen aufeinandertreffen) unter dem Einfluss von Schwerkraft und Kapillarkräften aus dem Schaum drainiert. Infolgedessen trocknet die

Oberseite der Schaumblase und die Unterseite bleibt feucht, weshalb sich die Form der Blasen ändert und diese an Stabilität verlieren; die Blasen können dann auch platzen (Abbildung 18).

2) *Blasenvergrößerung* ist ein Vorgang des Gastransports zwischen Blasen unterschiedlicher Größe, der zum Wachstum der durchschnittlichen Blasengröße führt, da das Gas von einer Blase zur nächsten diffundiert. Dieser Prozess hat den gleichen Ursprung wie das Phänomen der OSTWALD-Reifung in Dispersionen, bei dem das Gas aufgrund des Unterschieds im LAPLACE-Druck von den kleineren zu den größeren Blasen diffundiert (Rio 2014).

3) *Koaleszenz* (Blasenverschmelzung) hat das gleiche Gesamtergebnis wie Blasenvergrößerung, d. h. verringerte Anzahl von Blasen und erhöhte durchschnittliche Blasengröße (Abbildung 19). Eine Koaleszenz tritt jedoch auf, weil die dünnen Filme zwischen den Blasen aufbrechen, was zu einer Verringerung des Gasvolumens innerhalb des Schaumes führt. CARRIER *et al.* berichteten, dass ein Zusammenhang zwischen Drainage und Koaleszenz besteht und dass die Koaleszenz nicht direkt von der Größe der Blasen abhängt, sondern von der Art des Schaumkonzentrates und seiner Konzentration (Carrier 2003).

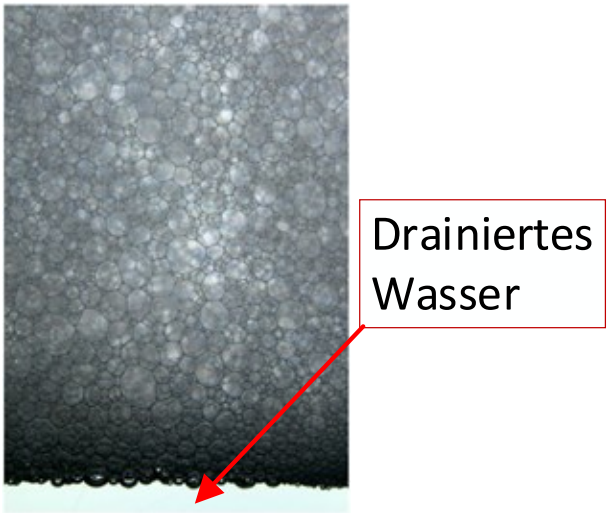
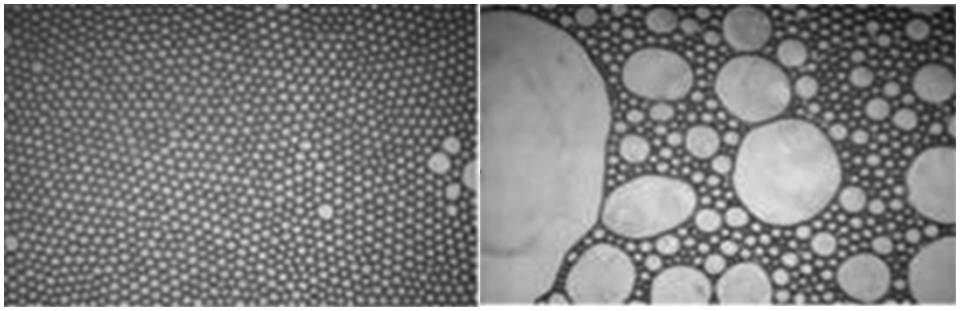
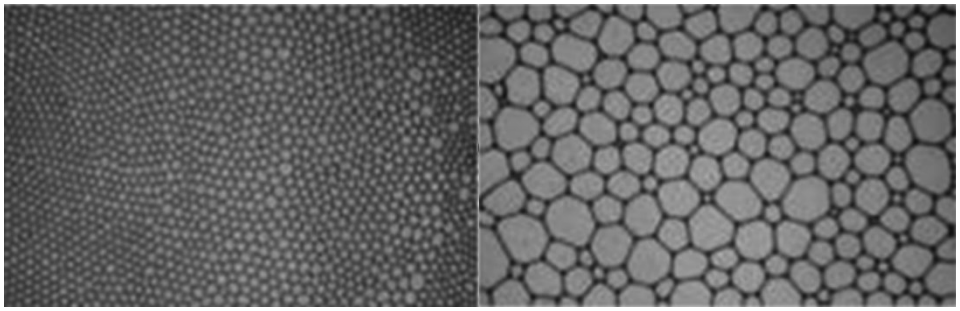



*Abbildung 18: Beispiel einer Schaumdrainage*



**(a)**



**(b)**

*Abbildung 19: a) Koaleszenz und b) Blasenvergrößerung (Hill 2017)*

## 3.2 Technologien zur Schaumbetonherstellung

Es gibt zwei grundlegende Verfahren zur Herstellung von Schaumbeton, nämlich das *Einmisch-* und *Mischverfahren*, siehe Kapitel 3.1.1 und Abbildung 16.

Beim *Einmischverfahren* werden zunächst alle Bestandteile mit Ausnahme des Schaumes, also die Bestandteile der Matrix, gemischt, bis eine homogene Suspension mit einer einheitlichen Konsistenz erzeugt ist. Anschließend wird die erforderliche Menge an vorgeformtem Schaum hinzugefügt. Im Allgemeinen wird angenommen, dass die Mischzeit von zwei bis drei Minuten ausreicht, um den Schaum in die Matrix zu integrieren. Die Mischzeit variiert je nach Schaumerzeugerleistung und Betondichte (ACI 523). Niedrige Mischgeschwindigkeit wird empfohlen um Blasenbruch zu vermeiden, insbesondere bei Zementleimen mit hoher Viskosität.

Der vorgeformte Schaum kann entweder durch Trocken- oder Nassverfahren hergestellt werden. Trockener Schaum wird erzeugt, indem eine Lösung aus Schaummittel und Wasser durch eine Reihe von Beschränkungen (z. B. Gitternetze oder Filter) unter gleichzeitiger Zufuhr von Druckluft in eine Mischkammer geleitet wird. Wenn Druckluft zur Lösung hinzugefügt wird, entsteht ein Schaum, dessen Konsistenz Rasierschaum ähnelt (Aldridge 2005). Der trockene Schaum ist mit einer Blasengröße von weniger als einem Millimeter ziemlich stabil. Die Stabilität des trockenen Schaumes hilft beim Einmischen in die Matrix und trägt ebenfalls zur Stabilität und Pumpbarkeit des resultierenden Schaumbetons bei.

Nasser Schaum wird durch Sprühen einer Lösung aus Schaummittel und Wasser durch ein feines Netz erzeugt. Der resultierende Schaum ähnelt einem Schaumbad mit einer Blasengröße zwischen 2 und 5 mm. Der nasse Schaum ist im Vergleich zum trockenen Schaum weniger

stabil und wird für die Herstellung von Schaumbeton mit niedriger Dichte nicht empfohlen (Aldridge 2005). Um die Stabilität des Schaumes zu gewährleisten sollte er im Allgemeinen sofort nach seiner Erzeugung verarbeitet werden.

Beim *Mischverfahren* wird Schaum im Beton durch intensives Mischen des Schaumbildners und der Bestandteile der Matrix hergestellt. Diese Methode ist standardisiert, weit verbreitet und einfach zu befolgen (Ramamurthy 2009).

In beiden Fällen soll der Schaum stabil sein, so dass sich ein starkes Betonskelett um die mit Luft gefüllten Hohlräume bildet (Amran 2015). Das *Einmischverfahren* ist teurer als das *Mischverfahren*, weist jedoch eine bessere Schäumungseffizienz auf, ohne Beeinträchtigung der Qualität der Luftblasen (Panesar 2013). Darüber hinaus ist das *Einmischverfahren* für Schaumbetone mit niedriger Dichte bevorzugt, weil die Menge der Luftblasen durch Zugabe eines bestimmten Volumens an vorgeformtem Schaum leichter zu kontrollieren ist. Im Gegensatz dazu hängt der Luftgehalt beim *Mischverfahren* von verschiedenen Faktoren ab, die schwer zu kontrollieren sind. Beispielsweise muss die Menge des Schaummittels für einen bestimmten Mischer und bestimmte Mischungszusammensetzung immer angepasst werden.

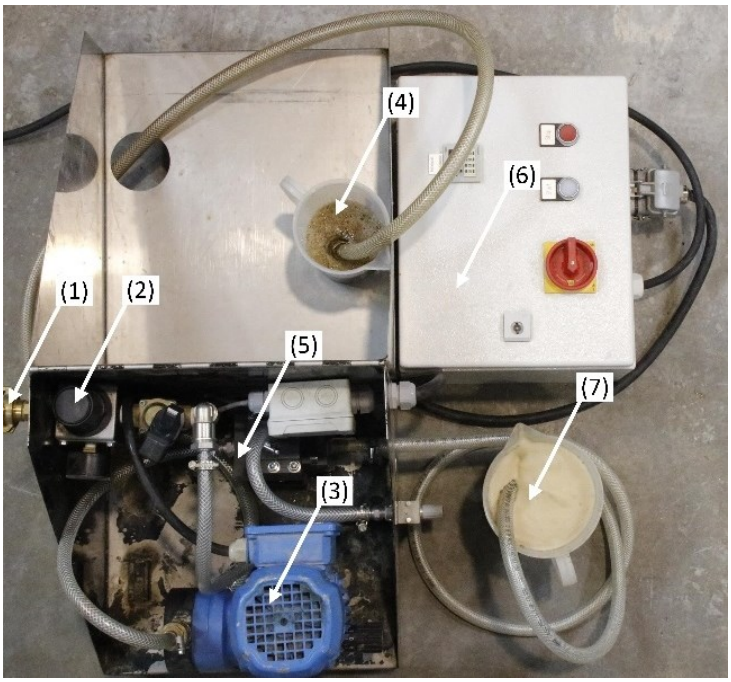
# 4 Konzepte und Methoden zur kontinuierlichen Schaumbetonherstellung

## 4.1 Prozessgestaltung zur kontinuierlichen Herstellung von Schäumen

### 4.1.1 Herstellung des vorgefertigten Schaumes

Für die Herstellung des vorgefertigten Schaumes wurde der Schaumgenerator MC-Foam Generator II des Projektpartners MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG (Bottrop, Deutschland) verwendet (Abbildung 20). Er besteht im Wesentlichen aus einer Druckluftzufuhr (1) mit manuellem Druckregler (2), einer Dosierpumpe mit variabler Fördermenge (3) für den Schaumbildner (4), der Belüftungsstrecke (5) und einer elektrischen Steuerungseinheit (6). Das Kernstück ist die Belüftungsstrecke, in der durch Zusammenführen von Schaumkonzentratlösung und Druckluft der Schaum (7) gebildet wird. Einstellmöglichkeiten zur Beeinflussung der Schaum-eigenschaften sind Luftdruckregulierung, Fördermenge der Flüssigkeitsdosierpumpe sowie die Porengröße der in der Belüftungsstrecke eingesetzten Membran.

Zwei Sorten Schaumbildner wurden von MC-Bauchemie für die Herstellung des Schaumes bereitgestellt, jeweils in Kanistern mit Fassungsvermögen 30 kg: Der synthetische Schaumbildner Centripor SK-155 und der proteinbasierte Schaumbildner Oxal PLB6.




1 – Druckluftzufuhr
2 – Manueller Druckregler
3 – Dosierpumpe
4 – Schaumbildner
5 – Belüftungsstrecke
6 – Steuerungseinheit
7 – Schaum

*Abbildung 20: Schaumgenerator*

Zu Beginn der Untersuchungen wurde eine Konzentration des tensidbasierten Mittels SK155 von 2 % verwendet. Abbildung 21 zeigt den produzierten Schaum. Im Anschluss an die Herstellung wurde ein rascher und deutlicher Zerfall des Schaumes beobachtet. Zusätzlich führte dieser Zerfall zur Absetzung (Drainage) der wässrigen Lösung des Schaumkonzentrats.

(a) (b) (c)

*Abbildung 21: Herstellung des vorgefertigten Schaumes mit tensidbasiertem Schaumkonzentrat SK155*

In Studien zur Schaumbetonherstellung wird die Schaumstabilität in der Regel durch Messung des Zusammenbruchs oder der Entwässerung (der Menge der abgetrennten Schaummittellösung – Drainage) in unterschiedlichen Zeitabständen mit einem transparenten Messzylinder bestimmt (Brady 2001). Die genaue Ermittlung der Menge des drainierten Wassers ist wichtig, um eine Aussage über Stabilität des Schaumes zu treffen und um nach Möglichkeit den w/z-Wert der zementbasierten Matrix anzupassen.

In Abbildung 22 ist der zeitabhängige Zerfall des Schaumes zu sehen. Der eingestellte Luftdruck beeinflusste die Qualität des Schaumes. Bei einer Erhöhung des Luftdrucks von 1,0 auf 2,0 bar wurde der Zerfall des Schaumes beschleunigt. Ferner zeigte sich eine deutliche Verbesserung der Stabilität des Schaumes durch eine schrittweise Erhöhung der Schaumbildnerkonzentration. Die aufgeführten Beobachtungen bewiesen die Notwendigkeit einer ausführlichen Untersuchung der optimalen Herstellungsparameter (Einstellungen des Schaumgenerators) und darauf abgestimmten Lösungszusammensetzung vom Wasser und Schaumkonzentrat.

Die wesentlichen Einflussparameter auf die Qualität des Schaumes sind: Art und Menge des Schaumkonzentrats in der Lösung, technische Ausführung des Schaumgenerators, Druckluft, Durchflussrate des Schaumbildners und Umgebungstemperatur.

Diese Einflussparameter auf die Stabilität des Schaumes ergeben eine große Anzahl von Variationsmöglichkeiten, die in Kombination miteinander eine breite Parametermatrix bilden (Abbildung 23, Beispiel für die 5 %ige Lösung eines Schaumkonzentrats).

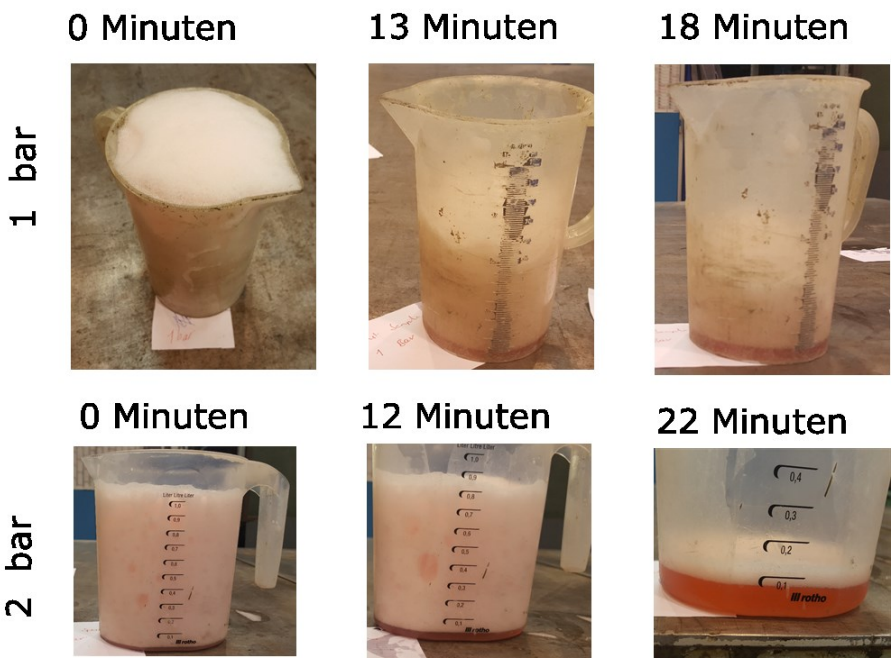



*Abbildung 22: Einfluss der Luftdruck-Einstellung auf die Stabilität des vorgeformten Schaumes*

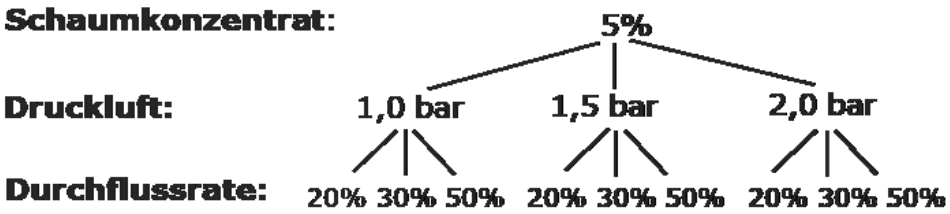



*Abbildung 23: Paramterkombinationen der Einstellungen des Schaumgenerators*

Der Begriff Durchflussrate beschreibt die Herstellmenge des Schaumes pro Zeiteinheit. Somit ist die Durchflussrate an eine konkrete Fördermenge geknüpft. Die in Abbildung 23 angegebenen Prozentwerte entsprechen folgender Korrelation: 10 % → 1,0 L/min; 20 % → 1,9 L/min; 30 % → 2,4 L/min. Die Angabe der Fördermenge in Prozent ist durch die technische Ausführung des Schaumgenerators bedingt und die tatsächliche Fördermenge des Schaumgenerators wurde gemessen. Eine Übersicht über die Fördermenge des verwendeten Schaugenerators ist in Abbildung 75 in Anhang A.1 dargestellt.

Nach der Durchführung erster Untersuchungen gemäß den Einflussparametern von Abbildung 23 konnte die breitgefächerte Parameterkombination zu einem spezifizierten Untersuchungsprogramm verringert werden (Tabelle 20).

*Tabelle 20: Versuchsprogramm für die Bestimmung der optimalen Schaumgenerator-Parameter bei verschiedenen Schaumbildner-Konzentrationen*

| Schaumkonzentrat | Konzentration | Luftdruck | Durchflussrate (Pumpe) |
|---|---|---|---|
| Tensid-SK155 bzw. Protein-PLB6 | 5 % | 1,0 bar | 20 % |
| | 10 % | 1,5 bar | 30 % |
| | 20 % | 3,0 bar | 50 % |
| | 30 % | 1,0 bar | 20 % |

Die Einstellung von Durchflussrate und Luftdruck wirkten sich signifikant auf den Gasanteil und die Menge des produzierten Schaumes pro Zeiteinheit aus. Weiterhin wird darüber auch die Stabilität des vorgefertigten Schaumes beeinflusst. Für die Bewertung der Stabilität des Schaumes wurden die Höhe des Messbecherinhalts und die Menge des drainierten Wassers innerhalb von mehr als 30 min gemessen. Die gewählte Messdauer entspricht der maximal zulässigen Wartezeit bis zum Einmischen des Schaumes in die zementbasierte Matrix. Die Änderung der Durchflussrate von 30 % auf 50 % spiegelte sich in der Erhöhung des drainierten Wassers wider, was eine mangelhafte Stabilität des Schaumes beschreibt. Die gemessene Höhe des Schaumes blieb aber konstant und ab ca. 15 min war eine geringe Reduzierung des Schaumvolumens sichtbar (Abbildung 24).

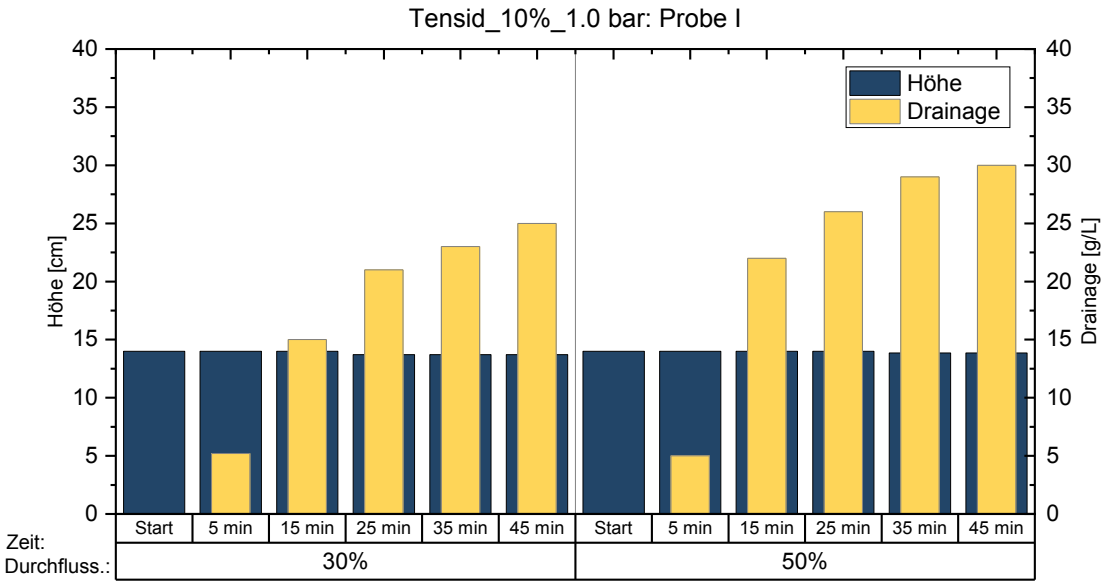



*Abbildung 24: Einfluss der Durchflussrate auf die Qualität des Schaumes*

Beim Vergleich eines Schaumes aus 10 % und einem aus 20 % mit SK155 ist eine Erhöhung der Stabilität des Schaumes zu beobachten. Abbildung 25 zeigt die Messergebnisse der Stabilität des Schaumes mit einer 20 %igen Dosierung des Schaumkonzentrats SK155.

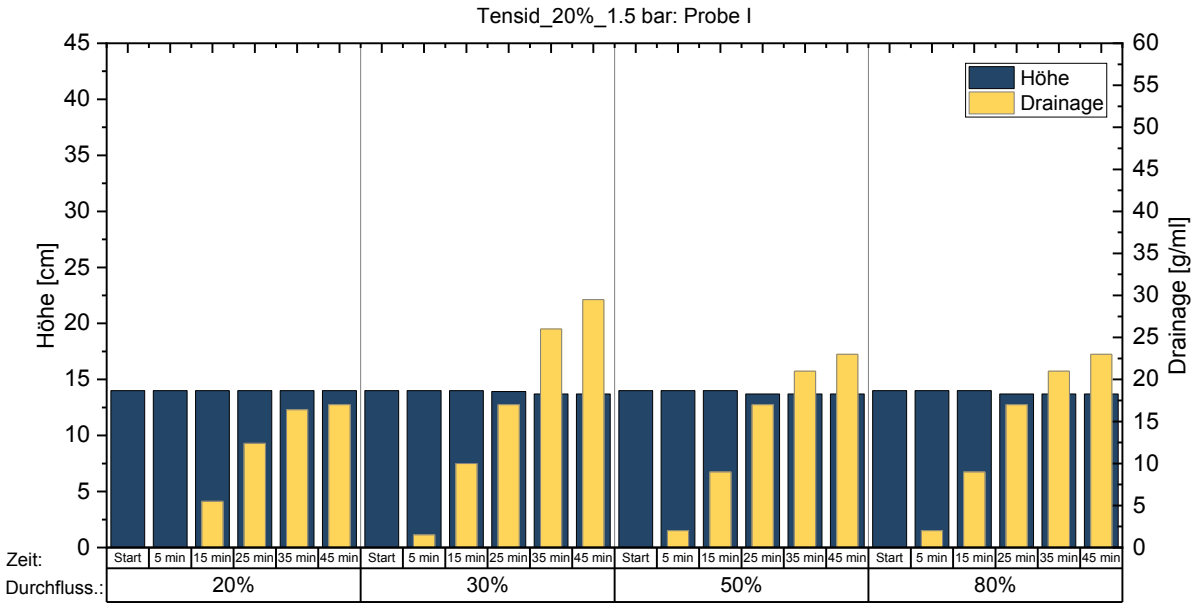



*Abbildung 25: Stabilität des Schaumes hergestellt mit 20 % Lösung des Schaumkonzentrats SK155 und einem Druckluftdruck von 1,0 bar*

Wie im Fall einer Lösung mit 10 % des Schaummittels hat auch bei einer Lösung mit 20 % die Erhöhung der Durchflussrate einen negativen Einfluss auf die Stabilität des Schaumes. Durch die Erhöhung der Konzentration des Schaummittels in der Lösung konnte die Drainage innerhalb von 45 min von ca. 25 g auf ca. 5 g reduziert werden (Abbildung 25). Wie im Beispiel der 10 % Lösung des Schaumbildners blieb auch bei der 20 % Lösung die Volumenstabilität des Schaumes nahezu konstant.

Sowohl das proteinbasierte Oxal PLB6 als auch das tensidbasierte SK155 eignen sich gut für die Schaumherstellung. Beim Vergleich von Schäumen, die unter gleichen Herstellungsbedingungen und gleichen Einstellungen des Schaumgenerators hergestellt wurden, zeichnete sich der tensidbasierte Schaum im Vergleich zum proteinbasierten Schaum durch besseres Stabilitätsverhalten aus (SK155: Abbildung 25; Oxal PLB6: Abbildung 26).

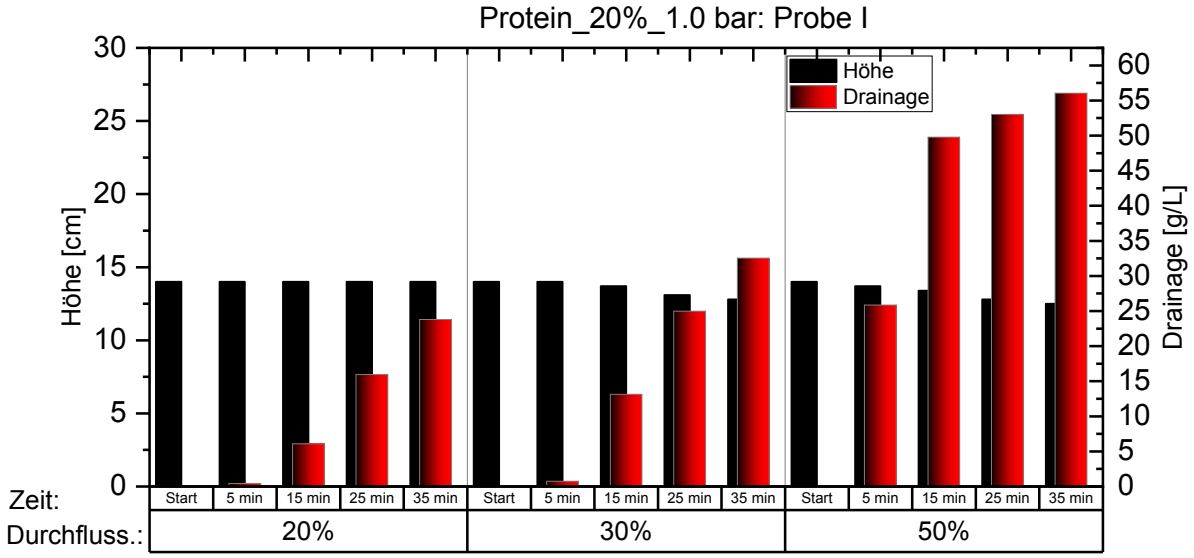



*Abbildung 26: Stabilität des Schaumes hergestellt mit 20 % Lösung des Schaumkonzentrats Oxal PLB6 und einer Druckluftdruck von 1,0 bar*

Basierend auf durchgeführten Untersuchungen zur Schaumstabilität kann zusammengefasst werden, dass sowohl die Einstellungen des Schaumgenerators als auch die Zusammensetzung des Schaumbildners einen Einfluss auf die Stabilität des Schaumes haben. So führte z. B. die Erhöhung des Luftdrucks und damit einhergehend die Erhöhung der zugeführten Luftmenge zu erhöhter Drainage. Eine negative Auswirkung auf die Stabilität des Schaumes bei den beiden untersuchten Arten des Schaumbildners ergab sich bei der Erhöhung der Durchflussrate. Anhand der untersuchten Parameter wurden die optimalen Einstellungen des Schaumgenerators und der Rezeptur der Schaummittellösung ermittelt:

- Luftdruck: 1,0 bar,
- Durchflussrate: 20 %,
- Konzentration des Schaumbildners: 20 %.

Die gemessene Dichte des Schaumes wird durch die Einstellungen des Schaumgenerators und der Menge der Schaumbildner-Konzentration beeinflusst und liegt zwischen 50 und 70 kg/m$^3$. Die ausführlichen Ergebnisse zur Schaumstabilität mit unterschiedlichem Luftdruck, variierender Art des Schaumbildners und der Konzentrationen sind in Anhang A.1 zu finden.

Trotz dieser Ergebnisse zur Schaumstabilität muss berücksichtigt werden, dass die Zielanwendung vorsieht, den vorgeformten Schaum in die zementbasierte Matrix einzumischen. Die dabei entstehende mechanische Beanspruchung stellt zusätzliche Anforderungen an die Stabilität der Blasen im Schaum. Der direkte Vergleich des Stabilitätsverhaltens beider Schäume beim Einmischen in die zementbasierte Matrix zeigte letztlich einen deutlichen Vorteil des proteinbasierten Schaumes gegenüber dem tensidbasierten Schaum.

### 4.1.2 Instabilität des vorgeformten Schaumes

Aus der Literatur ist bekannt, dass Umgebungsfeuchte und Lufttemperatur die Schaumstabilität beeinflussen (Hajimohammadi 2017, Hajimohammadi 2018). Eigene Versuche sollten die Beständigkeit des vorgefertigten Schaumes gegen Temperaturschwankungen ermitteln. Dafür wurden PVC-Formteile unterschiedlicher Temperatur mit dem Schaum in Kontakt gebracht. Zwei Probekörpergeometrien wurden verwendet, um mögliche Einflüsse der Formgestaltung zu verringern: Typ A: 243,0 x 19,8 x 8,0 $mm^3$ (Höhe x Breite x Tiefe), Belastungsfläche 48,1 $cm^2$, Masse 56,5 g; Typ B: 75,9 x 28,0 10,2 $mm^3$, Belastungsfläche 21,3 $cm^2$, Masse 30,0 g (Abbildung 27).

Die Stabilität des vorgefertigten Schaumes kann durch Fremdstoffe auf der Probekörperoberfläche beeinflusst werden. Daher wurden die Probekörper vor jedem Versuch gründlich gereinigt und entfettet. Die Probekörper wurden im Ofen (Probekörper 1), bei Raumtemperatur (Probekörper 2) und im Kühlschrank (Probekörper 3) temperiert. Eine Übersicht der Temperaturspanne zeigt Tabelle 21.

**(a)** **(b)**

*Abbildung 27: PVC-Probekörper für die Bestimmung der Stabilität des Schaumes bei Belastung, Kontaktthermometer zur Temperaturmessung*

*Tabelle 21: Probekörper zur Bewertung der Temperaturbeständigkeit des vorgefertigten Schaumes*

| Probekörper Nr. | Temperatur vor der Prüfung | |
|---|---|---|
| | Probekörper Typ A | Probekörper Typ B |
| 1 | 23,1 °C | 24,5 °C |
| 2 | 20,0 °C | 21,0 °C |
| 3 | 17,6 °C | 16,4 °C |

Die Probekörper wurden ohne zusätzliche Belastung in den Schaum von oben eingelegt (Schaumbildner: Oxal PLB6, 10 % Lösung, 10 % Durchflussrate, 1,0 bar). Abbildung 28 zeigt das Einsinken bzw. das Setzmaß der Probekörper Typ A und Abbildung 29 der Probekörper Typ B jeweils direkt nach dem Aufbringen auf die Schaumoberfläche.

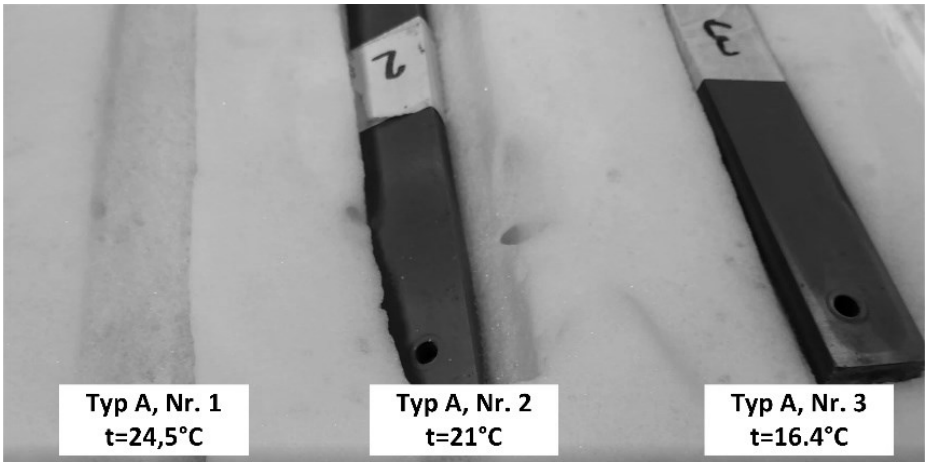



*Abbildung 28: Temperatureinfluss auf die Stabilität des vorgefertigten Schaumes, Probekörper Typ A*

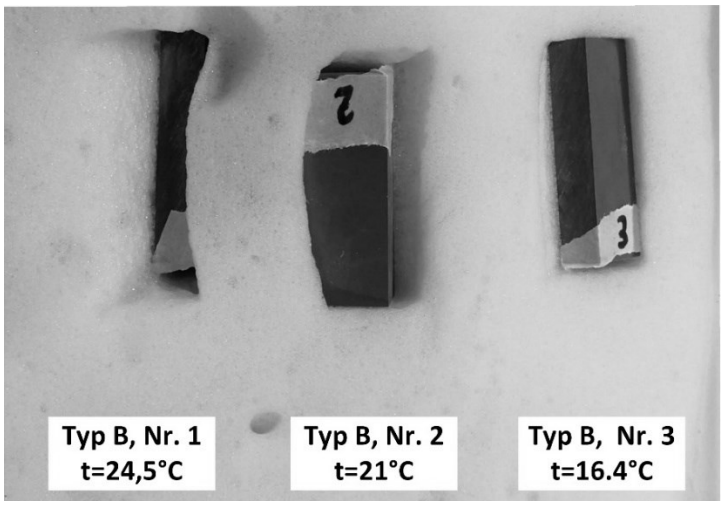



*Abbildung 29: Temperatureinfluss auf die Stabilität des vorgefertigten Schaumes, Probekörper Typ B*

Aus diesen Ergebnissen ist zu schließen, dass Temperaturerhöhung einen negativen Einfluss auf die Stabilität des Schaumes hat. Nicht nur die Temperatur von mit dem Schaum in Kontakt tretenden Gegenständen, sondern auch die Temperatur der Umgebungsluft kann die Stabilität des Schaumes beeinträchtigen. Die Stabilität des Schaumbetons muss separat von der Stabilität des Schaumes betrachtet werden. Es wird vermutet, dass die bei der Hydratation des Zements entstehende Wärme eine negative Auswirkung auf den untergemischten Schaum haben kann.

### 4.1.3 Umbau des Schaumgenerators

Die Stabilität des vorgeformten Schaumes hat wesentlichen Einfluss auf die Gleichmäßigkeit der Eigenschaften des Schaumbetons während der Verarbeitung. Der ermittelte Schaumzerfall liegt zum Teil an der technischen Ausführung des Schaumgenerators. Der vom Projektpartner zur Verfügung gestellte Schaumgenerator (Abbildung 20) ist für den technischen Produktionseinsatz konzipiert, d. h. er ist darauf ausgelegt, in kurzer Zeit sehr große Schaummengen zu produzieren. Dies macht sich vor allem in großen Luftströmungen bemerkbar, die sich bei den gewählten Druckbereichen einstellen. Gepaart mit den eher geringen Durchflussraten des Schaumbildners (Tabelle 20) ergab sich bei der ursprünglichen Konfiguration des Schaumgenerators ein unkontrollierter Luftstrom neben der eigentlichen Schaumbildung. Diese „Nebenluft“ am Schaumaustritt verhinderte die Kontrolle der Schaumeigenschaften anhand der Eingangsparameter Luft- und Flüssigkeitsmenge. Daher war es nötig, die Belüftungsstrecke des Schaumgenerators an die Erfordernisse des Labormaßstabs im Projekt anzupassen und zu optimieren. Im Zuge der Neukonstruktion der Belüftungsstrecke wurden die Luftströmung durch die Belüftungsstrecke und die Lage der Begasungsmembran geändert (Abbildung 30).

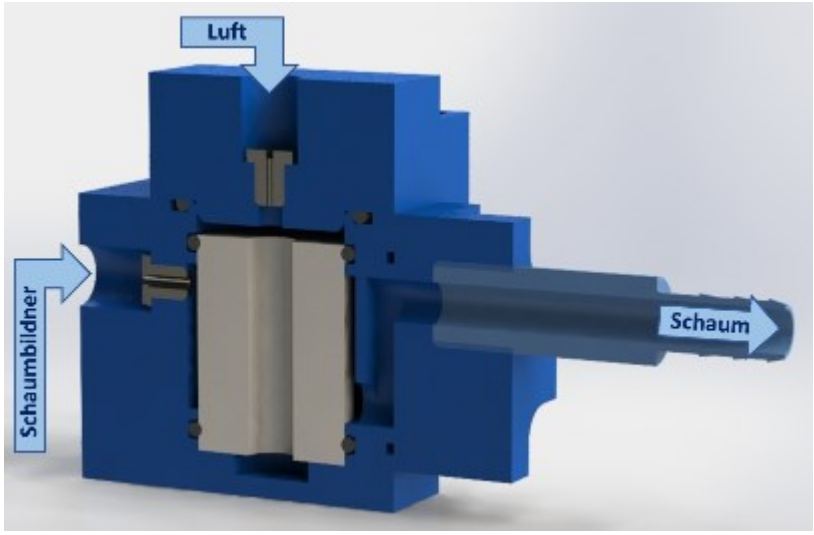



*Abbildung 30: An der TU Dresden im Projektrahmen entwickelte und ausgeführte Belüftungsstrecke*

Die Membran wird von außen mit Flüssigkeit umspült und von innen dringt die Druckluft in sie ein. Membranen mit Porengrößen zwischen 5 und 50 µm können eingesetzt werden. Durch den höher gelegenen Schaumaustritt soll möglichst die gesamte Luft mit der Flüssigkeit durchgemischt werden. An den Anschlussstellen für Flüssigkeit und Luft können Reduzierdüsen eingeschraubt werden, um Durchflussmenge und Druck zu regulieren. Zunächst wurden zwei Reduzierdüsen mit den Durchmessern 3,0 mm und 1,5 mm gefertigt. An der Anschlussstelle am Schaumaustritt wurde ein Edelstahlgitter zur Vergleichmäßigung des Schaumes bzw. zur Erhöhung des Gegendrucks eingelegt und über die Anschlussstücke verklemmt (getestete Gittermaschenweiten ca. 0,3 mm und 1,0 mm). Der Einsatz eines Schwebekörper-Durchflussmessers mit Feinregulierventil am eingangsseitigen Druckluftanschluss in Kombination mit dem vorgelagerten Druckregler erlaubt eine sehr präzise Regulierung des Luftstromes innerhalb

der Begasungsstrecke. Damit wurde bei gegebenem Flüssigkeitsdurchsatz eine gute Kontrolle über das Flüssigkeits/Luft-Verhältnis im Schaum erzielt. Das Problem der unkontrollierten „Nebenluft“ am Schaumaustritt konnte so vollständig beseitigt werden.

Die Möglichkeit der Ansteuerung der Luftmenge ist ein zusätzlicher Steuerungsparameter, der die Qualität des Schaumes beeinflusst. Somit war es nach der Modifizierung des Schaumgenerators notwendig, die optimalen Einstellungen für die Schaumherstellung neu zu definieren. Basierend auf den Ergebnissen zur Schaumqualität vor der Modifizierung des Schaumgenerators wurde ein Versuchsprogramm aus vier Schritten konzipiert (Tabelle 22).

Gemäß diesen Ergebnissen wurde für die weiteren Untersuchungen die optimale Einstellung des Schaumgenerators festgelegt:

- Luftmenge 800 L/h,
- Druck 1,0 bar,
- Durchflussrate 20 %.

*Tabelle 22: Einstellungen am Schaumgenerator*

| Schritt | Einstellungen | | Ergebnis |
|---|---|---|---|
| 1 | Luftmenge<br>Druck<br>Durchflussregler | 1000 L/h<br>1,0 bar<br>10 % | Keine Schaumproduktion, geringe Menge wird „geschossen“, nicht konstant |
| 2 | Luftmenge<br>Druck<br>Durchflussregler | 1000 L/h<br>1,0 bar<br>20 % | Schaum wird produziert, Stabilität fraglich, Oberfläche feucht, nicht formstabil |
| 3 | Luftmenge<br>Druck<br>Durchflussregler | 1500 L/h<br>2,0 bar<br>20 % | Schaum wird „geschossen“, stabile Form, „feste“ Konsistenz, hoher Porengehalt |
| 4 | Luftmenge<br>Druck<br>Durchflussregler | 800 L/h<br>1,0 bar<br>20 % | Konstante flussartige Produktion, schnell aufgehender bzw. Stabilität einbüßender Schaum |

Abbildung 31 zeigt die Ergebnisse zur Schaumstabilität mit den ermittelten Einstellungen des Schaumgenerators. Um die Ergebnisse zur Volumenstabilität des Schaumes bei Verwendung unterschiedlicher Messbecher vergleichen zu können, werden sie in Form des relativen Höhenverlusts dargestellt. Die Dichte des vorgefertigten Schaumes betrug ca. 65 kg/m$^3$ vor und ca. 18 kg/m$^3$ nach dem Umbau des Schaumgenerators. Schaum mit höherer Dichte beinhaltet mehr Wasser und damit neigt er mehr zu Drainage. Es ist ersichtlich, dass die modifizierte Belüf-

tungsstrecke zu erheblich stabilerem Schaum führte. So konnte die Drainage in der Gegenüberstellung zu einem Schaum, der mit vergleichbaren Einstellungen hergestellt wurde, auf rund ein Zehntel, d. h. ca. 70 g/L reduziert werden.

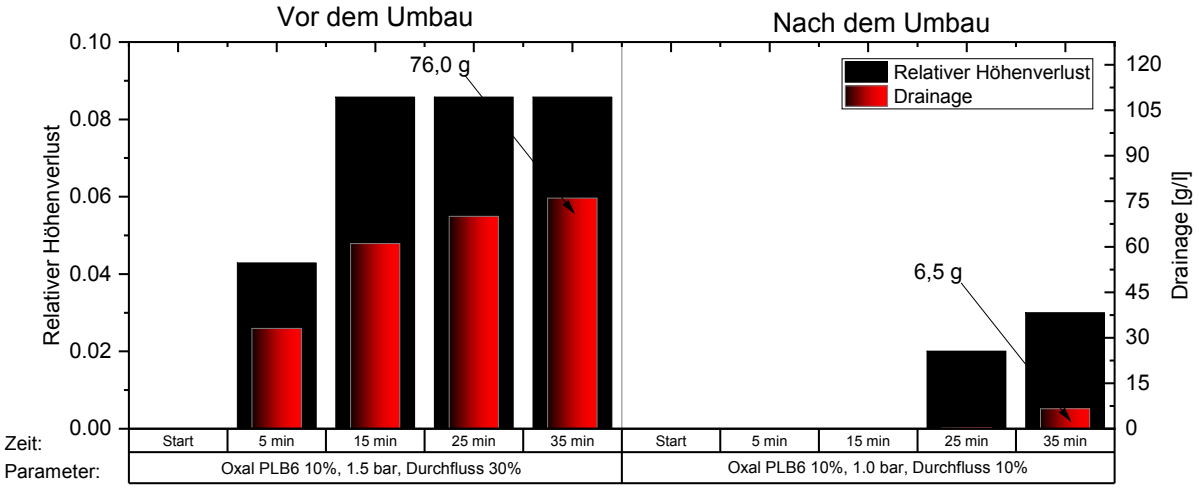



*Abbildung 31: Qualität des Schaumes vor und nach der Modifizierung des Schaumgenerators*

### 4.1.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zur Schaumherstellung

Die Untersuchungen zur Stabilität des vorgeformten Schaumes ließen klare Vorteile des proteinbasierten Schaumes in Form des Widerstands gegen Zerfall beim Untermischen in die zementbasierte Matrix erwarten. Voruntersuchungen zeigten, dass eine Erhöhung der Konzentration des Schaummittels zur Steigerung der Schaumstabilität führt. Abbildung 32 vergleicht die Stabilität der Schäume mit 30 % und mit 10 % des Schaumkonzentrats. Beide Schäume wurden unter gleichen Bedingungen hergestellt. Bis 45 min verhielten sich die beiden Schäume recht ähnlich und wiesen eine nur geringe Drainage und hohe Volumenstabilität auf. Erhöhung der Menge des Schaumkonzentrats ermöglichte eine Reduzierung der Drainage um ca. 1 g/L. Demgegenüber sind steigende Materialkosten zu betrachten, denn der Verbrauch an Schaumkonzentrat erhöhte sich um 20 %. Letztlich wurde die geringfügige Erhöhung der Schaumstabilität als nicht wesentlich angesehen. Die Menge des drainierten Wassers wird im Mischungsentwurf für den Schaumbeton berücksichtigt. Ähnlich einem Feuchtigkeitsgehalt einer Gesteinskörnung wird diese Wassermenge beim w/z-Wert angerechnet. Dieses Verfahren wäre bei sowohl der 10 %igen als auch 30 %igen Schaumkonzentratdosierung erforderlich.

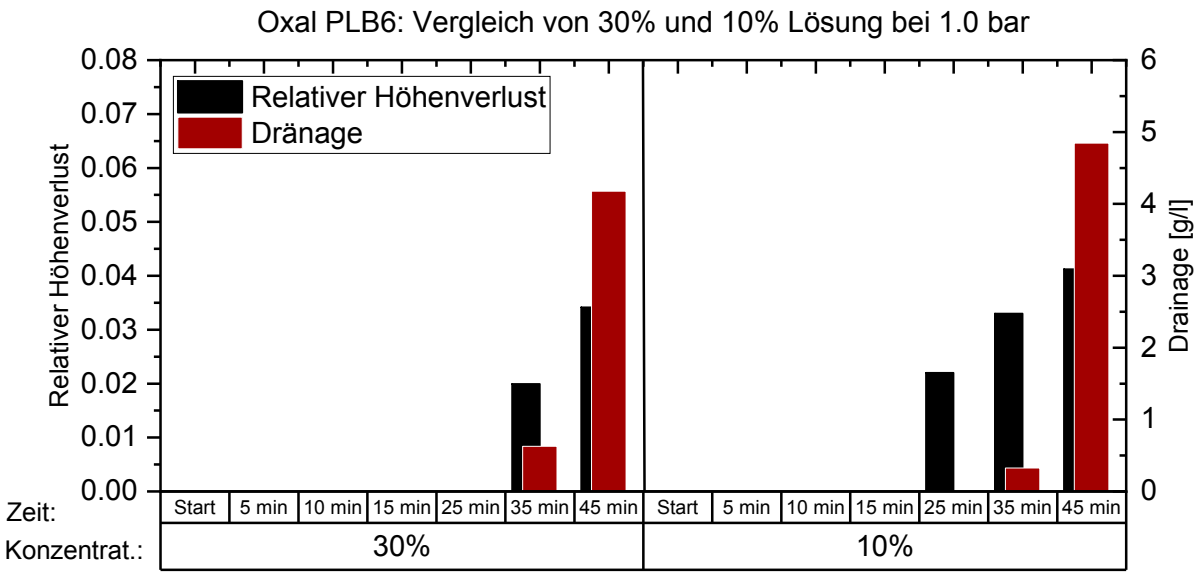



*Abbildung 32: Gegenüberstellung der proteinbasierten Schäume mit 30 %iger Schaumkonzentratlösung und 10 %iger Lösung, Druckluftdruck von 1,0 bar*

## 4.2 Prozessgestaltung zur Herstellung von Schaumbeton

Der Betondruck als kontinuierliches, schalungsfreies Bauverfahren stellt hohe Anforderungen an den Baustoff Schaumbeton. Um einen stabilen Druckprozess bewerkstelligen zu können, ist es notwendig, dass sich die Frischbetoneigenschaften innerhalb enger Toleranzgrenzen befinden und der Baustoff kontinuierlich in der erforderlichen Menge zur Verfügung steht. Für die Herstellung des Schaumbetons bedeutet dies, dass entweder während des Druckprozesses die geforderte Menge an Schaumbeton kontinuierlich produziert und bereitgestellt wird oder ausreichend große Materialpuffer geschaffen werden, um die Zeitspanne eines diskontinuierlichen Produktionsprozesses überbrücken zu können.

Die Herstellung des Schaumbetons kann grundsätzlich, wie in Abschnitt 3.1.1, Abbildung 16, und Abschnitt 3.2 beschrieben, über das Einmischverfahren oder das Mischverfahren erfolgen. Bei den beiden Verfahren wird zunächst eine homogene Matrix hergestellt. An der TU Dresden wurde dafür der Konusmischer KKM 30 der Fa. Kniele GmbH genutzt (s. Abschnitt 6.2.3). Die Weiterverarbeitung dieses Bindemittelleims zum Schaumbeton kann anschließend auf verschiedene Weise erfolgen:

a) Diskontinuierliches, chargenweises Vermischen von Schaum und Zementleim in einer Mischstufe (Einmischverfahren);
b) Kontinuierliches Vermischen von Schaum und Zementleim in nachgelagerter Mischstufe (Einmischverfahren);
c) Kontinuierliches, direktes Aufschäumen des Zementleims durch Lufteintrag (Mischverfahren).

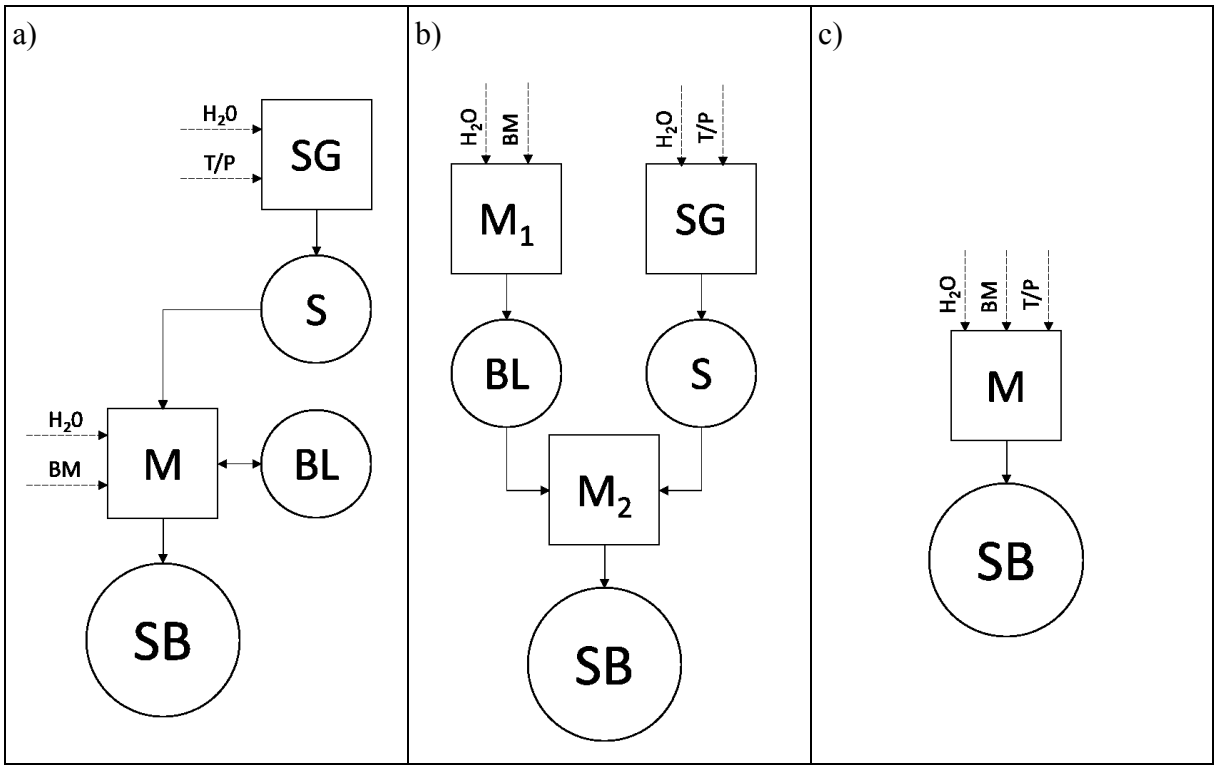



*Abbildung 33: Methoden der Schaumbetonherstellung mit den Komponenten Schaumgenerator (SG), Mischer (M), Schaum (S), Bindemittelleim (BL), Schaumbeton (SB), Wasser ($H_2O$), Bindemittel (BM) und tensid- oder proteinbasierter Schaumbildner (T/P)*

Abbildung 33 stellt die verschiedenen Methoden grafisch gegenüber. Für die Versuche im vorliegenden Projekt wurde der Schaumbeton entsprechend der Methoden a) und c) hergestellt. Bei Methode a), einem Einmischverfahren, werden Schaum und Zementleim separat voneinander hergestellt. Anschließend wird der Schaum dem bereits im Mischer befindlichen Zementleim beigemischt. Der Vorteil dieser diskontinuierlichen Herstellungsmethode ist die gute Kontroll- und Überwachungsmöglichkeit für einzelne Schaumbetonchargen. Nachteilig ist, dass entsprechende Materialpuffer vorzusehen sind und Herstellungs- und Förderprozess eng aufeinander abgestimmt werden müssen, um den Drucker unterbrechungsfrei mit Schaumbeton versorgen zu können.

Die Herstellungsmethode b) umgeht diesen Nachteil, indem die Matrix zwar chargenweise hergestellt wird, der separat erzeugte Schaum aber in einem nachgelagerten Mischer kontinuierlich hinzugefügt wird. Dies beschleunigt den Herstellungsprozess und macht den Einsatz größerer Materialpuffer überflüssig, sofern Produktions- und Druckprozess gut aufeinander abgestimmt sind. An der TU Dresden wurde diese Herstellungsmethode nicht weiter verfolgt, da der Einsatz eines zusätzlichen Mischorgans $M_2$ im Rahmen des Projektes als zu aufwändig eingestuft wurde. Es sind aber verschiedene Systeme am Markt erhältlich, die nach diesem Prinzip arbeiten (Uelzener 2011, Gertec 2016, Gertec 2017). Als Abwandlung dieser Methode werden auch Systeme mit kontinuierlicher Zementleimproduktion eingesetzt (Aercrete 2009).

Bei der Herstellungsmethode c), dem Mischverfahren, wird der Schaumbildner direkt in den zuvor hergestellten Zementleim gegeben. Anschließend wird durch die Mischwerkzeuge des

Mischers Luft eingebracht und damit der Zementleim aufgeschäumt. Durch den Verzicht auf zwei zusätzliche Prozessschritte ist diese Methode sehr effizient. Allerdings ist zur Einstellung der Prozessparameter (Mischregime) viel Erfahrung erforderlich und es besteht während der Herstellung nahezu keine Kontrollmöglichkeit über die tatsächlich eingetragene Luftmenge und die daraus resultierende Schaumdichte. Die Einhaltung der beim Betondruck geforderten engen Toleranzgrenzen stellt sich entsprechend schwierig dar. Aufgrund des hohen Potenzials dieser Methode arbeitet die TU Dresden an der Optimierung des Herstellungsverfahrens. In diesem Zuge wurde Kontakt zur Fa. beba Technology GmbH & Co. KG (kurz beba) aufgenommen. Beba produziert unter anderem Schaummischer für die Herstellung von Kunststoff- und Mineralschäumen. Das Prinzip der beba-Schaummischer entspricht im Grunde dem der Herstellungsmethode c), jedoch wird die Matrix separat hergestellt, mit Schaumbildner versetzt und die Luft in einem nachgelagerten Mischprozess eingetragen. Das Belüftungssystem von beba ist patentiert (EP1716915B1) und basiert auf einem dynamischen Oszillationsverfahren, wobei die Schaumbildung in einem schwingenden, mit Mischelementen versehenen Mixkopf erfolgt (Abbildung 34).

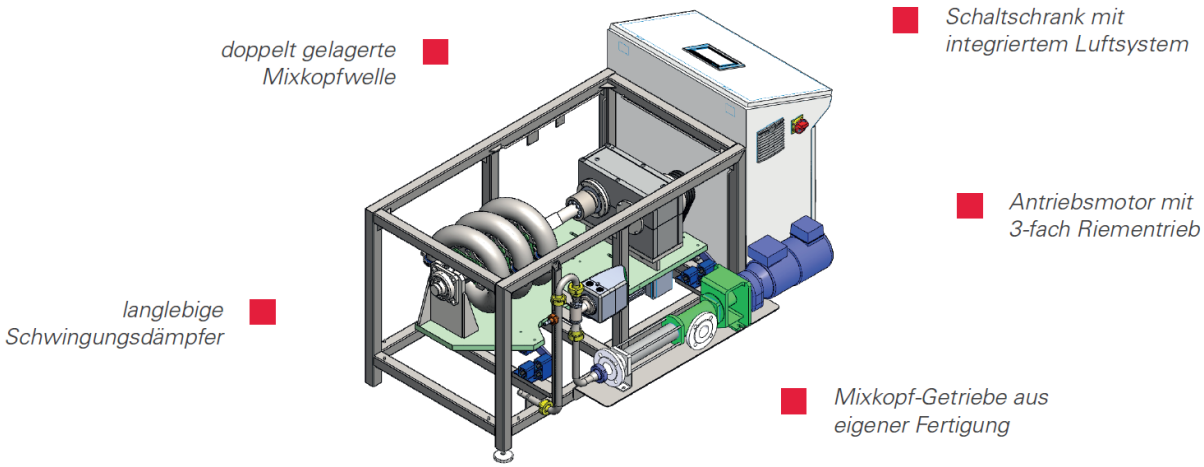



*Abbildung 34: Schaummischer BM der Fa. beba Technology GmbH & Co. KG (beba 2017)*

Die Schaummischer von beba bieten aufgrund des geschlossenen Systems eine ausgezeichnete Kontrolle über Lufteintrag und Schaumdichte. Die Schaumeigenschaften können weiterhin über die Geometrie und Anzahl der eingesetzten Mischelemente beeinflusst werden. Weitere Vorteile der beba-Schaummischer sind die elektronische Regelung und das integrierte Reinigungssystem. Nachteilig ist, dass die Maschinen vom Werk aus eher für dünnflüssige Materialien ausgelegt sind, die Matrix des druckbaren Schaumbetons ist allerdings eher plastisch. Für die ersten Versuche am Standort Essen/Oldenburg wurde daher eine flüssigere Matrixrezeptur verwendet. Diese Laborversuche bestätigten die prinzipielle Möglichkeit mit beba-Mischern Schaumbeton zu produzieren. Es konnte Schaumbeton mit einer Dichte von 820 kg/m$^3$ hergestellt werden. Aufgrund der abgewandelten Matrixrezeptur war dieser Schaum jedoch zu dünnflüssig und für den 3D-Druck unbrauchbar. Anschließende Versuche unter Verwendung der regulären Matrix konnten aufgrund des zu hohen Änderungsaufwandes an der

vorhandenen Versuchsmaschine nicht durchgeführt werden. Inwiefern diese Versuche erneut aufgriffen werden, ist zu Projektende nicht abschließend geklärt.

## 4.3 Fördern von Schaumbeton

Der Transport des Schaumbetons erfolgt bei am Markt verfügbaren Maschinen in der Regel über Exzenterschneckenpumpen. Die Hersteller der Anlagen geben teilweise mögliche Förderweiten über 100 m an (Aercrete 2009, Richway 2015). Bei der Herstellung nach den Methoden b) und c) sind Schaummisch- und Förderprozess oftmals in einem Teilsystem integriert.

Um zu ermitteln, inwiefern sich das Fördern des Schaumbetons über weitere Strecken auf seinen Luftanteil bzw. Rohdichte auswirkt, wurden im Projektverlauf Förderversuche durchgeführt. Dazu wurde eine vorhandene Exzenterschneckenpumpe von Typ „DURAPACT 406 S“ mit folgenden technischen Daten verwendet:

- Variable Fördermenge bis 15 L/min,
- Motorleistung bis 2,2 kW,
- Behältervolumen 70 L,
- Förderschlauch DN 25, Länge 20 m.

Für die Förderversuche wurde Schaumbeton mit einer Dichte von ca. 1200 kg/m$^3$ verwendet. Dieser wurde mit halber Pumpenleistung (ca. 8 L/min) über eine 20 m lange Förderstrecke gepumpt und Proben vor und nach der Pumpe sowie am Ende des Förderschlauches bei unterschiedlichen Förderhöhen (0/2,5/5,5 m) untersucht (Abbildung 35).

a) b)

*Abbildung 35: a) Pumpe „DURAPACT 406 S“, b) Förderversuch 5,5 m Förderhöhe*

Die Versuche zeigten eine Änderung der Schaumdichte, wobei die größte Änderung nicht in der Pumpe, sondern hauptsächlich im Förderschlauch erfolgte. Die Variation der Förderhöhe wirkte sich weder auf den Förderdruck noch auf die Schaumdichte signifikant aus.

Nach Auswertung der Ergebnisse ist eine durch den Förderprozess verursachte Änderung der Schaumdichte prinzipiell erkennbar, jedoch zeigen die Messungen starke Schwankungen, sodass für repräsentative Aussagen die Versuche wiederholt werden müssten. Begründet ist dies dadurch, dass die für die Versuche benötigen Materialmengen die Produktionskapazitäten im Labor überschritten und damit für die Auswertung mehrere Chargen Schaumbeton miteinander verglichen werden mussten. Diese Chargen unterschieden sich geringfügig in ihren Ausgangseigenschaften, was sich auch auf das Förderverhalten auswirkte. Um verlässliche Ergebnisse zu erhalten ist eine Wiederholung der Förderversuche geplant. Dies war im Zeitrahmen des Projektes allerdings nicht mehr möglich.

# 5 Druckkopf für 3D-Druck mit Schaumbeton

Der Versuchsstand der CONPrint3D®-Technologie an der TU Dresden war und ist sowohl für den Druck normalschwerer, druckbarer Betone mit Gesteinskörnung bis 10 mm als auch für den 3D-Druck mit Schaumbeton konzipiert. Vorteilhaft ist dabei der ausgesprochen modulare Aufbau des Druckkopfes (Abbildung 36). Durch geringe Modifikationen kann z. B. zwischen zwei verschiedenen Fördermechanismen gewechselt werden und auch die Formungseinheit am Betonaustritt lässt sich beliebig variieren. Dadurch können die einzelnen Parameter des Druckkopfes optimal auf die Anforderungen der verwendeten Schaumbetonrezeptur abgestimmt werden. Als Manipulator für den Druckkopf dient im Labor ein 3-Achs-Portalsystem mit einem Bewegungsraum von ca. 2,0 x 1,0 x 1,5 $m^3$. Das CONPrint3D®-Verfahren sieht vor, die Förder- und Dosiertechnik für den Beton direkt am Druckkopf anzuordnen. Dadurch kann eine bessere Kontrolle über den Betonfluss erzielt werden. Außerdem lassen sich auf diese Weise die Frischbetoneigenschaften kurz vor der Materialablage besser prüfen und nach Bedarf beeinflussen. Der Druckkopf ist für den Druck monolithischer Wandprofile ausgelegt. Er ist in der Lage, Betonschichten mit einem Querschnitt von 150 x 50 $mm^2$ bei Druckgeschwindigkeiten von bis zu 10 m/min auszutragen.

*Abbildung 36: Zum 3D-Druck von Schaumbeton verwendeter Druckkopf*

Abgestimmt auf das jeweilige Druckobjekt kann der Druckkopf mit unterschiedlichen Formungssystemen ausgestattet werden (Abbildung 37):

- Einfache Austrittsdüsen mit festem Querschnitt für die Herstellung von Probekörpern oder den Test verschiedener Prozessparameter,
- Komplexe Formungssysteme mit mehreren Aktoren, z. B. für den Druck komplexer Bauwerksformen mit unterschiedlichen Wanddicken und Filamenthöhen.

Durch die Integration verschiedener Messstellen für Druck und Materialtemperatur liefert der Druckkopf vor allem während der Testphase im Labor wichtige Daten für das Verständnis und die Kontrolle des Druckprozesses.

a) b)

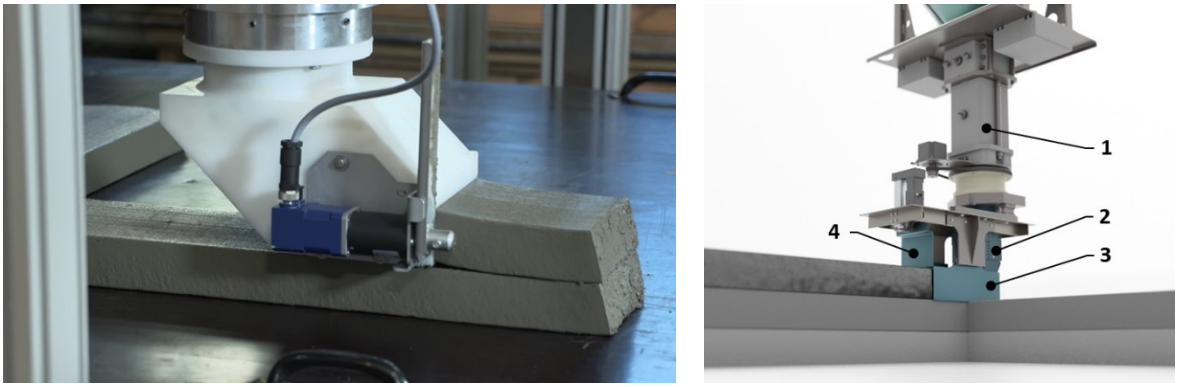



*Abbildung 37: Formungssysteme des Druckkopfes: a) verschließbare Austrittsdüse für einfache Probekörper; b) vereinfachte Darstellung des komplexen Formungssystems mit Extrusionseinheit (1), Düse (2), Formungsblechen (3) und Verschluss (4)*

# 6 Stoffliche Entwicklung druckbarer Schaumbetone

Basierend auf der Literaturrecherche zur Schaumbetonherstellung sah das erarbeitete Konzept zuerst die Entwicklung des Feinmörtels vor und anschließend die Steuerung des Erstarrens.

## 6.1 Stoffliche Entwicklung der Feinmörtel

### 6.1.1 Verwendete Materialien

Zementbasierter Feinmörtel bzw. die zementbasierte Matrix ist der Grundbestandteil des Schaumbetons. Da Gesteinskörnungen nicht eingesetzt werden können, ist die Zusammensetzung des Feinmörtels für die mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Schaumbetons neben der Qualität des Schaumes ausschlaggebend. Vom Projektpartner Opterra wurde ein Portlandkompositzement CEM II/A-M (S-LL) mit der Festigkeitsklasse 52,5 R in die Studie eingebracht, der EN 197-1 (EN 197) entsprach. Die Zementdichte betrug 3140 kg/m$^3$.

Zur Schaumbetonherstellung können große Mengen Sekundärrohstoffe verarbeitet werden, was Schaumbeton als nachhaltigen Baustoff qualifiziert. Für die Entwicklung der Grundrezeptur wurde Flugasche Steament H-4 (STEAG Power Minerals GmbH, Dinslaken, Deutschland) verwendet, ein Nebenprodukt bei der Verbrennung von Steinkohle zur Strom- und Wärmeerzeugung im Kraftwerk Herne (Steag 2017). Die Dichte dieser Flugasche betrug 2220 kg/m$^3$.

Als weitere puzzolanische Zusatzstoffe neben der Flugasche wurden ein Silikastaub (Grade 971U, Elkem ASA Silicon Materials, Skøyen, Norwegen) (Elkem 2018) und ein synthetisches Alumosilikat (Centrilit NC II des Projektpartners MC-Bauchemie) verwendet. Im Vergleich zu Zement besitzen sowohl der Silikastaub als auch das Alumosilikat eine vielfach kleinere Partikelgröße. Da diese Feinststoffe stark zur Agglomeration neigen, ist intensives Mischen erforderlich. Nur deagglomerierte Silikastaub- bzw. Centrilitpartikel, idealerweise die Primärpartikel, können die Zwickelräume zwischen den Zementkörnern auffüllen und so die Packungsdichte der Matrix wesentlich erhöhen. Dies erhöht die Festigkeit des Schaumbetons erheblich. Des Weiteren soll das Alumosilikat den Widerstand gegen schädliche Medien und damit auch die Dauerhaftigkeit des Schaumbetons erhöhen.

Der w/z-Wert ist auch im Schaumbeton ein entscheidender Parameter für die Festigkeit und Dauerhaftigkeit. Er beeinflusst außerdem die Aufschäumung bzw. das Einmischen des Schaumes. Um die Verarbeitbarkeit der Mischung bei verringertem Wassergehalt zu erhöhen wurden die PCE-basierten Fließmittel MasterGlenium SKY 593 (BASF Construction Solutions GmbH, Trostberg, Deutschland) und MC-PowerFlow 5100 (MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG, Bottrop, Deutschland) verwendet. Der Wassergehalt in diesen Produkten ist jeweils 77 %, der bei der Berechnung des w/z-Werts des Schaumbetons berücksichtigt wird. Die Dichte der Fließmittellösung MasterGlenium SKY 593 beträgt 1050 kg/m$^3$ und die des MC-PowerFlow 5100 1040 kg/m$^3$.

Die Festbestandteile der drei ausgeführten Matrices zeigt Tabelle 23.

*Tabelle 23: Festbestandteile der zementbasierten Matrix, Angaben in Volumenprozent*

| Bezeichnung | Zement | Flugasche | Silikastaub | Centrilit NC II |
|---|---|---|---|---|
| A-1 | 60 % | 40 % | - | - |
| A-2 | 55 % | 40 % | 5 % | - |
| A-3 | 55 % | 40 % | - | 5 % |

### 6.1.2 Bestimmung des Wasserbedarfs der Matrix

Die Anforderungen an die Konsistenz druckbarer Betone stellen hohe Ansprüche an eine präzise Bestimmung des Wasserbedarfs. Der minimal notwendige Wasserbedarf wurde anhand der von OKAMURA und OZAWA beschriebenen Methode ermittelt (Ozawa 1992, Okamura 1995). Der Wasserbedarf $\beta_p$ des vordefinierten Partikelgemisches gemäß Tabelle 23 wurde durch lineare Extrapolation des relativen Setzfließmaßes $\Gamma_p$ (Formel 3) aus den Messungen für verschiedene volumetrische Wasser/Pulver-Verhältnisse erhalten. $D_1$ und $D_2$ bezeichnen die Abmessungen des Setzfließmaßes (Abbildung 38). Wenn das relative Setzfließmaß $\Gamma_p$ gleich null ist, wird angenommen, dass die Wassermenge im Leim gerade ausreicht, um die Oberflächen aller Partikel zu benetzen und alle Hohlräume im System zu füllen (Sättigungspunkt).

*Formel 3: Relatives Ausbreitmaß Γp*

$$\Gamma_p = \left[\frac{(D_1 + D_2)/2}{D_0}\right]^2 - 1, \qquad (1)$$

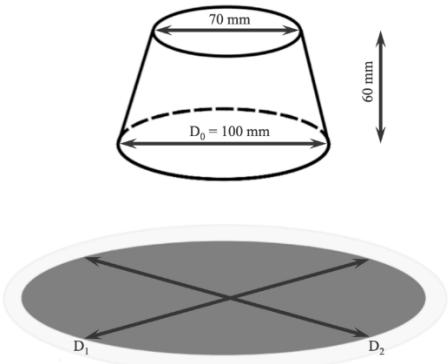
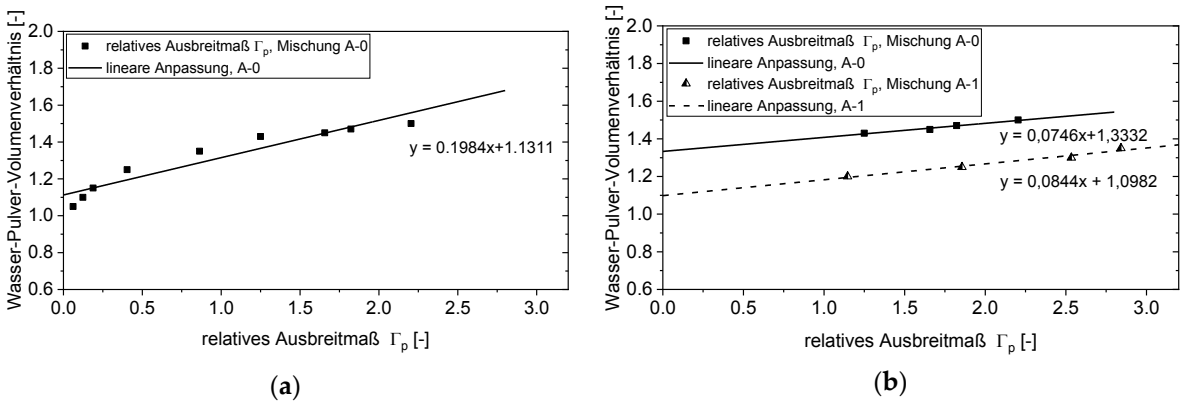



*Abbildung 38: Testmethode für die Bestimmung des relativen Setzfließmaßes*

Abbildung 39a zeigt alle Ergebnisse von $\Gamma_p$ für A-0, ein-schließlich derjenigen, die < 1 sind. In diesem Fall wäre der Wasserbedarf $\beta_p$ 1,13, was zu einem sehr niedrigen w/z-Wert und einem nicht ausreichenden Wassergehalt in der Mischung führen würde. Basierend auf Literaturempfehlungen sollen nur Werte $\Gamma_p > 1$ betrachtet werden (Okamura 2003, Brameshuber 2004). Der Wasserbedarf $\beta_p$ beträgt folglich 1,33 für A-0 bzw. 1,10 für A-1 (Abbildung 39b).




(**a**) (**b**)

*Abbildung 39: Ergebnisse der relativen Ausbreitmaßes: (a) Ergebnisse für A-0, (b) Ergebnisse für Γp > 1 für A-0 und A-1*

Um den Wasserbedarf eines Mehlkorns auf den Wasserbedarf eines Betons zu übertragen, wird $\beta_P$-Wert mit einem in der Praxis experimentell bestimmten Faktor multipliziert. So wird üblicherweise der $\beta_P$-Wert um 10 bis 20 % reduziert, um den Einfluss von Fließmitteln und zusätzlicher mineralischer Inhaltsstoffe im Beton zu berücksichtigen. In der vorliegenden Studie wurde ein derartiger Reduktionsfaktor individuell bestimmt, um die Besonderheiten des Schaumes zu berücksichtigen. Unter Einbeziehung der Instabilität des Schaumes, die im Lauf der Zeit ca. 30 g Wasser pro Liter Schaum freisetzt (vgl. Kapitel 4.1.2) und der Beobachtung, dass ein bestimmtes Schaumvolumen während des Einmischens in den mineralischen Leim zusammenbrach, wurde der experimentell bestimmte $\beta_P$-Wert um 25 % reduziert.

## 6.2 Entwicklung und Herstellung druckbarer Schaumbetone

### 6.2.1 Methoden zur Mischungsberechnung vom Schaumbeton

In Deutschland existieren zurzeit keine genormten Berechnungsmethoden für die Bestimmung der Mischungszusammensetzung vom Schaumbeton. Oft wird ein Versuchs- und Fehlerverfahren angewendet, um Wassergehalt, Schaumvolumen und Bindemittelgehalt zu bestimmen. In der Literatur findet man folgende Methoden zur Berechnung der Schaumbetonrezeptur:

1. Der Leitfaden des American Concrete Institute für Porenbeton empfiehlt die Bestimmung des Zementgehalts und der Wassermenge in Abhängigkeit der gewünschten Dichte und der geforderten Druckfestigkeit (ACI 523).
2. Der Leitfaden ASTM C796/C796M beschreibt eine Methode zur Berechnung des erforderlichen Schaumvolumens, das der Bindemittelmatrix hinzugeführt werden muss, um Schaumbeton mit der gewünschten Dichte zu erhalten. Eine Reihe von Gleichungen ist zur Bestimmung des Zementgehalts und des Schaumvolumens pro Kubikmeter Schaumbeton in Abhängigkeit der Zieldichte formuliert (ASTM C796).
3. Die von KEARSLEY und MOSTERT vorgeschlagene Methode beschreibt die Bestimmung des Wasserbedarfs und beinhaltet Leitlinien zur Berechnung des Zementgehalts und des Schaumvolumens (Kearsley 2015).

4. Die University of Dundee entwickelte eine weitere Methode zur Mischungsrezepturentwicklung von Schaumbeton. Hierbei wird das Wasser/Zement-Verhältnis vorbestimmt und der Gehalt von Feinaggregaten ermittelt, indem die Summe aus Feststoffen und Wassergehalt der Zielgröße gleichgesetzt werden (Mohammad 2011).

Im Allgemeinen ermöglichen diese Methoden die Ermittlung der Stoffmengen für die Herstellung des Schaumbetons mit einer bestimmten Dichte. Allerdings erfordern die besonderen Anforderungen an den 3D-druckbaren Schaumbetons neue Methoden zur Bestimmung der Mischungszusammensetzung.

### 6.2.2 Entwicklungskonzept für die Mischungsrezeptur druckbarer Schaumbetone

Das im Projekt entwickelte Schema zur Entwicklung der Mischungsrezeptur für druckbare Schaumbetone zeigt Abbildung 40. Dieser Ansatz sieht die Herstellung im *Einmischverfahren* vor. Er kann jedoch auch für das *Mischverfahren* angewendet werden, wobei die Schaumcharakterisierung gemäß Schritt 2 dann entfällt. Das Ziel dieses Ansatzes besteht darin, einen druckbaren Schaumbeton zu erhalten, der stabil ist und ausreichende rheologische und mechanische Eigenschaften besitzt, die für den 3D-Druck geeignet sind. Das Entwurfsverfahren gliedert sich in vier Teile: Festlegen der Matrixzusammensetzung, Assimilieren der Bestandteile und Optimierung der Matrixzusammensetzung und des Schaumes, Optimierung der rheologischen Eigenschaften und Bewertung der erreichten mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Schaumbetons im Festzustand. Das Konzept sieht eine iterative Optimierung der Mischungszusammensetzung vor, die in eine zufriedenstellende Rezeptur eines druckbaren Schaumbetons mündet.

Zuerst müssen entsprechend der Anforderungen und Verfügbarkeiten die Ausgangsmaterialien festgelegt werden. Die Zieleigenschaften Dichte, Druckfestigkeit und Rheologie müssen dabei berücksichtigt werden. Basierend auf Literaturdaten können die Mengenverhältnisse und die Materialien für die Matrix sowie die gewünschten Eigenschaften des vorgeformten Schaumes identifiziert werden. Parallel dazu wird der Wasserbedarf der Matrix, einschließlich der Fließmitteldosierung, durch iterative Tests bestimmt. Ziel dieses Schrittes ist es, eine gut verarbeitbare Matrix mit einer für die Zementhydratation ausreichenden Wassermenge zu erhalten. Damit wird sichergestellt, dass der Zement dem Schaum kein Wasser entzieht, was zu einer raschen Degeneration des Schaumes führen kann. Die Bindemittelmatrix muss mit minimalen Wassermengen hergestellt werden, so dass Fließmittel verwendet werden soll. Die Kompatibilität des Fließmittels mit dem Schaumbildner und anderen Zusatzmitteln ist zu prüfen.

Die Matrix muss hinreichend fließfähig sein, um eine gute Einarbeitung des Schaumes in die Mischung zu gewährleisten. Eine übermäßig steife Matrix führt zu Schaumbruch, und es entsteht eine übermäßig flüssige Konsistenz des Schaumbetons. Deswegen werden im zweiten Schritt der Schaum und die zementbasierte Matrix aufeinander abgestimmt. Die Abschätzung der notwendigen Wassermenge erfolgt nach der in Kapitel 6.1.2 beschriebenen Methode. Als Ergebnis dieses zweiten Schritts liegen ein stabiler Schaum und eine Matrix vor, die eine Konsistenz entsprechend der Anforderungen an die Fließfähigkeit aufweist.

Der dritte Schritt konzentriert sich auf die Prüfung und Optimierung der rheologischen Eigenschaften des frischen Schaumbetons, die Anforderungen des 3D-Druckverfahrens hinsichtlich Pumpbarkeit, Extrudierbarkeit und Verarbeitbarkeit erfüllen müssen (Roussel 2018, Ogura 2018). Die Bindemittelzusammensetzung kann verändert werden, um die erforderlichen Eigenschaften zu erreichen. Weiterhin besteht die Möglichkeit, Zusatzmittel zur Steuerung der Viskosität und des Erstarrens zu verwenden.

Der letzte Schritt konzentriert sich auf die Bestimmung der Festbetoneigenschaften. Die Kennwerte Druck- und Biegezugfestigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Wasseraufnahme sind die zentralen Materialeigenschaften des Schaumbetons. In Abhängigkeit der ermittelten Materialeigenschaften kann z. B. die Zusammensetzung der Bindemittelmatrix zum Erzielen einer besseren Packungsdichte zwischen den feinkörnigen Partikeln geändert werden.

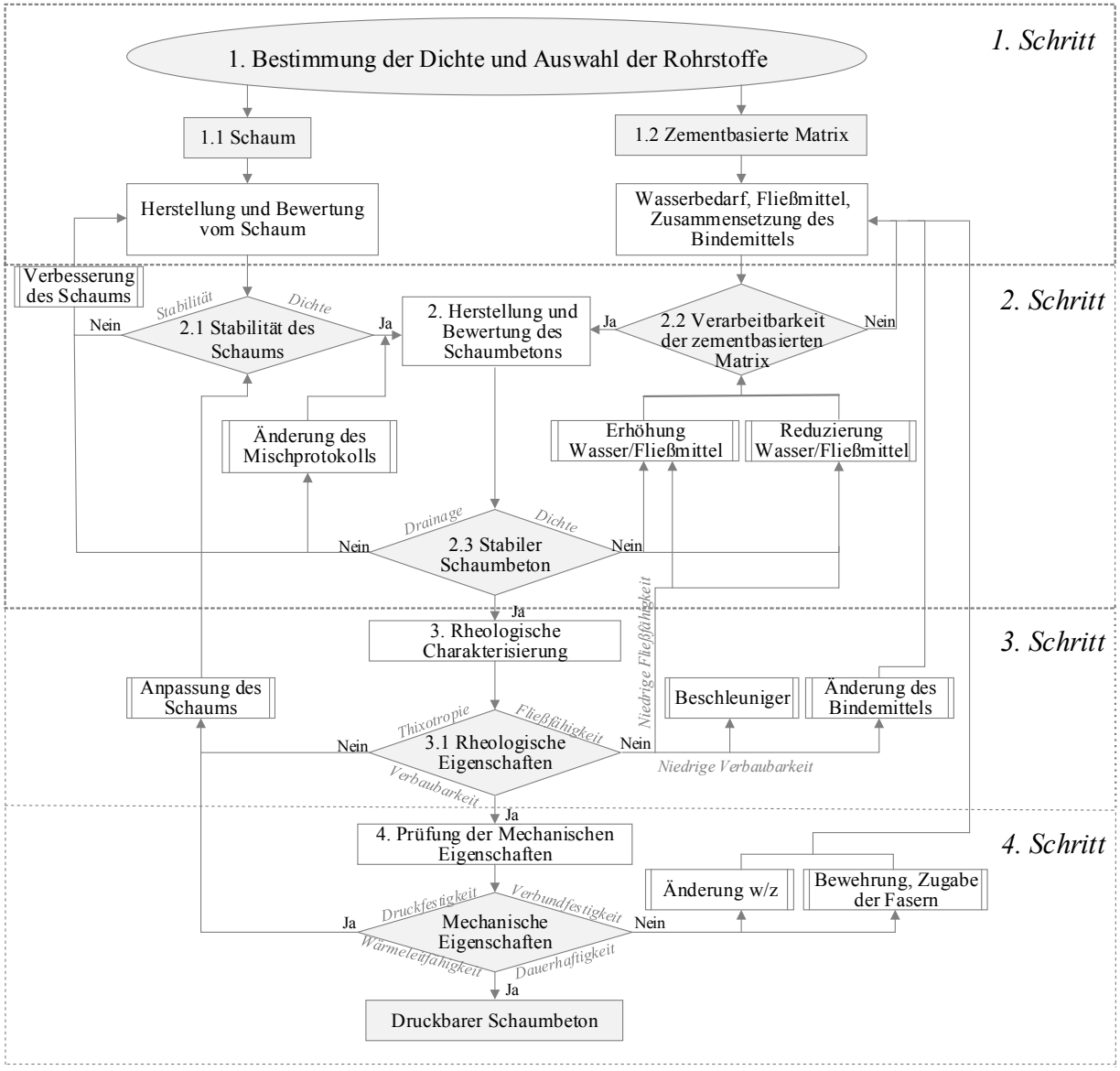



*Abbildung 40: Konzept der Mischungsrezepturentwicklung für druckbare Schaumbetone*

### 6.2.3 Optimierung des Mischprotokolls

Im konventionellen Schaumbeton wird die Konsistenz der Matrix möglichst fließfähig gehalten, z. B. Durchmesser des Setzfließmaßes > 170 mm (Bagheri 2018). Dies ermöglicht optimale Leistung des Schaumbildners und selbstverdichtende Eigenschaften beim Einbau. Neben den Ausgangsstoffen, einschließlich des vorgeformtem Schaumes, beeinflusst das Mischprotokoll die Konsistenz stark. Auch die Reihenfolge der Zufuhr der Ausgangsstoffe und die Mischgeschwindigkeit sind entscheidend für erfolgreiche Schaumbetonherstellung.

Die Formstabilität der gedruckten Schaumbetonschichten hängt im Wesentlichen von den rheologischen Eigenschaften des Schaumbetons ab. Die rheologischen Eigenschaften wiederum werden von den Ausgangsstoffen, den Zusatzmitteln und dem Mischprotokoll beeinflusst. Somit ist der Mischprozess für druckbare Schaumbetone besonders kritisch.

Die Entwicklung der Dichte wird durch die Mischintensivität und die Mischdauer beeinflusst. So steigt beim intensiven Mischen durch die Zugabe des Schaumbildners das Volumen des Schaumbetons deutlich an und die Dichte sinkt. Des Weiteren erfolgt beim *Einmischverfahren* das Mischen in zwei Schritten, nämlich Mischen der Matrix und Untermischen des vorbereiteten Schaumes. Beide Teilschritte benötigen unterschiedliche Mischprotokolle und müssen aufeinander abgestimmt sein. Bei der Optimierung des Mischprotokolls sind die technische Ausführung und Besonderheiten des jeweiligen Mischers zu berücksichtigen. Im vorliegenden Vorhaben wurde ein Konusmischer KKM30 des Projekpartners Kniele GmbH verwendet (Abbildung 41). Das Alleinstellungsmerkmal dieses Mischers ist die Anordnung des Rührwerks. Das Alleinstellungsmerkmal dieses Mischers ist die Anordnung des Rührwerks. Die inneren und äußeren Teile des Rührwerks lassen sich separat ansteuern, wobei sowohl Geschwindigkeit als auch Drehrichtung des inneren und äußeren Rührwerks unabhängig voneinander geregelt werden können. Tabelle 24 zeigt die Schaumbetonrezeptur der Versuche zur Optimierung des Mischprotokolls.

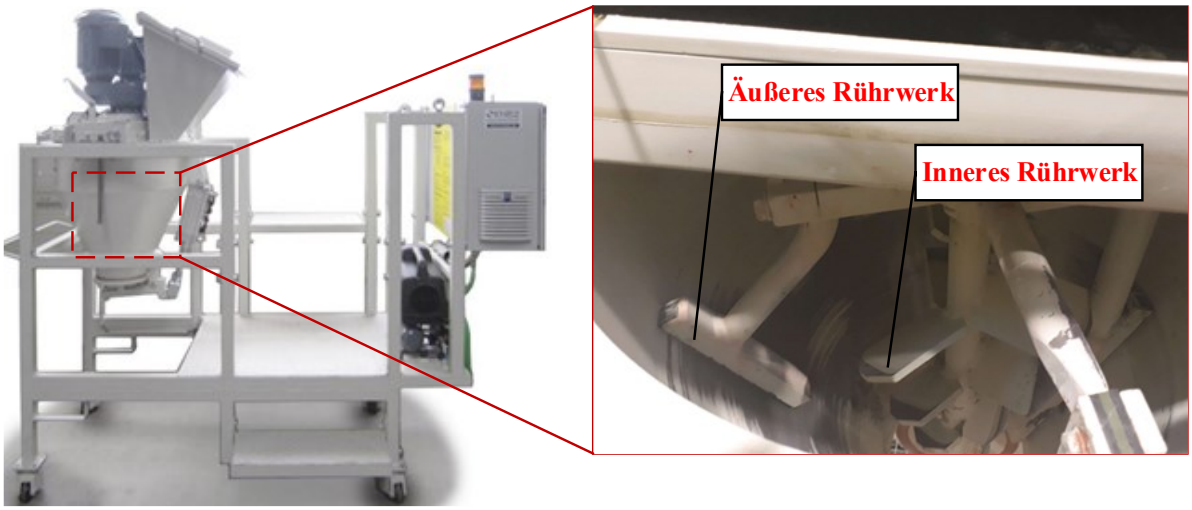



*Abbildung 41: Kniele KKM30 Gesamtansicht sowie Detailansicht des Mischwerks*

*Tabelle 24: Mischungsrezeptur für 20 L Schaumbetons zur Optimierung der Mischdauer und der Mischgeschwindigkeit*

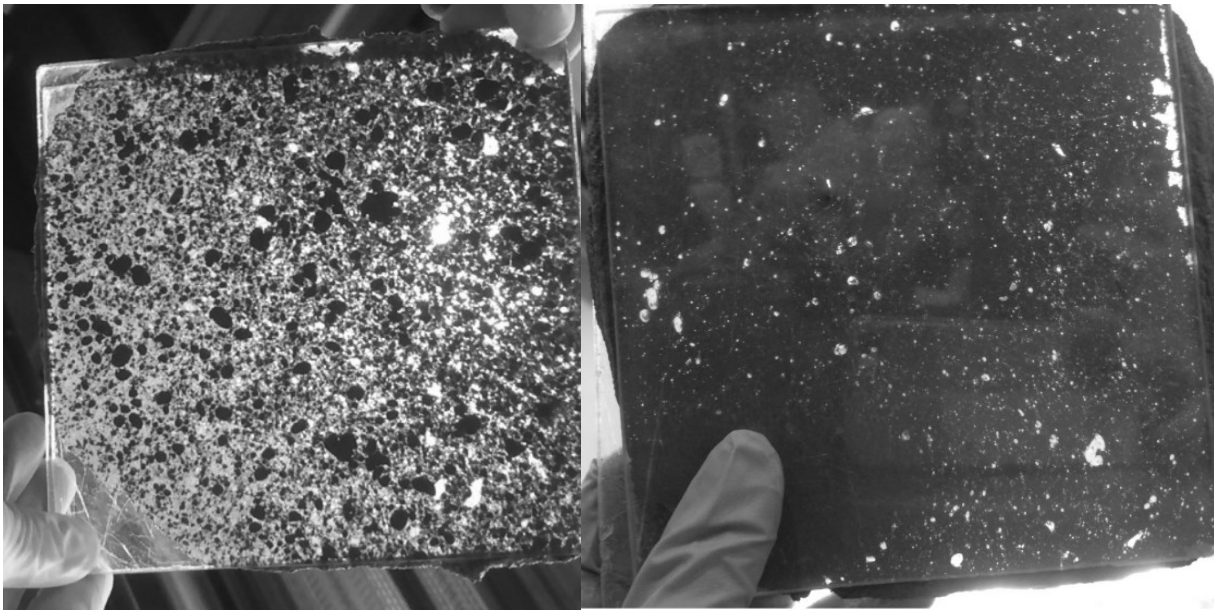
| Stoff | Bezeichnung | Einheit | Menge |
|---|---|---|---|
| Zement | CEM II/A-M(S-LL) 52,5 R | [kg] | 8,103 |
| Flugasche | H4 | [kg] | 3,844 |
| Wasser | - | [kg] | 3,726 |
| Fließmittel | SKY 593 | [kg] | 0,0299 |
| Schaum | SK 155 oder Oxal PLB6 | [L] | 11,92 |

Die Optimierung des Mischprotokolls erfolgte in drei Schritten:

1. Schritt: Bestimmung der Mischdauer unter Betrachtung der Parameter
    a. Einschaltverzögerung Außenmischer,
    b. Mischlauf in eine Richtung,
    c. Mischlauf gegenläufig;
2. Schritt: Bestimmung der Mischgeschwindigkeit des inneren und äußeren Rührwerks bzw. Einstellung der Leistung von Innen- und Außenmotor des Mischers;
3. Schritt: Basierend auf den Erkenntnissen der Teilschritte 1 und 2 wird das Mischprotokoll auf das Einmisch- und Mischverfahren separat eingepasst.

Die möglichen Variationen der Einstellungen des Mischers stellten ein breitgefächertes experimentelles Programm dar. In Anhang A.3, Tabelle 35, ist ein Überblick zu den durchgeführten Untersuchungen dargestellt. Eine Darstellung des Eingabemenüs für die Einstellung des Mischprotokolls ist Anhang A.3 ebenso zu entnehmen. Bei der Durchführung der Untersuchungen stellte sich heraus, dass das Mischprotokoll die Homogenität der Mischung stark beeinflussen kann. Abbildung 42 zeigt typische Beispiele je einer homogenen und einer inhomogenen Mischung, beeinflusst durch die Änderung des Mischprotokolls.

Zuerst wurden die vorinstallierten Einstellungen des Mischers untersucht (Tabelle 25). Nach der Mischdauer wurde die Mischgeschwindigkeit der beiden Motoren optimiert. In Anbetracht der spezifischen Form des Mischers und der erreichten Ergebnisse bei der mehrmaligen Herstellung der untersuchten Rezepturen wurde die R1-Regelung ausgewählt.



(a) (b)

*Abbildung 42: Einfluß des Mischprotokols auf die Homogenität des Schaumbetons: a) inhomogene Mischung mit Klumpen, b) homogene Mischung; frische Schaumbetonproben zwischen zwei Glasplatten eingebracht und sachte zusammengepresst*

*Tabelle 25: Einstellungen des Mischers – Mischdauer*

| **Parameter** | **Bezeichnung der Mischregelung** | | |
|---|---|---|---|
| | **R1** | **R2** | **R3** |
| Einschaltverzögerung Außenmischer in [s] | 3 | 5 | 5 |
| Mischlauf in eine Richtung in [s] | 5 | 15 | 20 |
| Mischlauf gegenläufig in [s] | 5 | 35 | 35 |
| Mischdauer in [s] | 20 | 60 | 60 |

Für das Mischen der Matrix eignete sich auch eine höhere Drehzahl der Schaufeln. Daher wurde für das Mischen der Matrix eine R1-Regelung der Mischdauer und eine Motorleistung von 100 % des inneren Rührwerks und 80 % der Motorleistung des äußeren Rührwerks festgelegt. Die 100 %ige Leistung des Motors entspricht der Frequenz 50 Hz und gleicht 3000 Umdrehungen pro Minute (Upm) (SEW 2011). Beim Einmischen des Schaumes in die Matrix wirkte sich eine höhere Drehzahl jedoch negativ auf die Stabilität des vorgeformten Schaumes aus. Deswegen sind für das Einmischen das Schaumes eher niedrigere Geschwindigkeiten zu empfehlen. Daher wurde für das Einmischen des vorgeformten Schaumes eine R1-Regelung mit 50 % der Motordrehzahl des inneren Rührwerks und 40 % der Motordrehzahl des äußeren Rührwerks festgelegt. Für das *Mischverfahren* vor der Zugabe des Schaumkonzentrats wurde die R1-Regelung mit 50 % der Motorleistung des inneren Rührwerks und 40 % der Motor-

drehzahl des äußeren Rührwerks ausgemacht. Nach Zugabe des Schaumkonzentrats sollte die Geschwindigkeit auf 100 % des inneren Rührwerks und 80 % der Motordrehzahl des äußeren Rührwerks eingestellt werden. Das innere Rührwerk hat die Funktion, die Baustoffe zu vermengen, wobei das äußere Rührwerk für den Zulauf des Frischbetons auf das innere Rührwerk sorgt und Rückstände von den Innenwänden des Mischers abkratzt.

Tabelle 26 zeigt das Mischprotokoll für die Herstellung des Schaumbetons. Nach dem Mischvorgang wird das Material in den Extruder des 3D-Betondruckers gefüllt.

Zusätzlich zum gewählten Mischprotokoll beeinflusst die Art und Weise der Zugabe des vorgefertigten Schaumes die Homogenität des Schaumbetons. Schrittweise Zugabe des Schaumes ist der einmaligen Zugabe des gesamten Schaumes vorzuziehen. Die direkte Zugabe des gesamten Schaumvolumens führte häufig zu Inhomogenitäten in der Mischung und Separierung des Schaumes. Abbildung 43 stellt die Entwicklung der Dichte des Schaumbetons und entsprechende Bilder des Schaumbetons dar. Ab einer Dichte von ca. 1300 kg/m$^3$ trat ein deutlicher Rückgang der Homogenität des Schaumbetons ein. Dieser Mangel an Homogenität führte zu beschädigten Strukturbildungen der Porenwandungen, was sich wiederum in den erreichten Festigkeitsparametern widerspiegelte. Die so hergestellten Schaumbetonprobekörper hatten eine sehr unregelmäßige Struktur und konnten von Hand zerbrochen werden.

*Tabelle 26: Mischprotokoll für die Herstellung von druckbarem Schaumbeton im Mischverfahren R1*

| Zeit [min:s] | Geschwindigkeit [Upm] | Aktion |
|---|---|---|
| 0:00 | 0 | Zugabe von Wasser zu den trockenen Bestandteilen |
| 0:00 – 2:00 | 3000 | Mischen mit hoher Geschwindigkeit |
| 2:00 – 2:30 | 0 | Kontrolle der Homogenität |
| 2:30 – 4:30 | 3000 | Vermischen mit hoher Geschwindigkeit |
| 4:30 – 5:00 | 0 | Zugabe von 40 % des Gesamtvolumens des Schaumes |
| 5:00 – 7:00 | 1500 | Vermischen des Schaumes und der zementbasierten Matrix mit niedriger Geschwindigkeit |
| 7:00 – 8:00 | 0 | Zugabe von 40 % des Gesamtvolumens des Schaumes |
| 8:00 – 10:00 | 1500 | Vermischen von Schaum und zementbasierter Matrix bei niedriger Geschwindigkeit |
| 10:00 – 11:00 | 0 | Zugabe des verbliebenen Schaumvolumens |
| 11:00 – 13:00 | 1500 | Vermischen von Schaum und zementbasierter Matrix bei niedriger Geschwindigkeit |

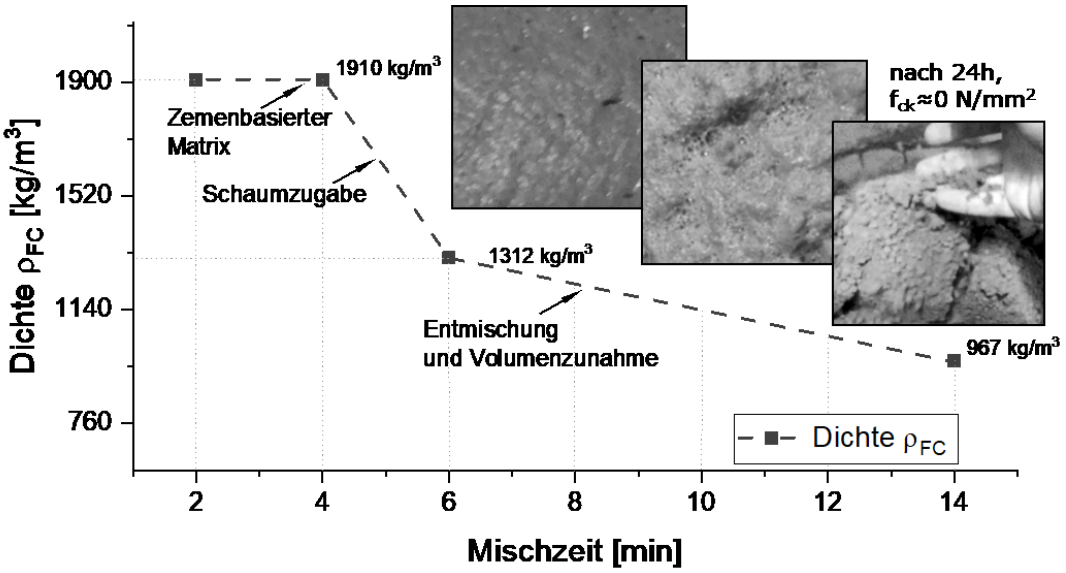



*Abbildung 43: Einfluss der einmaligen Schaumzugabe auf die Dichte des frischen Schaumbetons*

Bei einer schrittweisen Zugabe des Schaumes bei gleicher Mischdauer und Mischgeschwindigkeit entstand homogener Schaumbeton mit der geforderten Konsistenz. Abbildung 44 zeigt die Entwicklung der Dichte des Schaumbetons bei einer schrittweisen Zugabe des Schaumes.

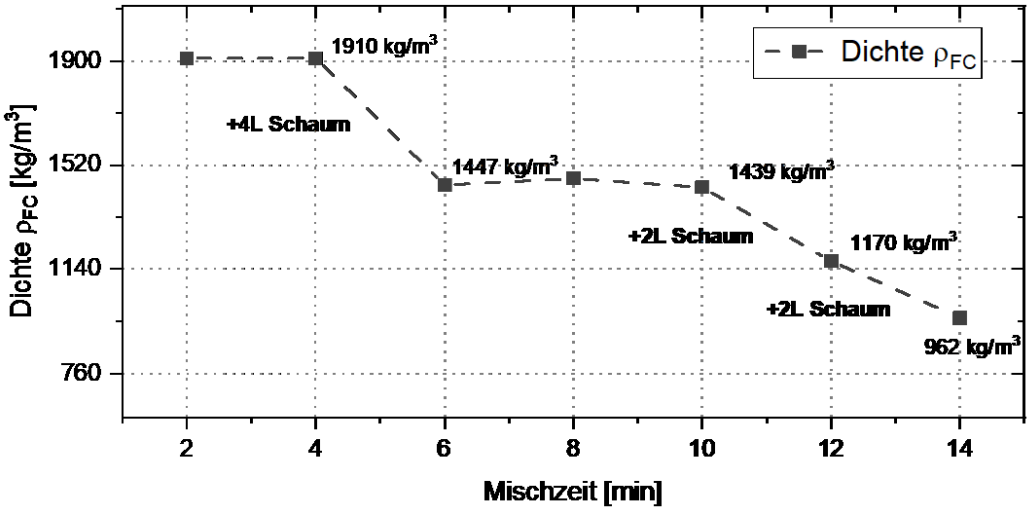



*Abbildung 44: Veränderung der Frischbetondichte durch schrittweise Zugabe des vorgefertigten Schaumes*

Nach der Zugabe von 50 % des Gesamtvolumens des Schaumes (d. h. etwa 4 L) sank die Dichte auf ca. 1450 kg/m³, ohne dass sich die Homogenität erkennbar verschlechterte. Der restliche Schaum wurde in zwei Anteilen von je 25 % des Gesamtvolumens zugegeben. Bei einer Dichte von 962 kg/m³ hatte der Schaumbeton eine homogene Konsistenz. Die Homogenität der Matrix bzw. der Mischung wurde sowohl vor als auch nach der Schaumzugabe beobachtet. In allen weiteren Versuchen wurde der vorgefertigte Schaum ebenfalls schrittweise zugegeben.

### 6.2.4 Herstellung druckbarer Schaumbetone

Für die Herstellung des Schaumbetons wurden die Zusammensetzungen gemäß Tabelle 23 verwendet. Das Schaumvolumen wurde nach der in (Mohammad 2011) beschriebenen Methode berechnet, die jedoch nicht die Wassermenge im Schaum, sondern nur das Wasser in der Matrix berücksichtigte. Im Gegensatz dazu wurde hier der Wassergehalt im Schaum an den endgültigen w/z-Wert angerechnet. Die resultierenden Rezepturen zeigt Tabelle 27.

*Tabelle 27: Entwickelte Schaumbetonrezepturen; Fließmittel: *MasterGlenium SKY 593 bzw. **MC-PowerFlow 5100*

| Mischung | Zement [m³/m³] | Flugasche [m³/m³] | Silica-staub [m³/m³] | Centrilit NC [m³/m³] | Wasser [m³/m³] | Schaum [m³/m³] | Fließmittel [m³/m³] | $(w/z)_{eq}$ FC | Kalkulierte Dichte [kg/m³] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A1-S4 | 0,134 | 0,089 | - | - | 0,164 | 0,612 | 0,001* | 0,40 | 800 |
| A1-S | 0,201 | 0,134 | - | - | 0,249 | 0,414 | 0,002* | 0,37 | 1200 |
| A2-M | 0,179 | 0,130 | 0,016 | - | 0,288 | 0,383 | 0,003** | 0,44 | 1200 |
| A3-CN | 0,181 | 0,132 | - | 0,016 | 0,275 | 0,394 | 0,002** | 0,41 | 1200 |

#### 6.2.4.1 Eigenschaften des druckbaren Schaumbetons im Frischzustand

In Abbildung 45 sind beispielhaft die Ergebnisse des HÄGERMANN-Ausbreitmaßversuches der Mischung A1-S dargestellt.

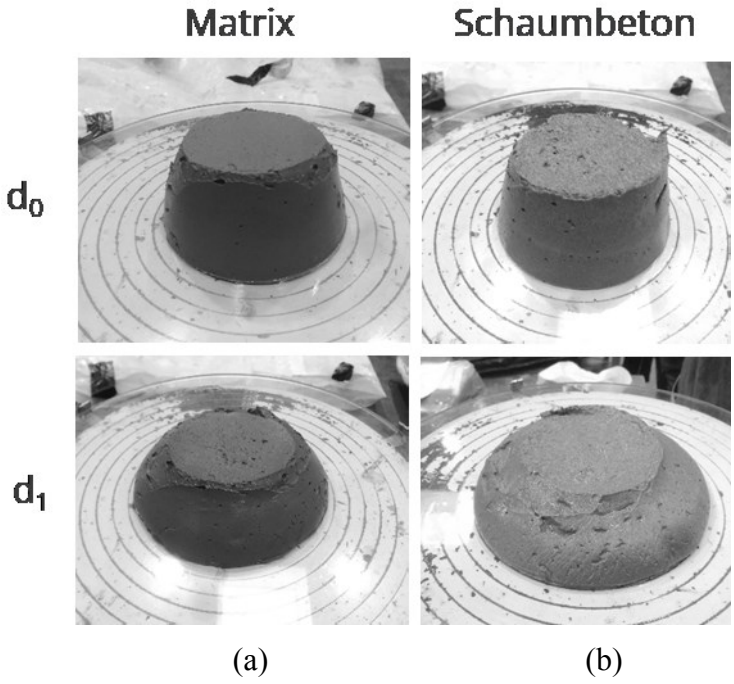



*Abbildung 45: HÄGERMANN-Ausbreitmaß: (a) Matrix, (b) Schaumbeton A1-S*

Die Probekörper der Matrix und des Schaumbetons behielten nach dem Abziehen des Stahlrings im gleichen Maß ihre Form. Durch die reduzierte Dichte des Schaumbetons war keine Ausbeulung zu sehen. Nach den 15 Schlägen des Ausbreitversuchs jedoch zeigte sich ein etwas erhöhtes Ausbreitmaß des Schaumbetons.

Die Änderung der Matrixzusammensetzung durch die Zugabe von Silicastaub bei der Mischung A2-M und Alumosilikat bei der Mischung A3-CN beeinflussten die Verarbeitbarkeit und Konsistenz des Schaumbetons. Die Zugabe des Aluminiumsilikats hatte eine positive Auswirkung auf die Verarbeitbarkeit, was anhand des Vergleichs von Proben mit und ohne Aluminosilikat festgestellt wurde (gleichartige optische Begutachtung wie in Abbildung 42, Kapitel 6.2.3).

Abbildung 46 stellt die Veränderung des Ausbreitmaßes mit der zunehmenden Schaumzugabe dar. Sowohl bei der Mischung A2-M als auch bei der Mischung A3-CN erhöhte der Schaum das Ausbreitmaß.

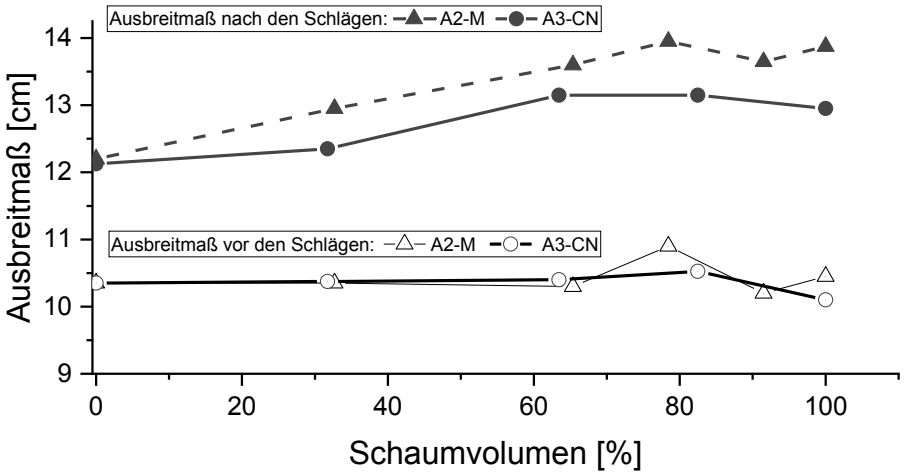



*Abbildung 46: Einfluss des Schaumvolumens im Beton auf das HÄGERMANN-Ausbreitmaß*

Das Ausbreitmaß zementbasierter Baustoffe ändert sich im Zeitverlauf; im Regelfall nimmt es mit der Zeit mehr oder weniger stark ab. Der Zeitpunkt der Wasserzugabe zu den vorhomogenisierten trockenen Komponenten wird als Minute 0 bezeichnet. Die zeitliche Entwicklung des Ausbreitmaßes der Schaumbetone fasst Abbildung 47 zusammen.

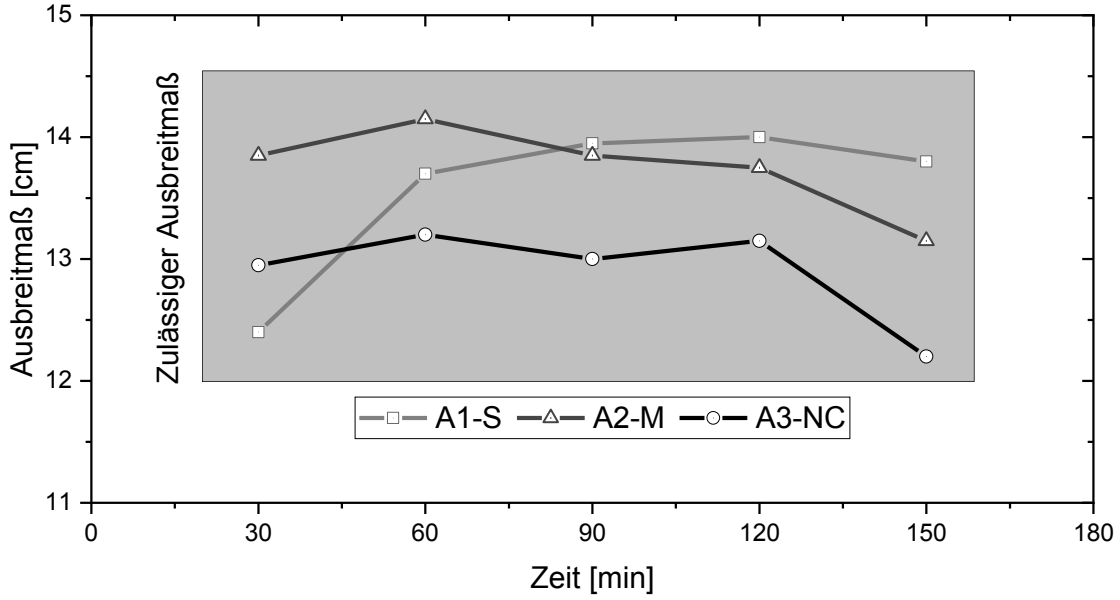



*Abbildung 47: Zeitliche Entwicklung des HÄGERMANN-Ausbreitmaßes der Schaumbetone*

Die erwartungsgemäße Abnahme des Ausbreitmaßes trat bei den Mischungsrezepturen A2-M und A3-CN ein. Demgegenüber nahm das Ausbreitmaß von A1-S bis zum Schaumbetonalter von 120 min kontinuierlich zu. Danach reduzierte sich das Ausbreitmaß. Dies ist ein eindeutiges Zeichen, dass Wasser im Verlauf der Zeit aus einem gebundenen Zustand herausgelöst wird und die Mischung nachverflüssigt. Im vorliegenden Fall der Schaumbetonrezeptur A1-S war festzustellen, dass die Schaumqualität nicht immer gleichmäßig war, sondern schwankte. Diese ungenügende Schaumstabilität stellte sich auch in beschleunigtem Zerfall und damit verbundener erhöhter Drainage von ca. 20 g/L dar. Mögliche Ursachen für diese nicht ausreichende Schaumstabilität führt Kapitel 4.1.2 detailliert aus. Detaillierte Studien, warum die Schaumbetonrezeptur A1-S ungleichmäßigere Schaumstabilitäten aufwies als die anderen, wurden nicht durchgeführt.

Das Ausbreitmaß gilt als eine leicht anwendbare und weit verbreitete Methode für die Beschreibung der Konsistenz von Mörteln. Es kann darüber hinaus auf die Bewertung der Konformität der Anforderungen für druckbare Schaumbetone übertragen werden. Tabelle 28 fasst die während dieser Studie abgeleiteten Richtwerte zusammen. Diese Werte eignen sich für Schaumbetonmischungen, die ohne Zugabe eines Beschleunigers für die schichtweise Ablage im CONPrint3D®-Verfahren geeignet sind.

*Tabelle 28: Maximale und minimale Werte des Hägermann-Ausbreitmaßes druckbarer Schaumbetone, mit denen die schichtenweise Ablage im CONPrint3D® UL Verfahren möglich ist*

| **Vor den 15 Schlägen, $d_0$ [cm]** | | **Nach den 15 Schlägen, $d_1$ [cm]** | |
|---|---|---|---|
| min | max | min | max |
| 10,4 | 10,8 | 12,4 | 13,7 |

Drei der in Tabelle 27 dargestellten Mischungen wurden für das Erreichen der Frischrohdichte 1200 kg/m³ konzipiert, nur A1-S4 mit einer Dichte von 800 kg/m³. Der Schaum wurde der zementbasierten Matrix schrittweise beige-mischt. Allerdings war bei allen realisierten Mischungen eine Diskrepanz zwischen kalkulierter und tatsächlicher Dichte zu beobachten. Abbildung 48 stellt die Entwicklung der Schaumbetonrohdichte durch die Zugabe des Schaumes dar, aus der eine Abweichung von ca. 2 % von der kalkulierten Dichte erkennbar ist.

Die Dichtereduzierung des Schaumbetons erfolgt durch die Erhöhung des Schaumanteils in der Gesamtrezeptur. Basierend auf den entwickelten Matrixzusammensetzungen wurden Schaumbetone mit einer Dichte von bis hinab zu 800 kg/m³ kalkuliert. Ausgehend davon, dass die Schaumzugabe schrittweise erfolgte, war es möglich, Homogenität und korrespondierende tatsächliche Dichte zu messen und zu bewerten. Sichere und wiederholbare Herstellung von Schaumbeton mit ausreichender Homogenität war bis zu einer Dichte von rund 1000 kg/m³ möglich. Demgegenüber führte weitere Dichtereduzierung zur unkalkulierbaren Separierung von Matrix und Schaum, was durch Klumpenbildung erkennbar war. In Abbildung 48 sind diese Grenzbereiche der Homogenität eingetragen. Dabei beziehen sich 100 % Schaumvolumen auf die Zielrohdichte 1200 kg/m³.

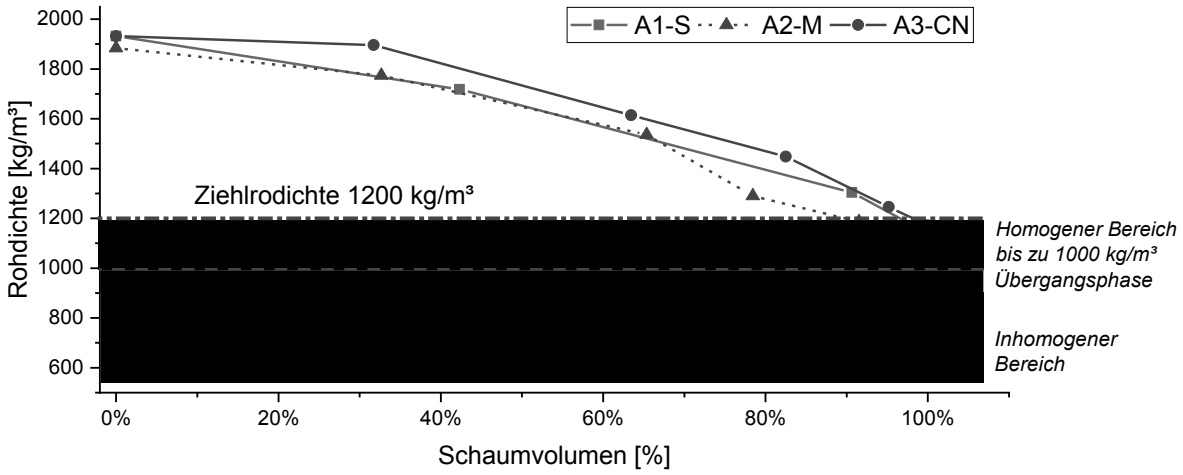
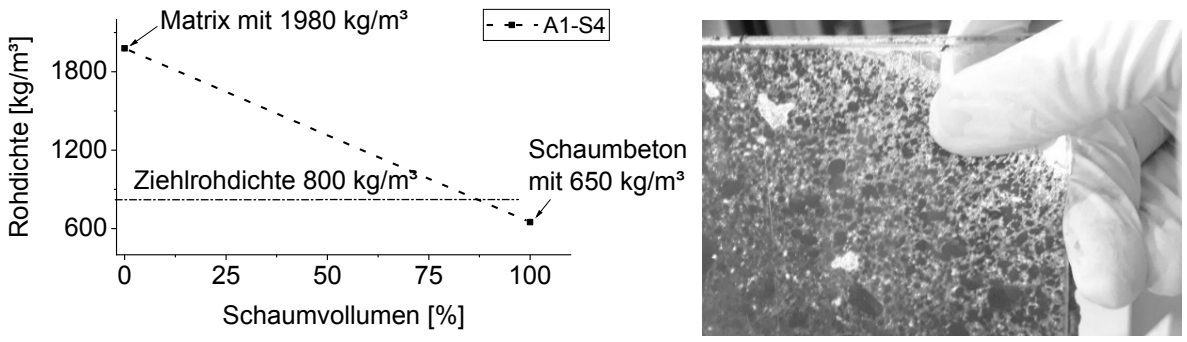



*Abbildung 48: Änderung der Schaumbetonrohdichte durch schrittweise Zugabe des vorgefertigten Schaumes und Grenzbereich der Homogenität des druckbaren Schaumbetons*

Ein weiteres Merkmal bei der Herstellung der druckbaren Schaumbetone mit einer Dichte kleiner als 1000 kg/m³ ist eine erschwerte Kontrolle der Dichteentwicklung. So sank bei einer geringen Abweichung vom Mischprotokoll (im Beispielfall ca. 30 s extra Mischzeit) die Dichte von planmäßigen 800 auf 650 kg/m³. Die Dichteentwicklung bei der Herstellung der Rezeptur A1-S4 zeigt Abbildung 49a. Nachdem die Mischung in die Bütte ausgeladen wurde, wurde die Homogenität der Mischung visuell bewertet. Dafür wurde ein geringes Volumen des hergestellten Schaumbetons zwischen zwei Glasplatten zusammengedrückt. Abbildung 49b macht die deutliche Inhomogenität mit örtlicher Klumpenbildung deutlich. Derartige Separierung des Schaumes von der Matrix würde geringe mechanische Festigkeiten und mangelhafte Dauerhaftigkeit bedingen.




(**a**) (**b**)

*Abbildung 49: Abweichung der tatsächlichen Dichte von der Zielrodichte der Mischungsrezeptur A1-S4: (a) Entwicklung der Dichte, (b) Klumpenbildung*

Die Dichte des Schaumbetons ist eine der absolut zentralen Eigenschaften, die sowohl mechanische als auch physikalische Kennwerte bestimmt. Nach der Herstellung ist die erreichte Dichte nicht endgültig, sie ändert sich im Laufe der Zeit. Nach der Aushärtung und Trocknung sinkt sie um einen von der ursprünglichen Dichte abhängigen prozentualen Anteil. So wies die für eine Frischrohdichte von 1200 kg/m$^3$ konzipierte Schaumbetonmischung nach dem Trockenen bis zur Massekonstanz einen Masseverlust von etwa 15 bis 18 % auf. Der Massenverlust ist bei Schaumbetonen mit höherer Dichte kleiner ist als bei solchen niedrigerer Dichte. So zeigt ein Schaumbeton mit einer Frischrohdichte von z. B. 1430 kg/m$^3$ einen Massenverlust von nur 8,6 % nach der vollständigen Trocknung.

Die Untersuchungen zeigten, dass die Frischrohdichte durch eine mechanische Belastung oder die Umgebungsbedingungen verändert werden kann. Die Versuche zur Förderung des Schaumbetons dokumentieren diese Dichteänderung als Folge der mechanischen Beanspruchung in Form des Förderdrucks, siehe Kapitel 4.3.

Die Stabilität des Schaumbetons kann auch einer Degradation unterliegen. Dies hängt eng mit der Qualität des vorgefertigten Schaumes zusammen. Bei einer nicht ausreichenden Stabilität zerfällt der Schaum im Verlauf der Zeit, was eine Zunahme der Dichte durch den Zusammenbruch der Porenstruktur mit sich bringen kann. Somit kann die Dichte nach der Wasserzugabe bis zum Einbauzeitpunkt durch äußere und innere Einflussfaktoren verändert werden.

Diese Erkenntnisse verdeutlichen, dass die tatsächliche Rohdichte der im CONPrint3D®-Verfahren extrudierten, wandartigen Probekörper gemessen werden muss und die Ergebnisse aus den Vorversuchen nur Anhaltspunkte bieten können. Es war zu vermuten, dass die Schaumbetondichte mit der Höhe einer 3D-gedruckten Wand variiert. Die Versuchsergebnisse bestätigten diese Annahmen (Abbildung 50).

Für die Dichtebestimmung wurden mindestens zwei Probekörper aus jeder Schicht der Schaumbetonwand herausgeschnitten. Diese wurden im Trockenschrank bei 80 °C bis zur Massekonstanz getrocknet und anschließend geometrisch vermessen. Alle untersuchten Schaumbetone zeigten eine Tendenz der Gewichtszunahme mit steigender Schichtenanzahl. Offenkundig

überwiegt die Dichteerhöhung im zeitlichen Verlauf aufgrund der Schauminstabilität eine mögliche Kompression der unteren Schichten durch die zunehmende Auflast.

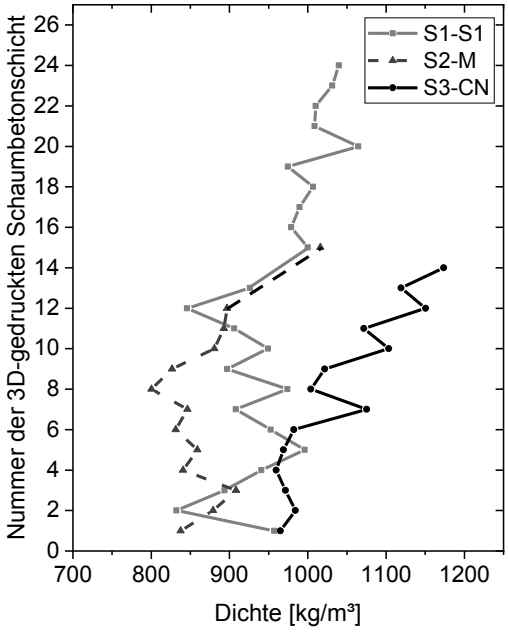



*Abbildung 50: Änderung der Dichte des Schaumbetons über die Höhe eines 3D-gedruckten, wandförmigen Probekörpers*

### 6.2.4.2 3D-Druckversuche

Abbildung 51 zeigt exemplarisch zwei Ergebnisse der 3D-Druckversuche.

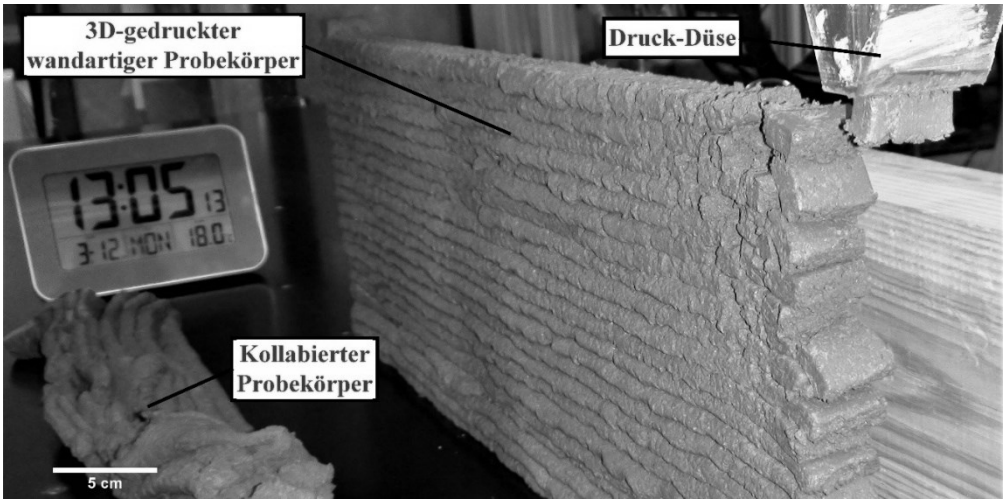



*Abbildung 51: 3D-Druckversuche mit Schaumbeton in der CONPrint3D®-Anlage: Links ein kollabierter, rechts ein aufrecht stehender wandartiger Probekörper*

Zu Beginn wurde der Schaumbeton in den 60 L fassenden Stahlbehälter des Extruders gefüllt. Der Schaumbeton erfährt hierbei eine gewisse Verdichtung unter dem Eigengewicht. Daher

wurde das Gesamtvolumen beim Befüllen auf ca. 30 L festgelegt, um die Herstellungsbedingungen stets konstant zu halten. Die Herstellung erfolgte mit einer Düsenöffnung von 14 x 33 $mm^2$ ohne zusätzliche Einheit für das Zuschneiden der Filamente bzw. Schließen der Düse. Hin- und Rückfahrt des Druckkopfs erfolgten mit konstanter Geschwindigkeit von 40 mm/s.

Die einzelnen Schaumbetonschichten wurden im minimalen Zeitintervall der Rückfahrzeit des Druckkopfs bis zur Anfangsstelle sowie dem Zeitintervall von fünf Minuten abgelegt. Die Rückfahrzeit des Druckkopfs bei einer Schichtlänge von 800 mm beträgt ca. 40 s. Durch die Reduzierung des Zeitintervalls zwischen den Schichten sinkt die Formstabilität der gedruckten Wand. Dies liegt vornehmlich am für die Aushärtung fehlenden Zeitfenster. In Abbildung 51 ist ein typischer kollabierter Probekörper zu sehen, bei dem das Zeitintervall zu kurz war.

Mit der Verlängerung des Zeitintervalls zwischen den Schichten auf fünf Minuten steigt die Formstabilität. In Abbildung 51 ist exemplarisch ein wandartigerer Probekörper aus 22 Schichten ohne sichtbare Deformationen und Stabilitätsgefahrstellen zu sehen. Anhand der Betrachtung üblicher Wohngrundrisse und Bauteilabmessungen errechnet sich aus dem Fahrweg des Druckkopfes ein Zeitabstand zwischen den Schichten, der weit länger als fünf Minuten ist. Die Zeit bis zum erneuten Erreichen der Anfangsstelle durch den Druckkopf des Extruders ist somit ausreichend für die Zunahme der Formstabilität der Schichten durch den fortschreitenden Mikrostrukturaufbau und die Hydratation.

Das wesentliche Überziehen des Zeitabstands zwischen der Ablage der Schaumbetonschichten kann sich jedoch negativ auf die Verbundfestigkeit auswirken. Die Änderung der Verbundfestigkeit in Abhängigkeit vom Zeitabstand zwischen den Schichten bei den 3D-gedruckten normalschweren Betonen wurde bereits erforscht und quantifiziert (Beushausen 2005, Nerella 2018b, Nerella 2019b). Zahlreiche Methoden zur Erhöhung der Verbundfestigkeit in Kombination mit einer optimierten Druckstrategie sind auch für den Schaumbeton anwendbar.

Eine schichtweise Ablage der Filamente war in allen Fällen möglich. Allerdings beeinflussten die Unterschiede in der Konsistenz die Verbaubarkeit, d. h. die Formstabilität der Schichten. Die Inhomogenität und teilweise Separierung des Schaums von der Matrix bei A1-S4 erschwerte eine mehrlagige Platzierung der Filamente. Alle weiteren Mischungszusammensetzungen konnten ohne sichtbare Verformungen durch die Ablage der weiterfolgenden Schichten extrudiert werden. Die Versuche zum 3D-Druck der entworfenen Schaumbetone bestätigten die Anwendbarkeit des entwickelten Konzeptes für einschlägige Mischungsrezepturen, siehe Kapitel 6.2.2. In Abbildung 52 sind die 3D-gedruckten Probekörper zu sehen, die Rezepturen wurden in Tabelle 27 vorgestellt.

Nach der Herstellung wurden die 3D-gedruckten Schaumbetonwände in der Klimakammer bei einer konstanten Temperatur von (20 ± 2) °C und relativen Luftfeuchte von (65 ± 5) % auf Stahlgitterrosten bis zur Prüfung gelagert. Diese bewusst von der Norm abweichende Probekörperlagerung wurde gewählt, um Baustellenbedingungen einigermaßen wirklichkeitsgetreu nachzustellen. Daher wurde sowohl auf Wasserlagerung als auch Einwickeln in Folien verzichtet.

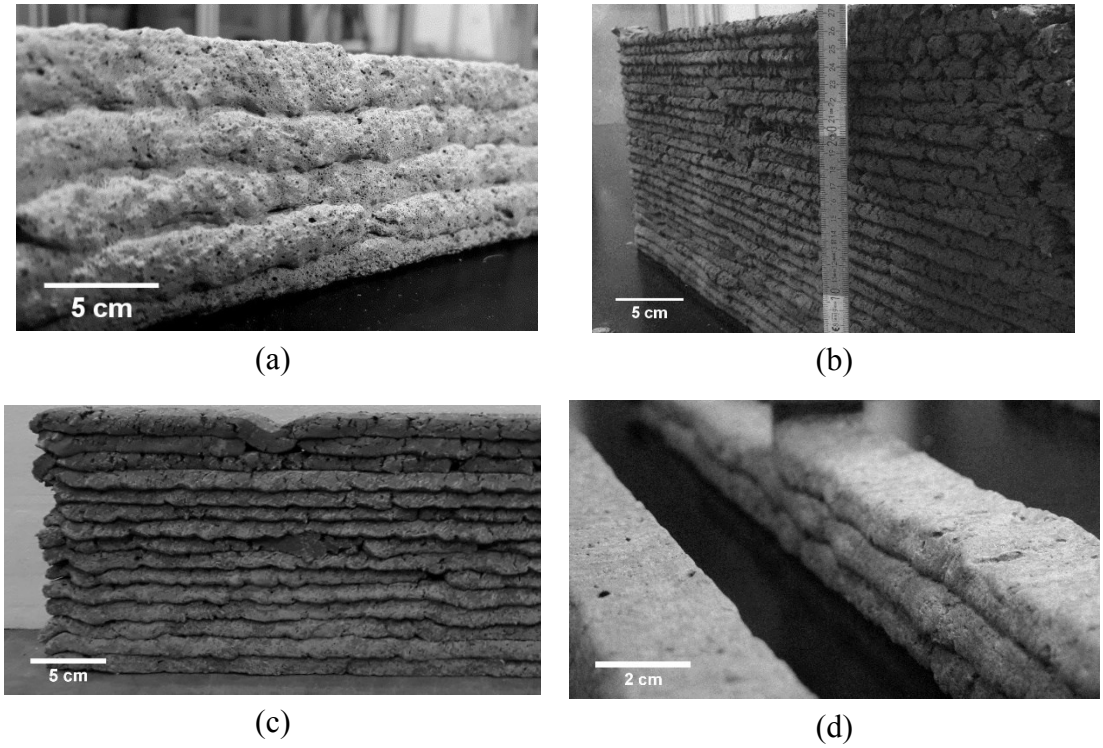



*Abbildung 52: 3D-gedruckte wandartige Probekörper mit unterschiedlichen Schaumbetonrezepturen: (a) A1-S4; (b) A1-S; (c) A2-M; (d) A3-CN*

Rissbildung und ungleichmäßige Oberflächenqualität in den 3D-gedruckten Schaumbetonwänden können die Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit beeinträchtigen. Abbildung 53 zeigt exemplarisch einen 3D-gedruckten, wandartigen Probekörper aus Schaumbeton A3-CN. Die Volumenverminderung durch Austrocknen, zusammen mit dem Entzug der Feuchtigkeit aus den Oberschichten beim Überziehen des Zeitintervalls zwischen den Schichten, begünstigt die Rissbildung. Des Weiteren können temperaturbedingte Volumenänderungen nicht ausgeschlossen werden. Dennoch wurde keine kritische stabilitätsmindernde Rissbildung nach der Aushärtung der hergestellten Schaumbetonwände beobachtet, die trotz der unruhigen Oberflächenoptik klar erkennbar wäre.

*Abbildung 53: Oberflächenqualität einer 3D-gedruckten Schaumbetonwand der Rezeptur A3-CN*

Die Oberfläche der hergestellten Probekörper aus der Mischungsrezeptur A2-M wies ähnliche Unregelmäßigkeiten der Schichtoberfläche auf (Abbildung 54). Die Extrusion der letzten Schicht erfolgte ca. 120 min nach der Wasserzugabe. Die Diskontinuitäten in den oberen Lagen der Wand resultieren aus dem fortgeschrittenen Strukturaufbau bzw. Hydratationsvorgang und stehen im Zusammenhang mit den gemessenen Werten des Ausbreitmaßes bzw. der statischen Fließgrenze. In Anbetracht des geplanten Konzeptes zum Einsatz von Schaumbeton in der additiven Fertigung ist eine automatisierte Nachbehandlung der Wandoberflächen gut denkbar. Die Unregelmäßigkeiten in der Schichtoberfläche können entweder durch Anpassen der Mischungsrezeptur oder durch zusätzliche Glättungseinheiten am Druckkopf behoben bzw. vermieden werden.

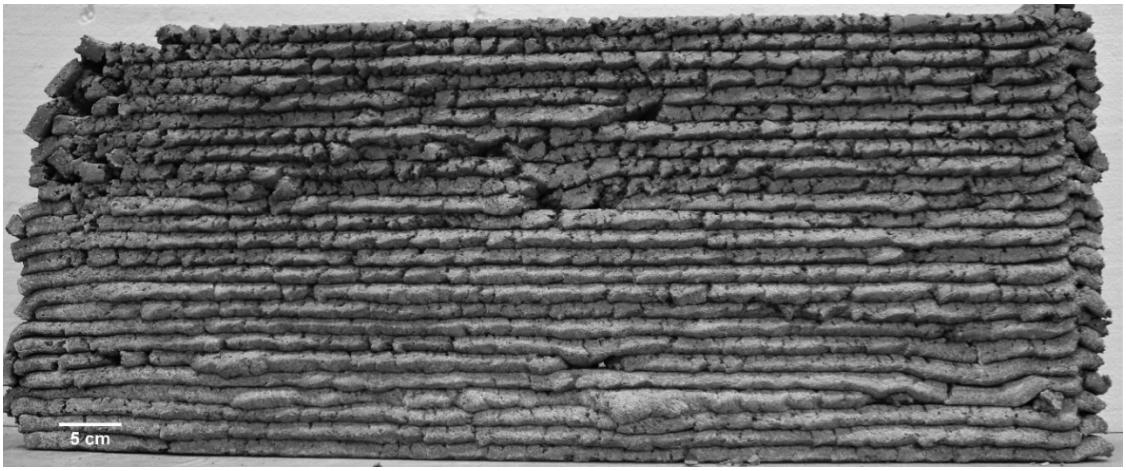



*Abbildung 54: 3D-gedrucktes Schaumbetonbauteil der Mischungszusammensetung A2-M*

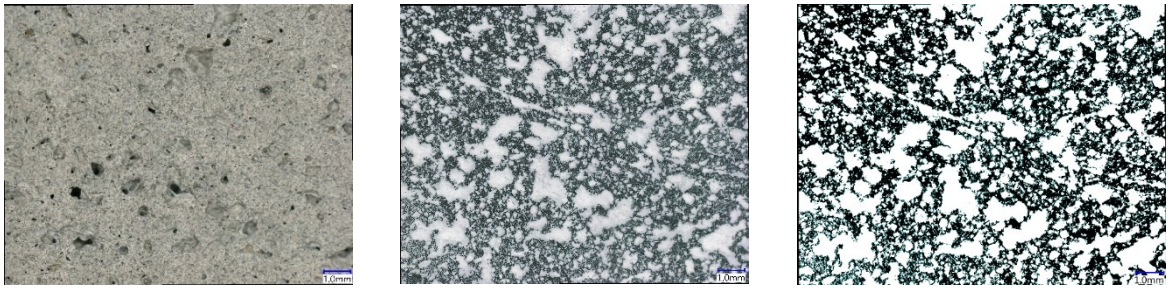
Weitere Faktoren, die die Oberflächenqualität der Schaumbetonwände beeinträchtigen können, sind die qualitativen Eigenschaften der technischen Ausführung des 3D-Betondruckers. In Abbildung 53 sind die Diskontinuitäten in den einzelnen Schichtlagen deutlich erkennbar. Obwohl die Düse des Extruders beim Drucken mit gleicher Geschwindigkeit fährt und die Materialzufuhr gemäß den Einstellungen des Pumpenmotors über die Software gleich bleibt, entstehen Störungen im Herstellungsprozess, die sich in der Ungleichmäßigkeit des Querschnitts äußern. Diese Tatsache spiegelt sich vor allem in der Ebenheit der Wand wider. Der in den Stahlbehälter des Extruders geladene Schaumbeton wird durch sein Eigengewicht und die Einzugsbewegung der Extruderschnecke gefördert. Eine gesteuerte Zufuhr des Materials auf die Schnecke des Extruders sollte zur Behebung der Diskontinuitäten in den extrudierten Schichten beitragen. Der Einbau eines frequenzgesteuerten Rüttlers für die Fortbewegung des Schaumbetons auf die Schnecke des Extruders ist mit technischen Ausführungsschwierigkeiten verbunden. Die entstehenden Schwingungen durch die Verdichtungsarbeit des Rüttlers werden auf die Düse des Druckkopfs übertragen, infolgedessen mit einer Abweichung vom Druckpfad zu rechnen ist.

#### 6.2.4.3 Porosität des Schaumbetons

Für die Bestimmung der Porosität im Schaumbetons existieren keine genormten Messverfahren. Dazu erschwert die unterschiedliche Art und Weise der Porenverteilung die Einführung eines für alle Schaumbetone passenden Messverfahrens. Daher musste für die Bewertung der Porosität der 3D-geruckten Schaumbetone eine eigene Methode ausgearbeitet werden. Das Auszählen der Poren erfolgte anhand einer automatisierten, softwaregestützten Bildanalyse. Zur Aufnahme des Porenraums wurde ein optisches Digitalmikroskop VHX 6000 (Keyence Deutschland GmbH, Neu-Isenburg, Deutschland) mit einem hochauflösenden Bildanalysewerkzeug verwendet. Für die Bestimmung der Porosität war eine dreistufige Vorbereitung der Probekörper notwendig (Abbildung 55):

1) Polieren der zu betrachtenden Oberfläche mit Sandpapieren unterschiedlicher Körnung,
2) Einfärben der polierten Oberfläche mit einem schwarzen Filzstift,
3) Auffüllen der „angeschnittenen“ Poren mit einem Kontrastfarbpulver (weißes $BaSO_4$).

Der Schwarzweißkontrast ermöglichte die einfache Binarisierung der Bilder. Schwarze Bereiche entsprechen dem Porenzwischenraum, d. h. dem Tragskelett, wohingegen die weiße Färbung die Poren abbildet. Im binären Bild werden die Pixel einer bestimmten Farbe ausgezählt und auf eine Einheitsfläche bezogen, z. B. Anzahl pro $cm^2$.



(**a**) (**b**) (**c**)

*Abbildung 55: Verarbeitungssequenz von Bildern für die Bestimmung der Porengrößenverteilung des Schaumbetons: (a) polierter Probekörper, (b) gefärbter Probekörper, (c) binäres Bild*

Eine breitflächige Betrachtung ermöglicht eine statistisch aussagekräftige Analyse. Für die Aufnahme einer ausreichend großen Fläche in entsprechend hoher Auflösung empfiehlt sich das Zusammenfügen von einzelnen Aufnahmen zu einem gemeinsamen Bild (engl. image stitching), was später für die Analyse verwendet wird. In dieser Studie wurden neun (3 x 3) und 36 (6 x 6) Einzelbilder eines Probekörpers aufgenommen und zusammengefügt. Die Variation der Größenordnung der betrachteten Fläche ermöglicht die Analyse der Auswirkung des Flächenmaßes auf die statistische Aussagekraft der Ergebnisse. In Tabelle 29 sind die Ergebnisse zweier Aufnahmen des selben Probekörpers der Rezeptur A1-S gegenübergestellt. Anhand beider Aufnahmen wurde eine Porosität von ca. 60 % ermittelt. Die Erhöhung der betrachteten Fläche erhöhte zwar wohl die Genauigkeit der Ergebnisse. Der Unterschied zwischen beiden Messungen betrug jedoch nur ca. ein Prozent. Daher wurde für die weiteren

Analysen der Porengrößenverteilung zusammengefügte 3 x 3 Bilder mit ca. 229,53 $mm^2$ Grundfläche verwendet. Die Handhabung derartiger Bildgrößen war erheblich einfacher als der aus 36 Einheiten zusammengesetzten Bildern.

*Tabelle 29: Vergleich der Messergebnisse der Porositätserfassung anhand der kleineren (3 x 3 Einzelbilder) und größeren (6 x 6 Einzelbilder) zusammengesetzen Images; 3D-gedruckter Schaumbeton A1-S*

| Mischung: Probekörper | Analysierte Fläche ($mm^2$) | Summierte Fläche der Poren ($mm^2$) | Porenanzahl | Porosität (%) |
|---|---|---|---|---|
| A1-S: (3x3) | 229,53 | 139,63 | 6067 | 60,8 |
| A1-S: (6x6) | 822,68 | 491,55 | 13955 | 59,7 |

Die Ergebnisse der Porositätsmessungen sind in Tabelle 30 zusammengefasst. Die anhand der binarisierten Bilder gemessene Dichte der Probekörper korrespondiert mit der gemessenen Porosität. Die Mischungszusammensetzung A1-S mit der niedrigsten Dichte von 960 $kg/m^3$ hat eine auf die Grundfläche bezogene Porosität von 60,8 % und A3-CN mit der Dichte von 1230 $kg/m^3$ hat eine solche von 41,8 %. Der Probekörper aus A3-CN wies die höchste Anzahl an Poren auf, jedoch war die Gesamtporosität dieses Probekörpers deutlich kleiner als die von A1-S und A2-M.

*Tabelle 30: Porosität und Porenanzahl der untersuchten 3D-gedruckten Schaumbetone, ermittelt aus der Analyse binarisierter Lichtmikroskopbilder*

| Mischung | Analysierte Fläche ($mm^2$) | Summierte Fläche der Poren ($mm^2$) | Poren-anzahl | Probeköper-dichte ($kg/m^3$) | Porosität (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| A1-S | 229,53 | 139,63 | 6067 | 960 | 60,8 |
| A2-M | 229,40 | 123,28 | 5418 | 970 | 53,7 |
| A3-CN | 229,73 | 96,10 | 7329 | 1230 | 41,8 |

## 6.3 Untersuchungen zur Steuerung des Erstarrens

Das Zusammenspiel der Hydratationskinetik und des thixotropen Verhaltens des Betons im Allgemeinen und des Schaumbetons im Einzelnen ist die Grundvoraussetzung für das Gelingen der Förderung des Schaumbetons und den anschließenden mehrlagigen Einbau. Die Bestimmung der Anfangs- und Endabbindezeit des Schaumbetons ist durch kein genormtes Verfahren definiert. Literaturrecherche ergab, dass die Abbindezeit des Schaumbetons üblicherweise zwischen zwölf und 24 Stunden liegt (Brady 2001). Das Volumen an hinzugefügtem Schaum kann die Hydratationskinetik beeinflussen, wobei Schaumbildner und auf deren Basis produzierte Schäume ähnlich wie Verzögerer wirken (Brady 2001, Mohammad 2011).

Die Abbindezeit des Schaumbetons kann durch den Einsatz schnell aushärtender Zementsorten und Beschleuniger verringert werden. Bisherige Studien zur Abbindezeit von Schaumbeton konzentrierten sich auf die Identifizierung des effektivsten Beschleunigungsmittels, um die Produktivität bei der Blockherstellung durch, das frühere Entformen zu erhöhen (Sathya Narayanan 2012). Herkömmliche Beschleuniger wie Calciumchlorid, Calciumnitrat oder Triethanolamin hatten sich als wirksam erwiesen. Als negative Folge der Beschleunigerzugabe wird eine Instabilität des Schaumbetons berichtet, die sich im frühzeitigen Zusammenbruch des Porenraums des Schaumbetons äußert.

Der Hydratationsprozess im Schaumbeton kann durch das Verfahren der Ultraschall-Wellenübertragung genau verfolgt werden. WEI *et al.* zeigten, dass erhöhte Temperatur der Umgebungsluft während der Nachbehandlung des Schaumbetons die Abbindezeit deutlich reduziert. Umgekehrte Wirkung auf die Abbindezeit haben erhöhte Zugabemengen von Flugasche bzw. Schaumkonzentrat (Wei 2014).

Die bei der Zementhydratation freigesetzte Wärme beeinflusst stark die Ausbildung des Porenzwischenraums und somit die mechanischen Eigenschaften des Schaumbetons. Darüber hinaus bleibt die den Hydratationsprozess des Schaumbetons begleitende Wärme länger im Schaumbetonbauteil als in einem Bauteil aus normalschwerem Beton. Bei der Anwendung des Schaumbetons mit hohem Verhältnis von Volumen zu Oberfläche kann sich eine erhebliche Hydratationswärme entwickeln, die Rissbildung, langfristige Festigkeitsverluste, ausgeprägtes Schwinden und eine deutliche Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit bewirkt (Jones 2006). TARASOV *et al.* berichteten ebenfalls, dass die höchste Wärmeentwicklung bei Schaumbetonen mit der niedrigsten Dichte und dem größten Verhältnis von Volumen zu Oberfläche stattfindet. Weiterhin kann die Verringerung des Zementgehalts oder der teilweise Ersatz von Zement durch Flugasche die Temperaturentwicklung reduzieren (Tarasov 2010).

Für den Schaumbeton-3D-Druck ist die Beschleunigerzugabe kurz vor dem Austritt des Materials aus der Düse des Extruders denkbar, was jedoch eine anspruchsvolle technische Lösung zum Einmischen und für die homogene Verteilung des Beschleunigers erfordert. Bisherige Studien zur Inline-Zugabe von Zusatzmitteln beim Beton-3D-Druck berücksichtigten pulverförmige und flüssige nachzudosierende Zusatzmittel (Leal da Silva 2017).

In der vorliegenden Arbeit wurde die Wirkungsweise von pulverförmigen und flüssigen Beschleunigern einbezogen. Die Zugabemenge der Beschleuniger entsprach der Herstellerempfehlung. Weiterhin wurde eine Überdosierung getestet und die Auswirkungen bewertet. Folgende Beschleunigerprodukte des Projektpartners MC-Bauchemie wurden eingesetzt:

1) in Pulverform:
    a. Fluresit Schnell Pulver BE,
    b. RAPID 601,
2) flüssig:
    a. Centrament Rapid 640,
    b. Centrament Rapid 650.

Alle untersuchten Beschleuniger ließen sich gut beimischen und hatten die gewünschte beschleunigende Wirkung. Abbildung 56 zeigt beispielhaft die Veränderung der Konsistenzen durch die Zugabe des pulverförmigen Fluresit-Schnell. Das Ausbreitmaß des Schaumbetons wurde unmittelbar nach der Zugabe des Beschleunigers gemessen. Die Einwirkungszeit des Beschleunigers lag somit unter 1 min. Die Ergebnisse zeigen, dass eine deutliche Reduzierung der Fließfähigkeit eintrat.

Da in der Literatur häufig negative Auswirkungen durch Beschleunigerzugabe berichtet werden, z. B. auf die mechanischen Eigenschaften und die Dauerhaftigkeit des Schaumbetons, wurde der 3D-Druck mit Schaumbeton in der vorliegenden Studie ohne Beschleuniger ausgeführt.

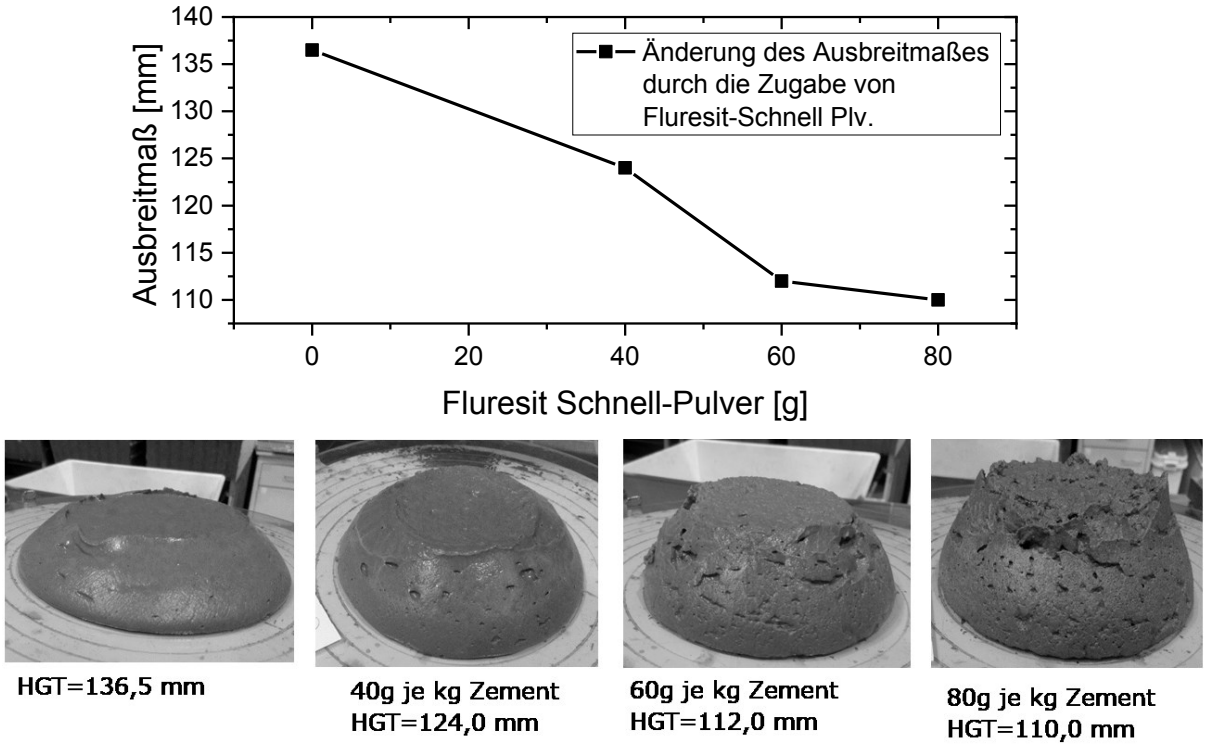



*Abbildung 56: Steuerung des Erstarrens durch die Zugabe des Beschleunigers Fluresit Schnell*

## 6.4 Untersuchungen zur Rheologie vom frischen Schaumbeton

Die rheologischen Eigenschaften des Schaumbetons sind für das Gelingen der Förderung und die schichtweise Ablage der Filamente von entscheidender Bedeutung. Um zu bewerten, ob die Eigenschaften des Materials für die Belange der 3D-Drucktechnologie angemessen sind, ist in den meisten Fällen eine experimentelle Quantifizierung des thixotropen Verhaltens notwendig.

Die Thixotropie des Schaumbetons ist als eine belastungs- und zeitabhängige Veränderung der Fließeigenschaften zu verstehen. Durch eine Scherbeanspruchung während der Förderung findet ein Abbau innerer Strukturen statt, wobei die Viskosität und die Schergrenze abnehmen, d. h. der Schaumbeton wird fließfähiger. Nach der Filamentanlage, im Ruhezustand, nehmen diese Werte durch den Strukturaufbau wieder zu. Die von der Belastungsgeschichte und Zeit

abhängige Veränderung der rheologischen Eigenschaften einer thixotropen Substanz kann beim 3D-Druck vorteilhaft ausgenutzt werden. Wie die Beziehung der dynamischen Viskosität $\eta$ zur Zeit $t$ in Abbildung 57 zeigt, wird die innere Widerstandskraft, die dem Krafteintrag von außen entgegenwirkt, reduziert und in der darauffolgenden Ruhephase wiederhergestellt.

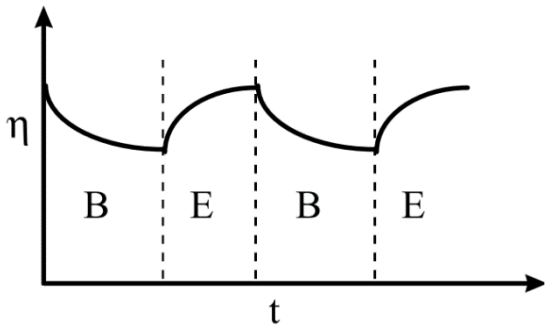



*Abbildung 57: Zeit- und Belastungsabhängigkeit der dynamischen Viskosität bei einer thixotropen Substanz: (B) Belastungsphase, (E) Entlastungsphase (Blask 2002)*

Das Materialverhalten von 3D-druckbarem Schaumbeton lässt sich annährend als visko-plastischer BINGHAM-Körper darstellen und beschreiben. Der kritische Schwellenwert, ab dem ein visko-plastisches Material unter Beanspruchung zu fließen beginnt, wird als Fließgrenze $\tau_c$ oder Schergrenze definiert. Nach dem Austritt des Schaumbetons aus der Düse wird die Konsistenz und die Formstabilität der Schaumbetonschicht von bestimmten rheologischen Parametern beeinflusst. Diese Parameter sind die anfängliche Fließgrenze $\tau_{c0}$, die anfängliche kritische Scherrate $\dot{\gamma}_{c0}$ und das anfängliche Schubelastizitätsmodul $G_0$. Nach der Ablage der Schaumbetonschicht beginnt eine Ruhephase, während der die Entwicklung dieser rheologischen Parameter stattfindet (Abbildung 58).

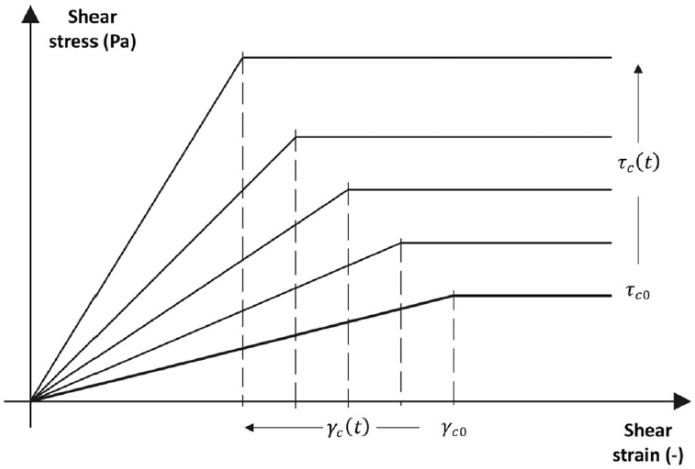



*Abbildung 58: Scherspannung-Scherdehnungsverhalten in Abhängigkeit der Ruhezeit (Roussel 2018)*

Um die Entwicklung der oben genannten Parameter und deren Veränderung durch die Variation der Rohrstoffe im Schaumbeton zu analysieren, wurden Messungen der rheologischen Eigen-

schaften mit dem Rotationsrheometer HAAKE MARS III (Thermo Fisher Scientific Deutschland, Kehl, Deutschland) durchgeführt. Die vier betrachteten Schaumbetonrezepturen sind in Tabelle 27 gelistet. Um die Prüfparameter möglichst realistisch in Bezug zur Beanspruchung des Materials während des 3D-Drucks zu halten, wurde die Schergeschwindigkeit im Rheometer nahe der gewählt, die im Material zum Zeitpunkt kurz nach der Filamentablage vorherrscht, nämlich Null. Hierbei sollte die Stabilität des extrudierten Materials unter dem Einfluss einer vertikalen Belastung aus den weiterfolgenden Schichten charakterisiert werden. Um das thixotrope Verhalten zementbasierter Bindemittel zu charakterisieren, werden Schergeschwindigkeiten im Bereich von 0.001 $s^{-1}$ bis 0.02 $s^{-1}$ empfohlen (Nerella 2018a). Die Möglichkeit, solche niedrigen Schergeschwindigkeiten anzuwenden und zuverlässige Daten zu erhalten, hängt jedoch vom verwendeten Instrument und dem zu prüfenden Material ab.

Die Untersuchung des Einflusses verschiedener Schergeschwindigkeiten wurde an derselben Probe durchgeführt. Die Schergeschwindigkeiten 0,05 $s^{-1}$, 0,08 $s^{-1}$, 0,10 $s^{-1}$, 0,12 $s^{-1}$, 0,15 $s^{-1}$ und 0,18 $s^{-1}$ wurden angewendet. Tabelle 31 fasst die Versuche in der Reihenfolge ihrer Durchführung und mit den wichtigsten Größen zusammen.

*Tabelle 31: Ergebnisse zu den Testeinstellungen für die Referenzmischung*

| Bezeichnung | $\tau$ [Pa] | t [s] | $\gamma$ [-] | $\dot{\gamma}$ [1/s] |
|---|---|---|---|---|
| CSR 0.1_32min | 359,2 | 96 | 1,605 | 0,10 |
| CSR 0.08_40min | 278,5 | 116 | 3,079 | 0,08 |
| CSR 0.08_90min | 393,7 | 127 | 1,422 | 0,08 |
| CSR 0.08_120min | 461,2 | 145 | 1,315 | 0,08 |
| CSR 0.08_150min | 565,0 | 178 | 1,640 | 0,08 |
| CSR 0.12_150-160min | 297,9 | 69 | 1,661 | 0,13 |
| CSR 0.15_150-160min | 293,9 | 56 | 1,879 | 0,15 |
| CSR 0.18_150-160min | 295,3 | 49 | 2,161 | 0,18 |
| CSR 0.05_160min | 749,7 | 373 | 1,878 | 0,05 |

Die Tests wurden mit einer Schergeschwindigkeit von 0,10 $s^{-1}$ begonnen. Als nächstes wurde eine Schergeschwindigkeit von 0,08 $s^{-1}$ eingestellt. Mit dieser Schergeschwindigkeit wurden drei Versuche zu den Zeiten von 90 min, 120 min und 150 min nach Wasserzugabe durchgeführt. Ferner wurden Versuche mit einer erhöhten Schergeschwindigkeit von 0,12 $s^{-1}$, 0,15 $s^{-1}$ und 0,18 $s^{-1}$ im Zeitraum zwischen 150 min und 160 min nach der Wasserzugabe durchgeführt. Hydratation und Strukturaufbau sind nach 150 min bereits weit vorangeschritten. Der letzte Versuch wurde mit einer Scherrate von 0,05 $s^{-1}$ durchgeführt. Dies ist der Wert, der am nächsten an den in der Literatur häufig verwendeten und gebräuchlichen Schergeschwindigkeiten liegt. Bis der Strukturbruch eintrat, benötigte der Versuch mit einer solch geringen Scherrate allerdings im Vergleich zu den anderen Scherraten die lange Zeitdauer von

373,3 Sekunden. Die Fließgrenze war bei höheren Schergeschwindigkeiten schneller erreicht. So wurde bei der Schergeschwindigkeit von 0,18 $s^{-1}$ die Fließgrenze bereits nach 49 s erreicht. Alle Schergeschwindigkeiten ≥ 0,1 $s^{-1}$ erwiesen sich aus den Anfangsversuchen ebenso als machbar und angemessen.

Aus Abbildung 59 ist deutlich ersichtlich, dass unterschiedliche Zeiträume erforderlich sind, um den Spitzenwert der Scherspannung (Ausbildung des Scherspannungsplateaus) zu erreichen, wenn der Schaumbeton mit unterschiedlichen Schergeschwindigkeiten geschert wird.

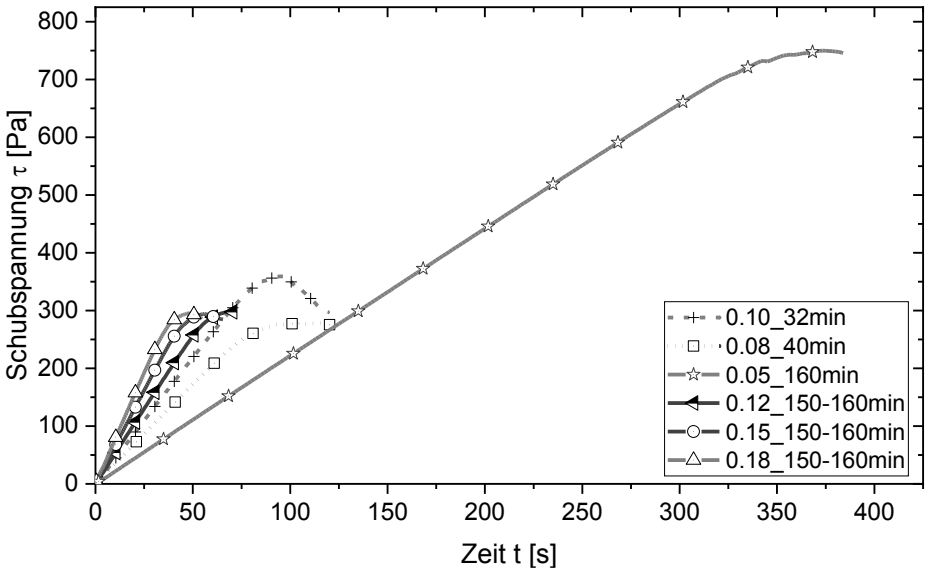



*Abbildung 59: Einfluss der Scherrate auf die zeitliche entwicklung der Schubspannung, Mischungsrezeptur A1-S*

Die statische Fließspannung hing signifikant von der angewendeten Scherrate ab. Ein Faktor, der hierbei natürlich auch zu beachten ist, ist der Effekt des Strukturaufbaus während der Versuchsreihe, vgl. Tabelle 31. Unter Beachtung auch weiterer am Institut für Baustoffe vorliegender Erfahrungen wurde eine Schergeschwindigkeit von 0,08 $s^{-1}$ als optimal geeignet identifiziert und für die Hauptversuche mit den Schaumbetonen verwendet. Bei der Schergeschwindigkeit von 0,08 $s^{-1}$ betrug die Zeit bis zum Erreichen der Fließgrenze ca. 178 s.

Die statische Fließgrenze ist für die Sicherstellung der Formstabilität der gedruckten Schaumbetonschichten von großer Wichtigkeit. Beim 3D-Druck entstehen Ruhezeiten zwischen der Ablage von aufeinander folgenden Filamenten, was einen Strukturaufbau und somit die Zunahme der Fließgrenze ermöglicht. Die Kinetik dieses Wachstums ist für die Gestaltung von 3D-Druckprozessen von zentraler Bedeutung (Roussel 2008). Abbildung 60 zeigt die Ergebnisse zur experimentellen Ermittlung der statischen Fließgrenze mit der Schergeschwindigkeit von 0,08 $s^{-1}$. Die Versuche wurden im Rotationsregime mit einer konstanten Scherrate anhand der in (Nerella 2018a) dargelegten Methode durchgeführt. Die Messungen erfolgten zu den Zeitpunkten 46, 60, 91, 121 und 150 min nach der Wasserzugabe. Die Schubspannungs-Scherdehnungs-Kurven zeigen zunächst linearen Anstieg, was auf elastisches Materialverhalten hindeutet. Mit zunehmendem Spannungsniveau flachen die Kurven ab und gehen

schließlich in ein Plateau über. Die maximale Schubspannung ergibt dabei die statische Fließgrenze (auch als statische Schergrenze bezeichnet), die den Strukturbruch des Schaumbetons markiert. Mit zunehmender Zeit nach der Herstellung nimmt die statische Fließgrenze des Schaumbetons zu.

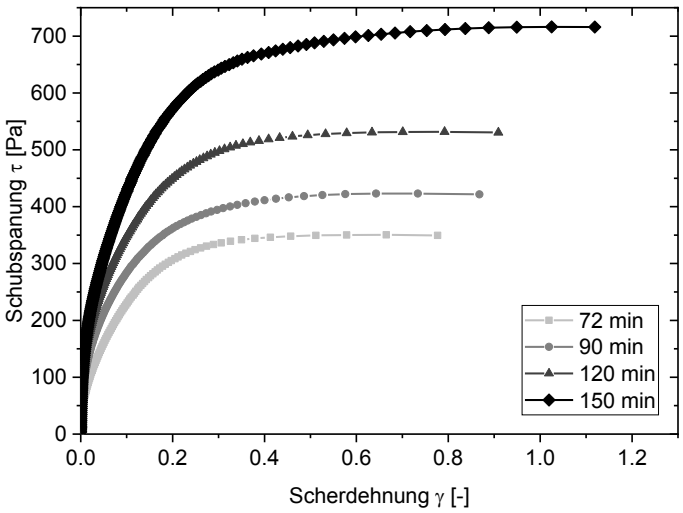
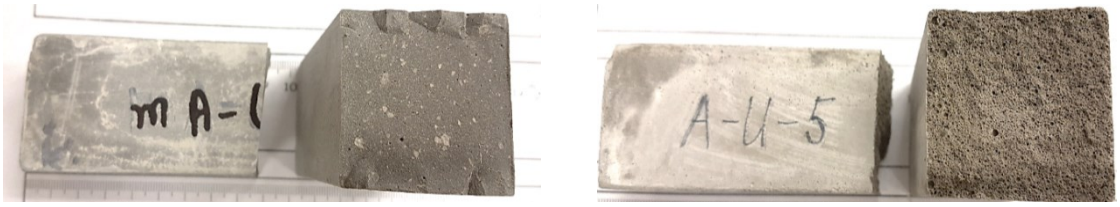



*Abbildung 60: Vier Versuchsergebnisse zur Zeitabhängigkeit statischen Fließgrenze, Schaumbetonrezeptur A2-M*

## 6.5 Untersuchungen zur Festigkeitsentwicklung

Die Druckfestigkeit von Schaumbeton hängt maßgeblich von den Eigenschaften der Matrix und der Qualität des vorgefertigten Schaumes ab. Im Einzelnen wird die Druckfestigkeit des Schaumbetons durch Dichte, Porenstruktur, Qualität des vorgeformten Schaumes, Wassergehalt, Eigenschaften der Matrixbestandteile, Alter, Nachbehandlung sowie Probenform und -größe beeinflusst. Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen Dichte und Druckfestigkeit des Schaumbetons. Eine Dichteerhöhung führt zu einem exponentiellen Anstieg der Druckfestigkeit; dieser Zusammenhang ist vor allem bei den hochfesten Schaumbetonen deutlich, vgl. Abbildung 17 in Kapitel 3.1.1. Abbildung 61a zeigt prismatische Schaumbetonprobekörper mit der feinpulverigen Zusammensetzung A-1 (40 Vol.-% Flugasche und 60 Vol.-% Zement). Zu dieser Matrix wurde der vorgefertigte Schaum hinzugegeben. Der entstandene Schaumbeton-Probekörper ist in Abbildung 61b dargestellt, er wies eine Dichte von 970 kg/m$^3$ auf, während die Dichte der Matrix 1919 kg/m$^3$ betrug.




(a) (b)

*Abbildung 61: Umwandlung der zementbasierten Matrix (a) zu Schaumbeton (b)*

Durch die Erhöhung des Luftgehalts und der damit verbundenen Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften wurde die Festigkeit des Baustoffs herabgesetzt. Die ursprüngliche Druckfestigkeit der zementbasierten Matrix von 57,8 N/mm$^2$ sank auf 2,5 N/mm$^3$ beim zugehörigen Schaumbeton (Tabelle 32).

*Tabelle 32: Mechanische Eigenschaften der Matrix und des darauf basierenden Schaumbetons der Zusammensetzung A-0*

| Zementbasierte Matrix A-0 | | | Schaumbeton A-0 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Dichte [kg/m$^3$] | Biegezugfestigkeit [N/mm$^2$] | Druckfestigkeit [N/mm$^2$] | Dichte [kg/m$^3$] | Biegezugfestigkeit [N/mm$^2$] | Druckfestigkeit [N/mm$^2$] |
| 1919 | 2,69 | 57,8 | 970 | 0,59 | 2,5 |

Die Dichte verringerte sich ebenfalls erheblich. Jedoch ist ein Dichte-Festigkeit-Verhältnis nur für Mischungszusammensetzungen mit gleichen Bestandteilen anwendbar. Die Schaumbeton-Zusammensetzung kann jedoch unterschiedlich gestaltet werden. Deswegen ist die Dichte nicht unbedingt ein verlässlicher Indikator für Festigkeit und Qualität des Schaumbetons (Brady 2001). Zusätzlich können bei Schaumbetonen gleicher Zusammensetzung die Festigkeitsparameter durch unterschiedliche Lagerungsbedingungen vor der Prüfung beeinflusst werden.

In Abbildung 62 sind die Ergebnisse der Druckfestigkeit der einzelnen Schaumbetonprobekörper nach unterschiedlichen Nachbehandlungen dargestellt. Neben der im Projektverlauf üblichen Lagerung in der Klimakammer ohne Einwickeln in Folie bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 65 % wurden Probekörper nach 28 d Lagerung vor der Prüfung bis zur Massenkonstanz bei 105 °C im Umluftofen getrocknet und geprüft. Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung zeigen, dass die Lagerungsbedingungen und somit der verbliebene Feuchtegehalt des Schaumbetons die gemessenen Festigkeiten stark beeinträchtigen können.

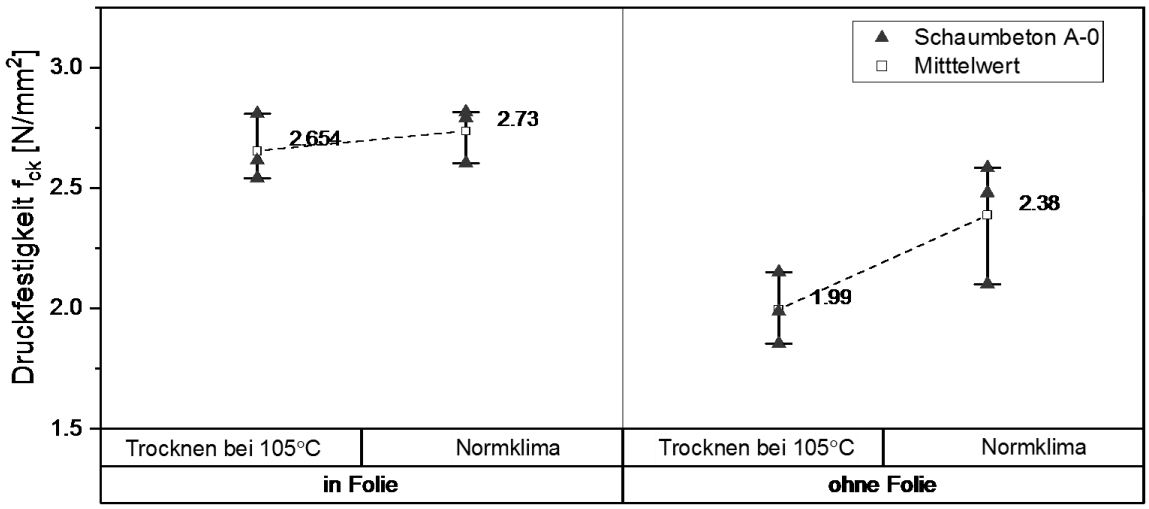



*Abbildung 62: Einfluss der Nachbehandlung auf 28 d Druckfestigkeit des Schaumbetons A-0*

Die Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen von Schaumbeton können weiterhin variieren, wenn anstelle geschalter Probekörper 3D-gedruckte Probekörper verwendet werden. Weitere mögliche Einflüsse wurden in (Nerella 2018b, Mechtcherine 2019, Nerella 2019b) beschrieben. In Anbetracht dessen ist es angemessen, die Festigkeitsparameter des Schaumbetons direkt an den tatsächlich 3D-gedrukten Probekörpern zu bestimmen. Daher erfolgte die Ermittlung der Biegezug- und Druckfestigkeiten der entwickelten Schaumbetone direkt an 3D-gedruckten Schaumbetonprobekörpern (Abbildung 63).

(a) (b)

*Abbildung 63: Versuchsaufbauten für die Prüfung der (a) Biegezugfestigkeit und (b) Druckfestigkeit von 3D-gedruckten Schaumbetonprobekörpern*

Für die Biegezugfestigkeitsprüfung im Drei-Punkt-Biegeversuch wurden Probekörper mit den Abmessungen von ca. 160 x 40 x 14 mm$^3$ verwendet, für die Prüfung der Druckfestigkeit die Probenhälften aus den Biegezugversuchen. Als Belastungsfläche diente ein Stahlbolzen mit dem Durchmesser von 25 mm. Es wurden die Festigkeitsparameter aller 3D-gedrukten Schaumbetone ermittelt (siehe Anhang A.2). Hier wird exemplarisch nur die Rezeptur A2-M besprochen, deren Ergebnisse der Druck- und Biegezugversuche Abbildung 64 zusammenfasst.

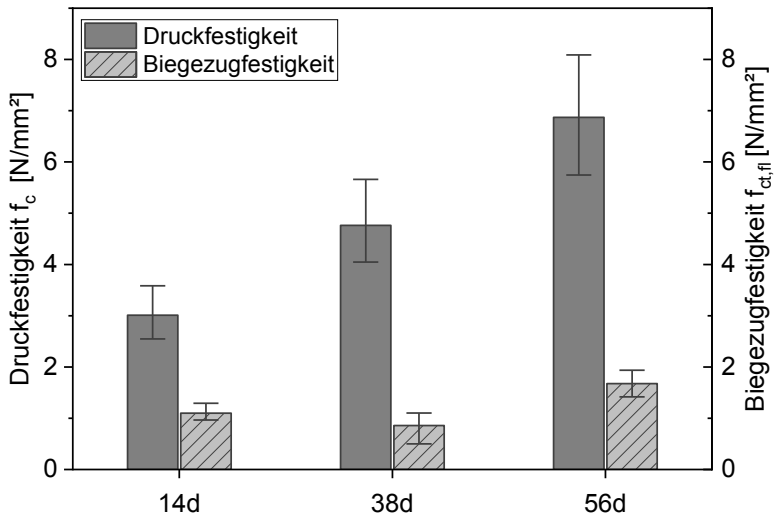



*Abbildung 64: Druck- und Biegezugfestigkeiten des 3D-gedruckten Schaumbetons A2-M in Abhängigkeit des Prüfalters*

Die Druckfestigkeit betrug 2,5 N/mm$^2$ im Alter von 14 Tagen und stieg auf 6,9 N/mm$^2$ im Alter von 56 Tagen. Die Biegezugfestigkeit nahm im gleichen Zeitraum von 1,0 auf 1,7 N/mm$^2$ zu. Die Ergebnisse liegen somit im Erwartungsbereich, der vom Institut für Baubetriebswesen für den mehrgeschossigen Wohnungsbau formuliert wurde (vgl. Abschnitt 2.1.2).

## 6.6 Wärmeleitfähigkeit der 3D-gedruckten Schaumbetone

Die Wärmeleitfähigkeit des entwickelten Schaumbetons wurde mit einem Wärmeübertragungsanalysator ISOMET 2104 (Applied Precision Ltd., Bratislava, Slowakei) gemessen. Diese Vorrichtung wendet ein dynamisches Messverfahren an, das eine sehr kurze Messdauer von etwa zehn bis 15 Minuten ermöglicht. Ein weiteres Alleinstellungsmerkmal des Gerätes ist die Möglichkeit, kleine Probekörper zu verwenden. Dies ermöglichte die Ermittlung des Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten λ unmittelbar an den 3D-gedruckten Schaumbetonprobekörpern. In Abbildung 65 ist der Versuchsaufbau zu sehen. Vor der Prüfung wurden Proben mit den Maßen 70 x 70 x 20 mm$^3$ aus den 3D-gedruckten Wänden herausgesägt und bis zur Massekonstanz im Trockenschrank bei 80 °C gelagert.

*Abbildung 65: Messung der Wärmeleitfähigkeit von 3D-gedruckten Schaumbetonprobekörpern*

Tabelle 33 führt die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsuntersuchung der Schaumbetone auf. Je Prüfung wurden mindestens drei Probekörper verwendet und die Wärmestrommessung erfolgte an beiden Seiten der Probekörper. Die angegebenen Werte der Wärmeleitfähigkeit sowie die korrespondierende Dichte stellen gemittelte Werte dar. Die Standardabweichung der Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeit blieb bei allen untersuchten Probekörpern kleiner als 0,04.

*Tabelle 33: Ergebnisse der Messung der Wärmeleitfähigkeit, Standardabweichung < 0,04*

| **Mischung** | **λ (W/mK)** | **Dichte (kg/m³)** |
|---|---|---|
| A1-S4 | 0,17 | 600 |
| A1-S | 0,24 | 960 |
| A2-M | 0,21 | 970 |
| A3-CN | 0,35 | 1230 |

Die Wärmeleitfähigkeit hängt allgemein stark von der Dichte des Festkörpers ab, was auch in der vorliegenden Versuchsserie festgestellt wurde. Die Zusammensetzung A1-S4 mit einer Dichte von 600 kg/m$^3$ weist die niedrigste Wärmeleitfähigkeit von 0,17 W/mK auf. Mit der Steigerung der Dichte auf bis zu 960 kg/m$^3$ steigt die Wärmeleitfähigkeit auf 0,24 W/mK bei A1-S. Weiterhin wird die Wärmeleitfähigkeit des Schaumbetons von der Art und Porenstruktur und dem Mikrogefüge beeinflusst. Ein Beispiel dafür ist Wärmeleitfähigkeit bei A2-M. Die Zugabe des Silikastaubes führte zur Erhöhung der Gefügedichte der Porenwände und somit zur Verbesserung des Widerstands gegen den Wärmestrom. Somit wies A2-M bei annährend gleicher Dichte wie A1-S einen besseren, d. h. niedrigeren, Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten von 0,21 W/mK auf. Demgegenüber betrug die Wärmeleitfähigkeit von A3-CN 0,35 W/mK, was der höchste Wert der Reihe ist. Dies liegt vor allem am deutlich niedrigen Verhältnis des Feststoffvolumens zum Porenraum in Vergleich zu den anderen Mischungszusammensetzungen. Obwohl die 3D-gedruckte Wand dieser Mischungsrezeptur eine mittlere Trockendichte von ca. 1000 kg/m$^3$ aufwies, wurde am lokal entnommenen Probekörper für die Wärmeleitfähigkeitsmessung die Dichte von 1230 kg/m$^3$ ermittelt.

Abbildung 66 vergleicht die Wärmeleitfähigkeiten der Schaumbetone A1-S und A1-S4 mit dem 3D-druckbaren normalschweren Beton V-1, der in (Nerella 2019a) detailliert beschrieben ist. Jener 3D-gedruckte hochfeste Beton mit einer Dichte von 2100 kg/m$^3$ hat eine Wärmeleitfähigkeit von 1,68 W/mK. Insofern wurde in der vorliegenden Studie eine Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit um bis zu 85 % bezogen auf die normalschwere Referenz erzielt.

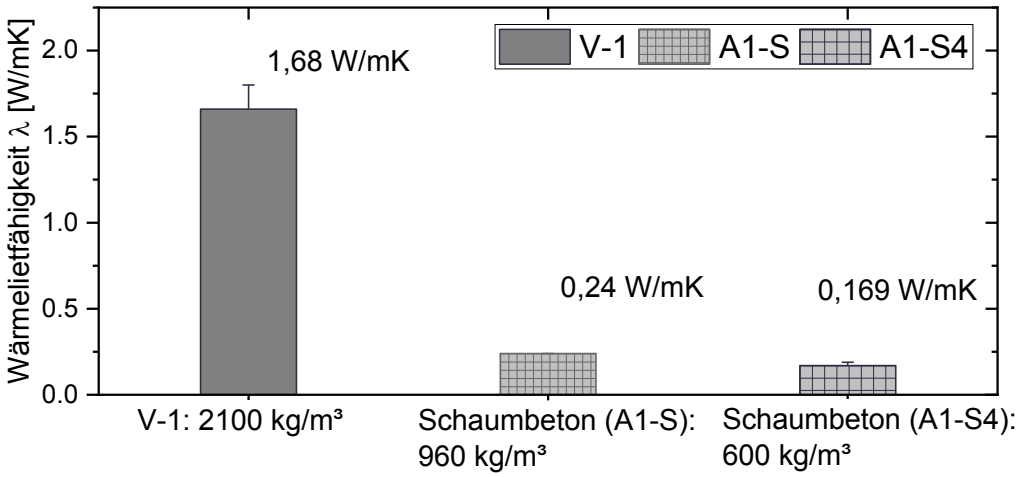



*Abbildung 66: Gegenüberstellung der Wärmeleitfähigkeit von 3D-gedrucktem normalschweren Beton und der entwickelten 3D-gedruckten Schaumbetone A1-S und A1-S4*

## 6.7 Formulierung von analytischen oder numerischen Ansätzen

Die Eigenschaften des Schaumbetons im Frischzustand haben einen primären Einfluss auf das Gelingen des mehrlagigen Schichtenaufbaus. Diese Eigenschaften können anhand unterschiedlicher Modellvorstellungen beschrieben werden. Die analytischen und numerischen Ansätze sind für die Vorhersage des Material- und Bauteilverhaltens besonders hilfreich. Die Quantifizierung des Strukturaufbaus des Schaumbetons während der Ruhezeit und des Strukturabbaus beim Fließen ist dabei von großer Relevanz (Roussel 2008). Die am häufigsten verwendeten Modelle für die Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der statischen Schergrenze $\tau_0(t)$ im Ruhezustand sind das lineare Modell von ROUSSEL (Roussel 2006) (Formel 4) und das exponentielle Modell von PERROT *et al.* (Perrot 2016).

*Formel 4: Rheologisches Modell nach Roussel (Roussel 2006), welches auch für 3D-druckbare zementgebundene Werkstoffe anwendbar ist*

$$\tau_0(t) = \tau_{0,0} + A_{thix} \cdot t$$

Dabei ist $A_{thix}$ die Strukturaufbaurate, welche die Zunahmegeschwindigkeit der statischen Fließgrenze definiert. In Abhängigkeit der Strukturaufbaurate $A_{thix}$ ist es zur Sicherstellung der Formstabilität möglich, das minimal zulässige Zeitintervall zwischen der Ablage von aufeinander folgenden Filamenten zu bestimmen. $\tau_{0,0}$ beschreibt die anfängliche Fließgrenze des Materials. Das Modell ermöglicht die Berechnung der Materialfließgrenze zu jedem beliebigen Zeitpunkt.

PERROT *et al.* beschreiben demgegenüber die Strukturaufbaurate als exponentielle Entwicklung (Perrot 2016) (Formel 5).

*Formel 5: Rheologisches Modell nach Perrot et al. (Perrot 2016), welches auch für 3D-druckbare zementgebundene Werkstoffe Anwendung findet*

$$\tau_0(t) = \tau_{0,0} + A_{thix} \cdot t_c(e^{t/t_c} - 1)$$

Dabei ist $\tau_{0,0}$ die anfängliche Fließgrenze des Materials vor dem Ausruhen und $t$ die Entlastungsphase (Ruhezeit). In diesem Materialmodell wird der Strukturaufbau bis zu einem bestimmten Zeitpunkt als linear betrachtet. Nach der Überschreitung der charakteristischen Zeit $t_c$ wird ein exponentieller Anstieg der Strukturaufbaurate, angetrieben durch Hydratation des Zements, vorhergesagt. Das Alleinstellungsmerkmal dieses Modells ist die Berücksichtigung des charakteristischen Zeitpunkts, an dem sich die Strukturaufbaurate von einer linearen zu einer exponentiellen Steigerung wandelt. Die genaue Ermittlung der charakteristischen Zeit $t_c$ benötigt jedoch umfangreiche und aufwendige experimentelle Untersuchungen.

Um die Angemessenheit der beiden Materialmodelle für die Beschreibung des Materialverhaltens von 3D-druckbarem Schaumbetonen zu prüfen, wurden in dieser Studie rheologische Untersuchungen zur Bestimmung der statischen Fließgrenze durchgeführt. Nach Ermittlung der statischen Fließgrenze zu verschiedenen Zeitpunkten nach der Wasserzugabe wurden die Einzelwerte als eine Funktion der Zeit aufgetragen. Daraus wurde anschließend die Strukturaufbaurate abgeleitet. Die zeitliche Entwicklung der statischen Fließgrenze der Mischungsrezeptur A1-S ist in Abbildung 67 dargestellt.

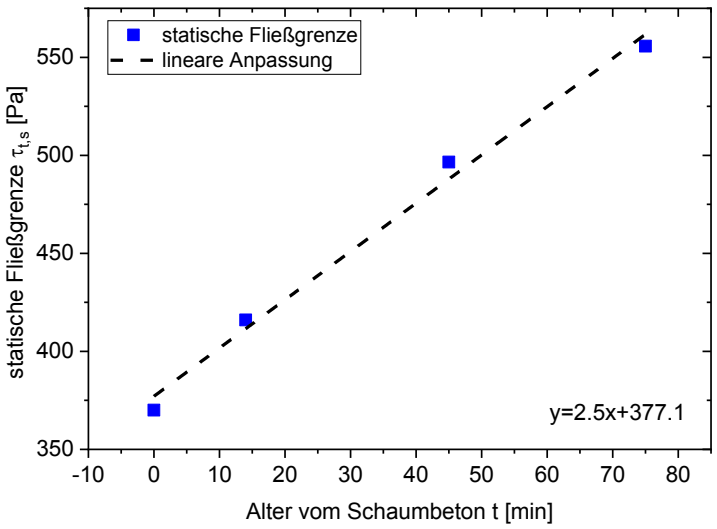



*Abbildung 67: Statische Fließgrenze vom Schaumbeton in Abhängigkeit vom Alter, Rezeptur A1-S*

Innerhalb des untersuchten Zeitraums zeigte die Mischungszusammensetzung A1-S in den ersten rund 80 min einen linearen Anstieg der statischen Fließgrenze und damit auch der Scherfestigkeit des Betons im frischen Zustand. Die Strukturaufbaurate betrug etwa 2,5 Pa/min. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Zusammensetzung des Schaumbetons diesen Parameter wesentlich beeinflusst. Daher wurde als nächster Schritt die Mischungszusammensetzung durch eine Zugabe von Silikastaub modifiziert (Mischungsrezeptur A2-M). Abbildung 68 stellt

die statischen Fließgrenzen von A2-M im Zeitverlauf dar, aus denen die Strukturaufbaurate $A_{thix}$ von rund 4,6 Pa/min ermittelt wurde. Dieser Wert ist deutlich höher als die Strukturaufbaurate des A1-S.

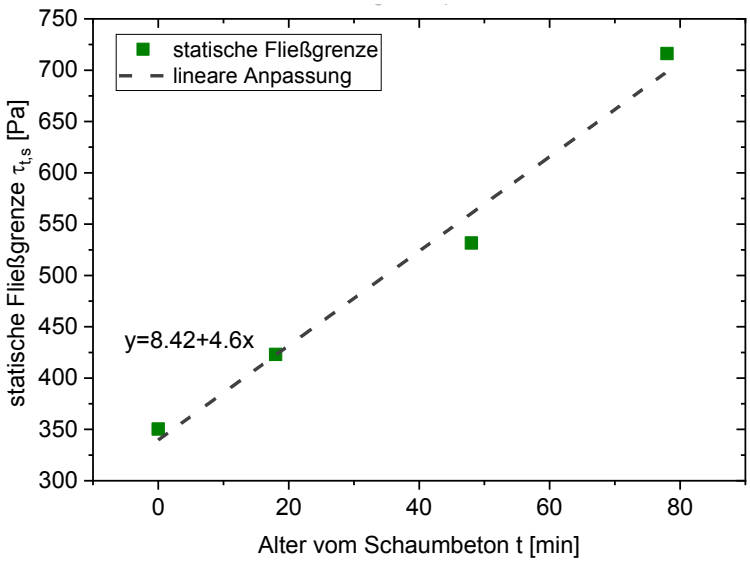



*Abbildung 68: Statische Schergrenze des Schaumbetons in Abhängigkeit vom Alter, Rezeptur A2-M*

Obwohl die anfängliche Fließspannung $\tau_0$ von 370 Pa bei der Mischung A1-1 höher als die anfängliche Fließspannung $\tau_0$ von 350,4 Pa der Mischung A2-M war, zeigte A2-M nach Ablauf von ca. 20 min einen beschleunigten Aufbau der inneren Struktur. Die Zugabe des Silikastaubes hat offensichtlich eine positive Wirkung im Hinblick auf die Rheologie des druckbaren Schaumbetons.

Im untersuchten Zeitraum zeigten beide Schaumbetone eine lineare Entwicklung der Strukturaufbaurate, was mit dem Modell von ROUSSEL im Einklang steht (Roussel 2006). Darüber hinausgehendes Verhalten wurde nicht getestet.

# 7 Literaturverzeichnis

ACI 523: “ACI 523.3R-14 Guide for cellular concretes above 50 lb/ft$^3$ (800 kg/m$^3$)”. American Concrete Institute 2014.

ACI CT-13: “ACI standard CT-13: Concrete terminology”. 78 S., letztes Abrufdatum online 08.07.2019.

Aercrete 2009: Aercrete Technology AB: “The Aercrete System”. Firmenprospekt, Bankeryd, 2009.

Aldridge 2005: D. Aldridge: “Introduction to foamed concrete: what, why, how?”. In: Use of foamed concrete in construction. ICE Publishing, 2005, pp. 1-14.

Amran 2015: Y. M. Amran, N. Farzadnia, A. A. A. Abang: “Properties and applications of foamed concrete; a review”. Construction and Building Materials 101 (2015) 990-1005.

An 2018: C. An: „Beton-3D-Druck: Funktionalität mit Building Inforamtion Modeling (BIM)“. Diplomarbeit, eingereicht am Institut für Baubetriebswesen, TU Dresden, 03.08.2018.

ASTM C796: Committee C09: “Test method for foaming agents for use in producing cellular concrete using preformed foam”. ASTM International, West Conshohocken, PA. 6 S., 2012, letztes Abrufdatum 19.03.2018.

Bagheri 2018: A. Bagheri, A. Samea: “Effect of air content on rheology of foamed concrete”. Magazine of Concrete Research (2018) 1-29.

Baublatt 2019: Internetquelle: https://www.baublatt.ch/baupraxis/aethiopien-stadtplanung-auf-dem-land, letztes Abrufdatum 08.08.2019.

Bauforumstahl 2013: Internetquelle: https://bauforumstahl.de/upload/documents/veranstaltungen/Praesentationen/1430_Siebers_Bau2013.pdf, letztes Abrufdatum 08.08.2019.

Beba 2017: beba Technology GmbH & Co. KG: “Nono-Food-Mixer BM”. Produktprospekt, Essen/Olenburg, 2017.

Beushausen 2005: H. D. Beushausen: “Long term performance of bonded concrete overlayers”. Dissertation, University of Capetown, 2005, 286 S.

Bing 2012: C. Bing, W. Zhen, L. Ning: “Experimental research on properties of high-strength foamed concrete”. Journal of Materials in Civil Engineering 24 (1) 113-118.

Blask 2002: O. Blask: „Zur Rheologie von polymermodifizierten Bindemittelleimen und Mörtelsystemen“. Dissertation, Universität-Gesamthochschule Siegen, 2002, 246 S.

Brady 2001: K. C. Brady, G. R. A Watts, M. R. Jones: “Specification for foamed concrete”. Project Record: TF 3/31 The use of foamed concrete as backfill, 2001, 65 pp. Online: https://trl.co.uk/sites/default/files/AG39.pdf, letztes Abrufdatum 21.07.2019.

Brameshuber 2004: W. Brameshuber: „Selbstverdichtender Beton“. Verlag Bau und Technik, Düsseldorf, 2004, 67 S.

Carrier 2003: V. Carrier, A. Colin: “Coalescence in draining foams”. Langmuir 19 (11) (2003) 4535-4538.

Chen 2013: B. Chen, N. Liu: “A novel lightweight concrete-fabrication and its thermal and mechanical properties”. Construction and Building Materials 44 (2013) 691-698.

Chen 2014: Chen, X.; Yan, Y.; Liu, Y. u. Hu, Z.: Utilization of circulating fluidized bed fly ash for the preparation of foam concrete. Construction and Building Materials 54 (2014) 137–146.

Chen 2017: J. Chen, M. Qiao, N. Gao, Q. Ran, S. Wu, S. Qi: “Sulfonic gemini surfactants: Synthesis, properties and applications as novel air entraining agents for concrete”. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 522 (2017) 593-600.

Dandc 2013: Internetquelle: https://www.dandc.eu/de/article/traditionelle-lehmhaeuser-ghana-sind-von-erosion-bedroht-das-verschlimmert-die-wohnungsnot, letztes Abrufdatum 08.08.2019.

DGUV 2017: Internetquelle: https://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/12728.pdf, letztes Abrufdatum 08.08.2019.

DGUV 2018: Internetquelle: https://www.dguv.de/de/zahlen-fakten/au-wu-geschehen/au-1000-vollarbeiter/index.jsp, letztes Abrufdatum 08.08.2019.

DIN 1045: Deutsches Institut für Normung e.V. and European Committee for Standardization: “DIN 1045-2:2008-08 Concrete, reinforced and prestressed concrete structures - Part 2: Concrete - Specification, properties, production and conformity - Application rules for DIN EN 206-1”. Beuth Verlag, August 2008, 62 S.

DIN 18202: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: „DIN 18202:2019-07 Toleranzen im Hochbau – Bauwerke, ICS 91.010.30“. Beuth Verlag, Juli 2019.

DIN EN 197: Deutsches Institut für Normung e.V.: „Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement; Deutsche Fassung EN 197-1:2000 + A1:2004“. Beuth Verlag, November 2011, 32 S.; letztes Abrufdatum 05.07.2019.

DIN EN 206: Deutsches Institut für Normung e.V. and European Committee for Standardization: “Concrete - Specification, performance, production and conformity; German version EN 206:2013+A1:2016”. Beuth Verlag, Januar 2017, 98 S.

Dreberis 2013: Internetquelle: https://www.dreberis.com/sites/default/files/projekty/factsheet_ghana_2013.pdf, letztes Abrufdatum 08.08.2019.

Elkem 2018: Elkem ASA: „Produktinformationsblatt Elkem Microsilica 971“., letztes Abrufdatum.Internetquelle: https://www.elkem.com/globalassets/silicon-materials/refractory/product-data-sheets/pds-ms971-october-2018.pdf, letztes Abrufdatum 21.07.2019.

EP1916915B1: „Verfahren und Vorrichtung zum Aufschäumen wenigstens eines flüssigen oder viskosen Stoffes“. Patentschrift 2006, Patentinhaber beba Mischtechnik GmbH, Essen/Oldenburg. 14 S.

Europa 2014: Internetquelle: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/images/3/30/Waste_generation_by_economic_activities_and_households%2C_2014_YB17-de.png, letztes Abrufdatum 08.08.2019.

Futurite 2016: Internetquelle: www.futurite.in/blog/glossary-23-terms-of-3d-printing, letztes Abrufdatum 08.08.2019.

Gabler 2019a: Internetquelle: https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/marktpotenzial-37387, letztes Abrufdatum 08.08.2019.

Gabler 2019b: Internetquelle: https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/nachhaltigkeit-41203, letztes Abrufdatum 08.08.2019.

Gabler 2019c: Internetquelle: https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/oekonomische-nachhaltigkeit-53449, letztes Abrufdatum 08.08.2019.

Gabler 2019d: Internetquelle: https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/soziale-nachhaltigkeit-53451, letztes Abrufdatum 08.08.2019.

Gertec 2016: GERTEC Maschinen- und Anlagenbau GmbH: „Schaumbetonmischer“. Produktprospekt, Waltenhofen, 2016.

Gertec 2017: GERTEC Maschinen- und Anlagenbau GmbH: „Entwicklungsgeschichte GERTEC CLC Technologie“. Firmenbekanntmachung, Waltenhofen, 2017.

Gtai 2019: Internetquelle: https://www.gtai.de/GTAI/Navigation/DE/Trade/Maerkte/Branchen/branchencheck,t=branchencheck--ghana-januar-2019,did=2213246.html, letztes Abrufdatum 08.08.2019.

Hajimohammadi 2017: A. Hajimohammadi, T. Ngo, P. Mendis: “Development of a strong foam for lightweight concrete applications”. In: ICCE-25, 25th Annual international conference on composites and nano, 2017, 8-11.

Hajimohammadi 2018: A. Hajimohammadi, T. Ngo, P. Mendis, P. (2018): “Enhancing the strength of pre-made foams for foam concrete applications”. Cement and Concrete Composites 87 (2018) 164-171.

Hill 2017: C. Hill, J. Eastoe: “Foams: From nature to industry”. Advances in Colloid and Interface Science 247 (2017) 496-513.

Holland 2015: T. C. Holland: “Silica fume user’s manual”. Technical report issued by Silica Fume Association and Federal Highway Administration 2015, 194 S.

India 2018: Internetquelle: https://www.india.com/news/india/modi-in-gujarat-pm-hails-pmay-scheme-says-he-dreams-of-every-family-owning-a-house-by-2022-3252078/, letztes Abrufdatum 08.08.2019.

Ingenieur 2016: Internetquelle: https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/3d-druck/das-buerogebaeude-3d-drucker-steht-in-dubai/, letztes Abrufdatum 08.08.2019.

Jones 2005: M. R. Jones, A. McCarthy: “Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material”. Magazine of Concrete Research 57 (1) (2005) 21-31.

Jones 2006: M. R. Jones, A. McCarthy: “Heat of hydration in foamed concrete: Effect of mix constituents and plastic density”. Cement and Concrete Research 36 (6) (2006) 1032-1041.

Jones 2015: M. R. Jones, A. McCarthy: “Behaviour and assessment of foamed concrete for construction applications”. In: Use of foamed concrete in construction. ICE Publishing, 2005, pp. 61-88.

Kearsley 2001: E. P. Kearsley, P. J. Wainwright: “The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete”. Cement and Concrete Research 31 (1) (2001) 105-112.

Kearsley 2002: E. P. Kearsley, P. J. Wainwright: “Ash content for optimum strength of foamed concrete”. Cement and Concrete Research 32 (2): 241-246.

Kearsley 2015: E. P. Kearsley, H. F. Mostert: “Designing mix composition of foamed concrete with high fly ash contents”. In: Use of foamed concrete in construction. ICE Publishing, 2005, pp. 29-36.

Krause 2019: M. Krause, J. Otto: „Digitales Prozessmodell beim Beton-3D-Druck“. Bauingenieur 94 (5) (2019) 171-178.

Kuntze 2018: K. Kuntze: „Internationale Marktanalyse zu CONPrint3D®“. Diplomarbeit, eingereicht am Institut für Baubetriebswesen, TU Dresden, 16.08.2018.

Leal da Silva 2017: W. R. Leal da Silva: “3D concrete printing - from material design to extrusion”. Presentation slides retrieved from Danish Technological Institute website: https://www.dti.dk/projects/3d-printed-buildings/36993, 2017, letztes Abrufdatum: 03.07.2019.

Maiervidorno 2016: Internetquelle: https://www.maiervidorno.de/gute-aussichten-fur-indiens-bauindustrie/, letztes Abrufdatum 08.08.2019.

Maiervidorno 2017: Internetquelle: https://www.maiervidorno.de/die-indische-bauindustrie-wachstum-durch-innovative-technologien/, letztes Abrufdatum 08.08.2019.

Mechtcherine 2019: V. Mechtcherine, V. N. Nerella: „Beton-3D-Druck durch selektive Ablage“. Beton- und Stahlbetonbau 114 (1) (2019) 24-32.

Mohammad 2011: M. Mohammad: “Development of foamed concrete enabling and supporting design”. Dissertation. University of Dundee, Scotland, 2011. 260 S.

Moro 2001: A. Moro, C. Gatti, N. Delorenzi: “Hydrophobicity of whey protein concentrates measured by fluorescence quenching and its relation with surface functional properties”. Journal of agricultural and food chemistry 49 (10) (2001) 4784-4789.

Nachhaltigkeit 2015: Internetquelle: https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/soziale_nachhaltigkeit_1935.html, letztes Abrufdatum 08.08.2019.

Nambiar 2006: E. K. Nambiar, K. Ramamurthy: “Influence of filler type on the properties of foam concrete”. Cement and Concrete Composites 28 (5) (2006) 475-480.

Nerella 2018a: V. N. Nerella, M. A. B. Beigh, S. Fataei, V. Mechtcherine: “Strain-based approach for measuring structural build-up of cement pastes in the context of digital construction”. Cement and Concrete Research 115 (2018) 530-544.

Nerella 2018b: V. N. Nerella, V. Markin, S. Hempel, V. Mechtcherine: “Characterising bond between concrete layers resulting of extrusion-based digital construction”. In: 1st International conference on concrete and digital fabrication, Digital Concrete 2018 – Zurich, Switzerland, p. 115.

Nerella 2019a: V. N. Nerella, M. Näther, A. Iqbal, M. Butler, V. Mechtcherine: “Inline quantification of extrudability of cementitious materials for digital construction”. Cement and Concrete Composites 95 (2019) 260-270.

Nerella 2019b: V. N. Nerella, S. Hempel, V. Mechtcherine: “Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing”. Construction and Building Materials 205 (2019) 586-601.

Neville 2008: A. M. Neville, J. J. Brooks: “Concrete technology”. Pearson Education Ltd., Harlow, England, 2008,. 460 S.

Neville 2011: A. M. Neville: “Properties of concrete”. Pearson Education Limited, Harlow (Essex, England), 5th ed. 2011, 1 p.

Ogura 2018: H. Ogura, V. N. Nerella, V. Mechtcherine: “Developing and testing of strain-hardening cement-based composites (SHCC) in the context of 3D-printing”. Materials (Basel, Switzerland) 11 (8) (2018), paper-ID 1375, 11 pp.

Okamura 1995: H. Okamura, K. Maekawa, K. Ozawa: “Development of self-compacting high performance concrete”. Doboku Gakkai Ronbunshu (522) (1995) 23-26.

Okamura 2003: H. Okamura, M. Ouchi: “Self-compacting concrete”. Journal of Advanced Concrete Technology 1 (1) (2003) 5-15.

Ozawa 1992: K. Ozawa, K. Maekawa, H. Okamura: “Development of high performance concrete”. Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo 3 (1992) 381-439.

Panesar 2013: D. K. Panesar: “Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents”. Construction and Building Materials 44 (2013) 575-584.

Perrot 2016: A. Perrot, D. Rangeard, A. Pierre: “Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques”. Materials and Structures 49 (4) (2016) 1213-1220.

Portalafrika 2019: Internetquelle: http://www.portalafrika.de/news-detailansicht/news/detail/News/branche-kompakt-ghanas-bauwirtschaft-steuert-auf-flaute-zu/, letztes Abrufdatum 08.08.2019.

Prins 1998: A. Prins, M. A. Bos, F. J. G. Boerboom, H. K. A. I. van Kalsbeek: “Relation between surface rheology and foaming behaviour of aqueous protein solutions”. Studies in Interface Science 7 (1998) 221-265.

Ramamanrthy 2009: K. Ramamurthy, E. K. Kunhanandan Nambiar, G. Indu Siva Ranjani: “A classification of studies on properties of foam concrete”. Cement and Concrete Composites 31 (6) (2009) 388-396.

Ranjani 2010: G. I. S. Ranjani, K. Ramamurthy: “Analysis of the foam generated using surfactant sodium lauryl sulfate”. International Journal of Concrete Structures and Materials 4 (1) (2010) 55-62.

Richway 2015: Richway Industries Ltd.: “Crete Foamer CT-100D”. Produktinformation, Janesville, 2015.

Rio 2014: E. Rio, W. Drenckhan, A. Salonen, D. Langevin: “Unusually stable liquid foams”. Advances in Colloid and Interface Science 205 (2014) 74-86.

Roslan 2012: A. F. Roslan, H. Awang, M. A. O. Mydin: “Effects of various additives on drying shrinkage, compressive and flexural strength of lightweight foamed concrete (LFC)”. Advanced Materials Research 626 (2012) 594-604.

Roussel 2006: N. Roussel: “A thixotropy model for fresh fluid concretes. Theory, validation and applications”. Cement and Concrete Research 36 (10) (2006) 1797-1806.

Roussel 2008: N. Roussel, F. Cussigh: “Distinct-layer casting of SCC: The mechanical consequences of thixotropy”. Cement and Concrete Research 38 (5) (2008) 624-632.

Roussel 2018: N. Roussel: “Rheological requirements for printable concretes”. Cement and Concrete Research 112 (2018) 76-85.

Saint-Jalmes 2005: A. Saint-Jalmes, M.-L. Peugeot, H. Ferraz, D. Langevin: “Differences between protein and surfactant foams: Microscopic properties, stability and coarsening”. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 263 (1-3) (2005) 219-225.

Sathy Narayanan 2012: J. Sathya Narayanan, K. Ramamurthy: “Identification of set-accelerator for enhancing the productivity of foam concrete block manufacture”. Construction and Building Materials 37 (2012) 144-152.

Schach 2017: R. Schach, M. Krause, M. Näther, V. N. Nerella: „CONPrint3D: Beton-3D-Druck als Ersatz für den Mauerwerksbau“. Bauingenieur 92 (9) (2017) 355-363.

Schmitt 2001: R. Schmitt: „Die Schalungstechnik – Systeme, Einsatz und Logistik“. Ernst Verlag, Berlin, 2001, 701 S.

Schneider Bautab: K. J. Schneider: „Bautabellen für Ingenieure, Hrsg. A. Albert“. 23. Überarbeitete Auflage, Verlag Bundesanzeiger, Köln, 2018. ISBN: 978-3-8462-0880-9.

SEW 2011: SEW Eurodrive: “Betriebsanleitung MOVITRAC® LTE-B (01)”. SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG, Bruchsal, 72 S. Internetquelle: https://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/16923618.pdf, letztes Abrufdatum 13.08.2019.

Siva 2017: M. Siva, K. Ramamurthy, R. Dhamodharan: “Development of a green foaming agent and its performance evaluation”. Cement and Concrete Composites 80 (2017) 245-257.

Statista 2019a: Internetquelle: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1065/umfrage/verbraucherpreisindex-wohnungsmiete-nebenkosten/, letztes Abrufdatum 08.08.2019.

Statista 2019b: Internetquelle: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/368357/umfrage/bruttoinlandsprodukt-bip-von-ghana/, letztes Abrufdatum 08.08.2019.

Steag 2017: Internetquelle: https://www.steag.com/de/modalcontent/02-leistung/kraftwerke-deutschland/heizkraftwerk-herne/, letztes Abrufdatum 05.07.2019.

Sun 2011: H. Y. Sun, A. M. Gong, Y. L. Peng, X. Wang: "The study of foamed concrete with polypropylene fiber and high volume fly ash". Applied Mechanics and Materials 90-93 (2011) 1039-1043.

SWP 2017: Internetquelle: https://www.swp.de/politik/inland/mietsteigerung-in-deutschland_-staedte-als-beute-24417270.html, letztes Abrufdatum 08.08.2019.

Tagesspiegel 2017: Internetquelle: https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/interaktive-mietpreiskarte-wo-die-mietpreise-am-staerksten-steigen/19632040.html, letztes Abrufdatum 08.08.2019.

Tam 1987: C. T. Tam, T. Y. Lim, R. S. Ravindrarajah, S. L. Lee: "Relationship between strength and volumetric composition of moist-cured cellular concrete". Magazine of Concrete Research 39 (139) (1987) 12-18.

Tan 2014: X. Tan, W. Chen, Y. Hao, X. Wang: "Experimental study of ultralight (<300 kg/m$^3$) foamed concrete". Advances in Materials Science and Engineering 2014, iss. 8, p. 1-7.

Tarasov 2010: A. S. Tarasov, E. P. Kearsley, A. S. Kolomatskiy, H. F. Mostert: "Heat evolution due to cement hydration in foamed concrete". Magazine of Concrete Research 62 (12) (2010) 895-906.

Tikalsky 2004: P. J. Tikalsky, J. Pospisil, W. MacDonald: "A method for assessment of the freeze–thaw resistance of preformed foam cellular concrete". Cement and Concrete Research 34 (5) (2004) 889-893.

Uelzener 2011: Uelzener Maschinen GmbH: „UELZENER S64E-SCH-2". Produktprospekt, Rüsselsheim, 2011.

UmweltBA 2018: Internetquelle: https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/abfallaufkommen#textpart-1, letztes Abrufdatum 08.08.2019.

Wei 2014: S. Wei, Z. Yunsheng, M. R. Jones: "Using the ultrasonic wave transmission method to study the setting behavior of foamed concrete". Construction and Building Materials 51 (2014) 62-74.

Wessig 1998: J. Wessig: „KS-Maurerfibel". Verlag Bau + Technik, 6., aktualisierte Auflage, Düsseldorf, 1998, 223 S., ISBN 3764003561.

Yang 2015: K.-H. Yang, K.-H. Lee: "Tests on high-performance aerated concrete with a lower density". Construction and Building Materials 74 (2015) 109-117.

Zhihua 2007: P. Zhihua, H. Fujiwara, W. Tionghuan: “Preparation of high performance foamed concrete from cement, sand and mineral admixtures”. Journal of Wuhan University of Technology – Matererials Science Edition 22 (2) (2007) 295-298.

ZukunftBau 2017: Endbericht Forschungsinitiative Zukunft Bau – Wissenschaftliche Begleitung der Arbeitsgruppe „Modul D“ des Runden Tisches Nachhaltiges Bauen, 2017, online erhältlich unter: https://www.bbr.bund.de/BBSR/DE/FP/ZB/Auftragsforschung/2NachhaltigesBauenBauqualitaet/2016/runder-tisch-modul-d/endbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=3

Zulkurnain 2011: F. Zulkarnain, M. Ramli: “Durability of performance foamed concrete mix design with silica fume for housing development”. Journal of Materials Science and Engineering 5 (2011) 518-527.

# Anhang

## A.1 Qualität des Schaumes

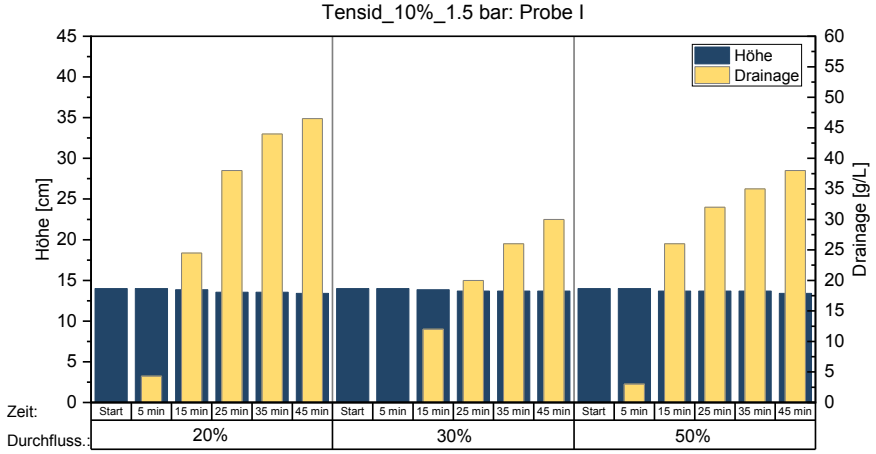



*Abbildung 69: Stabilität des tensidbasierten Schaumes mit einer 10 %igen Lösung des Schaumkonzentrates SK155; Drucklufthöhe 1,5 bar*

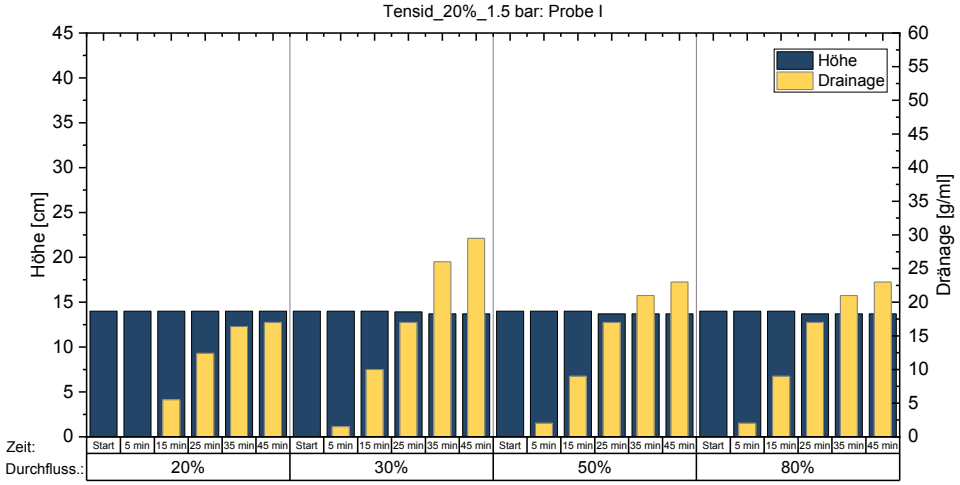



*Abbildung 70: Stabilität des tensidbasierten Schaumes mit einer 20 %igen Lösung des Schaumkonzentrates SK155; Drucklufthöhe 1,5 bar*

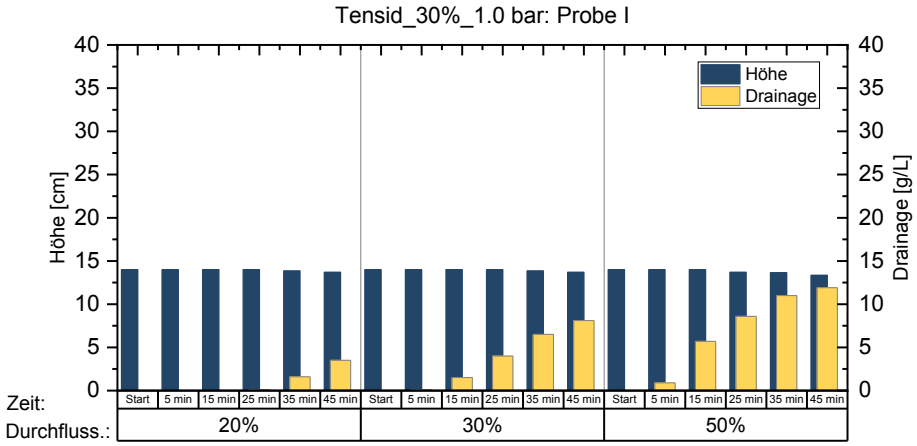


*Abbildung 71: Stabilität des tensidbasierten Schaumes mit einer 30 %igen Lösung des Schaumkonzentrates SK155; Drucklufthöhe 1,0 bar*

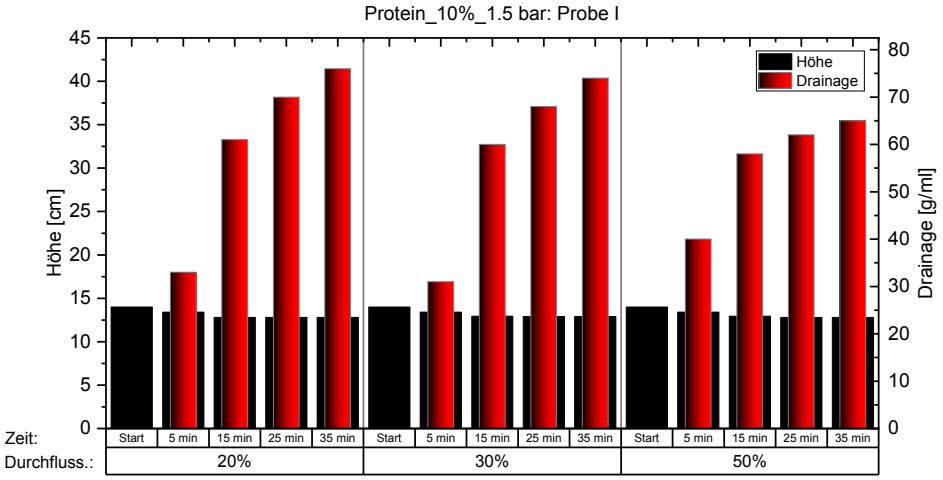



*Abbildung 72: Stabilität des proteinbasierten Schaumes mit einer 10 %igen Lösung des Schaumkonzentrates Oxal PLB6; Drucklufthöhe 1,5 bar*

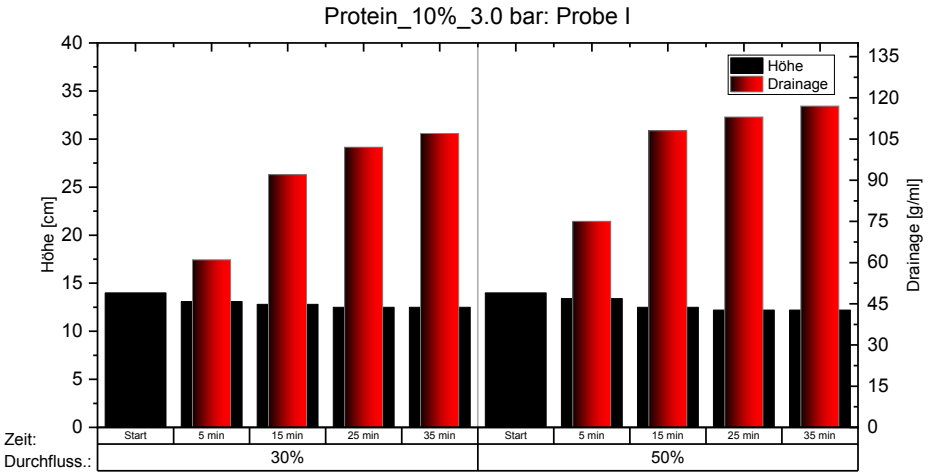



*Abbildung 73: Stabilität des proteinbasierter Schaumes mit einer 10 %igen Lösung des Schaumkonzentrates Oxal PLB6, Drucklufthöhe 3,0 bar*

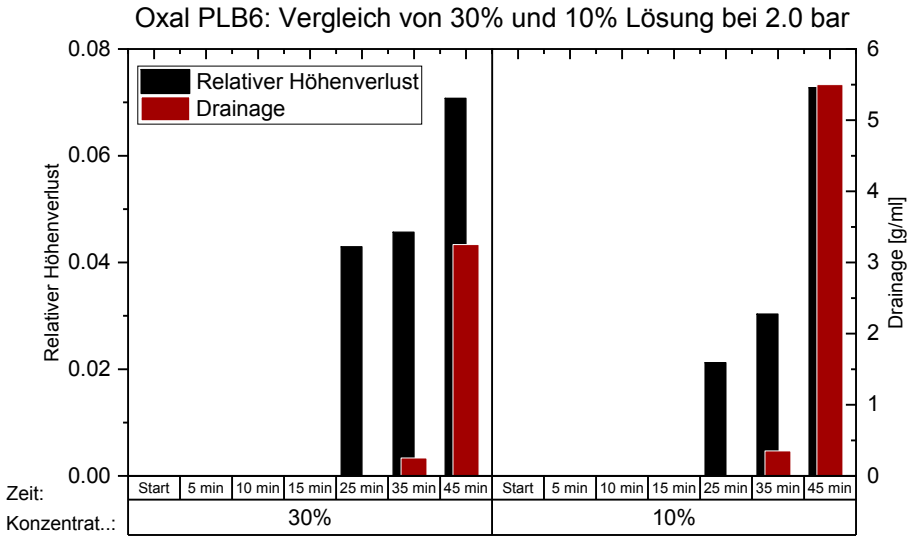


*Abbildung 74: Gegenüberstellung der 30 %igen und 10 %igen Lösung des proteinbasierten Schaumes, hergestellt mit Drucklufthöhe 2,0 bar*

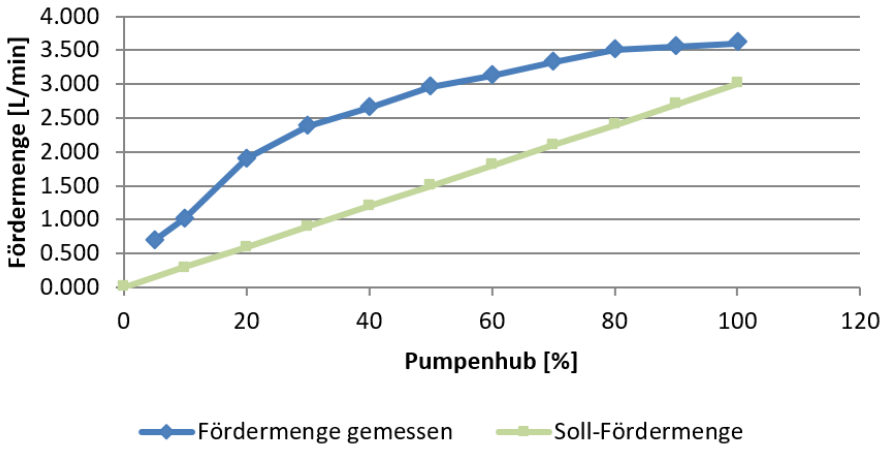



*Abbildung 75: Fördermenge des Schaumgenerators*

## **A.2** Mechanische Eigenschaften

*Tabelle 34: Druck- und Biegezugfestigkeit von gedruckten Schaumbetonprobekörpern*

| Mischung | Prüfalter [Tage] | Druckfestigkeit N/mm$^2$] | Standardabweichung | Prüfalter [Tage] | Biegezugfestigkeit [N/mm$^2$] | Standardabweichung |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A1-S | 39 | 5,0 | 1,3 | 38 | 1,10 | 0,11 |
| A1-S4 | 28 | 0,2 | - | 28 | 0,01 | - |
| A2-M | 38 | 4,8 | 0,2 | 38 | 1,03 | 0,07 |
| A3-CN | 38 | 8,3 | 0,3 | 32 | 1,34 | 0,00 |

## **A.3** Zusätzliche Informationen

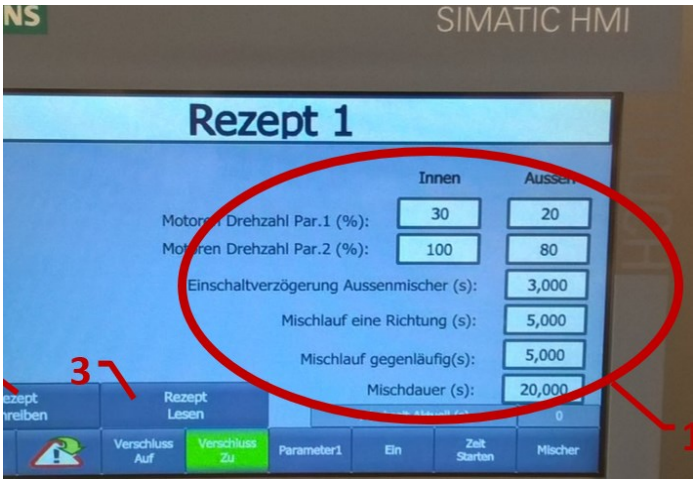



*Abbildung 76: Einstellung der Parameter beim Konusmischer Kniele KKN30: 1) Parametersatz, 2) angezeigten Rezeptparametersatz in Mischerparameter laden, 3) aktuellen Mischerparametersatz in Rezept einlesen*

*Tabelle 35: Untersuchungsprogramm zur Bestimmung des optimalen Mischprotokolls*

| | **Paramater 1 (P1)** | | **Paramater 2 (P2)** | |
|---|---|---|---|---|
| ***Regime*** | **Innen*** | **Außen*** | **Innen*** | **Außen*** |
| *R1* | 50 | 50 | 100 | 80 |
| | 50 | 90 | 100 | |
| | 90 | 50 | | |
| | 90 | 90 | | |
| *R2* | 50 | 50 | 100 | |
| | 50 | 90 | | |
| | 90 | 50 | | |
| | 90 | 90 | | |
| *R3* | 50 | 50 | 100 | |
| | 50 | 90 | | |
| | 90 | 50 | | |
| | 90 | 90 | | |
| Insgesamt: | **16 Untersuchungen** | | | |

* In Prozent der maximalen Motorleistung

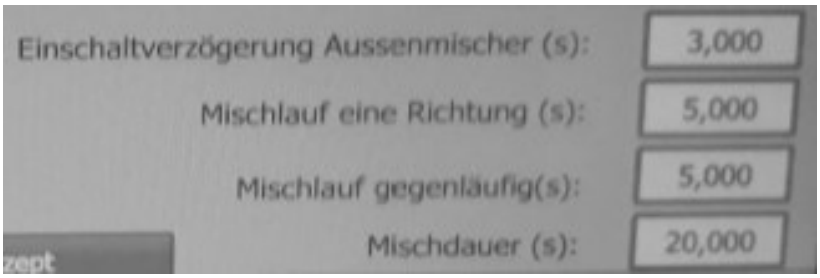



*Abbildung 77: Standardeinstellung des Mischers, Mischprotokoll R1*

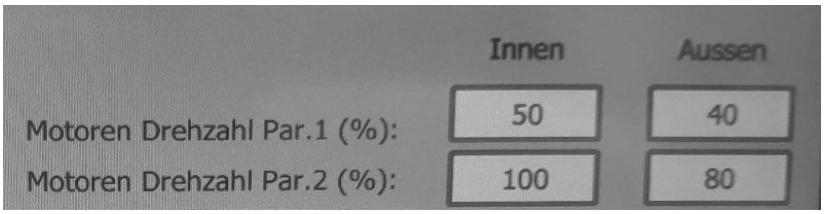



*Abbildung 78: Standardeinstellung des Mischers, Leistung von Innen- und Außenmotor*