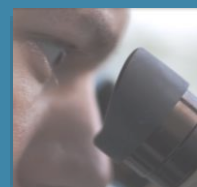
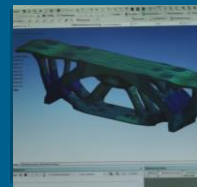


Dissertation 2022

Daniel Nyman

# Analyse von Einflussfaktoren zur Entwicklung eines angepassten zementgebundenen Werkstoffes zum 3D-Drucken von Beton im 3D-Pulverdruckverfahren



**Analyse von Einflussfaktoren zur Entwicklung  
eines angepassten zementgebundenen  
Werkstoffes zum 3D-Drucken von Beton im  
3D-Pulverdruckverfahren**

Vom Fachbereich  
Bauingenieurwesen  
der Technischen Universität Kaiserslautern  
zur Verleihung des akademischen Grades

**DOKTOR-INGENIEUR (Dr.-Ing.)**

genehmigte

**DISSERTATION**

von

**Daniel Nyman, M. Eng.**

aus Frankfurt am Main

Dekan:	Prof. Dr.-Ing. Hamid Sadegh-Azar
Prüfungsvorsitz:	Prof. Dr.-Ing. habil. C. Vrettos
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. W. Breit
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. G. Kapteina
3. Berichterstatter:	Prof. Dipl.-Ing. D. Bayer
Tag der mündlichen Prüfung:	22.09.2022

Kaiserslautern 2022

(DE 386)



Daniel Anthony Eduard Nyman

**Analyse von Einflussfaktoren für die Entwicklung  
eines angepassten zementgebundenen  
Werkstoffes zum 3D-Drucken von Beton im  
3D-Pulverdruckverfahren**



## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit wurde während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen der Technischen Universität Kaiserslautern angefertigt.

Für die besondere Zeit am Fachgebiet, die konstruktive Zusammenarbeit in der Forschung sowie für die Unterstützung im Laufe meiner Promotionstätigkeit möchte ich mich insbesondere bei folgenden Personen bedanken.

Ich möchte meinem Doktorvater, Herrn Professor Dr.-Ing. Wolfgang Breit, für seine menschlich und fachlich herausragende Betreuung, freundliche Überlassung des Themas sowie für sein großes Vertrauen und die Zuversicht, die er mir entgegengebracht hat, besonders danken. Durch seine langjährige Expertise hat er wertvolle Anregungen sowie Korrekturen einfließen lassen und diese Arbeit in vielerlei Hinsicht erst ermöglicht.

Bei Herrn Dr. rer. nat. Joachim Schulze sowie Herrn Robert Adams möchte ich mich besonders für die stets konstruktive Kritik und die Bereitschaft, jederzeit Fragen und Probleme zur Arbeit mit mir zu diskutieren, bedanken.

Des Weiteren bedanke ich mich bei allen studentischen Hilfskräften für ihre tatkräftige Unterstützung bei den Versuchsserien sowie bei allen Kolleginnen und Kollegen des Fachgebiets Werkstoffe im Bauwesen für die wundervolle Zeit in Kaiserslautern. Außerdem danke ich allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Mechanische Verfahrenstechnik und des Lehrstuhls für Thermische Verfahrenstechnik, die mich bei unterschiedlichen Analysen unterstützt haben.

Insbesondere gilt mein Dank Herrn Karl Leidner, der mir mithilfe seiner Erfahrung bei der Konzipierung verschiedener Projekte stets mit Rat und Tat zur Seite stand sowie Frau Carolin Anders und Frau Sara Blietschau für ihre konstruktiven Anregungen beim Korrekturlesen dieser Dissertation.

Nicht zuletzt möchte ich Familie Anders, Familie Nyman sowie meinen Freunden und all jenen herzlich danken, die mich unermüdlich motiviert und mir den Rücken freigehalten haben.

Kaiserslautern, im März 2021

Daniel Nyman



# **Inhalt**

<b>Vorwort</b>	<b>i</b>
<b>Inhalt</b>	<b>iii</b>
<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b>	<b>vii</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Forschungsgegenstand	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	4
<b>2 Grundlagen</b>	<b>6</b>
2.1 Einleitung	6
2.2 Additive Fertigungstechniken	6
2.2.1 Allgemeines	6
2.2.2 Beschreibung des Produktionsprozesses im Allgemeinen	9
2.2.3 Aktuelle Betondrucktechnologien im Vergleich	13
2.2.3.1 Allgemeines	13
2.2.3.2 Contour Crafting Verfahren	14
2.2.3.3 Shotcrete 3D Printing Verfahren	17
2.2.3.4 3D-Pulverdruckverfahren	19
2.2.4 Auflösung der Modelldarstellung beim 3DP-Verfahren	21
2.3 Beschreibung der verwendeten Werkstoffe	25
2.3.1 Allgemeines	25
2.3.2 Zement	25
2.3.3 Silicastaub	30
2.3.4 Gesteinskörnung	32
2.3.5 Bindemittelflüssigkeit	34
2.4 Hydratation des Zements	37
2.4.1 Allgemeines	37
2.4.2 Prä-Induktionsperiode	38
2.4.3 Induktionsperiode	39
2.4.4 Accelerationsperiode	39
2.4.5 Post-Accelerationsperiode	40
2.4.6 Stetige Periode	41



2.4.7	Porenstruktur und Wasseranspruch	43
2.5	Pulveranalyse	50
2.5.1	Packungsdichte	50
2.5.2	Fließfähigkeit	52
2.5.3	Korngrößenverteilung	54
2.5.4	3DP-Standfestigkeit	55
<b>3</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen</b>	<b>57</b>
3.1	Allgemeines	57
3.2	Vorgehensweise	58
3.2.1	Allgemeines	58
3.2.2	Herstellungsprozess	60
3.2.3	Probekörper	64
3.2.4	Untersuchungsmethoden	66
3.2.4.1	Pulveranalyse	66
3.2.4.2	Flüssigkeitsanalyse	75
3.2.4.3	Additive Fertigungsparameter beim 3D-Pulverdruckverfahren	80
3.2.4.4	Festbetonuntersuchungen	87
3.3	Einfluss des Zementanteils	90
3.3.1	Allgemeines	90
3.3.2	Versuchsprogramm	90
3.3.1	Versuchsergebnisse und Auswertung	94
3.3.1.1	Pulveranalyse	94
3.3.1.2	Flüssigkeitsanalyse	97
3.3.1.3	AF-Parameter	100
3.3.1.4	Festbetonuntersuchungen	104
3.4	Einfluss des Klinkerfeinmehlanteils	107
3.4.1	Allgemeines	107
3.4.2	Versuchsprogramm	107
3.4.3	Versuchsergebnisse	110
3.4.3.1	Pulveranalyse	110
3.4.3.2	Flüssigkeitsanalyse	114
3.4.3.3	AF-Parameter	117
3.4.3.4	Festbetonuntersuchungen	120
3.5	Einfluss des Silicastaubanteils	123
3.5.1	Allgemeines	123
3.5.2	Versuchsprogramm	123
3.5.3	Versuchsergebnisse und Auswertung	125
3.5.3.1	Pulveranalyse	125
3.5.3.2	Flüssigkeitsanalyse	129

3.5.3.3	AF-Parameter	131
3.5.3.4	Festbetonuntersuchungen	134
3.6	Einfluss der Gesteinskörnung und der Belastungsrichtung	138
3.6.1	Allgemeines	138
3.6.2	Versuchsprogramm	138
3.6.3	Versuchsergebnisse und Auswertung	140
3.6.3.1	Pulveranalyse	140
3.6.3.2	Flüssigkeitsanalyse	143
3.6.3.3	AF-Parameter	144
3.6.3.4	Festbetonuntersuchungen	146
3.7	Einfluss des Wasser-Zement-Wertes	152
3.7.1	Allgemeines	152
3.7.2	Versuchsprogramm	152
3.7.3	Versuchsergebnisse und Auswertung	154
3.7.3.1	Pulveranalyse	154
3.7.3.2	Flüssigkeitsanalyse	154
3.7.3.3	AF-Parameter	155
3.7.3.4	Festbetonuntersuchungen	157
3.8	Analyse der Festigkeitsentwicklung	163
3.8.1	Allgemeines	163
3.8.2	Versuchsprogramm	163
3.8.3	Versuchsergebnisse und Auswertung	165
3.8.3.1	AF-Parameter	165
3.8.3.2	Festbetonuntersuchungen	165
<b>4</b>	<b>Ergebnissynthese</b>	<b>168</b>
4.1	Allgemeines	168
4.2	Herstellungskonzept	168
4.3	Eigenschaften des 3D-gedruckten Betons	175
<b>5</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>178</b>
5.1	Fazit	178
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>183</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>195</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>201</b>
	<b>Anhang</b>	<b>202</b>
	<b>Lebenslauf</b>	<b>211</b>



## **Formelzeichen und Abkürzungen**

Nicht aufgeführte Zeichen werden im Kontext erläutert.

- Allgemeine Abkürzungen:

<b>Abkürzung</b>	<b>Bezeichnung</b>
3DP	3D-Pulverdruck / 3D-Printing
A	Auflagefläche
$\alpha$	Hydratationsgrad-Faktor
AF	Additive Fertigung
AM	Additive Manufacturing
b	Breite des Querschnittes
BIM	Building Information Model
CAD	Computer-Aided-Design
CAM	Computer-Aided-Manufacturing
CC	Contour Crafting
CNC	Computerized-Numerical-Control
Ca/Si	Calcium/Silicium
$\delta_w$	Dichte des Wassers
$\delta_z$	Rohdichte des Zements
DLP	Digital Light Processing
DMA	Dichtemessapparatur
dpi	Dots per Inch
E-Modul	Elastizitätsmodul
EBM	Electron Beam Melting
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
F	Maximale Belastung oder Festigkeitsentwicklung
$ff_c$	Fließfähigkeit
FLM	Fused Layer Modelling
G	Schubmodul
GK	Gesteinskörnung
h	Höhe des Querschnittes
H	Hausner-Faktor

HP/GL	Hewlett-Packard-Graphics-Language
K	Klinkerfeinmehl oder Kompressionsmodul
$K_I$	Kompressibilitätsindex
l	Abstand zwischen den Auflagerrollen
LBM	Laser Beam Melting
LLM	Layer Laminated Manufacturing
LS	Laser Sintering
MJM	Multi-Jet Modelling
$m_C$	Masse des Compounds
$m_K$	Masse des Kornhaufwerks
$m_{KI}$	Masse des Klinkerfeinmeihls
$m_L$	Masse des Bindemittelflüssigkeitsbedarfs bei Sättigung
$m_W$	Masse des Wassers
$m_Z$	Masse des Zements
n	Konstante
$n_L$	Bindemittelflüssigkeitsanspruch
p	Volumenanteil der Poren
$P_{KI}$	Prozentuale Menge des Klinkerfeinmeihls
$P_W$	Prozentuale Menge des Wassers
$P_Z$	Prozentuale Menge des Zements
PFT	Powder Flow Tester
ppi	Pixel per Inch
PJM	Poly-Jet Modelling
$\rho_C$	Schüttdichte des verwendeten Compounds
$\rho_K$	Schüttdichte des Kornhaufwerks
$\rho_L$	Dichte der Bindemittelflüssigkeit
$\rho_{sch}$	Schüttdichte
$\rho_{st}$	Stampfdichte
REM	Rasterelektronenmikroskop
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
RM	Rapide Manufacturing
RP	Rapide Prototyping
s	Silicastaub

SC3DP	Shotcrete 3D Printing Verfahren
$\sigma$	Druckfestigkeit
$\sigma_0$	Festigkeit des porenfreien Zements
$\sigma_1$	Verfestigungsspannung
$\sigma_c$	Schüttgutfestigkeit bzw. Uniaxiale Druckfestigkeit
$\sigma_{ct,f}$	Biegezugfestigkeit
$\sigma_{LG}$	Oberflächenspannung der Flüssigkeit zum umgebenden Gas
$\sigma_{SG}$	Oberflächenenergie des Festkörpers zum umgebenden Gas
$\sigma_{SL}$	Grenzflächenenergie zwischen Festkörper und Flüssigkeit
SL	Stereolithography
STL	Surface-Tessellation-Language
$\theta$	Kontaktwinkel
TTS	Thermo-transfer Sintering
$\nu$	Querkontraktionszahl
$V_K$	Volumenanteil aus Kapillarporen oder des Kornhauwerks
$V_L$	Volumen des Bindemittelflüssigkeitsbedarfs bei Sättigung
$V_P$	Volumen des Probekörpers
$V_{Z+G}$	Volumenanteil aus hydratisiertem Zement inkl. Gelporen
w/z	Wasser/Zement
z	Zement

• Chemische Abkürzungen und Formeln

<b>Abkürzung</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Formel</b>
A	Aluminiumoxid	$Al_2O_3$
$\gamma$ -AH <sub>3</sub>	Aluminiumhydroxid (Gibbsit)	$Al(OH)_3$
C	Calciumoxid (Freikalk)	CaO
C <sub>3</sub> A	Tricalciumaluminat (Aluminat)	$3 CaO \cdot Al_2O_3$
C <sub>4</sub> AF	Tetracalciumaluminatferrit (Aluminatferrit)	$4 CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$
C <sub>3</sub> (A,F)H <sub>6</sub>	Calciumaluminatferrithydrat	$3 CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \cdot 6 H_2O$
C <sub>6</sub> (A,F) $\bar{S}$ <sub>3</sub> H <sub>32</sub>	Tricalciumaluminatferrit- Tricalciumsulfathydrat bzw. AFt-Phasen	$3 CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \cdot$ $3 CaSO_4 \cdot 32 H_2O$

## Formelzeichen und Abkürzungen

---

$C_4(A,F)\bar{S}H_{12}$	Tricalciumaluminatferrit- Monocalciumsulfathydrat bzw. AFm-Phasen	$3 CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \cdot$ $CaSO_4 \cdot 12 H_2O$
C-A-H	Calcium-Aluminat-Hydrat	$x CaO \cdot y Al_2O_3 \cdot z H_2O$
$C_3AH_6$	Katoit	$3 CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6 H_2O$
$C_4AH_{19}$	Tetracalciumaluminathydrat	$4 CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 19 H_2O$
$C_6\bar{A}SH_{32}$	Calciumaluminatrisulfat (Ettringit)	$6 CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3 CaSO_4 \cdot 32 H_2O$
$C_4\bar{A}SH_{12}$	Tricalciumaluminat- Monocalciumsulfathydrat (Monosulfat)	$4 CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SO_4 \cdot 12 H_2O$
CH	Calciumhydroxid (Portlandit)	$Ca(OH)_2$
$C_2S$	Dicalciumsilicat (Belit)	$2 CaO \cdot SiO_2$
$C_3S$	Tricalciumsilicat (Alit)	$3 CaO \cdot SiO_2$
$C\bar{S}$	Calcium-Sulfat (Anhydrit)	$CaSO_4$
$C\bar{S}H_2$	Calcium-Sulfat-Hydrat (Gips)	$CaSO_4 \cdot 2 H_2O$
C-S-H	Calcium-Silicat-Hydrat	$x CaO \cdot y SiO_2 \cdot z H_2O$
$C_5S_6H_2$	0,9 nm-Tobermorit	$5 CaO \cdot 6 SiO_2 \cdot 2 H_2O$
$C_5S_6H_5$	1,1 nm-Tobermorit	$5 CaO \cdot 6 SiO_2 \cdot 5 H_2O$
$C_5S_6H_9$	1,4 nm-Tobermorit	$5 CaO \cdot 6 SiO_2 \cdot 9 H_2O$
$C_9S_6H_{11}$	Jennit	$9 CaO \cdot 6 SiO_2 \cdot 11 H_2O$
F	Eisenoxid	$Fe_2O_3$
H	Wasser	$H_2O$
K	Kaliumoxid	$K_2O$
$K_2C\bar{S}_2H$	Syngenit	$K_2SO_4 \cdot CaSO_4 \cdot H_2O$
M	Magnesiumoxid	$MgO$
N	Natriumoxid	$Na_2O$
S	Siliciumdioxid	$SiO_2$
$\bar{S}$	Sulfit	$SO_3$

## Kurzfassung

In der vorliegenden Dissertation wurden verschiedene Einflussfaktoren zur Entwicklung eines angepassten zementgebundenen Werkstoffes zum 3D-Drucken von Beton im 3D-Pulverdruckverfahren analysiert. Für die Entwicklung eines druckfähigen Compounds, der in seiner ausgehärteten Form eine hohe mechanische Festigkeit bei gleichbleibend hoher Qualität bietet, wurde im Rahmen dieser Arbeit untersucht, wie die einzelnen Ausgangsstoffe den Herstellungsprozess sowie die Qualität des gedruckten Betons beeinflussen und welche Faktoren dafür in welchem Maß relevant sind.

Zur Vergleichbarkeit unterschiedlicher Versuchsreihen wurden zunächst Analysemethoden definiert. Diese gliederten sich in vorbereitende Analysen zum 3D-Druckprozess und in Analysen, die speziell für das 3D-Pulverdruckverfahren definiert wurden sowie in die gängigen Festbetonuntersuchungen. Zu den vorbereitenden Analysen zählten neben der Untersuchung der Bindemittelflüssigkeit die Pulveranalysen. Bei der Auswertung der speziell für das 3D-Pulverdruckverfahren definierten Additiven Fertigungsparameter zeigte sich, dass die Korngrößenverteilung sowie die Partikelform einen essentiellen Einfluss auf die Fließfähigkeit des Compounds nehmen und daher die Grundlage für die Qualität des Druckergebnisses bieten.

Weitere Untersuchungen zur Auswirkung der Zusammensetzung auf die s. g. 3DP-Standfestigkeit wiesen darauf hin, dass gedruckte Betonstrukturen, in denen ausschließlich ein CEM I 52,5 R als Bindemittel enthalten ist, keine ausreichende Stabilität für eine optimale Nachbearbeitung kurz nach Druckvorgangsende bieten. Trotz des schnell erhärtenden Zements bedarf es für das vorgestellte Herstellungsverfahren ein noch reaktiveres Bindemittel in Form von Klinkerfeinmehl, um die notwendige 3DP-Standfestigkeit zu einem sehr frühen Zeitpunkt gewährleisten zu können. In weiteren Versuchsserien wurde ergänzend der Einfluss des Zusatzstoffes Silicastaub analysiert. Die Untersuchungsergebnisse zu diesem Einflussfaktor dokumentierten, dass mit einem geringen Massenanteil die Eigenschaften des gedruckten Betons optimiert werden konnten.

Teilweise konträr zu bekannten betontechnologischen Zusammenhängen verliefen die Festbetonuntersuchungen zum Einfluss des Wasser-Zement-Wertes. Zwar nimmt dieser Parameter wie in der konventionellen Betonproduktion einen signifikanten Einfluss auf die resultierende Druckfestigkeit, jedoch sind bekannte Wechselbeziehungen (wie bspw. eine Verringerung der Druckfestigkeit bei erhöhtem Wasser-Zement-Wert) oder bestimmte Kenngrößen (wie eine vollständige Hydratation des Zements bei einem Wasser-Zement-Wert von ca. 0,4) aufgrund der unterschiedlichen Produktionsweisen zwischen konventioneller Fertigung und dem 3D-Pulverdruckverfahren nicht kongruent. Dass die Feuchtigkeitsmenge gleichwohl im verwendeten Druckverfahren einen maßgebenden Einfluss auf die Festbetoneigenschaften hat, verdeutlichten die Untersuchungsergebnisse dieser Arbeit. Unter anderem deuteten verschiedene Versuchsreihen darauf hin, dass mit einem geringeren Verhältnis zwischen Bindemittelflüssigkeitsmenge bei theoretischer Sättigung des Compounds und tatsächlich eingebrachter Bindemittelflüssigkeits-



menge das Potenzial einer vollständigen Hydratation und letztendlich einer höheren Druckfestigkeit der additiv gefertigten Betonelemente steigt.

Für die abschließende Nachbehandlung der gedruckten Betonkörper wurde neben der Normlagerung in Wasser eine weitere Lagerungsvariante in Wasserglas untersucht. Hierbei stellte sich bei der Wasserglasnachbehandlung heraus, dass sich infolge chemischer sowie physikalischer Erhärtungsprozesse eine dichtere Betonmatrix einstellt, die neben einer konstant höheren Druckfestigkeit sowie einer geringeren Porosität eine höhere Abriebfestigkeit der Betonoberfläche erzeugt.

Letztlich konnte aufgrund der Analyse vielzähliger Einflussfaktoren ein Compound entwickelt werden, der infolge des vorgestellten Herstellungsprozesses vergleichbare Betoneigenschaften zum Leichtbeton erzielt. Des Weiteren verdeutlichten die Erkenntnisse dieser Arbeit die Grenzen sowie das Potenzial der additiven Fertigung im 3D-Pulverdruckverfahren.

## **Abstract**

This dissertation analysed various influencing factors for the development of an adapted cementitious material for 3D printing concrete using the 3D powder printing process. Furthermore, for the development of a printable compound that offers high mechanical strength with consistently high quality in its hardened form, it was investigated how the individual components influence the manufacturing process and the quality of the printed concrete.

For the comparability of different test series, analysis methods were first defined. These were divided into preparatory analyses for the 3D printing process and analyses that were defined specifically for the 3D powder printing process as well as the common hardened concrete analyses. The preparatory analyses included powder analyses in addition to the examination of the binder fluid. The evaluation of the additive manufacturing parameters defined specifically for the 3D powder printing process showed that the particle size distribution and the particle shape have an essential influence on the flowability of the compound and therefore provide the basis for the quality of the printing result.

Further analyses of the effect of the composition on the 3DP stability indicated that printed concrete structures only contain a CEM I 52.5 R as a binder do not achieve sufficient stability for an optimal post-processing shortly after the end of the printing process. Despite the rapid hardening cement, the production process requires an even more reactive binder such as very fine clinker powder in order to be able to guarantee the necessary 3DP stability at a very early stage. In further test series, the additive silica fume was also analysed. The test results for this influencing factor documented that the properties of the printed concrete could be optimised with a low mass proportion.

The hardened concrete analyses on the influence of the water-cement ratio were partly contrary to known concrete technology correlations. Although this parameter has a significant influence on the resulting compressive strength, as in conventional concrete production, known correlations (such as a decrease in compressive strength with an increased water-cement ratio) or certain parameters (such as complete hydration of the cement at a water-cement ratio of approx. 0.4) are not congruent due to the different production methods between conventional production and the 3D powder printing process. The results of this study have shown that the amount of binder fluid has a decisive influence on the hardened concrete properties in the printing process. Various test series indicated that the potential for complete hydration and a higher compressive strength of the additively manufactured concrete elements increases with a lower ratio between the amount of binder liquid at the theoretical saturation of the compound and the actually added amount of binder liquid.

For the final post-treatment of the printed concrete specimens, a further storage in sodium silicate was analysed in addition to the standard storage in water. The post-treatment in sodium silicate resulted in a denser concrete matrix due to chemical and physical hardening processes. Furthermore, in addition to constantly higher compressive strength and lower porosity, a higher abrasion resistance of the concrete surface could be produced.

## *Abstract*

---

Finally, based on the analysis of numerous influencing factors, a compound was developed that achieves comparable concrete properties to lightweight concrete. Furthermore, the results of this dissertation clarified the limits and the potential of additive manufacturing in the 3D powder printing process.

# 1 Einführung

## 1.1 Forschungsgegenstand

Bisweilen wurde Beton häufig als kalt und wenig kreativ angesehen [1], jedoch dient dieser Werkstoff nicht mehr nur dazu, massive Bauten herzustellen, sondern wird mehrfach von Architekten sowie Künstlern als Blickfang genutzt. Durch das 3D-Druckverfahren bzw. die additive Fertigung ergeben sich weitreichendere Möglichkeiten der Umsetzung sowie Gestaltung von Betonstrukturen, um dem jeweiligen Wunsch nach einem individuellen Exponat gerecht werden zu können. Des Weiteren bietet sich mit dem Wegfallen einer im konventionellen Herstellungsverfahren notwendigen Schalung das Potenzial eines geringeren Montageaufwands sowie aufgrund der geometrischen Freiheit bei der Konstruktion die Option der funktionellen bzw. topologischen Optimierung des gewünschten Produkts. Anhand der Teilkonsolidierung können somit erhebliche Kosten eingespart werden.

Im derzeitigen Stadium der additiven Fertigungstechnologie beschränken sich die Verfahren primär noch auf die Konzeption von Produktentwicklungen sowie deren Planungs- und Entwurfsprozessen. Gleichwohl forschen weltweit einige Universitäten sowie Unternehmen an einer Optimierung des Druckprozesses, um infolge von Weiterentwicklungen im Bereich der Hardware und Ausgangsmaterialien mithilfe leistungsstarker Technologien den Übergang vom Prototyp zum funktionellen Endprodukt immer schmaler werden zu lassen [2].

Das 3D-Pulverdruckverfahren bzw. 3D-Printing-Verfahren (3DP-Verfahren) zählt hierbei zu den zuverlässigsten 3D-Druckverfahren [3] in diesem noch relativ jungen Technologiezweig und weist die größte Materialvielfalt auf. In dieser breiten Produktpalette konnte sich bisweilen nur der Sand-, Metall-, Keramik- und Kunststoff-Druck etablieren. Da sich der Betondruck primär mit dem extrudierenden Verfahren des Contour Craftings (CC) auf großflächige Bauteile spezifiziert hat, bedarf es noch an Entwicklungsprozessen zur Komposition eines angepassten zementgebundenen Werkstoffes zum 3D-Drucken von Beton im Pulverdruckverfahren. Dies ermöglicht es, das Anwendungsgebiet des 3D-Betondrucks auf filigrane, detailgetreue Bauteile zu erweitern, ohne dabei im Gegensatz zu den extrudierenden Herstellungsverfahren geometrische Einschränkungen in Bezug auf Überhänge oder Hohlräume hinnehmen zu müssen. In Punkto Ästhetik, Funktionalität und finanzieller Aufwendungen besteht somit das Potenzial eine ganzheitliche Optimierung des gedruckten Betonkörpers zu realisieren.

In der Literatur werden im Wesentlichen die diversen Einflussfaktoren in Bezug auf die Betonproduktion im konventionellen Herstellungsverfahren erfasst. Dass sich diese Erkenntnisse nicht grundlegend auf die additive Fertigung und im Speziellen auf das 3DP-Verfahren übertragen lassen, erschließt sich durch die differierenden Herstellungsprozesse. Inwiefern sich bspw. der Einfluss einer einzelnen Komponente der Beton- oder Trockenmörtelzusammensetzung auf die charakteristischen Betoneigenschaften auswirkt, ist u. a. Bestandteil dieser Arbeit. Bei der additiven Fertigung ergeben sich zudem durch die Anforderungen an eine druckfähige Bindemittelflüssigkeit sowie eines fließfähigen Compounds zusätzliche Faktoren aus

den Bereichen der Verfahrenstechnik, die es für einen optimal verlaufenden Produktionsprozess zu berücksichtigen gilt. In der Entwicklung eines Herstellungskonzepts ergeben sich ergänzend dazu weitere Parameter, die sich zum einen mit dem Druck- und Schichtauftrag auf den Themenbereich des additiven Fertigungsverganges der 3D-Druckmaschine beziehen und zum anderen mit der geometrischen Optimierbarkeit die realisierbare Auflösung der 3D-gedruckten Betonstrukturen berücksichtigen.

Essentiell bei der Produktion der 3D-gedruckten Betonkörper sind u. a. die Themen einer verwertbaren Prozessstabilität sowie der Reproduzierbarkeit der Bauteile hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften, der Genauigkeit und der Oberflächenqualität. Bei einer ambitionierten Weiterführung des Entwicklungsprozesses ergibt sich mit einer erfolgreichen Umsetzung der aufgeführten Produktionsfaktoren ein enormes Potenzial. Denn das 3DP-Verfahren könnte den Entwicklungszyklus verkürzen, die Gestaltungsfreiheit vergrößern und die Produktivität optimieren. Bei der Anwendung im Bauwesen besteht somit das Potenzial den Bauprozess zu beschleunigen sowie die Risiken während der Herstellung zu minimieren. Ein 3DP-Modell kann ebenfalls mit einem Gebäudeinformationsmodell (Building Information Model, BIM) verknüpft werden, wodurch der gesamte Prozess vom Entwurf über den Bau, das Management und die Wartung bis hin zur Stilllegung digitalisiert wird [4]. Allgemein betrachtet richtet sich dabei der gesamte Herstellungsablauf nach dem Prinzip der Lean Production, da bei der additiven Fertigung hinsichtlich der Gestaltung eines automatisierten Arbeitsablaufs hauptsächlich auf weitgehende Einsparungen von Arbeitskräften, Kosten und Material geachtet wird [5]. Neben der Ressourcenschonung bzw. der Beachtung einer effizienteren und kostengünstigeren Produktion [6] können mit dieser additiven Fertigungstechnologie individuelle Kundenwünsche realisiert werden, was wiederum die Attraktivität dieser Entwicklung gerade im Zeitalter der Digitalisierung fördert.

## 1.2 Zielsetzung

Für die vorliegende Arbeit wurde das Grundprinzip des additiven Fertigungsverfahrens beibehalten. Dieses umfasst die Generierung des gewünschten 3D-Volumenmodells mittels CAD-Software, die darauffolgende virtuelle Zerteilung des Baukörpers in einzelne Schichten, eine sequentielle Übermittlung der Daten sowie den schichtweisen Aufbau innerhalb des 3D-Druckers. Jedoch umfasst die erfolgreiche Realisierung einer spezifischen additiven Fertigungstechnologie nicht nur die Weiterentwicklung des maschinentechnischen Herstellungsprozesses selbst, sondern für das 3DP-Verfahren auch die Formulierung einer geeigneten Kombination aus einem Pulver- bzw. Bindemittelmaterialeystem. Ergänzend dazu ergeben sich infolge des innovativen Forschungsprozesses relevante additive Fertigungsparameter (AF-Parameter), die es während des Druckvorgangs und der anschließenden Nachbearbeitung zu analysieren gilt. Beide Faktoren nehmen eine wesentliche Rolle bei der Bestimmung der mechanischen sowie betontechnologischen Eigenschaften – wie bspw. der Druckfestigkeit und Porosität – der 3D-gedruckten Betonstrukturen ein.

Während man das 3DP-Verfahren bereits erfolgreich für ein breites Spektrum von Materialien – einschließlich Polymere, Metalle, Keramik und Sand – nutzen kann, erfordert die Anwendung dieses Verfahrens auf ein zementgebundenes Materialsystem die Entwicklung eines grundlegenden Herstellungs Konzeptes, bei dem diverse betontechnologische sowie verfahrenstechnische Einflussfaktoren berücksichtigt werden müssen.

Ziel dieser Arbeit ist es, neben einer druckfähigen Bindemittelflüssigkeit zunächst einen Compound zu formulieren, der den spezifischen Produktionsbedingungen gerecht werden kann. Eine weitere Intention ist es, aufbauend auf den maßgebenden Einflussfaktoren für den Druckprozess AF-Parameter zu definieren, auf deren Basis ein einheitliches Bewertungsschema festgelegt werden kann. Abschließend soll ein optimales Nachbearbeitungsverfahren ermittelt werden, sodass die gesammelten Erkenntnisse dieser Forschungsarbeit eine Grundlage bilden, um additiv gefertigte Betonkörper im 3DP-Verfahren hinsichtlich einer höchstmöglichen Druckfestigkeit, hohen Präzision bzw. Auflösung sowie einer funktionalen Produktion zielsicher herstellen zu können.

### **1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit**

Zur Umsetzung der formulierten Ziele gliedert sich die Arbeit in insgesamt fünf Kapitel.

**Kapitel 1** dient der Einführung in die Thematik der additiven Fertigung und beschreibt die Relevanz sowie das Potenzial der Technologie. Des Weiteren bietet es einen allgemeinen Überblick über den Aufbau und die Ziele dieser Arbeit.

**Kapitel 2** bildet die Grundlage für die daran anknüpfenden Analysen. Zunächst wird die Literatur dahingehend ausgewertet, welche differierenden 3D-Betondrucktechnologien derzeit in dieser progressiven Entwicklung mitwirken und welche Ansätze bzw. Ziele dahingehend verfolgt werden, um abschließend in Bezug auf den Status Quo die Vor- und Nachteile des jeweiligen Verfahrens darzustellen. Des Weiteren werden der Wissensstand zu den verwendeten Materialien aufgeführt und im Detail die chemischen sowie physikalischen Prozesse beschrieben, die in einem zementgebundenen Werkstoff zu erwarten sind. Darüber hinaus werden neben den bekannten Grundlagen zum konventionellen Herstellungsverfahren mögliche Bezüge zum 3DP-Verfahren hergestellt. Im Anschluss daran folgt die Erläuterung zu den potenziellen Einflussparametern, die sich bei der Produktion mit einem pulverbettbasierten additiven Fertigungsverfahren maßgeblich auf die mechanischen Eigenschaften der 3D-gedruckten Betonstrukturen auswirken können.

**Kapitel 3** behandelt mit den experimentellen Untersuchungen den praktischen Teil der Arbeit. Im Rahmen der Methodik bzw. Vorgehensweise wird zu Beginn der gesamte Ablauf transparent dargestellt. Dies umfasst neben dem gesamten Herstellungsprozess die Geometrie der zu untersuchenden Probekörper sowie deren Auflösung. Daran anschließend wird die Systematik erläutert, in welcher jede Versuchsserie untersucht wird. Die erste Thematik umfasst mit der Partikelgrößenverteilung, der Fließfähigkeit und den unterschiedlichen physikalischen Kenngrößen in Bezug auf die Dichte den wesentlichen Anteil der Pulveranalyse. Hinsichtlich der Flüssigkeitsanalyse folgen im Anschluss die Untersuchungen zur notwendigen Bindemittelflüssigkeit sowie für jeden formulierten Compound eine Ermittlung des Feuchtigkeitsanspruchs. Zur vergleichbaren Auswertung der Versuchsreihen im Herstellungsprozess wird mithilfe der AF-Parameter ein Bewertungsschema entwickelt, das als Grundlage für eine objektivere Analyse dient. Der Terminus AF-Parameter repräsentiert die relevanten Faktoren für einen optimalen Druckvorgang. Mit dem Abschluss der verfahrenstechnischen Untersuchungen beginnen die Festbetonprüfungen, die u. a. einen signifikanten Faktor für das folgende Herstellungskonzept darstellen.

**Kapitel 4** integriert die Ergebnisse aus den diversen Versuchsserien in ein Herstellungskonzept. Hierbei werden die analysierten Einflussfaktoren angesichts der Relevanz für einen optimalen Druckprozess sowie für eine zielsichere Produktion eines druckfesten und detailgetreuen Betonkörpers im 3DP-Verfahren gewichtet. Zudem werden die Materialeigenschaften des 3D-gedruckten Betons mithilfe einer auf Grundlage des Herstellungskonzeptes konzipierten Versuchsreihe dokumentiert.

**Kapitel 5** fasst die wesentlichen Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit systematisch zusammen und identifiziert den Bedarf an zukünftigen Forschungsarbeiten im Bereich der additiven Fertigungsverfahren von Beton.

Abb. 1-1 veranschaulicht die Struktur dieser Arbeit schematisch in einem Übersichtsdiagramm.

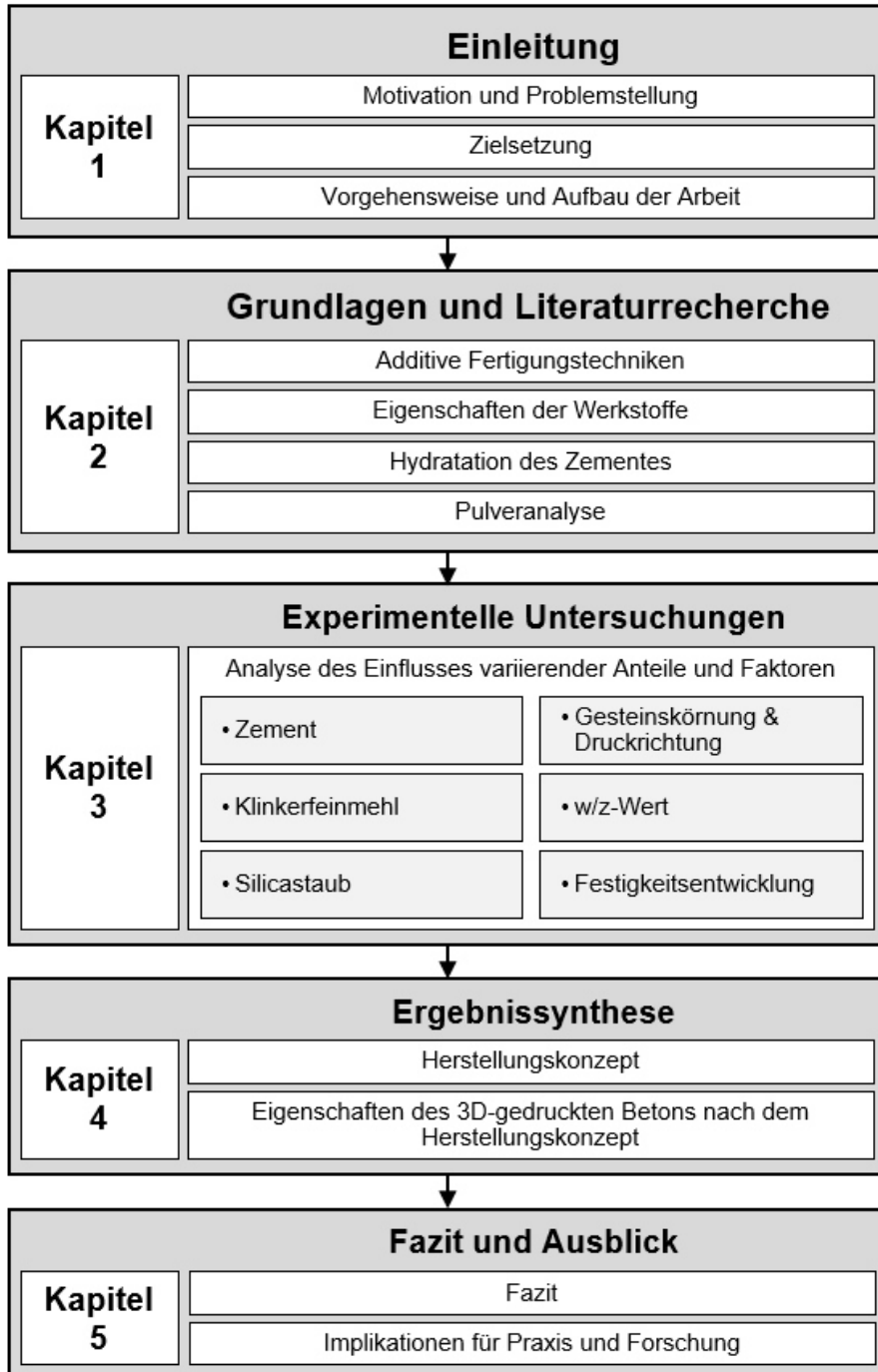


Abb. 1-1: Schematische Struktur der Arbeit



## **2 Grundlagen**

### **2.1 Einleitung**

In den folgenden Abschnitten des Kapitels 2 wird auf Basis einer umfassenden Literaturrecherche der Stand der Forschung aufgeführt. Zunächst werden in Abschnitt 2.2 die additiven Fertigungstechniken sowie der Produktionsprozess im Allgemeinen beschrieben. Anschließend werden nach den Grundlagen der Ablauf des 3DP-Verfahrens im Detail vorgestellt und zum anderen weitere Betondruckverfahrensarten sowie die Betoneigenschaften zur Vergleichbarkeit aufgeführt. Zudem werden in diesem Abschnitt die Machbarkeit, Auflösung sowie die Vorteile der additiven Fertigung dargestellt.

Daran anknüpfend werden detailliert die Grundlagen der Betontechnologie in Bezug auf die verwendeten Materialien beschrieben. Im darauffolgenden Abschnitt 2.4 werden die chemischen und physikalischen Prozesse hinsichtlich der Verfestigung des Betons vertieft. Zum späteren Verständnis etwaiger Similaritäten und Diversitäten in der Betonmatrix zwischen den konventionell und additiv hergestellten Betonkörpern wird anschließend die Porenstruktur sowie der Wasseranspruch analysiert.

Des Weiteren werden im Hinblick auf den angewandten Herstellungsprozess in Abschnitt 2.5 essentielle Kennwerte und Parameter beschrieben, die für die Produktion und Auswertung der 3D-gedruckten Exponate von Bedeutung sind.

### **2.2 Additive Fertigungstechniken**

#### **2.2.1 Allgemeines**

Die additive Fertigung hat seinen Ursprung in den Anfängen der 80er Jahre und ist demnach gesehen noch ein relativ neues automatisiertes Technologiefeld. Hideo Kodama vom Nagoya Municipal Industrial Research Center in Japan beschrieb 1981 die Möglichkeit der Herstellung gedruckter Festkörper, bevor Charles W. Hull mit der Entwicklung der Stereolithographie (SL) 1984 die erste funktionierende additive Fertigungsmaschine vorstellte [7]. In erster Linie dienen diese additiv gefertigten Exponate zur Veranschaulichung, Funktionstüchtigkeit und Passgenauigkeit eines Produkts, welches im anstehenden Zyklus in der Regel mit einem konventionellen Fertigungsverfahren in Masse produziert werden sollte. Demnach waren die Anforderungen an Haltbarkeit, Qualität und Stabilität der kostengünstigen Prototypen nicht primär relevant.

Im Anschluss an die Erfindung des SL-Verfahrens sowie des Digital-Light-Processings (DLP) konnte in diesem progressiven Entwicklungsprozess mit dem Selektiven Laser Sintern (LS) eine pulverbett-basierte 3D-Drucktechnologie entstehen, die mit dem 3DP-Verfahren verwandt ist. Weitere additiven Fertigungsvarianten sollten folgen, sodass in jüngster Zeit die Rapid-Prototyping-Technologien (RP) in vielen Bereichen erfolgreich eingesetzt werden konnten. Gegenwärtig bieten diese Technologien eine schnelle und passgenaue Produktion auf Abruf („on demand“), um bspw. eine kurzfristige und bedarfsgerechte Herstellung von Ersatzteilen zu ermöglichen [8]. Des

Weiteren verringert sich aufgrund der digitalen Lagerung der Modelle das physische Vorhalten von Materialien, wodurch zudem auf langfristige Sicht hin die Lager- und Logistikkosten minimiert werden können [9]. Es wird angenommen, dass RP-Technologien in Zukunft den gesamten Produktionsbereich verändern können, da sie mithilfe der automatisierten Maschinenfertigung in einem Druckprozess die Anforderungen der Diversifizierung, Industrialisierung und Informatisierung für technische Konstruktionen inkludieren. Ein signifikanter Aspekt für die breite Anwendung großer Konstruktionen ist das Verständnis des mechanischen Verhaltens der additiven Fertigungsprodukte. Vor diesem Hintergrund werden in dieser Arbeit unterschiedliche Einflussfaktoren untersucht, die sich im Speziellen auf die Eigenschaften des gedruckten Betons sowie auf die Prozessparameter des 3DP-Verfahrens auswirken.

Bei der additiven Fertigung (volkssprachlich auch beim „3D-Druck“) werden die Geometrien im Gegensatz zu den subtraktiven Fertigungsverfahren nicht durch Abtragung des Rohmaterials mittels Fräsen, Drehen oder Bohren erzeugt, sondern durch Hinzufügen, Auftragen respektive Ablagern von Material und anschließender Verbindung der einzelnen Layer infolge physikalischer oder chemischer Härtungsprozesse generiert. Dies impliziert den Gedanken der Ressourcenschonung bzw. der effizienteren Produktion des gewünschten Bauteils und bietet je nach additivem Fertigungsverfahren hinsichtlich der Geometrie ebenfalls ein größeres Potenzial gegenüber den Formenden Fertigungsverfahren, da bei der Produktion von Bauteilen durch Biegen, Pressen oder Gießen die gestalterische Freiheit limitiert ist.

Die nach VDI-Richtlinie 3405 kommerziell etablierten additiven Fertigungsverfahren inkl. der Materialverwendungsmöglichkeiten sind in Tab. 2-1 dargestellt und beinhalten mit dem 3DP-Verfahren, welches im US-amerikanischen Sprachraum ebenfalls unter der Bezeichnung Binder Jetting bekannt ist [10], die angewandte Betondruckverfahrensart dieser Arbeit. Eine ausführliche Gegenüberstellung des 3DP-Verfahrens mit weiteren Betondruck-technologien erfolgt in Abschnitt 2.2.3. Ergänzend ist hier jedoch zu erwähnen, dass die Terminologie hinsichtlich einiger Fachbegriffe, Bezeichnungen und Abkürzungen in den Literaturquellen dieser noch relativ jungen Fertigungstechnologie nicht einheitlich angewendet werden. Beispielsweise wird das Dateiformat STL, welches als Standarddatenformat der meisten additiven Fertigungsmaschinen verwendet wird und die Oberfläche des Objektes beschreibt, je nach Quelle als STereo-Lithographie, Standard-Triangulation/Tessellation-Language oder wie in der VDI-Richtlinie 3405 als Surface-Tessellation-Language Format bezeichnet. Zur Vermeidung von Divergenzen werden in dieser Arbeit demnach die Bezeichnungen der VDI-Richtlinie verwendet.

Tab. 2-1: Kommerziell etablierte additive Fertigungsverfahren (vgl. [11])

Abkürzung	Bezeichnung	Papier	Kunststoff	Sand	Metall	Keramik	Beton
SL	Stereolithography		X			X	
LS	Laser Sintering		X	X	X	X	
LBM	Laser Beam Melting				X		
EBM	Electron Beam Melting				X		
FLM	Fused Layer Modelling		X				
MJM	Multi-Jet Modelling		X				
PJM	Poly-Jet Modelling		X				
3DP	3D-Printing		X	X	X	X	X
LLM	Layer Laminated Manufacturing	X	X		X	X	
DLP	Digital Light Processing		X		X	X	
TTS	Thermo-transfer Sintering		X				

Anhand der zahlreichen Arten additiver Fertigungsverfahren sowie deren Weiterentwicklungen seit Beginn der 80er Jahre ist zu erkennen, dass die Produktion freigeformter Strukturen eine der aufstrebenden Technologien des 21. Jahrhunderts ist. Unter anderem bezeichnete der US-amerikanische Soziologe und Wirtschaftsprofessor Jeremy Rifkin die additiven Fertigungstechnologien auch als „Dritte industrielle Revolution“ [12], welche sich in der provokanten Illustration von Brett

Ryder in Abb. 2-1 widerspiegelt. Rifkin begründet sein Denken darin, dass im Gegensatz zu den konventionellen Verfahrensarten verschiedene Arbeitsprozesse im Themengebiet der Informations- und Energietechnologie parallel umsetzbar sind und die Technologien demzufolge Lösungen für eine Vielzahl gegenwärtiger Herausforderungen bieten. Essentielle Bestrebungen, wie Ressourcenschonung, dezentrale Produktion, effizienterer Materialeinsatz sowie dessen Ausnutzung können mit der Reduzierung von Transportwegen und -kosten erzielt werden.

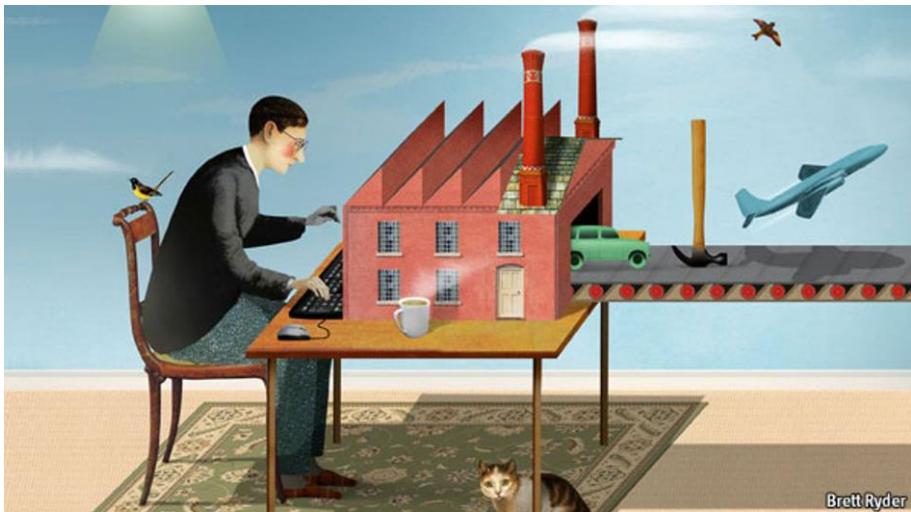


Abb. 2-1: Die dritte industrielle Revolution [13]

### 2.2.2 Beschreibung des Produktionsprozesses im Allgemeinen

Zu Beginn eines 3D-Druckprozesses bedarf es bei allen additiven Fertigungsverfahren immer einer **Generierung eines 3D-Modells**, welches mithilfe einer Computer-Aided-Design- bzw. Computer-Aided-Manufacturing-Software (CAD-/CAM-Software) konstruiert wird. Die Generierung dieser Datei wird in Zukunft den essentiellen Part in der Wertschöpfungskette (siehe Abb. 2-2) druckfähiger Konstruktionen einnehmen, da in diesem Arbeitsschritt der Ausnutzungsgrad, das architektonische Design sowie alle weiteren Vorgänge entschieden werden. Somit benötigt der Konstrukteur des 3D-Modells ein grundlegendes Verständnis über alle nachfolgenden Prozesse sowie ein ingenieurtechnisches Verständnis für die Materie, deren Belastungsgrenze und den Kraftfluss im konstruierten Bauteil.

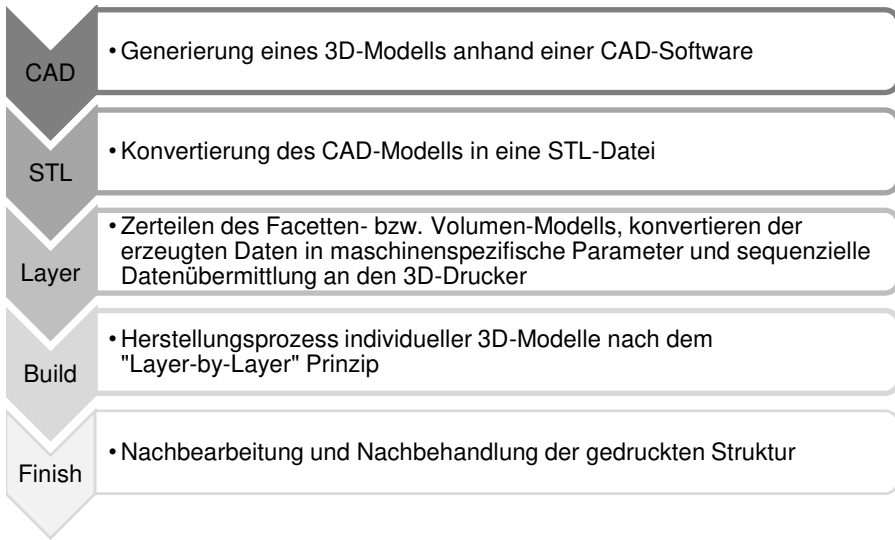


Abb. 2-2: Übersicht des Herstellungsprozesses in der additiven Fertigung (vgl. [14])

Die **Konvertierung des CAD-Modells** in eine STL-Datei erfolgt in der Regel mit den Standardfunktionen des CAD-Programms. Dazu wird eine Liste von Koordinatenreihen dreieckiger Facetten generiert, deren Kanten sich alle perfekt berühren, um eine Darstellung der Oberfläche des Modells zu bilden. Die Generierung dieser Datei ist nicht zwangsläufig fehlerfrei, d. h. dass der Erfolg der Konvertierung abhängig von der Beschaffenheit bzw. Struktur des 3D-Körpers ist. Einige additive Fertigungsverfahren sind empfindlicher als andere, aber ein leichter Kantenversatz kann dazu führen, dass das Endprodukt unförmig, nicht passgenau ist oder im schlimmsten Fall versagt. Insofern ist die Generierung der STL-Datei ein wichtiger Teilprozess bis zum fertigen Baukörper.

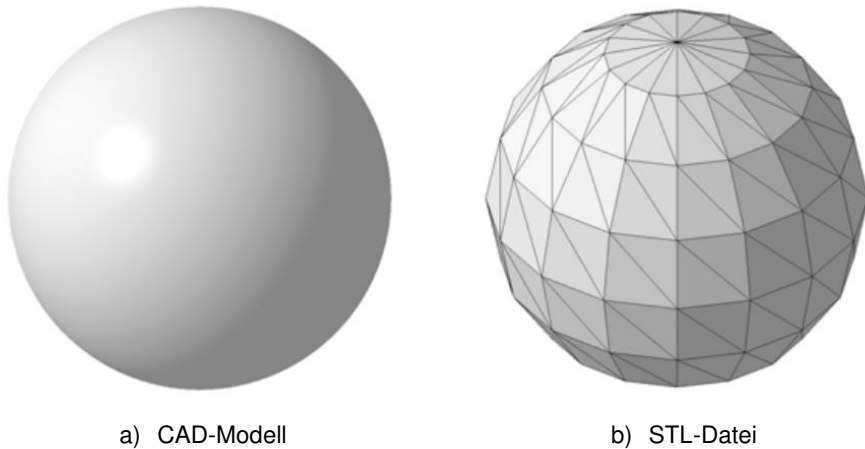


Abb. 2-3: Konvertierung eines CAD-Modells in eine STL-Datei [15]

Für die Generierung dreidimensionaler Konstruktionsobjekte müssen in einem automatisierten Bauprozess die spezifischen Maschinenfunktionen anhand von Konstruktionsdaten abgeleitet und dissoziiert werden. Die Slicing-Methodik ist für alle additiven Fertigungsverfahren gleichermaßen als Bestandteil des Pre-Prozesses durchzuführen. Dieser Arbeitsschritt impliziert das **Zerteilen des Facetten- bzw. Volumen-Modells** in eine Vielzahl von zu konstruierenden Layern sowie das Konvertieren der erzeugten Daten in **maschinenspezifische Parameter**, die mittels **sequenzieller Datenübermittlung** während des Herstellungsvorgangs **an den 3D-Drucker** gesendet werden. Diese Layer werden je nach additiver Fertigungsverfahren unterschiedlich generiert, sodass u. a. Pulverdruckmaschinen einen zusätzlichen Bearbeitungsschritt erfordern, nämlich die Erzeugung von 2,5D-Layern [16] aus dem 3D-Modell. Die Bezeichnung der s. g. 2,5D-Layer bei pulverbett-basierten 3D-Druck-Technologien erfolgt aus dem fließenden Übergang zwischen dem zweidimensionalen Auftrag einer Bindemittelflüssigkeit sowie einem weiteren Layer des pulverförmigen Compounds.

Bei extrudierenden Verfahrensarten wird das Modell ebenfalls von einem Computerprogramm in eine Vielzahl von Schichten zerlegt (geslicet), jedoch wird nicht in jeder Schicht der gesamte Bauraum mit dem extrudierenden Material gefüllt, sondern nur die essentiellen Bereiche. Die geschnittenen Querschnittelemente haben nach dem Slicing-Prozess in z-Richtung (der Höhe) prinzipiell keinen Bezug mehr zueinander, wodurch ein nachträgliches Skalieren nicht mehr möglich ist [11]. Bei einigen additiven Fertigungstechnologien wird dieser Vorgang – nach Einstellung erforderlicher Parameter (z. B. Schichtdicke) – selbstständig von der Software ausgeführt. Ein weiterer Bestandteil des Pre-Prozesses bildet je nach Verfahrensart neben der Datenvorbereitung die Erzeugung von temporären Zusatz- und Hilfsgeometrien (z. B. in Form von Stützkonstruktionen). Abschließende prozessvorbereitende Maßnahmen sind ggf. noch das Anordnen der Bauteile im Bauraum sowie die hardwareseitige Anlagenvorbereitung (Materialbefüllung etc.).

Mit Vollendung der erforderlichen Einstellungen startet die automatisierte Produktion respektive der s. g. In-Prozess. In dieser Phase werden die aus dem Pre-Prozess resultierenden Fertigungsoperationen von der additiven Fertigungsanlage ausgeführt bzw. verarbeitet. Der **Herstellungsprozess individueller 3D-Modelle** erfolgt dabei stets **nach dem „Layer-by-Layer“ Prinzip** [17, 18], unwesentlich ob es sich dabei um gedruckte, medizinische Objekte, Prototypen für die Automobilbranche oder andere individuelle Strukturen in der Lebensmittel-, Mechanik- und chemischen Industrie handelt [4, 19–22]. Unterschiede zeigen sich folglich in den bereits aufgelisteten Materialien (siehe Tab. 2-1) sowie der Verarbeitung der maschinentechnischen Operatoren. Beispielsweise eignet sich der Computerized-Numerical-Control/G-Code-Ansatz (CNC/G-Code-Ansatz) für die Bearbeitung von laserbasierten Prozessen wie dem SL- oder LS-Verfahren. G-Code ist hierbei die Programmiersprache für numerische Computersteuerungen respektive dient zur Kommunikation zwischen 3D-Druckprogramm und additiver Fertigungsmaschine. Extrusionsbasierte Prozesse wie das FLM-Verfahren können mit G-Codes oder Plottercodes – wie der Programmiersprache Hewlett-Packard-Graphics-Language (HP/GL) – ausgeführt werden. Somit bestimmt der Computer die Pen up / Pen down Funktion bzw. ob Material aufgetragen wird oder ob sich das Gerät an den Anfang einer neuen

Vektorposition verschieben soll. Bei rastergesteuerten Operationen, wie dem 3DP-Verfahren, bestimmt hingegen jeder Punkt auf einer definierten Ebene, wo das Material aufgetragen wird. Dies erfolgt mithilfe des generierten monochromen Bitmaps (siehe Abb. 2-4), welches in der Regel automatisch von der 3D-Druck-Software erzeugt wird.

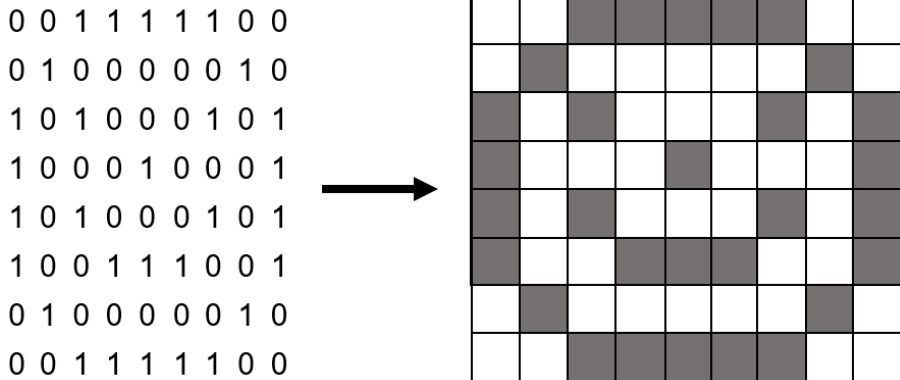


Abb. 2-4: Exemplarische Darstellung eines monochromen Bitmaps [23]

Die Höhe bzw. der z-Befehl wird inkrementiert, sobald die Plotterpfade für eine bestimmte Schicht vollständig sind.

Des Weiteren unterscheiden sich die Verfahrensarten in der physikalischen und/oder chemischen Verbindung der einzelnen Layer. Beim SL-Verfahren verfestigen sich Fotoprepolymer-Kunstharze (Prepolymere mit Fotoaktivatoren) unter Einwirkung von vektororientiertem Laserlicht, wohingegen beim DLP-Verfahren das Fotopolymere-Flüssigharz unter Einwirkung einer rasterorientierten Lichtmaske (mittels Mikrospiegel gesteuerte oder umgelenkte Lichtstrahlen) chemisch aushärtet.

Abgeschlossen wird der ressourcenoptimierte Produktionsvorgang im Allgemeinen mit dem Entpacken oder Entnehmen des Exponates aus dem Bauraum der additiven Fertigungsmaschine. Bei Bauteilen, die in keiner Fertigungsanlage gedruckt wurden (wie bspw. in der Regel beim CC-Verfahren), ist dennoch in den meisten Fällen noch eine **Nachbearbeitung und Nachbehandlung der gedruckten Struktur** erforderlich. In diesem s. g. Post-Prozess werden die additiv hergestellten Bauteile vorwiegend manuell bearbeitet, um ausgewählte Eigenschaften zu erzielen, zu verbessern oder weitere Merkmale einzubringen. Dazu gehören exemplarisch die physikalischen Eigenschaften wie Oberflächengüte, Haptik oder eine erforderliche Materialverfestigung des 3D-gedruckten Materials. Zusätzlich sollen diese Nachbehandlungsmaßnahmen ebenfalls möglichst zeitsparend, praktikabel und im Idealfall automatisiert erfolgen. Des Weiteren gilt, dass dieser Verarbeitungsabschnitt reproduzierbar ist und eine minimale Fehlerquote hat bzw. einen geringen Ausschuss impliziert.

## 2.2.3 Aktuelle Betondrucktechnologien im Vergleich

### 2.2.3.1 Allgemeines

Beton bietet in seiner typisch heterogenen Zusammensetzung diverse Vorteile und ist aufgrund seiner Eigenschaften in der Architektur ein beliebter Werkstoff, jedoch ist die individuelle Verwendung bzw. Gestaltung grundsätzlich durch die zur Formgebung benötigten Schalung deutlich eingeschränkt. Demnach wird aus ökonomischen Gründen hinsichtlich der aufzubringenden Zeit und Kosten für die Schalung sowie aus ökologischer Hinsicht vielfach an einer effizienteren bzw. ressourcenschonenderen Nutzung des Werkstoffes mithilfe der additiven Fertigung geforscht. Nach [21, 24, 25] können die Gesamtkosten der Betonkonstruktion infolge von Einsparungen im Bereich der Schalungsarbeiten sowie durch den Einsatz des 3D-Drucks um 35 – 60 % reduziert werden. Es ist prinzipiell die Selektivität und Variabilität des zu erhärtenden Compounds je Schicht, die es ermöglicht, jede gewünschte Geometrie herzustellen (oder zu bauen), was der grundlegende Vorteil dieser Verfahren gegenüber konventioneller Techniken ist.

Weiteres Potenzial bietet sich in Zukunft durch die voranschreitende Digitalisierung bzw. die Integration der Smart Services im Bereich des Baugewerbes, da die etablierte Wertschöpfung produktbezogener Dienstleistungen, wie der Betonage von Massivbauten, revolutioniert werden kann [26]. Infolge der flexibilisierten und individualisierten Entwicklung bzw. Produktion können demzufolge komplette Bauteile für den Bau, wie z. B. Paneele, Wände oder Stützen, ohne die Notwendigkeit einer Schalung gefertigt werden.

Die Grundprinzipien, die sich aktuell bei der additiven Verarbeitung von Beton ergeben, sind die Fähigkeiten entweder Material zu extrudieren (Abschnitt 2.2.3.2), zu sprühen (Abschnitt 2.2.3.3) oder die Materialphasenänderung selektiv aktivieren zu können (Abschnitt 2.2.3.4). Essentiell wird es demnach in Zukunft für den Konstrukteur sein, zu wissen, welche Eigenschaften sich mit dem jeweiligen additiven Fertigungsverfahren umsetzen lassen bzw. welche Anforderungen je nach Wunsch des Bauherrn oder Vorgabe des Architekten zu erfüllen sind (siehe Abb. 2-5). Dies betrifft bspw. die Forderung nach einer freigeformten Fassadenwand, einer denkmalgeschützten Rekonstruktion oder einem topologieoptimierten Unterzug mit Überhängen und Hohlräumen. Sicherlich werden Themen wie Baugeschwindigkeit, Oberflächenbeschaffenheit und letztendlich auch die charakteristischen Materialeigenschaften des Betons in die Auswahl des optimalen Fertigungsverfahrens für das individuelle Bauelement miteinfließen.



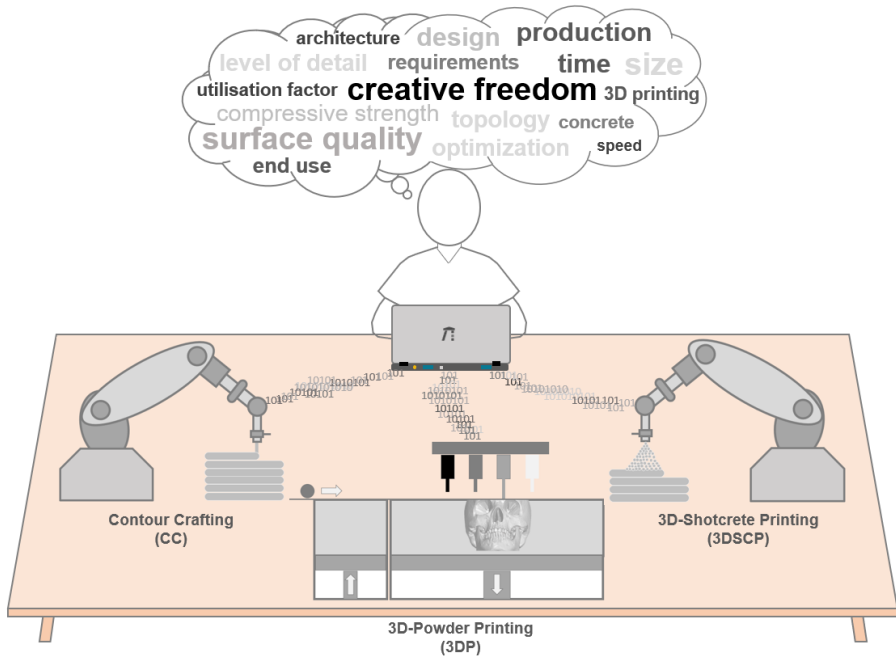


Abb. 2-5: Auswahl des optimalen Betondruckverfahrens je nach Anforderungen [23]

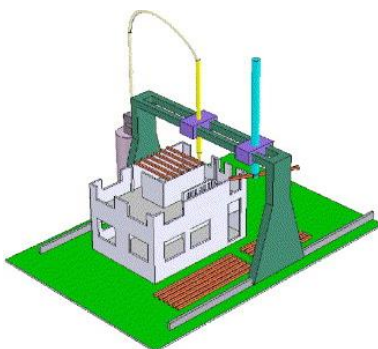
### 2.2.3.2 Contour Crafting Verfahren

Contour Crafting (CC) ist eine extrudierende Schichtbauweise, die von Prof. Khoshnevis von der University of Southern California 1996 patentiert [27] und für die automatisierte Herstellung von Betonbauwerken entwickelt wurde. Ähnlich wie bei anderen Verfahrensarten (z. B. der FLM-Technologie) nutzt CC einen computer-gesteuerten Herstellungsprozess, bei dem nur das benötigte Material in den gewünschten Bereichen platziert wird. Dies ist in Bezug auf die Geschwindigkeit des Produktionsvorgangs ein wesentlicher Vorteil, da im Gegensatz zu pulverbett-basierten Verfahrensformen nicht in jedem Layer der gesamte Bauraum gefüllt werden muss. Das Material befindet sich üblicherweise in einem flüssigen (oder pastösen) Zustand, wenn es extrudiert wird, und die Erstarrung erfolgt nicht wie beim FLM-Verfahren durch reines Abkühlen, sondern infolge des typischen Aushärtungsprozesses bei der Hydratation von Zement. Die daraus potenziell resultierenden Betoneigenschaften der additiv gefertigten Bauteile sind in Tab. 2-2 zusammengestellt.

Tab. 2-2: Potenzielle Eigenschaften des CC-Betons

Eigenschaften	Variable	Wert
Dichte (horizontal)	$\rho_H$	ca. 2.070 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Dichte (vertikal)	$\rho_V$	ca. 2.080 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Druckfestigkeit (horizontal)	$f_{c,H}$	ca. 59,0 MPa
Druckfestigkeit (vertikal)	$f_{c,V}$	ca. 61,0 MPa
Biegezugfestigkeit (horizontal)	$f_{\text{ct},H}$	ca. 5,2 MPa
Biegezugfestigkeit (vertikal)	$f_{\text{ct},V}$	ca. 4,0 MPa
Die Probekörper wurden sowohl horizontal als auch vertikal aus den Schichten geschnitten und nach 14 Tagen geprüft [34].		

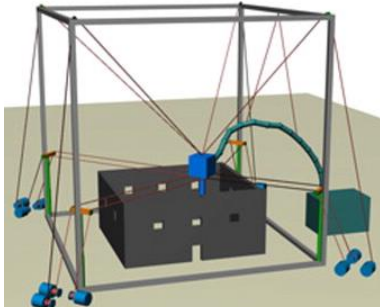
Im Gegensatz zu den bestehenden additiven Fertigungsverfahren ist CC nicht für die individuelle Produktion von kleineren Bauteilen ausgelegt, sondern für den Bau sehr großer Strukturen. Das Ziel dieser Technologie ist es, die Geschwindigkeit, Sicherheit, Qualität und Kosten des Bauens von Gebäuden – vom Einfamilienhaus bis hin zu Wohnkomplexen und Bürogebäuden – zu verbessern. Bei diesem Vorhaben werden, wie in Abb. 2-6 veranschaulicht, verschiedene maschinentechnische Ansätze verfolgt. Des Weiteren unterscheiden sich, wie in Abb. 2-7 dargestellt, die Methoden teilweise auch hinsichtlich der Streifenauflage, wobei mit zunehmender Filamentbreite die Geschwindigkeit des Baufortschrittes zunimmt und im Gegensatz die architektonische Variabilität abnimmt.



Die Darstellung von Khoshnevis [28] zeigt das Schema eines einachsigen fahrbaren Portalkrans, der sich durch eine hohe Steifigkeit, gute Positioniergenauigkeit sowie eine simple Steuerung auszeichnet. Nachteilig ist hingegen der erforderliche Aufbau des gesamten Systems vor Ort sowie eine unflexible Vergrößerungsmöglichkeit.



Der Ansatz der TU Dresden verbindet eine spezielle Druckkopftechnologie mit dem bestehenden Betonpumpenverfahren (CONPrint3D-Technologie) [29]. Demnach wäre dieses System sehr flexibel einsetzbar und erreicht große Reichweiten, jedoch besteht hierbei die Problematik der geringen Steifigkeit des Mastes und somit der geringen Positioniergenauigkeit.



Die schematische Darstellung des C<sup>4</sup>-Roboters der Ohio University [30] beschreibt eine Fertigungsmaschine mit vielen Seilrobotern. Vorteil dieses Systems ist eine hohe Positioniergenauigkeit und eine einfache Steuerung über G-Code. Der Aufbau kann je nach Größe der zu druckenden Struktur relativ aufwendig werden.

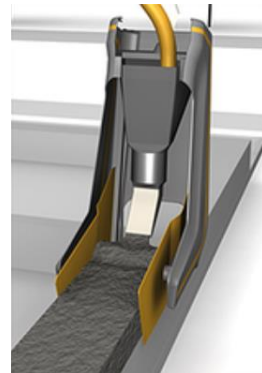
Abb. 2-6: Verschiedene Ansätze des Contour Crafting Verfahrens



Architektonische Sitzgelegenheit mit einer Filamentbreite von ca. 10 mm [31]



Additiv gefertigte Betonwand mit einer Filamentbreite von < 50 mm [32]



Wanddruck mit einer Filamentbreite > 100 mm mit CONPrint3D-Technologie [33]

Abb. 2-7: Differierende Methoden der Streifenauflege beim CC-Verfahren

Neben den genannten Vorteilen des CC-Verfahrens sowie dessen Variationen, die sich durch die dargestellten Methoden ergeben, zeigen sich dennoch einige Nachteile gegenüber den anderen Betondruckverfahren. Beispielsweise besteht ein Defizit bzgl. der geometrischen Freiheit im Vergleich zum 3DP-Verfahren. Des Weiteren weisen gerade die CC-Variationen mit einem breiten Filamentauftrag nachteilige

Eigenschaften hinsichtlich der architektonischen Gestaltung auf, da die Detailgenauigkeit mit größer werdender Streifenauflage abnimmt. Zudem sind die einzelnen Layer je nach Herstellungsmethode deutlich durch eine Art Verdickung zu erkennen. Hierdurch wird die Oberflächenbeschaffenheit nicht nur optisch sondern auch funktional negativ beeinflusst, da sich auch weitere Maßnahmen an der gewellten Wandfläche schwieriger umsetzen lassen als an einer glatten Fassade.

### 2.2.3.3 Shotcrete 3D Printing Verfahren

Das Shotcrete 3D Printing Verfahren (SC3DP-Verfahren) ist eine RM-Technologie, die sich von den bisherigen additiven Fertigungsverfahren durch seine neue Methode der Schichtenerzeugung auszeichnet. Die Technologie wurde zwischen 2016-2018 am Institut für Tragwerksentwurf (ITE) in Kooperation mit dem Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig entwickelt [35], um ähnlich zum CC-Verfahren mit einer relativ hohen Prozessgeschwindigkeit großformatige Bauteile in Massivbauweise, wie in Abb. 2-8 illustriert, fertigen zu können. Der Ansatz des Sprühens von Beton ist bereits seit 1907 bekannt [36], jedoch bietet dieses neuartige, robotisch gesteuerte additive Fertigungsverfahren die Möglichkeit, strukturelle Bewehrung in beide Hauptrichtungen zu integrieren [37]. Des Weiteren ermöglicht die variable Maschinenarmführung das Drucken kleinerer, horizontaler Auskragungen an vertikalen Flächen, was im Vergleich zum CC-Verfahren einen potenziellen Vorteil impliziert. Eine weitere Qualität, die sich infolge der kontrollierten Zugabe von Druckluft bietet, ist die Lösung des Problems von kalten Fugen, welche im Unterschied zu den Extrusionsverfahren eher auftreten können. Durch die Zerstäubung bzw. das beschleunigte Aufsprühen der Betonmatrix entsteht beim Aufprall eine hohe kinematische Energie, die eine Verdichtung des Betons sowie einen guten mechanischen Verbund zwischen zwei aufeinander-folgenden Schichten bewirkt. Demzufolge können mit dem SC3DP-Verfahren höhere Rohdichten bzw. geringere Porositäten im Gegensatz zur 3DP-Technologie erzielt werden [34]. Daraus resultieren, wie in Tab. 2-3 zusammengestellt, gute Betoneigenschaften der additiv gefertigten Bauteile.

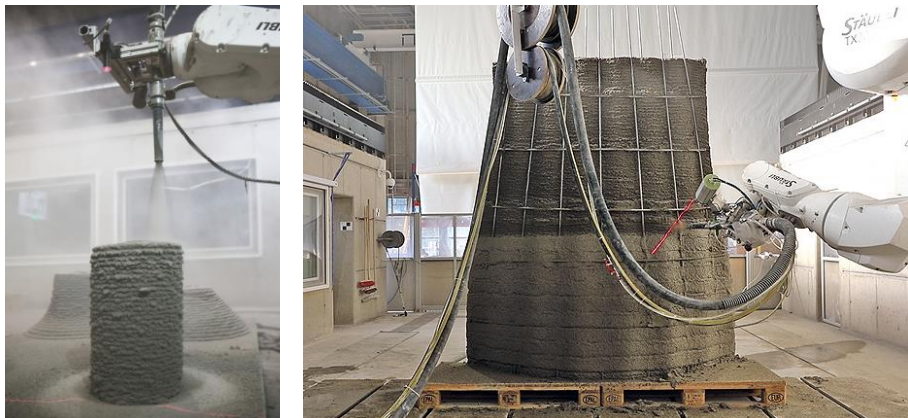


Abb. 2-8: Produktion einer Stütze mit dem SC3DP-Verfahren [38], Second Layer 3D Printing nach Einfädeln der Längsbewehrung [35]

Negative Eigenschaften weist dieses additive Fertigungsverfahren deutlich in der Detailgenauigkeit und Oberflächenbeschaffenheit auf. Dies ist darin begründet, dass aufgrund des schichtweisen Aufbaus, des recht hohen Spritzdrucks und des nicht vorhandenen Spritzschutzes der Beton nicht nur auf dem definierten Streifen platziert wird, sondern einen relativ großen Bereich um das bedruckte Feld mitbenetzt. Zudem entsteht ein gewisser Sprühnebel, der ebenfalls das umliegende Areal verunreinigt. Des Weiteren bedarf es einer komplexen Steuerung, sodass mit der Programmierung und Handhabung gegenüber den weiteren Betondruckverfahren ein größerer Aufwand in der Entwicklung einhergeht. Topologieoptimierte Bauteile können wie mit dem CC-Verfahren nur bedingt realisiert werden, da Überhänge und Hohlräume im Vergleich zur 3DP-Technologie nur mit temporären Stützkonstruktionen gedruckt werden können. Die Produktion von filigranen Bauteilen ist aufgrund des Spritzverfahrens nicht praktikabel und eine Nachbehandlung der Oberfläche ist in den meisten Fällen unerlässlich, um Kerben und eine gestörte Kraftübertragung zu vermeiden. Somit ist mindestens ein weiterer Arbeitsschritt in der Planung zu berücksichtigen.

Tab. 2-3: Potenzielle Eigenschaften des SC3DP Betons

Eigenschaften	Variable	Wert
Dichte (horizontal)	$\rho_H$	ca. 2.220 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Dichte (vertikal)	$\rho_V$	ca. 2.180 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Druckfestigkeit (horizontal)	$f_{c,H}$	ca. 71,0 MPa
Druckfestigkeit (vertikal)	$f_{c,V}$	ca. 68,0 MPa
Biegezugfestigkeit (horizontal)	$f_{ct,H}$	ca. 7,5 MPa
Biegezugfestigkeit (vertikal)	$f_{ct,V}$	ca. 7,0 MPa
Die Probekörper wurden sowohl horizontal als auch vertikal aus den Schichten geschnitten und nach 14 Tagen geprüft [34].		

#### 2.2.3.4 3D-Pulverdruckverfahren

Das 3D-Pulverdruckverfahren bzw. 3D-Printing-Verfahren (3DP), welches nach Shakor et al. [3] zu einem der zuverlässigsten 3D-Drucktechniken zählt, hat seine Anfänge in den 90er Jahren. Die Technologie, auch Binder-Jetting genannt, wurde 1993 von Wissenschaftlern am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Boston zunächst zum Drucken von Gipspulver mit einem auf Wasser basierendem Bindemittel entwickelt [39]. Doch schon frühzeitig erkannte man das Potenzial, um weitere Materialien, wie in Tab. 2-1 aufgelistet, miteinander zu verbinden. Daher bietet dieses additive Fertigungsverfahren das größte Anwendungsspektrum hinsichtlich der Materialenauswahl, um in einem automatisierten Fertigungsprozess dreidimensionale Strukturen fertigen zu können. Für diese Arbeit beziehen sich folgende Eigenschaften zur Vergleichbarkeit jedoch nur auf die Verarbeitung von zementösen Bindemitteln.

Ein entscheidender Vorteil des pulverbett-basierenden Betondruckverfahrens gegenüber der CC- und SC3DP-Technologie ist die praktisch grenzenlose, geometrische Freiheit bei der Modellierung der CAD-Struktur, da der nicht erhärtende Compound nach Vollendung des Druckprozesses aus den kleinsten Öffnungen entfernt werden kann. Das nicht erhärtende Material kann nach dem Prinzip der Ressourcenschonung wiederverwendet werden, sodass neben der optionalen Ausführung topologieoptimierter Bauteile die effizientere Verwertung des eingesetzten Materials zusätzlich gefördert werden kann. Zudem dient das trockene Pulver während des Herstellungsprozesses als Stützkonstruktion, sodass Hohlräume und Überhänge kein Problem bei der Produktion darstellen. Neben der Verringerung von zusätzlichen Planungsprozessen hinsichtlich geeigneter Stützstrukturen kann die additive Fertigungsmaschine mit der typischen G-Code Programmiersprache für numerische Computersteuerungen programmiert werden. Da sich infolge der nahezu freien Gestaltung der Exponate neue Optionen für die Architektur ergeben, können mit einer relativ hohen Detailgenauigkeit individuelle Kunst- und Kulturprojekte umgesetzt sowie optimierte Tragwerkskonstruktionen gedruckt werden. Somit lässt sich ohne aufwendige, subtraktive Fertigungsverfahren eine vergleichsweise ebene Oberflächenbeschaffenheit erzeugen. Dies dokumentieren zum einen die 3D-gedruckten Exponate in Abb. 2-9 und zum anderen verdeutlicht Abb. 2-10 die Methodik hinter dem Herstellungsprozess solcher detailgetreuer Betonstrukturen.

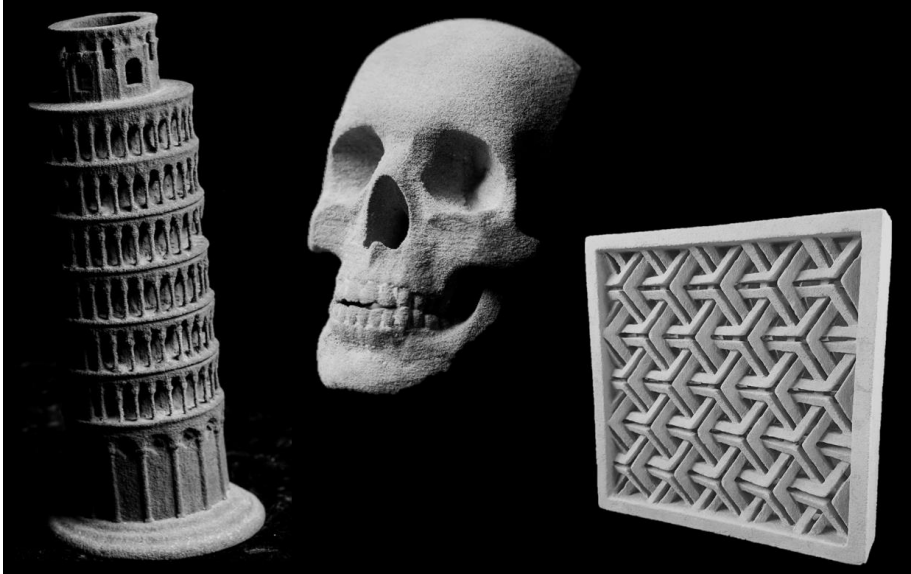


Abb. 2-9: 3D-gedruckte Exponate mit 3DP-Verfahren [23]  
Links: Pisa-Turm (Größe): ca. 21 x 9 x 9 cm  
Mitte: Schädel (Größe): ca. 13 x 9 x 8 cm  
Rechts: Element aus einer Fassade (Größe): ca. 20 x 20 x 4 cm

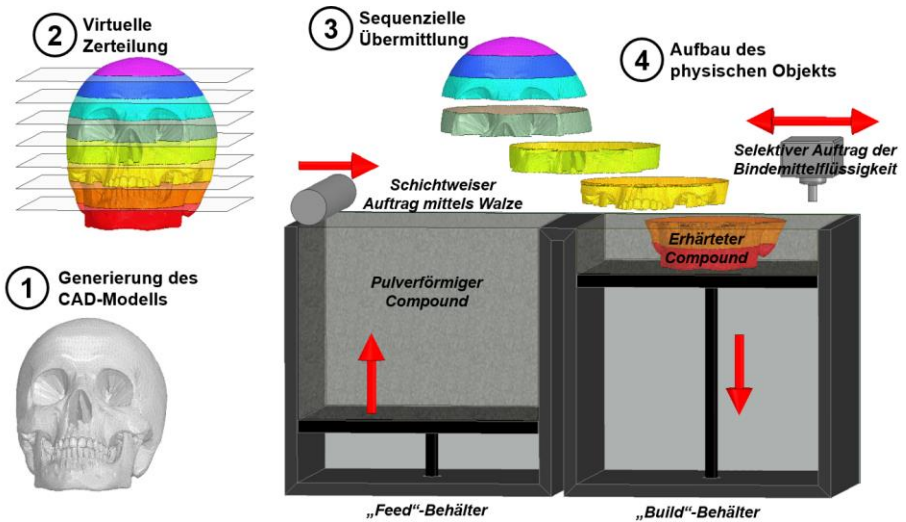


Abb. 2-10: Ablaufschema des 3D-Pulverdruckverfahrens [40]

Neben den genannten Vorteilen und der Verwendbarkeit besteht derzeit noch ein maßgebliches Defizit in der produzierbaren Größe im Vergleich zur CC- und SC3DP-Technologie. Zudem sind die charakteristischen Betoneigenschaften aus Tab. 2-4 hinsichtlich der erreichbaren Druck- und Biegezugfestigkeiten wesentlich geringer. Obwohl sich auch Druckfestigkeiten von bis zu 36,5 MPa [40, 41] umsetzen lassen, eignet sich dieses Verfahren derzeit nicht für die Produktion von Strukturen, die sich in identischer Qualität mit den beiden vorgenannten Betondruckverfahren realisieren lassen. Sicherlich können, wie bereits dargestellt, detaillierte Betonexponate ohne temporäre Stützkonstruktionen gedruckt werden, jedoch ist bei der erforderlichen Nachbearbeitung erhöhte Aufmerksamkeit bei diesen filigranen Strukturen geboten, da diese Konstruktionen nach dem Druckprozess noch äußerst fragil sind. Die Produktionsgeschwindigkeit der individuellen, freigeformten Elemente ist in Relation zur gewünschten Baugröße nicht langsam (mit verwendetem 3D-Drucker und gewählten Einstellungen ca. 12 sec pro Schicht), dennoch lassen sich massige Bauteile ohne besonders detailreiche Elemente mit dem extrudierenden Verfahren zügiger produzieren.

Tab. 2-4: Potenzielle Eigenschaften des 3DP Betons

Eigenschaften	Variable	Wert
Dichte	$\rho_H$	ca. $1.700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Druckfestigkeit (horizontal)	$f_{c,H}$	ca. 17,5 MPa
Druckfestigkeit (vertikal)	$f_{c,V}$	ca. 16,6 MPa
Druckfestigkeit (diagonal)	$f_{c,D}$	ca. 16,9 MPa
Biegezugfestigkeit (horizontal)	$f_{ct,H}$	ca. 3,6 MPa
Die Probekörper wurden partiell parallel, orthogonal und diagonal zum Schichtenauftrag nach 28 Tagen geprüft (vgl. [40, 42]). Die horizontale Druckfestigkeit entspricht einer orthogonalen Belastung zum horizontalen Schichtaufbau und die vertikale Druckfestigkeit entspricht einer parallelen Belastung zum Schichtaufbau.		

### 2.2.4 Auflösung der Modelldarstellung beim 3DP-Verfahren

Additive Fertigungsverfahren bzw. Rapid-Manufacturing-Prozesse erzeugen ein Abbild eines digitalen Modells. Die Auflösung der 3D-gedruckten Modelle gewinnt zunehmend an Bedeutung, sobald die Exponate filigraner, detailgetreuer und im Wesentlichen nicht mehr aufwendig nachbehandelt werden sollen. Für die genannten



Betondruckverfahren ergeben sich folglich Grenzen hinsichtlich der Auflösung. Der Grad, in dem sie in der Lage sind, diese Designvorgabe zu repräsentieren, hängt in gewissem Maße mit der Auflösung des Prozesses zusammen. Der Begriff „Auflösung“ stammt aus dem 2D-Druck und ist für die Beschreibung von 3D-Objekten etwas zweideutig [16].

Die Auflösung zweidimensionaler Strukturen wird im Allgemeinen mit den Begriffen Pixel, dpi (Dots per Inch) oder ppi (Pixel per Inch) beschrieben. Für dreidimensionale Elemente wird hingegen der von Pixel abgeleitete Ausdruck Voxel (volumetrische Pixel) verwendet. Diese haben typischerweise keine explizite x-, y-, z-Referenz, sondern stehen in einer impliziten Beziehung zueinander, um eine vollständige Struktur zu erzeugen. Die Anzahl der s. g. Voxel bestimmt die gewünschte Auflösung des 3D-Körpers. Typische 3D-CAD-Programme stellen Objekte dar, indem sie die Grenzflächen definieren und annehmen, dass das Material zwischen diesen homogen und isotrop ist. Für die meisten additiven Fertigungsverfahren ist dies eine adäquate Beschreibung der Informationen und lässt sich ebenfalls auf das verwendete 3DP-Verfahren übertragen. Somit können die Daten, die diesen binären Zustand repräsentieren, leicht in eine Slice-Information desselben festen Objekts übersetzt werden. Die Schnittdaten sind jedoch zweidimensional, d. h. sie sind unendlich dünn und bilden allein kein 3D-Objekt, wenn sie sequentiell gestapelt werden. Ein maschinen- und materialabhängiger Bauparameter ist erforderlich, der die Dicke jeder Schicht bestimmt;  $\Delta z = \delta z \cdot n$ , wobei „ $\Delta z$ “ die Höhe des Objekts ist, „ $\delta z$ “ die Dicke jeder Schicht und „ $n$ “ die Anzahl der Schichten. Da die 2D-Daten dieser Dicke zugeordnet sind, kann das resultierende 3D-Objekt nur eine Annäherung an die digital erzeugte Form sein. Tatsächlich wird das digitale Objekt durch Begrenzungen im analogen Prozess quantifiziert. Die Approximation wird mit abnehmender Schichtdicke besser [16]. Demzufolge steht die Auflösung in einem antiproportionalen Verhältnis zur Schichtstärke. Dies führt zu einem Wechselspiel zwischen einer detaillierten Darstellung und einer schnellen Produktion des 3D-Körpers. Buswell et al. [43] veranschaulichen mit ihrem idealisierten Diagramm (siehe Abb. 2-11) das Auflösungs- / Auftragsgeschwindigkeits-Paradoxon und setzten dabei bereits die in schwarz umrandeten, allgemeinen Fertigungsverfahren treffend in Relation zueinander. Ergänzend dazu stehen nun die in Abschnitt 2.2.3 beschriebenen additiven Fertigungsverfahren. Wie für alle Fertigungsverfahren werden je nach Anwendungstechnik differierende Produktionsgeschwindigkeiten und realisierbare Auflösungen angepriesen.

Mechtcherine et al. [44] erwähnen eine Druckgeschwindigkeit im CC-Verfahren von bis zu 10 m/min bei einer Düsenbreite von 150 mm sowie einer Schichtstärke von 50 mm. Im Gegensatz dazu erreichen Leal da Silva et al. [45] mit ihrem CC-Verfahren nur eine Ablagerate von 50 mm/s. Jedoch muss man ebenfalls konstatieren, dass sie durch den schmaleren und variableren Auftrag in Relation eine wesentlich höhere Auflösung erreichen. Somit bietet sich gerade bei den extrudierenden additiven Fertigungsverfahren eine große Bandbreite, die sich in der Darstellung durch den größeren Kreis verdeutlicht. Das SC3DP-Verfahren schneidet nur geringfügig die Fläche der additiven Fertigungsverfahren, da es prinzipiell mit der bereits existierenden Spritzbetontechnologie korreliert und eine Beurteilung der Auflösung aufgrund der teils großen Streuung nicht exakt definiert werden kann. Im angewandten

3DP-Verfahren lässt sich infolge einer geringen Schichtstärke von derzeit 0,1 mm kombiniert mit einem angepassten Größtkorn eine Auflösung von ca. 100 µm realisieren. Diese detailgetreue Herstellung geht aufgrund der proportional steigenden Anzahl an Layern zulasten der Fertigungsdauer. Eine Steigerung der Herstellungsgeschwindigkeit ist angesichts der variablen Schichtstärke möglich, allerdings auf Kosten steigender Toleranzen in Bezug auf die Auflösung bzw. Detailgenauigkeit der 3D-gedruckten Exponate.

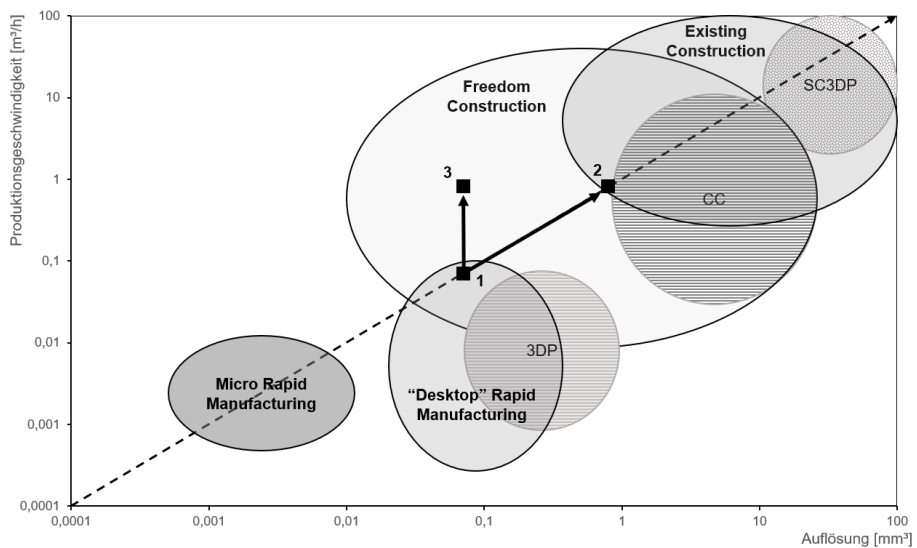


Abb. 2-11: Beziehung zwischen Produktionsprozessen in Bezug auf Bauauflösung und Beschichtungsgeschwindigkeit (vgl. [43])

Freigeformte Konstruktionen haben ihren Vorteil zur herkömmlichen Produktion im Bezug zur individuell anpassbaren Formgebung, jedoch besteht je nach Anwendungsfall weiterhin der Nachteil der Herstellungsgeschwindigkeit bei einfachen Strukturen. Abb. 2-11 stellt dieses Problem mit drei quadratischen Blöcken dar. In der Regel nimmt die Prozessauflösung mit zunehmender Geschwindigkeit ab (Punkt 1 zu 2) und im Idealfall müssen die additiven Fertigungsverfahren eine höhere Geschwindigkeit bei gleichbleibender Auflösung liefern (Punkt 1 zu 3). Inwiefern sich die Auflösung beim 3DP-Verfahren je nach Trockenmörtelzusammensetzung oder Feuchtigkeitseintrag darstellt, ist Bestandteil der AF-Parameteranalyse jeder Versuchsserie dieser Arbeit.

Eine weitere Thematik, die u. a. die Auflösung filigraner und detailgetreuer Exponate beeinflusst, ist die Generierung der 3D-Modelle. Um die kleinsten Bestandteile bzw. Details des Exponates, wie sie in Abbildung Abb. 2-12 zu erkennen sind, drucken zu können, bedarf es neben der abgestimmten Zusammensetzung aus Bindemittelflüssigkeit, optimiertem Compound sowie einer geringen Schichtstärke zu Beginn des Herstellungsprozesses, einer detaillierten Vernetzung – das s. g. Meshing.



Abb. 2-12: Veranschaulichung der realisierbaren Auflösung mit dem 3DP-Verfahren (Größe: ca. 13 x 9 x 8 cm) (vgl. [14])

Beim Meshing wird die Oberfläche des modellierten Körpers im Allgemeinen in viele kleine Dreieckflächen separiert. Je feiner dieses Netz generiert wird, desto größer ist die Übereinstimmung zum modellierten Körper. Demzufolge steigt mit der Feinheit auch die Auflösung und schließlich potenziell die Qualität der 3D-gedruckten Exponate. Demgegenüber steht, dass mit der Feinheit des Meshings bzw. der Anzahl an Facettenelementen die Größe der STL-Datei ansteigt. Abb. 2-13 veranschaulicht hierzu exemplarisch, wie die Oberfläche eines Modells in unterschiedlicher Auflösung in kleine Segmente zerlegt ist.

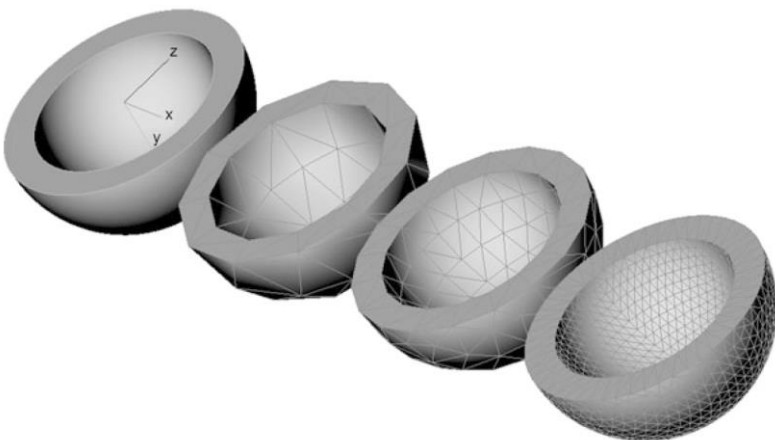


Abb. 2-13: Auflösungsunterschiede beim Meshing der konvertierten STL-Datei [46]

## 2.3 Beschreibung der verwendeten Werkstoffe

### 2.3.1 Allgemeines

Für die im experimentellen Teil der Arbeit generierten Versuchsreihen werden die Ausgangsstoffe in Abschnitt 2.3.2 bis 2.3.5 detailliert beschrieben. Zu den verwendeten Pulverpartikeln zählen neben den Bindemittelbestandteilen – wie Zement, Klinkerfeinmehl und Silicastaub – die betontypischen Gesteinskörnungsanteile, jedoch in einer an den Herstellungsprozess adaptierten, wesentlich feineren Variante. Hinzu kommen die ausgewählten Komponenten der aufzudruckenden Bindemittelflüssigkeit, die den Hydratationsprozess sowie die formulierten Additiven Fertigungsparameter essentiell beeinflussen.

Zum umfassenden Verständnis werden zusätzlich neben den Eigenschaften der aufzudruckenden Bindemittelflüssigkeit und der Gesteinskörnung u. a. die chemische Zusammensetzung des jeweiligen Bindemittelbestandteils sowie dessen Verhalten im Hinblick auf die Hydratation erläutert.

### 2.3.2 Zement

Zement gehört mit einer jährlich weltweiten Produktion von etwa 4,2 Milliarden Tonnen neben Holz und Stahl zu den am meisten genutzten Baumaterialien [47]. Für die Betonherstellung im konventionellen sowie additiven Herstellungsverfahren stehen dem Anwender viele verschiedene Zementarten zur Verfügung, wobei neben dem Hauptbestandteil Portlandzementklinker weitere Bestandteile enthalten sein können. Diese dienen wie bspw. Hüttensand, Flugasche oder Kalkstein u. a. zur Verbesserung der physikalischen Eigenschaften, der Verarbeitbarkeit des Zements sowie der CO<sub>2</sub>-Einsparung. In dieser Arbeit beschränken sich die zementösen Bestandteile des Compounds aufgrund der Vielzahl an Einflussgrößen auf ein optimales Druckergebnis auf einen Portlandzement CEM I 52,5 R sowie ein fein gemahlenes Klinkermehl.

Allgemein besteht CEM I mit einem Anteil von mindestens 95 M.-% aus Portlandzementklinker [48], der sich in vier Hauptklinkermineralien (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO) und weitere Nebenbestandteile unterteilen lässt. Die verschiedenen Klinkerphasen – Tricalciumsilicat (C<sub>3</sub>S), Dicalciumsilicat (C<sub>2</sub>S), Tricalciumaluminat (C<sub>3</sub>A) und Tetracalciumaluminatferrit (C<sub>4</sub>(A,F)) – variieren nach [49] und [50] sowohl in ihrer Reaktionsgeschwindigkeit als auch an ihrem Anteil zur Festigkeitsentwicklung des Zementsteins (siehe Abb. 2-14 und Abb. 2-15).

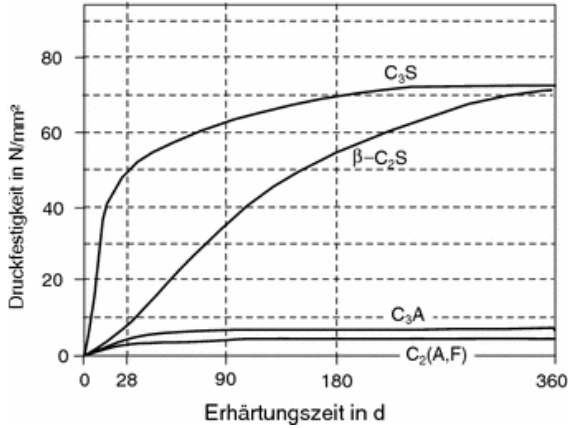


Abb. 2-14: Druckfestigkeitsverlauf der Klinkermineralien nach [49]

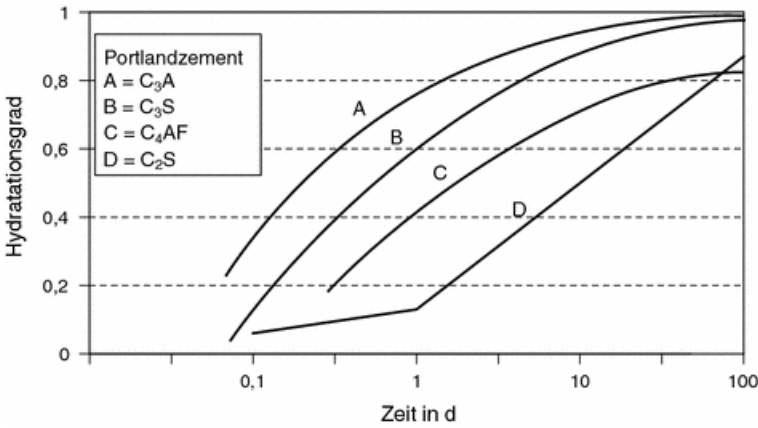


Abb. 2-15: Hydratationsgrad in Abhängigkeit von der Erhärtungszeit nach [50]

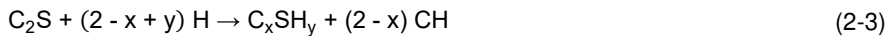
Mit 40 – 80 M.-% weist der Zement hauptsächlich Alit bzw. Tricalciumsilicat ( $C_3S$ ) auf, welches sich wiederum in etwa zu 60 – 75 % in Calciumoxid ( $CaO$ ) und zu 20 – 30 M.-% in Siliciumdioxid ( $SiO_2$ ) unterteilt [51–53]. Dieser primär monoklin kristallisierende Bestandteil reagiert bereits in der frühen Phase der Hydratation (siehe Abschnitt 2.4) zu Calciumsilicathydrat-Phasen (C-S-H-Phasen). Da die Zusammensetzung der C-S-H-Phasen primär von der Zugabewassermenge bestimmt wird, entstehen kalkärmere Morphologien je größer die Flüssigkeitsmenge ist [54]. Infolge der Variabilität können für die Reaktionen zwischen  $C_3S$  und der Feuchtigkeit nur allgemeine Formeln angegeben werden:



Beispiel:



Mit seiner schnellen Hydratation ist das  $C_3S$  in erster Linie für die Entwicklung der Frühfestigkeit des Portlandzements verantwortlich, während das Belit bzw. Dicalciumsilicat ( $C_2S$ ) mit einem Klinkeranteil von ca. 0–30 % zur Festigkeitsentwicklung im höheren Alter beiträgt [51–53]. Relevant für die Frühfestigkeit des konventionell hergestellten Betons sowie möglicherweise für den additiv gefertigten Probekörper ist somit in Bezug auf die Zementhydratation primär die silicatische Klinkerphase  $C_3S$ . Beide Mineralien erzeugen während der chemischen Reaktion eng verzahnte Morphologien, die u. a. die angestrebte Druckfestigkeit sicherstellen. Belit liegt im technischen Klinker prinzipiell als Betadicalciumsilicat ( $\beta$ - $C_2S$ ) vor und besteht zu etwa 65,1 M.-% aus CaO und zu 34,9 M.-% aus  $SiO_2$  [51]. Für die  $C_2S$ -Hydratation wird folgende bevorzugte Gleichung angegeben:



Beispiel:



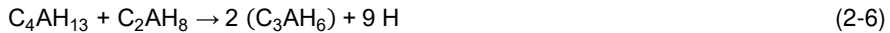
Sowohl bei der Hydratation des  $C_3S$  als auch beim  $\beta$ - $C_2S$  entsteht neben den C-S-H-Phasen Portlandit bzw. Calciumhydroxid (CH), jedoch verläuft die Reaktion beim  $\beta$ - $C_2S$  deutlich langsamer, sodass eine geringere CH-Bildung zu verzeichnen ist. Die Morphologie der entwickelten C-S-H-Phasen ist hingegen nahezu identisch. Nach Stark und Wicht [55] stellt die vereinfachte Strukturformel  $C_3S_2H_4$  die durchschnittliche Zusammensetzung der C-S-H-Phasen dar und kongruiert in ihrer mineralogischen Struktur mit den s. g. Schichtsilicaten Tobermorit ( $C_5S_6H_9$ ) und Jennit ( $C_9S_6H_{11}$ ). Einen signifikanten Einfluss auf die Strukturbildung nimmt das Calcium/Silicium-Verhältnis (Ca/Si) ein, wodurch während der Hydratation von  $C_3S$  und  $\beta$ - $C_2S$  das Ca/Si-Verhältnis der entstehenden C-S-H-Phasen stetig abnimmt. Ursache dafür ist die fortschreitende Polymerisation der Silicationen. Bei einem Verhältnis von 0,8 – 1,5 entsteht weitestgehend Tobermorit, welches als Typ I C-S-H bezeichnet wird und bei ausreichender Feuchtigkeit lange stabförmige Fasern auf der Oberfläche der Zementkörner bildet [52, 54]. Dementsprechend entstehen bei unzureichender Feuchtigkeit kleinere C-S-H-Strukturen, z. B. 1,1 nm-Tobermorit ( $C_5S_6H_5$ ) oder 0,9 nm-Tobermorit ( $C_5S_6H_2$ ), bei denen der Schichtabstand mit abnehmender Kristallwassermenge stetig geringer wird [56]. Diese kleineren Morphologien führen potenziell zu einer Minimierung des Schichtverbunds zwischen den einzelnen Layern beim Pulverdruckverfahren und schwächen zudem die Betonmatrix im Gesamtsystem der gedruckten Elemente. Bei Ca/Si-Relationen von 1,0 – 2,0 entwickelt sich vorzugsweise calciumreicheres Jennit, welches auch als Typ II C-S-H definiert wird [52, 57, 58].

Alit und Belit sind im Gegensatz zu den Aluminat- und Ferritphasen grobkörnig, was mitunter dazu führt, dass das feinkörnige Tricalciumaluminat ( $C_3A$ ) eine besonders hohe Reaktivität aufgrund der großen Oberfläche aufweist. Infolge der stark exothermen Reaktion zu Beginn des Hydratationsprozesses bilden sich je nach Konzentration an  $Ca^{2+}$ - und  $Al^{3+}$ -Ionen in der Lösung verschiedene stabile sowie metastabile Produkte. Ein weiterer zu berücksichtigender Faktor ist das Sulfatangebot

in der Zementzusammensetzung. Sofern kein Sulfat im Zement vorhanden ist, hydratisiert  $C_3A$  unmittelbar zu dünn tafelförmigen hexagonalen Calciumaluminathydrat-Phasen (C-A-H-Phasen), die ähnlich wie die C-S-H-Phasen aus der  $C_3S$  Hydratation eine Verfestigung der Betonmatrix erzeugen. Die chemische Reaktion des Tetracalciumaluminathydrats ( $C_4AH_{19}$ ) verläuft hingegen schneller und erzeugt dabei eine höhere Hydratationswärme (ca. 850 J/g  $C_3A$  zu ca. 500 J/g  $C_3S$  [59]). Infolge eines zu frühen Erstarrens wäre demnach eine Verarbeitung des Materials beim konventionellen Fertigungsverfahren ausgeschlossen. Für die additive Fertigung kann dies einerseits in Bezug auf die Frühfestigkeit potenziell einen positiven Effekt bewirken. Andererseits könnte jedoch ebenfalls die Problematik der zu schnellen Auskristallisation auftreten, sodass partiell der Verbund zwischen den einzelnen Layern verhindert wird. Diesbezüglich wäre die Betonmatrix gestört, was wiederum eine Minimierung der Endfestigkeit der 3D-gedruckten Betonstrukturen zur Folge hätte. Des Weiteren bildet sich durch die entstehenden kubischen (Katoit –  $C_3AH_6$ ), monoklinen (Gibbsit –  $\gamma-AH_3$ ) oder hexagonalen (Portlandit – CH) Kristallstrukturen, die den wassergefüllten Porenraum überbrücken, kein dichtes Faserbündel wie beim Reißverschlussprinzip der C-S-H-Phasen, sodass die Festigkeit dieser Morphologie wesentlich geringer ausfällt, als die der C-S-H-Strukturen [52, 53, 56, 60].



Die Reaktionsprodukte  $C_4AH_{13}$  sowie  $C_2AH_8$  sind metastabil resp. instabil, sodass sie sich mit der Zeit in stabiles Katoit umwandeln [61]:



Um den negativen Effekt einer zu schnellen Hydratation der C-A-H-Phasen bzw. einen beeinträchtigten Verbund zwischen den Layern beim 3DP-Verfahren potenziell zu verhindern, beinhaltet der eingesetzte Zement einen entsprechenden  $SO_3$ -Anteil. Für das verwendete Klinkerfeinmehl fällt dieser Sulfatrisoxidgehalt wesentlich geringer aus, sodass dieser Faktor im Hinblick auf die Untersuchungen zum Einfluss des Klinkerfeinmehlanteils zu analysieren ist. Bei der wesentlich komplexeren Hydratation mit dem Sulfatanteil entstehen je nach Sulfatangebot unterschiedliche Reaktionsprodukte, die sich u. a. wie das Calciumaluminatrisulfat ( $C_6\bar{A}\bar{S}_3H_{32}$ ) auf der Oberfläche der  $C_3A$ -Partikeln bilden und die C-A-H-Phasenbildung verzögern [55]:

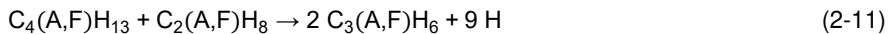
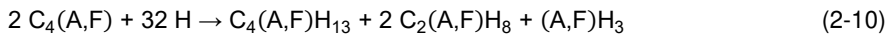


Die anschließende Hydratation erfolgt durch langsame Diffusionsprozesse [62, 63], wobei infolge des entstehenden Kristallisationsdrucks die Ettringitschicht aufbricht. Dieses primäre Hydratationsprodukt ist nur so lange stabil und behindert den Transport von Wasser und verschließt aufgebrochene Stellen der Hülle um das  $C_3A$ , wie ausreichend Sulfat zur Verfügung steht [62, 64]. Wie in Stephan [56] und Taylor [57] näher erläutert, entstehen je nach Konzentration in diesem quaternären System (C-A- $\bar{C}\bar{S}$ -H) [56] Hydratphasen wie Portlandit (CH), Gips ( $\bar{C}\bar{S}\bar{H}_2$ ), Katoit ( $C_3AH_6$ ),

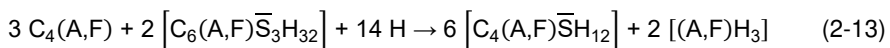
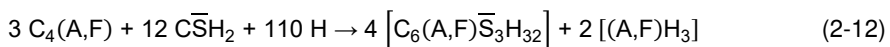
Gibbsit ( $\gamma\text{-AH}_3$ ) sowie das beschriebene Ettringit ( $\text{C}_6\overline{\text{AS}}_3\text{H}_{32}$ ). Aufgrund einer unzureichenden Sulfationenkonzentration für die Ettringitbildung oder einem entsprechend geringeren Feuchteangebot in den Poren sind während der Hydratation ebenfalls Strukturbildungen von Phasen mit geringerem Wassergehalt, wie das Tricalciumaluminat-Monocalciumsulfathydrat (Monosulfat –  $\text{C}_4\overline{\text{AS}}\text{H}_{12}$ ) annehmbar:



Letztendlich wird sich bei der Hydratation von  $\text{C}_3\text{A}$  ein Gleichgewicht zwischen Ettringit, Monosulfat und dessen bereits aufgezählten Mischkristallen einstellen [54, 64]. Der letzte Bestandteil der vier Hauptklinkerminerale ist das aufgeführte Tetracalciumaluminatferrit ( $\text{C}_4(\text{A},\text{F})$ ), das ähnlich zum  $\text{C}_2\text{S}$  deutlich langsamer als  $\text{C}_3\text{A}$  und  $\text{C}_3\text{S}$  reagiert. Die Hydratationsgeschwindigkeit nimmt zusätzlich mit steigendem  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Gehalt ab und weist im Vergleich zu den weiteren Klinkerphasen die geringste Festigkeit auf [58]. Der Hydratationsprozess verläuft kongruent zum  $\text{C}_3\text{A}$  [65], sodass bei Abwesenheit von Sulfat zunächst metastabile Calciumaluminatferrithydrate entstehen, die sich in der fortlaufenden chemischen Entwicklung in stabilere kubische Hydratformen ( $\text{C}_3(\text{A},\text{F})\text{H}_6$ ) transformieren:



Bei dem in dieser Arbeit vorliegenden Zement bzw. Klinkerfeinmehl können die  $\text{C}_4(\text{A},\text{F})$ -Phasen aufgrund des vorhandenen Sulfatangebots adäquat zum  $\text{C}_3\text{A}$  zu Aft-Phasen ( $\overline{\text{Al}}_2\text{O}_3\text{-}\overline{\text{Fe}}_2\text{O}_3\text{-tri}$ ) bzw. Tricalciumaluminatferrit-Tricalciumsulfathydrat ( $\text{C}_6(\text{A},\text{F})\overline{\text{S}}_3\text{H}_{32}$ ) sowie zu sulfatärmeren AFm-Phasen ( $\overline{\text{Al}}_2\text{O}_3\text{-}\overline{\text{Fe}}_2\text{O}_3\text{-mono}$ ) bzw. Tricalciumaluminatferrit-Monocalciumsulfathydrat ( $\text{C}_4(\text{A},\text{F})\overline{\text{S}}\text{H}_{12}$ ) reagieren.



Neben den aufgeführten Reaktionsprodukten können sich wie beim  $\text{C}_3\text{A}$  je nach Angebot an Calciumsulfat vielfältige Substanzen bilden [52, 57]. Essentiell ist in diesem chemischen Reaktionsablauf jedoch, dass sich die Hydratationsprodukte nur in einem flüssigen Medium bilden. Wenn folglich während dem Hydratationsprozess (siehe Abschnitt 2.4) zu wenig Feuchtigkeit für den Zement zur Verfügung steht (bspw. aufgrund von Wasserbindungen siehe Abschnitt 2.4.7) oder ein vorzeitiger Wasserverlust (z. B. infolge von Austrocknung) auftritt, so wirkt sich dies negativ auf die Festigkeitsentwicklung und Dauerhaftigkeit des 3D-gedruckten oder konventionell hergestellten Betons aus [52].



### 2.3.3 Silicastaub

Silicastaub oder auch Mikrosilica genannt, ist ein Nebenprodukt bei der Produktion von Silicium und Siliciumlegierungen im elektrischen Lichtbogenofen im Rahmen der Abgasreinigung und zählt zu den künstlichen Puzzolanen. Es besteht aus sehr feinen, glasig-kugeligen Partikeln mit einer mittleren Korngröße von etwa 0,1 – 0,2 µm und ist damit um ca. 50 – 100 mal kleiner als durchschnittliche Zementpartikel. Aufgrund der sehr feinen Partikelgröße liegt die spezifische Oberfläche des Pulvers, bestimmt nach dem BET-Verfahren (Brunauer-Emmett-Teller-Verfahren), gewöhnlich zwischen 180.000 und 250.000 cm<sup>2</sup>/g [60].

Die chemische Zusammensetzung des amorphen Silicastaubs kann sehr stark variieren, jedoch liegt im Allgemeinen der Siliciumdioxid-Anteil (S) bei mindestens 85 M-% [48]. Die restlichen Anteile bestehen aus Aluminiumoxid (A), Eisenoxid (F), Calciumoxid (C), Magnesiumoxid (M), Natriumoxid (N), Kaliumoxid (K) und Ruß [51]. Der in dieser Arbeit verwendete Silicastaub weist folgende chemische und physikalische Eigenschaften auf.

Tab. 2-5: Chemische und physikalische Eigenschaften vom Silicastaub

Eigenschaften	Charakteristischer Wert
Siliciumdioxid (S)	> 90 M.-%
Feuchtegehalt	< 1 M.-%
Maximaler Chloridgehalt	0,1 M.-%
Dichte	2,20 g/cm <sup>3</sup>
Schüttdichte	0,29 g/cm <sup>3</sup>
Mittlere Partikelgröße (nicht dispergiert)	41 µm (101 µm)
Spezifische Oberfläche BET-Messung [66]	250.000 cm <sup>2</sup> /g

Die Abweichung der mittleren Partikelgröße aus Tab. 2-5 im Vergleich zu den typischen Kennwerten vom Silicastaub ist darauf zurückzuführen, dass unkomprimiertes Silicastaub-Pulver aufgrund seiner hohen Feinheit zur Agglomeration neigt. Demnach weist Silicastaub, der bei der Lasergranulometrischen Messung mit einem Luftdruck von 0,3 MPa dispergiert wurde, eine mittlere Partikelgröße von ca. 41 µm auf. Eine höhere mittlere Partikelgröße von ca. 101 µm entsteht, sofern das unkomprimierte Silicastaub-Pulver direkt aus der Verpackung entnommen und keine Dispergierung während der Analyse durchgeführt wird. Die Agglomerate werden beim trockenen Mischprozess des konventionellen Fertigungsverfahrens mit grober Gesteinskörnung in der Regel zerstört bzw. aufgebrochen. Laut Hersteller bedarf es dazu einer Gesamtmischzeit für Silicastaub-Betone von mindestens drei Minuten, um

die Silicastaub-Knollen (Größe: wenige mm bis ca. 1 cm), die infolge längerer Lagerzeit, häufige Umschlagprozesse und Kompression gefördert werden, wirkungsvoll zu zerreiben. Ein Mischvorgang wie bei der konventionellen Fertigung ist beim Herstellungsprozess des 3DP-Verfahrens vor dem Druckprozess enthalten, jedoch sind die Erfahrungen vom konventionellen Fertigungsverfahren nicht in gleicher Weise übertragbar, da sich im Compound für das 3DP-Verfahren keine vergleichbar grobe Gesteinskörnung befindet und die Bindemittelflüssigkeit erst während des Druckprozesses hinzugegeben bzw. aufgedruckt wird. Demnach besteht die Frage, ob der intensive Mischprozess zur Vermeidung von Agglomeraten sowie zur Sicherstellung eines homogenen, druckfähigen Compounds ausreicht oder ob je nach Trockenmörtelzusammensetzung Divergenzen in Bezug auf die Menge von Agglomeraten im Compound zu identifizieren sind.

Silicastaub reagiert chemisch sowie physikalisch mit dem Zement. Die chemische Reaktion verläuft dabei exotherm ab, wobei die Gesamtwärmemenge des Silicastaubs von vergleichbarer Größenordnung zum Zement ist. Die Wärmeentwicklungsrate erfolgt dabei im Unterschied zum Hydratationsablauf des Portlandzementklinkers, wie in Abschnitt 2.4 dargestellt, je nach Silicastaub-Anteil im Compound zeitlich versetzt [67].

Der puzzolanische Zusatzstoff reagiert während der Hydratation mit dem zuvor entwickelten Portlandit zu weiteren wasserunlöslichen C-S-H-Phasen. Die dabei neu entstehende Kristallbildung verstärkt die Betonmatrix, da die hexagonalen CH-Kristallblättchen eine wesentlich geringere Festigkeit als die engmaschigen C-S-H-Nadeln aufweisen. Zu welchem Zeitpunkt der chemische Umsetzungsprozess beginnt, ist hingegen nicht eindeutig zu definieren. Nach [68, 69] scheint die Reaktion bei einer Temperatur von 20 °C erst nach sieben Tagen zu beginnen, da bis zu diesem Zeitpunkt die Siliciumoxid-Partikel unter dem Raster-Elektronen-Mikroskop (REM) zu erkennen sind. Nach [70] und [71] beginnt die puzzolanische Reaktion schon etwas früher. Nach [70] haben bspw. bereits bis zum dritten Tagen der Hydratation schon 34 % des Silicastaubs reagiert und die Untersuchungsergebnisse von Zelic et al. [71] deuten darauf hin, dass die puzzolanische Reaktion nach drei Tagen der Hydratation beginnt und bis zu 28 Tage andauert. Die Zusammensetzung der entstehenden C-S-H-Phasen ist wie bei der Zementhydratation variabel, sodass die nachfolgende Reaktionsgleichung eine exemplarische Summenformel (nicht stöchiometrisch) darstellt:



Die Zugabe von Silicastaub führt zu Änderungen des pH-Werts aufgrund einer Reduzierung der  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  und  $\text{OH}^-$ -Ionen-Konzentration in der Porenlösung. Durch die Veränderung kann der pH-Wert auf bis zu 11,9 sinken [72, 73], wodurch die Passivierungsschicht zum Schutz des Bewehrungsstahls im Beton geschwächt werden kann. Dennoch ist bei Untersuchungen an bestehenden Bauwerken aus Hochleistungsbetonen mit Silicastaub trotz geringerer Alkalitätsreserven keine Erhöhung der Korrosionsgefahr zu erwarten, da der notwendige pH-Wert von ca. 11,5 in der Passivierungsschicht nicht unterschritten wird. Zudem kompensiert der äußerst

dichte Beton den geringeren pH-Wert mithilfe eines erhöhten elektrolytischen Widerstands. Insgesamt lässt sich nach [74] konstatieren, dass die Alkalität des Hochleistungsbetons bei Zugabemengen von bis zu 15 M.-% bezogen auf den Zementgehalt dauerhaft gesichert ist. Eine vergleichbar hohe Dichte ist bei additiv gefertigten Betonstrukturen im 3DP-Verfahren nicht zu erwarten [75], jedoch ist neben der chemischen Verfestigung eine physikalische Verdichtung der Betonmatrix möglich. Die Verdichtung erfolgt dabei anhand der ultrafeinen Partikel, die u. a. die Kapillarporen durchsetzen und somit zu einer Verfeinerung des Porensystems beitragen, um folglich eine Steigerung der Druckfestigkeit 3D-gedruckter Exponate erzielen zu können. In Bezug auf konventionell gefertigten Beton ergaben Quecksilberporosimetrieuntersuchungen eine lineare Proportionalität zwischen dem Gelporenvolumen und dem Silicastaub-Gehalt, wobei das Gesamtporenvolumen bei  $w/z$ - bzw.  $w/(z+s)$ -Werten ( $s$  = Silicastaub) praktisch konstant blieb [76–78]. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Menge der groben Poren im silicastaubhaltigen Beton abnimmt und zugleich die Anzahl der feineren Poren steigt. Eine solche Verdichtung der Betonmatrix hat aufgrund der minimierten Permeabilität im Allgemeinen neben der bereits erwähnten Druckfestigkeitssteigerung eine bedeutende Erhöhung des Widerstands gegen das Eindringen von betonaggressiven Medien und demgemäß eine Optimierung der Dauerhaftigkeit zur Folge [51, 69, 74, 76, 79].

Die Wirkung des Silicastaubs als Füllstoff und einer somit höheren Packungsdichte des Trockencompounds bietet sich ebenfalls in Bezug auf die Optimierung des Verbundes in der Kontaktzone zwischen Zement und Gesteinskörnung an, um bspw. eine Verbesserung des Schichtauftrages im 3DP-Verfahren herbeizuführen. Einen weiteren AF-Parameter (siehe Abschnitt 3.2.4.3), der sich durch die Zugabe von Silicastaub potenziell beeinflussen lässt, ist die Strukturhaltung beim fluiden Auftrag und somit eine Verringerung des Adsorptionseffektes der angrenzenden Partikel. Des Weiteren wird dem mit Silicastaub angereicherten Beton eine Erhärtungsbeschleunigung zugesprochen, da die einzelnen Partikel als Kristallisationskeime für die Hydratationsprodukte des Zements dienen [69, 76]. Dieser physikalische Effekt könnte ebenfalls aufgrund der schnelleren Hydratation der bedruckten Bereiche im jeweiligen Layer die Detailgenauigkeit der additiv gefertigten Betonstrukturen begünstigen sowie die Stand- bzw. Frühfestigkeit fördern, um eine frühzeitige Entnahme aus dem Pulverbett zu ermöglichen.

### 2.3.4 Gesteinskörnung

Die Gesteinskörnung hat im konventionellen Herstellungsverfahren einen erheblichen Einfluss auf die rheologischen und mechanischen Eigenschaften der zu produzierenden Mörtel und Betone. Die Art und Qualität der feinen und groben Gesteinskörnung hat dabei allein aufgrund des Masseanteils im Beton eine signifikante Bedeutung auf die betontechnologischen Kennwerte. Die inerten Körner nehmen typischerweise 60 % bis 75 % des Betonvolumens (70 % bis 85 % der Masse) ein und wirken sich demnach nicht nur auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften aus, sondern sind ebenfalls für die Mischungsverhältnisse sowie die Wirtschaftlichkeit des Betons von größerer Relevanz.

Zu den wesentlichen Einflussfaktoren der Gesteinskörnung auf die betontechnologischen Kennwerte zählen u. a. das spezifische Gewicht, die Korngrößenverteilung, die Kornform, die Kornfestigkeit sowie die mineralogische Kornzusammensetzung. Inwiefern sich die genannten Eigenschaften ebenfalls auf die 3D-gedruckten Betonstrukturen auswirken, ist derzeit noch Teil der Forschung und wird partiell in den experimentellen Untersuchungen behandelt.

Die im Allgemeinen für die Mörtel- oder Betonherstellung genutzten, feinen Gesteinskörnungen bestehen aus Brechsand oder wie im Fall des eingesetzten Materials aus Natursand, wobei die Partikel nicht größer als 4 mm sind [80]. Für die erstellten Versuchsreihen dieser Arbeit weisen alle Körner sogar einen Durchmesser kleiner 0,25 mm auf, wovon der überwiegende Anteil mit einer Korngröße von höchstens 0,125 mm in der Größenordnung des Mehlkorns liegt. In Bezug auf das konventionelle Herstellungsverfahren kann mit einem entsprechenden Mehlkornanteil die Verarbeitbarkeit des Frischbetons verbessert sowie ein potentiell dichteres Gefüge erzeugt werden. Letzterer Aspekt würde sich im Hinblick auf das 3DP-Verfahren positiv für eine geringere Porosität und steigende Druckfestigkeit auswirken.

Tab. 2-6: Chemische und physikalische Eigenschaften vom Quarzsand und -mehl

Eigenschaften	Quarzsand Charakteristischer Wert	Quarzmehl Charakteristischer Wert
Siliciumdioxid (S)	98,5 M.-%	99,0 M.-%
Feuchtegehalt	0,1 %	0,1 %
Dichte	2,65 g/cm <sup>3</sup>	2,65 g/cm <sup>3</sup>
Schüttdichte	1,36 g/cm <sup>3</sup>	1,29 g/cm <sup>3</sup>
Mittlere Partikelgröße (nicht dispergiert)	152 µm (155 µm)	77 µm (98 µm)
Spezifische Oberfläche nach Blaine [81]	600 cm <sup>2</sup> /g	1.000 cm <sup>2</sup> /g

Im Detail weisen der verwendete Quarzsand sowie das noch feinere Quarzmehl die in Tab. 2-6 aufgeführten chemischen und physikalischen Kennwerte auf. Der Quarzsand besteht aus Partikeln der Korngruppe 0/0,25 und ermöglicht in Verbindung mit den weiteren, noch feineren Bestandteilen (wie bspw. Zement) das Auftragen dünner Pulverschichten beim Druckprozess. Der Quarzsand dient in erster Linie als Stützgerüst, dessen Hohlräume, wie in Abb. 2-16 veranschaulicht, durch die anderen Compound-Bestandteile gefüllt werden. Aufgrund der Feinheit des Quarzsands wird bereits grundlegend ein dichtes Gerüst mit kleinen Hohlräumen gebildet, sodass der zweite inerte Bestandteil in Form von Quarzmehl mit einer vergleichsweise noch feineren Zusammensetzung u. a. die verbliebenen Hohlräume füllen bzw. ein noch engmaschigeres Stützgerüst erzeugen soll. In Bezug auf die Korngrößenverteilung fallen beim Quarzsand bspw. nur noch 1 M.-% der Körnung durch ein Sieb der

Öffnungsweite von 0,063 mm und für das verwendete Quarzmehl sind es immerhin noch 38 M.-%. Beide Ausgangsstoffe zählen somit definitionsgemäß zur feinen Gesteinskörnung, jedoch nicht zur Gruppe der Füller, da der überwiegende Anteil auf dem 0,063 mm-Sieb verbleibt [80].

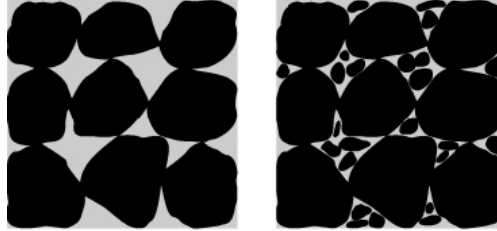


Abb. 2-16: Schematische Veranschaulichung eines Betongefüges [82]

Ein weiterer Parameter, der sich sowohl auf die physikalischen als auch chemischen Eigenschaften des 3D-gedruckten Betons auswirken kann, ist die Benetzbarkeit des Compounds. Diese ist nach Kirchberg et al. [83] sowie Tanaka et al. [84] u. a. abhängig von der Partikelgröße, Partikelgrößenverteilung sowie der Partikelform. Tanaka et al. [84] vergleichen die Benetzbarkeit von kugelförmigen Zementpulverbetten mit der von unregelmäßig geformten Partikeln, was sich prinzipiell auf die Gesteinskörnung übertragen lässt, und berichteten, dass sich das Benetzungsverhalten bei der Verwendung von kugelförmigen Partikeln aufgrund der glatten, regelmäßigen Oberflächenstruktur verbessert. Dies wirkt sich wiederum positiv auf das Ausbreitmaß beim konventionellen Fertigungsverfahren aus. Da beim 3DP-Verfahren kein Ausbreitmaß ermittelt wird, ist dieser Aspekt zu vernachlässigen, jedoch ist die Benetzbarkeit der einzelnen Partikel wesentlich für die Hydratation des Zements (siehe Abschnitt 2.4). Sofern zu viel Feuchtigkeit von den inerten Stoffen physikalisch gebunden wird, fehlt dem Zement die notwendige Wassermenge zur vollständigen Hydratation (siehe Abschnitt 2.4.7).

### 2.3.5 Bindemittelflüssigkeit

Der nächste Schritt nach der Auswahl der Bestandteile des trockenen Compounds ist die Formulierung der Bindemittelflüssigkeit, die wie bei jedem 3DP-Materialsystem auf den Druckkopf sowie den entsprechenden Compound angepasst wird. Die gewählte Druckkopftechnologie stellt die Grundlage für die Wahl und Entwicklung der Bindemittelflüssigkeit dar, damit neben einer langen Haltbarkeit des Druckkopfes eine konstant gleichbleibende Qualität des Druckauftrags gewährleistet werden kann. Ergänzend zum Wasser kann die gedruckte Flüssigkeit Zusätze enthalten, die den Druckprozess begünstigen oder die betontechnologischen Eigenschaften beeinflussen. Im Allgemeinen können nach [85] mit dem verwendeten Druckkopf (HP10-Kartusche) u. a. folgende Bindemittelkomponenten verdruckt werden: Wasser, Tenside, Porenbildner, organische Lösungsmittel und Co-Lösungsmittel, Biozide,

Sequestriermittel, Viskositätsmodifikatoren, niedermolekulare Polymere, Lithiumionenquellen. Weitere Druckhilfsmittel können Feuchthaltemittel zur Verringerung der Düsenverstopfung, ein Durchflussverstärker zur Erhöhung der Durchflussrate [86] und Farbstoffe sein. Die Kombination von Trägerflüssigkeit, potenziellen Bindemitteln und Additiven bestimmt die Rheologie der endgültigen flüssigen Formulierung.

Relevante Faktoren für eine optimale Benetzung der Partikel bzgl. der Bindemittelflüssigkeit sind nach Kiesvaara et al. [87] und van Aartsen [88] die Flüssigkeitsviskosität sowie die Oberflächenspannung. Die Untersuchungen zeigten, dass die Benetzbarkeit des Systems umso schlechter ist, je höher die Oberflächenspannung der Flüssigkeit und insbesondere die polare Komponente ist. Demzufolge nimmt der Kontaktwinkel mit zunehmender Tensidkonzentration ab und erzeugt somit eine niedrigere Oberflächenspannung des Fluids.

Die wichtigste Druckauftrageigenschaft ist die zuverlässige Benetzung der definierten Bereiche eines Layers. Eine Bindemittelflüssigkeit, die sich einwandfrei bindet, aber gar nicht oder nur sporadisch mittels der eingesetzten HP10-Kartusche aufgedruckt werden kann, ist für die Herstellung des gewünschten Teils unwirksam. Des Weiteren muss für einen effektiven Fertigungsprozess unabhängig von der Druckauftragsmethode die aufzubringende Flüssigkeit in der Lage sein, die oberste Pulverschicht zu durchdringen und die nächste Schicht ausreichend zu benetzen, damit ein optimaler Verbund zwischen den Schichten gewährleistet werden kann [85]. Die Zuverlässigkeit der Flüssigkeit hängt von der Rheologie und der richtigen Abstimmung der Flüssigkeitseigenschaften auf die Druckkopfspezifikationen ab. Druckköpfe haben typischerweise einen optimalen und einen extremen Bereich sowohl für die Oberflächenspannung als auch für die Viskosität des aufzudruckenden Fluids. Die Bindemittelflüssigkeit darf dabei bspw. nicht zu hochviskos sein, damit sie noch mittels Druckkopf auf den entsprechenden Layer aufgetragen werden kann. Die meisten Hersteller kommerzieller Tintenstrahldruckmaschinen geben eine maximale, dynamische Viskosität von etwa 20 cPs (cPs = Centipoise = mPa·s) an [89], jedoch können die Drucker ebenfalls für Flüssigkeiten mit einer Viskosität von bis zu 100 cPs ausgelegt werden und die minimal akzeptable Oberflächenspannung liegt in etwa bei 35 dyn/cm (dyn/cm = mN/m) [90].

Hauptbestandteil der Bindemittelflüssigkeiten in den untersuchten Versuchsserien ist Wasser, das eine Oberflächenspannung von 72 mN/m sowie eine dynamische Viskosität von 1,0 mPa·s jeweils bei Raumtemperatur von 20 °C aufweist. Da die Flüssigkeit in der HP10-Kartusche für einen optimalen Druckauftrag eine Viskosität von 1,35 mPa·s sowie eine Oberflächenspannung von 45 mN/m erfordert [91], wurden die rheologischen Eigenschaften der Trägerflüssigkeit in Anlehnung an die Patentschrift der ehemaligen 3D-Druckerfirma ZCorporation [86] mithilfe eines Alkohols in Form von 1,2-Propandiol sowie einem Tensid vorgenommen. Die Eigenschaften des jeweiligen Fluids sind hierbei in Tab. 2-7 zusammengetragen.

Tab. 2-7: Eigenschaften der Bindemittelflüssigkeit

Material	Dichte [ $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ]	Oberflächen- spannung [ $\frac{\text{mN}}{\text{m}}$ ]	Dynamische Viskosität $\eta$ [mPa·s]	Kinematische Viskosität $\nu$ [ $\frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$ ]
Destilliertes Wasser	0,9982	73,4	1,000	1,002
1,2-Propandiol	1,0400	34,6	45,001	43,270
Tensid	1,0062	30,2	1,427	1,418
Bindemittel- flüssigkeit	1,0033	26,4	1,268	1,264

Das verwendete 1,2-Propandiol ist ein Alkohol, welcher sich bei der Zugabe an den Zementklinker bindet. Aufgrund der hydroxyfunktionellen Verbindung mit mehr als einer Hydroxylgruppe zählt es zu den mehrwertigen Alkoholen und kann u. a. als Basis von Erhärtungsbeschleunigern eingesetzt werden [92]. Demnach bieten sich neben den in Abschnitt 2.3.2 und 2.3.3 dargestellten Bindemittelbestandteilen des Compounds zusätzlich die Komponenten der aufzudruckenden Bindemittelflüssigkeit an, um ein schnelles Abbinden bzw. eine frühzeitige Entnahme und Nachbearbeitung des 3D-gedruckten Betonkörpers zu begünstigen. Zu beachten gilt es jedoch dabei, dass durch die zügige Erhärtung der Verbund zwischen den einzelnen Schichten ebenfalls negativ beeinflusst werden kann [93].

Ergänzend zur potenziell beschleunigenden Wirkung setzt der verwendete, mehrwertige Alkohol neben dem eingesetzten Tensid die Oberflächenspannung des Wassers herab, um eine optimierte Benetzbarkeit der Bindemitteloberflächen in jedem Layer zu ermöglichen. Des Weiteren soll insbesondere eine Tröpfchenbildung auf dem Compound vermieden werden, sodass sich zum einen keine Tropfen beim Schichtauftrag an der Walze festsetzen bzw. anhaften können und zum anderen ein optimaler Verbund zwischen den Layern gewährleistet werden kann. Die Benetzbarkeit hängt vom Verhältnis der beteiligten Oberflächenspannungen ab, welche über die Youngsche Gleichung in Beziehung zum Kontaktwinkel steht. Der Kontaktwinkel wird daher zum Maß für die Benetzbarkeit. Je kleiner er ist, desto größer ist die Benetzbarkeit. Die Youngsche Gleichung besteht demnach aus den Faktoren der Oberflächenspannung des Bindemittels  $\sigma_{LG}$ , dem Kontaktwinkel  $\theta$  sowie aus der freien Oberflächenenergie des Compounds  $\sigma_{SG}$  und der Grenzflächenenergie zwischen Compound und Bindemittel  $\sigma_{SL}$  [94], wie Gleichung (2-15) verdeutlicht.

$$\cos(\theta) = \frac{\sigma_{SG} - \sigma_{SL}}{\sigma_{LG}} \quad (2-15)$$

Dabei ist

$\theta$	der Kontaktwinkel
$\sigma_{SG}$	die Oberflächenenergie des Festkörpers zum umgebenden Gas
$\sigma_{SL}$	die Grenzflächenenergie zwischen Festkörper und Flüssigkeit
$\sigma_{LG}$	die Oberflächenspannung der Flüssigkeit zum umgebenden Gas

## 2.4 Hydratation des Zements

### 2.4.1 Allgemeines

Die Begrifflichkeit „Hydratation“ bezeichnet in der Chemie die Anlagerung von Wassermolekülen an gelöste Ionen unter Bildung eines Hydrates. In der Betontechnologie wird dieser Begriff ein wenig weiter gefasst und bezieht sich hauptsächlich auf die Verfestigung von Zement bzw. im Detail auf die dabei ablaufenden Prozesse, die unabhängig von der Reaktionsart als Hydratation definiert werden. Für das 3DP-Verfahren kommt dem zeitlichen Ablauf der unterschiedlichen Phasen eine gesonderte Rolle zu, da neben der typischen Verfestigung des Betons AF-Parameter wie die Stand- bzw. Frühfestigkeit (siehe Abschnitt 2.5.4), die Einhaltung der gewünschten Geometrie infolge schnell reaktiver Reaktanten oder der Verbund zwischen den einzelnen Layern entscheidend werden.

Die Hydratationsstadien lassen sich in unterschiedliche Perioden gliedern. Nach Taylor [50] und Grübl et al. [79] wird die Hydratation des Zements in drei Phasen unterschieden. Die Anfangsphase bzw. Hydratationsstufe I beschreibt den chemischen Prozess, der sich primär durch die Bildung der Sulfatphasen kennzeichnet, bis ca. 3 – 6 Stunden nach Hydratationsbeginn. In der anschließenden mittleren Phase oder Hydratationsstufe II entstehen die Calciumsilicathydrat-Phasen (C-S-H-Phasen), die sich zunächst exponentiell fortentwickeln. Diese wasserhaltigen Verbindungen, die bei der Hydratation aller Zemente – mit Ausnahme des Tonerdezements – entstehen, entwickeln sich aus den silicatischen Klinkerphasen  $C_3S$  sowie  $C_2S$  und sind maßgeblich für die Festigkeitsbildung relevant. Die Quantität der entstehenden Klinkerphasen, die in ihrer Zusammensetzung variieren können, nimmt mit der Zeit ab, sodass in der s. g. späten Phase bzw. Hydratationsstufe III nach ca. 24 Stunden die chemische Entwicklung von C-S-H-Phasen sowie weiterer Reaktionsprodukte in einer Art Wurzelfunktion ausläuft [60].

Nach [52, 95–98] hingegen werden die einzelnen Perioden noch kleinteiliger strukturiert. Sie unterteilen die Hydratation hinsichtlich der chemischen Ablaufprozesse und der dadurch freiwerdenden Energie in vier Stadien. Die Einteilung des Hydratationsverlaufs hinsichtlich der Hydratationswärmeentwicklung in eine Prä-Induktions-, Dormante-, Accelerations- und Post-Accelerationsperiode ist ebenfalls nach [55, 99] zu erkennen, jedoch ergänzen sie den Vorgang noch mit einer fünften Phase, um den langsameren aber stetigen Verfestigungsprozess nach dem ersten Tag abzugrenzen.



Im Folgenden werden die bereits vielfach analysierten Hydratationsprozesse [54, 58, 60, 96, 97, 100] des Zements bzw. dessen Klinkerphasen mit Bezug zum Einfluss auf den konventionellen sowie additiven Fertigungsprozess beschrieben und abschließend zusammenfassend dargestellt.

#### 2.4.2 Prä-Induktionsperiode

Mit der Wasserzugabe beginnt die Prä-Induktionsperiode und leitet den nun immer weiter voranschreitenden Hydratationsprozess ein. Zu Beginn reagieren je nach Mahlfeinheit, Zementsorte und Temperatur ca. 1,5 M.-% des  $C_3A$  und etwa 2,0 bis 10,0 M.-% des  $C_3S$  mit dem Zugabewasser [96, 97]. Je feiner der Zement gemahlen und umso höher die Temperatur ist, desto schneller reagieren die einzelnen Bestandteile und dementsprechend steigert sich die reagierende Masse in den Anfangsminuten. Die im Klinker enthaltenen Alkalisulfate sowie die zugesetzten Calciumsulfate lösen sich direkt nach der Feuchtigkeitszugabe, sodass die maximale Konzentration von Aluminium-, Calcium-, Silicium- und Sulfat-Ionen bereits nach wenigen Minuten erreicht wird [54, 58, 100, 101].

Ohne den entsprechenden Sulfatanteil hydratisiert das  $C_3A$  in den ersten 40 Minuten der Prä-Induktionsperiode zu dünntafeligem, hexagonalem Tetracalciumaluminat-hydrat, das eine lockere Morphologie aufweist. Die anfängliche Reaktivität von  $C_3A$  hängt stark von der Menge der in das Kristallgitter eingebauten Alkalien ab. Sofern die Abstände zwischen den einzelnen Partikeln sehr gering sind, kann es zu einem schnellen Erstarren und letztendlich zu einer unverarbeitbaren Masse beim konventionellen Verfahren führen. In Bezug auf die additive Fertigung entsteht potenziell die Problematik eines unzureichenden Verbunds zwischen den einzelnen Layern. Da der verwendete Zement jedoch einen geringen  $SO_3$ -Gehalt aufweist, bildet sich in Anwesenheit von Sulfat-Anionen in der Porenlösung eine Passivierungsschicht aus Calciumaluminatsulfathydraten, welche die sehr schnelle Entstehung von dünntafeligen, hexagonalen Calciumaluminat-hydrat-Phasen (C-A-H-Phasen) regulieren und somit ein frühzeitiges Erstarren verhindern [54, 55]. Sofern die Porenlösung einen ausreichenden Sulfatgehalt beinhaltet, entstehen primär kurze, prismatisch nadelförmige Trisulfat-Kristalle, s. g. Ettringit, sowie wasserhaltige Kalium-Calcium-Sulfate ( $K_2CS_2H$ ), s. g. Syngenit, auf der Oberfläche der Calciumaluminat [52, 102]. Die positiv geladenen Ettringiteilchen können daraufhin mit positiv oder negativ geladenen Zementpartikeln oder weiteren Hydratationsprodukten eine elektrostatische Wechselwirkung eingehen [103]. Diese sulfatreichen Morphologien verursachen beim konventionellen Fertigungsverfahren wiederum potenziell ein verfrühtes Ansteifen des Betons, was sich ebenfalls wie das frühzeitige Erstarren bei fehlendem Sulfatgehalt negativ auf die Verarbeitung des Frischbetons auswirkt. Da beim 3DP-Verfahren keine Frischbetonkonsistenz zur weiteren Verarbeitung notwendig ist und sich diese Hydratationsprodukte während dem fortführenden chemischen Prozess wieder umsetzen, bewirken diese nadelförmigen Kristallstrukturen aufgrund der Wasserbindung eventuell eine Verringerung des Ausblutungsbereichs bzw. eine Optimierung der Detailgenauigkeit, jedoch erzeugen die Ettringitkristalle im Allgemeinen keine Verzahnung des Gefüges [104].

### 2.4.3 Induktionsperiode

Im Anschluss an die schnelle, wenige Minuten andauernde, chemische Reaktion vom  $C_3A$  und  $C_3S$  folgt die Dormante- bzw. Induktionsperiode, die sich typischerweise über einige Stunden erstreckt. Dies bedeutet für die Produktion der additiv hergestellten Betonstrukturen im 3DP-Verfahren, dass sich die einzelnen Layer je nach Baugröße teilweise in unterschiedlichen Phasen der Hydratation befinden. Bspw. sind die zu Beginn gedruckten Layer der Probekörper aus Abschnitt 3.2.3 bereits in der Beschleunigungsphase, wohingegen die letzten Schichten je nach Verweildauer nach dem Druckvorgangsende noch in der Ruhephase sein können. Für die Nachbehandlung ist es demnach essentiell, dass trotz der differierenden Hydratationsstadien eine ausreichende Festigkeit in allen Bereich des Exponates vorhanden ist.

In dieser Ruhephase zeigt sich die Reaktion deutlich abgeschwächt, was an der signifikant geringeren Hydratationswärmerate sowie am nicht weiter fortführenden Abbau der Klinkerphasen zu beobachten ist [96, 97]. Eine mögliche Ursache für die Einleitung der Induktionsperiode ist eine übersättigte Porenlösung an Calciumoxid und Siliciumdioxid. Zunächst gehen in der Anfangshydrolyse  $CaO$  und  $SiO_2$  kongruent zu ihrem Anteil im  $C_3S$  in Lösung. Das  $Ca/Si$ -Verhältnis der sich bildenden Hydrate steigt folglich an und die spezifische Oberfläche sowie die Permeabilität der Grenzschicht nimmt deutlich ab. Das gelöste  $SiO_2$  behindert die  $CH$ -Kristallisation, wodurch die Sättigung im Porenwasser weiterhin ansteigt. Diese erzeugte Übersättigung beeinträchtigt wiederum den voranschreitenden  $C_3S$ -Abbau [54].

Die Induktionsperiode endet, wenn infolge der Bildung von  $CH$ -Kristallen die Calciumionen-Konzentration in der Porenlösung sinkt und weiteres  $CaO$  in Lösung gehen kann [58]. Weitere in der Literatur [54] aufgeführte Ursachen für das Ende der Dormanten Periode könnten neben der erläuterten Option u. a. der Abbau erster hydrationsbremsender Produkte wie dem Syngenit oder die Zerstörung der Schutzschicht infolge osmotischer Vorgänge sein.

### 2.4.4 Accelerationsperiode

Nach Abschluss der Induktionsperiode steigt die Reaktionsgeschwindigkeit wieder an, was sich mitunter in einem Anstieg der Hydratationswärmerate abzeichnet. Die erneute, stärker ablaufende Trisulfat-Bildung auf der Oberfläche der  $C_3A$ -Partikel erfolgt nachdem das Calciumsulfat nahezu vollständig in Lösung gegangen ist. Zudem bilden und zersetzen sich parallel in Abhängigkeit vom Alkaligehalt die plättchen- oder leistenförmigen Syngenit-Kristalle zu sekundärem Gips, bis sich diese Strukturen zeitlich versetzt ebenfalls auflösen [51, 105].

Signifikant für die Accelerationsperiode ist die im Vergleich zur chemischen Reaktion von reinem Tricalciumsilicat in den vorherigen Phasen wesentlich schneller ablaufende  $C_3S$ -Hydratation in Anwesenheit von Calciumsulfat [97]. Hierbei bilden sich je nach  $Ca/Si$ -Verhältnis die in Abschnitt 2.3.2 aufgeführten, unterschiedlich großen  $C-S-H$ -Morphologien, die das Erstarrungsverhalten maßgeblich mitbeeinflussen. Nach [51] bilden sich zunächst stumpfnadelige bis zu 300 – 600 nm große  $C-S-H$ -Phasen, bevor

sie sich nach einigen Tagen in bis zu  $1,0 - 1,5 \mu\text{m}$  lange, spitznadelige Kristalle umwandeln. In Untersuchungen nach Richartz und Locher [106] hingegen entstehen zu Beginn primär langfaserige C-S-H-Phasen, die neben dem Erstarrungsverhalten die Frühfestigkeit bestimmen. Die Festigkeitsentwicklung ist ein relevanter Bestandteil der additiven Fertigung insbesondere beim 3DP-Verfahren, da für die geometrische Optimierung der 3D-gedruckten Betonstrukturen eine ausreichende Standfestigkeit notwendig ist. Des Weiteren ebenen diese engmaschigen Faserbündel den Grundstein für die charakteristische Druckfestigkeit nach 28 Tagen. Zunächst überbrücken die langen C-S-H-Nadeln mit niedriger Dichte den Porenraum, bevor anschließend weitere Kristallstrukturen den Zwischenraum langsam verdichten [105]. Als Nebenprodukt der heterogenen Reaktion des  $\text{C}_3\text{S}$  mit  $\text{H}_2\text{O}$  entstehen hexagonal plattenförmige Portlandit-Kristalle, die im späteren Hydratationsprozess bei Zugabe von bspw. Silicastaub (siehe Abschnitt 2.3.3) wiederum als Reaktant für eine weitere C-S-H-Phasenbildung dienen.

#### 2.4.5 Post-Accelerationsperiode

Im Anschluss an die Accelerationsperiode folgt eine Abnahme der Hydratationsrate, wobei die chemischen Reaktionen langsamer – überwiegend über Diffusionsprozesse gesteuert – ablaufen. Neben der Entwicklung festigkeitssteigernder C-S-H-Phasen durch die Hydratation von Alit hydratisiert nun Belit ebenfalls kontinuierlich unter Abspaltung von Portlandit. Der Anteil des hydratisierten  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  ist bis zur charakteristischen 28 Tage Druckfestigkeitsprüfung aufgrund der chemischen Zusammensetzung des CEM I 52,5 R aus Abschnitt 2.3.2 signifikant geringer als der des  $\text{C}_3\text{S}$ . In Relation zur Endfestigkeit führt dieses niedrige  $\beta\text{-C}_2\text{S}/\text{C}_3\text{S}$ -Verhältnis von 0,17 im Klinker zu einer höheren Frühfestigkeit der gedruckten Betonkörper.

Die in der vorangegangenen Periode stärker ablaufende Ettringitbildung nimmt in der Post-Accelerationsphase ebenfalls ab und sofern der Sulfatgehalt in der Porenlösung nicht mehr für die Hydratation des  $\text{C}_3\text{A}$  zu Trisulfat ausreicht, bildet sich sulfatärmeres, hexagonal dünntafeliges Monosulfat. Des Weiteren sind Strukturmodifikationen des Ettringits entsprechend eines geringeren Feuchteangebots in den Poren annehmbar. Hierbei bildet sich infolge einer chemischen Subtraktion von  $\text{C}_3\text{A}$  und  $\text{H}_2\text{O}$  bzw. Eliminierungsreaktion ebenfalls Monosulfat mit einem geringeren Wassergehalt. Bei einem potenziellen Sulfatgehalt von über 5 M.-% in der Porenlösung kann es darüber hinaus in dieser Periode zur Expansion des erhärteten Zementsteins führen. Diese Expansion zeigt sich in Form des s. g. Sulfatreibens, ausgelöst durch eine wiedereinsetzende Ettringitbildung [60, 107]

Vergleichbar zur Hydratation des  $\text{C}_3\text{A}$  beginnt in der Entschleunigungsphase die chemische Reaktion des  $\text{C}_4(\text{A},\text{F})$ . Die Reaktivität von Calciumaluminat-Ferrit kann in Abhängigkeit vom A/F-Verhältnis stark variieren, jedoch verläuft die Hydratation im Allgemeinen langsamer als beim  $\text{C}_3\text{A}$ . Bei vorhandenem Sulfatangebot reagieren die Aluminatferrit-Klinkerphasen adäquat zum  $\text{C}_3\text{A}$  zu sulfatreichen AFt-Phasen oder zu sulfatärmeren AFm-Phasen. Sofern sich keine Sulfatkristallverbindungen bilden können, entstehen bei Abwesenheit von  $[\text{SO}_4]^{2-}$ -Ionen zunächst metastabile Calciumaluminatferrithydrate, die sich in der stetigen Periode in stabilere kubische

Hydratformen transformieren. Hinsichtlich der chemischen und physikalischen Festigkeit tragen die aluminatreichen Strukturen nur einen wesentlich geringeren Anteil zur Druckfestigkeit der 3D-gedruckten Betonstrukturen bei als die silicatischen Phasen [108].

#### 2.4.6 Stetige Periode

Der Hydratationsprozess des Zements endet nicht abrupt mit der Post-Accelerationsperiode, sondern verläuft in einem stetigen, immer langsamer werdenden Entwicklungsprozess. Die Porenlösung enthält dabei aufgrund einer abnehmenden Konzentration an Sulfat- und Calciumionen sowie einem ansteigenden Natrium-, Kalium- und  $\text{OH}^-$ -Ionen-Gehalt überwiegend gelöste Alkalihydroxide, die meist einen pH-Wert von über  $\text{pH} = 13$  bewirken können [51]. Eine Beendigung der Hydratation erfolgt nur, sofern einer der Reaktionspartner für den weiteren Stoffumsatz nicht mehr zur Verfügung steht.

Die Kinetik der Hydratation unterscheidet sich bis zu diesem Stadium u. a. je nach Umgebungstemperatur, Wassermenge sowie chemischer Zusammensetzung der Zementbestandteile und physikalischer Beschaffenheit des Trockencompounds (spezifische Oberfläche, Partikelform, Packungsdichte, etc.), sodass je nach Anforderungsprofil die betontechnologischen Eigenschaften angepasst werden können. Diese Adaptionmöglichkeiten gelten sowohl für das konventionelle als auch additive Herstellungsverfahren. Inwieweit sich die einzelnen Einflüsse auf die Festbetoneigenschaften der im 3DP-Verfahren produzierten Betonkörper auswirken und wie sie sich zu Betonstrukturen im konventionellen Fertigungsverfahren unterscheiden, wird in Kapitel 3 analysiert.

Zusammenfassend lassen sich die einzelnen, aufgeführten Stadien des Hydratationsprozesses entsprechend ihrer Hydratationswärmerate sowie der Tendenzen in der anteilmäßigen Phasenentwicklung in Abb. 2-17 veranschaulichen. Des Weiteren sind ergänzend dazu in der nachfolgenden Tab. 2-8 die Reaktionskinetik, die chemischen Prozesse sowie die Einflüsse auf die Betoneigenschaften hinsichtlich der vorherrschenden Periode schematisch strukturiert.

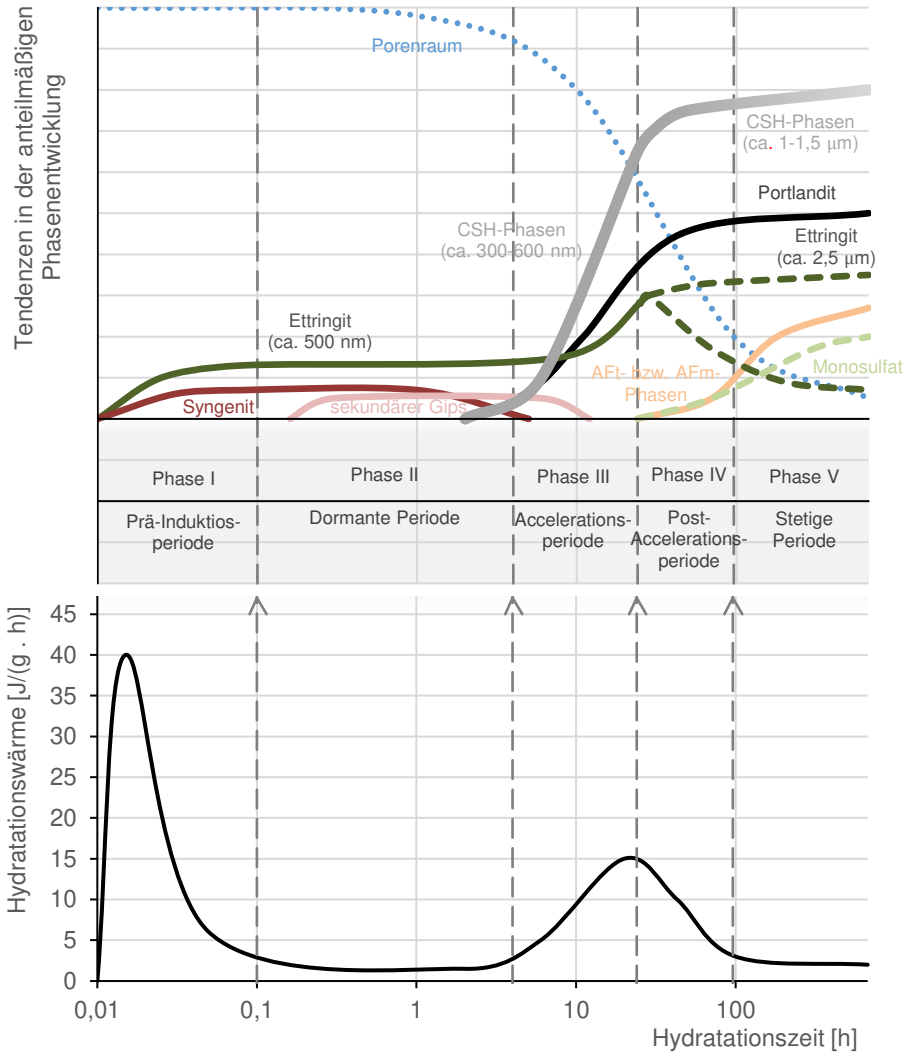


Abb. 2-17: Tendenzen der anteilmäßigen Phasenentwicklung in Kombination mit dem schematischen Hydratationsablauf von Portlandzementklinker (vgl. [79, 106, 109])

Tab. 2-8: Stadien der Zementhydratation (vgl. [52–54, 95, 96, 103])

Periode		Reaktions- kinetik	Chemische Prozesse	Einfluss auf die Betoneigenschaften
I	Prä- Induktions- periode (Anfangs- hydrolyse)	Chemisch kontrollierte, sehr schnelle Reaktion	Beginn der Hydrolyse, Keimbildung von CH + C-S-H, Lösen von Sulfaten, starke Bildung von Ettringit und Syngenit, in Lösung gehen von Ionen	Anstieg des pH- Wertes auf über 13
II	Dormante bzw. Induktions- Periode (Ruhephase)	Keim- bildung, langsame Reaktion	Kontinuierliche Ettringit-Bildung, Lösung von Ionen, langsameres Lösen von Alit	Bestimmt beim konventionellen Fertigungsverfahren die Dauer der Verarbeitbarkeit und das erste Ansteifen
III	Accelerations- periode (Beschleuni- gungsphase)	Chemisch kontrollierte, sehr schnelle Reaktion	Verstärkter Lösungsprozess, Bildung von Hydratationspro- dukten wie C-S-H- Phasen	Bestimmt das Erstarrungsende sowie die Frühfestigkeits- entwicklung
IV	Post- Accelerations- periode (Entschleuni- gungsphase)	Lösungs- und diffusions- kontrollierte Reaktion	Kontinuierliche Bildung von Hydratationspro- dukten wie C-S-H- Phasen und Portlandit	Bestimmt die Frühfestigkeit
V	Stetige Periode (Stetige Phase)	Diffusions- kontrollierte, langsame Reaktion	Langsame Bildung von Hydratationspro- dukten wie C-S-H- Phasen und Portlandit	Bestimmt die Endfestigkeit

#### 2.4.7 Porenstruktur und Wasseranspruch

Generell muss für eine Betonzusammensetzung bzgl. der gewünschten Frischbetonkonsistenz beim konventionellen Herstellungsverfahren oder hinsichtlich der AF-Parameter (siehe Abschnitt 3.2.4.3) beim 3DP-Verfahren der Wasseranspruch bestimmt werden. Dieser Wasseranspruch ist abhängig von den Eigenschaften der Ausgangsstoffe, ihrem Mischungsverhältnis sowie insbesondere von den physikalischen Parametern wie bspw. der Mahlfineinheit und Kornverteilung, da mit

einem größeren Anteil an feineren Bestandteilen der Wasseranspruch bzw. die Bindungsenergie steigt [110]. Die physikalische Bindung des Wassers beruht auf den van-der-Waals-Kräften, den etwas stärkeren elektrostatischen Dipol-Dipol-Kräften sowie auf der stärksten Bindungsenergie – den Wasserstoffbrückenbindungen –, sodass mitunter durch Wasserbindungen innerhalb der Matrix Teile der Flüssigkeit nicht zur Hydratation zur Verfügung stehen bzw. daran gehindert werden.

Ein weiterer Effekt mit Bezug zur physikalischen Wasserbindung ist die Gefahr der Wasserabsonderung (auch Bluten genannt). Die Neigung zum Wasserabsondern erhöht sich mit zunehmendem Wasser-Zement-Wert (w/z-Wert). Da feinere Partikel ein größeres Wasserrückhaltevermögen aufweisen, reduziert sich mit zunehmendem Feinststoffgehalt die Neigung zur Wasserabsonderung. Aufgrund der vielseitigen Abhängigkeit ist dieser Effekt bei Frischbetonuntersuchungen des konventionellen Fertigungsverfahrens stets zu analysieren. In Bezug auf das 3DP-Verfahren ist dieser Wasserabsonderungseffekt bzw. das Ausbluten ebenfalls in abgewandelter Form zu erwarten und nimmt eine signifikante Rolle hinsichtlich der Analyse der Geometrie resp. Detailgenauigkeit der gedruckten Exponate ein.

Die Korrelation zwischen feineren Partikeln und einem gesteigerten Wasseranspruch bei der konventionellen Fertigung lässt sich in gewissem Maße ebenfalls auf den Compound beim 3DP-Verfahren übertragen, sodass feinere Zusammensetzungen der ohnehin im Vergleich zur konventionellen Betonmischung sehr feinkörnigen Compounds potenziell einen höheren Feuchtigkeitseintrag benötigen. Der Einfluss der Gesteinskörnung relativiert sich hingegen bei hohen Zementgehalten im Betongemisch. Des Weiteren kann sowohl im konventionellen als auch im additiven Herstellungsverfahren der Wasseranspruch ebenfalls durch die Zugabe von Betonzusatzmitteln und/oder -zusatzstoffen beeinflusst werden [79].

Zunächst liegt das Wasser resp. die Bindemittelflüssigkeit jedoch als freies Wasser im Porenraum zwischen den einzelnen Partikeln vor. Sobald die Hydratation beginnt, nimmt die Menge an freiem Mischwasser im Porenraum ab und wird chemisch gebunden. Dieser chemische Prozess kommt erst zum Stillstand, sobald dem Zement kein Wasser mehr zur Verfügung steht, die Zwischenräume vollständig ausgefüllt sind oder der gesamte Zement hydratisiert ist. Die sich bei der exothermen Reaktion bildenden Hydratationsprodukte liegen in der Regel, wie in Abschnitt 2.3.2 u. a. erläutert, im Nanometerbereich und weisen dabei eine ähnliche Größe wie der mittlere Durchmesser der sich durch die Hydratation des Zementsteins bildenden Gelporen auf. Demnach wird dieser durch die Zugabe von Wasser entstehende Zementleim, der zu Beginn der Hydratation das Zementkorn mit einer dünnen Schicht umgibt, im Allgemeinen als Zementgel bezeichnet [54]. Bei fortschreitender chemischer Reaktion diffundiert das Wasser durch die äußere Schicht in den noch nicht hydratisierten Kern. Dort löst das Wasser einen weiteren Teil des Zementpartikels, das zum einen direkt im Kern Hydratationsprodukte ausbildet und zum anderen diffundieren die gelösten Stoffe erneut nach außen durch die bereits vorhandene Gelschicht, um in den Porenwasserraum zu expandieren bzw. weitere Kristallstrukturen zu erzeugen. In diesem Hydratationsprozess, der je nach vorherrschenden Bedingungen Tage bis Monate andauert, kann das Zementpartikel bei vollständiger Hydratation sein Volumen

einschließlich der darin enthaltenen Gelporen mehr als verdoppeln [60], was bzgl. der Porositätsminimierung beim 3DP-Verfahren potenziell einen positiven Effekt impliziert.

Für eine vollständige Hydratation des Portlandzements sind im Allgemeinen 40 M.-% Wasser bezogen auf den Zementgehalt notwendig, die wiederum nach [54, 60, 79, 111] zu 25 bis 28 M.-% chemisch in den Hydratationsprodukten gebunden sowie zu den restlichen 12 bis 15 M.-% physikalisch im Porenraum vorhanden sind. Sofern sich dabei ein Hydratationsgrad von 1,0 resp. eine vollständige Hydratation der Zementpartikel einstellt, entsteht im Idealfall keine Kapillarporosität. In Bezug auf eine hohe Dauerhaftigkeit der Betonkörper genügt es jedoch auch, wenn die wasserführenden Poren unterbrochen sind. Das chemisch gebundene Wasser wird bei der Hydratation auch als Kristallwasser deklariert und ist im Wesentlichen nicht verdampfbar. Eine Auslösung aus dem Zementstein kann nur durch extrem hohe Temperaturen erfolgen, die zu einer Zerstörung der Hydratationsprodukte führt. Hauptbestandteile des physikalisch gebundenen Wassers bilden neben dem Adhäsionswasser das Adsorptionswasser.

Reste von unhydratisiertem Zement verbleiben in der Betonmatrix bei w/z-Werten unterhalb von 0,4 oder sofern dem Zementkorn kein freies Wasser mehr zur Verfügung steht. Letztere Gegebenheit wird für gewöhnlich bei der konventionellen Herstellung aufgrund des Mischprozesses vernachlässigt, jedoch ist dieser Mischvorgang während dem Druckprozess beim 3DP-Verfahren nicht vorhanden, sodass angesichts der differierenden Herstellungsmethoden der Sachverhalt bzgl. unzureichender Hydratation trotz eines w/z-Wertes größer als 0,4 zusätzlich bei dieser Art der additiven Produktion zu analysieren ist.

Im gegenteiligen Fall der vollständigen Hydratation und einem zusätzlichen Überschuss an freiem Wasser – prinzipiell bei einem w/z-Verhältnis über 0,4 – verbleibt das s. g. Überschusswasser im Zwischenraum und bildet Poren mit einem Durchmesser von über 100 nm aus, die im Vergleich zu den 1 bis ca. 50 nm großen Gelporen um ein vielfaches größer sind. Die Bindungsenergie des Adsorptionswassers ist umso größer, desto kleiner der Durchmesser der wasserdurchlässigen Kapillarporen ist, da mit einer abnehmenden Distanz der Grenzflächen die Kräfte der intermolekularen Wechselwirkungen ansteigen. Der Durchmesser sowie die Anzahl an Kapillarporen in der Betonmatrix ist wiederum abhängig vom w/z-Wert und zeigt sich ebenfalls in der Zusammensetzung des Zementsteinvolumens (siehe Abb. 2-18). Vergleicht man die Volumenanteile zu einem jeweiligen w/z-Verhältnis berechnet sich nach [79] der Volumenanteil aus hydratisiertem Zement inkl. eingeschlossener Gelporen ( $\alpha \geq 0,4$ ) mit Gl. (2-16) sowie die Kapillarporengröße mit Gl. (2-17). Demgegenüber ist die Porosität des Zementgels weitgehend unabhängig vom w/z-Wert. Ob sich die Verteilung bei unterschiedlichen Wassermengen hinsichtlich des 3DP-Verfahrens in gleichem Maße verhält, ist Bestandteil der Untersuchungen in Abschnitt 3.7.

$$V_{Z+G} = \frac{\frac{\delta_w}{\delta_z} + 0,338 \cdot \alpha}{\frac{w}{z} + \frac{\delta_w}{\delta_z}} \quad (2-16)$$



$$V_K = \frac{\frac{w}{z} - 0,4 \cdot \alpha}{\frac{w}{z} + \frac{\delta_w}{\delta_z}} > 0 \tag{2-17}$$

Dabei ist

- $V_{Z+G}$  der Volumenanteil aus hydratisiertem Zement inkl. Gelporen
- $V_K$  die Volumenanteil aus Kapillarporen
- $w$  der Wasseranteil
- $z$  der Zementanteil
- $\alpha$  der Hydratationsgrad-Faktor ( $0 \leq \alpha \leq 1,0$ )
- $\delta_w$  die Dichte des Wassers
- $\delta_z$  die Rohdichte des Zements

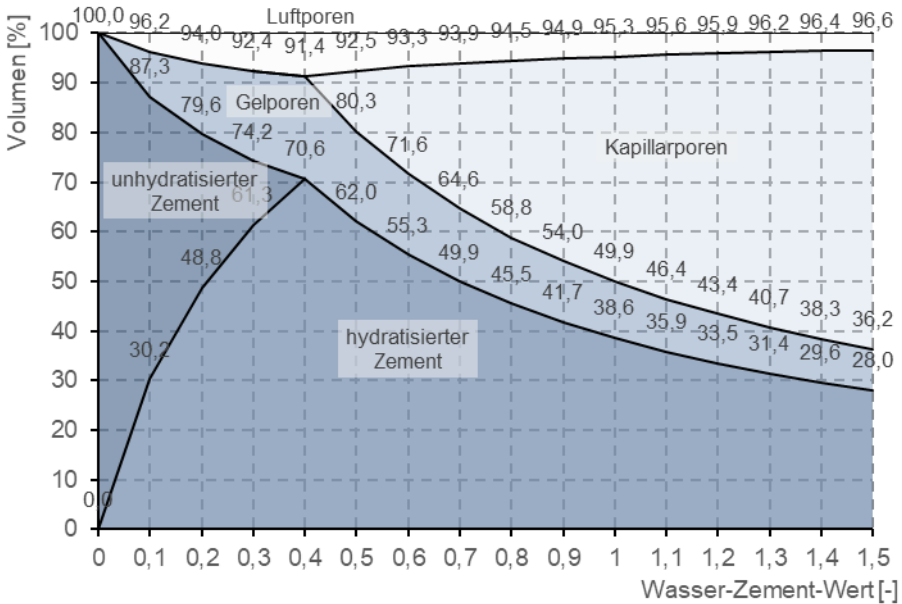


Abb. 2-18: Zusammensetzung des Zementsteinvolumens in Abhängigkeit vom w/z-Wert bei  $\alpha = 1$  (vgl. [60, 111])

Neben den Kapillar- und Gelporen befinden sich in der Betonmatrix weitere Porenstrukturen, die zum einen je nach Art und Größe Feuchtigkeit binden sowie zum anderen die Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit des Festbetons maßgeblich beeinflussen. Eine Veranschaulichung der unterschiedlichen Porengrößen bietet nach Setzer [112] Abb. 2-19. Anhand dieser Darstellung sowie Abb. 2-20 ist in Bezug auf die Korrelation

zwischen stärkerer Wasserbindung und kleinerer Porengröße ersichtlich, dass sich die Feuchtigkeit schlechter aus den Gelporen im Gegensatz zu den größeren Kapillarporen austreiben lässt. Manche Poren sind zudem so fein, dass zu einer Austreibung des Gelwassers Temperaturen erforderlich sind, bei denen sich bereits Kristallwasser aus verschiedenen Hydratationsprodukten entfernen lässt [60]. Demnach unterscheiden Powers und Brownyard [113] schlicht zwischen nicht verdampfbarem und verdampfbarem Wasser des Zementsteins. Bei verdampfbarem Wasser handelt es sich um den Wasseranteil, der sich u. a. durch Trocknung im Vakuum oder im Trockenschrank bei 105 °C aus dem Zementstein austreiben lässt. Nicht verdampfbares Wasser ist hingegen primär chemisch gebunden und kann nur durch Glühen bei etwa 1000 °C aus dem Zementstein ausgetrieben werden, wobei die Hydratphasen zerstört werden.

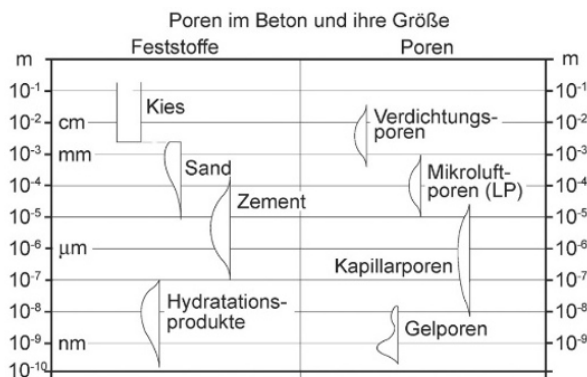


Abb. 2-19: Differierende Porenarten sowie deren Durchmesser nach [112]

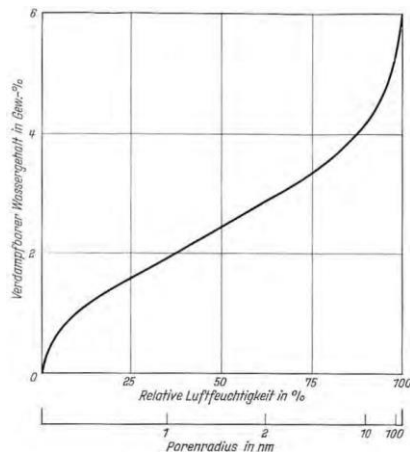


Abb. 2-20: Sorptionsisotherme von Zementmörtel nach [113]

Eine Übersicht der einzelnen Wasseranteile im Zementstein nach [50–52] ist in Abb. 2-21 definiert:



Abb. 2-21: Wasseranteile in der Zementsteinmatrix nach [50–52]

Die Summe der einzelnen Wasseranteile im Zementstein ergibt letztendlich wieder den w/z-Wert, sofern einerseits eine zusätzliche Wasseraufnahme, wie bspw. kapillares Saugen oder Kapillarkondensation, und andererseits ein Wasserverlust infolge Verdunstung ausgeschlossen werden kann.

Mit steigendem Porenraum bzw. einer größeren Porosität im Betongefüge, der u. a. infolge einer unzureichenden Verdichtung, suboptimalen Korngrößenverteilung oder eines zu hohen w/z-Verhältnisses entstehen kann, nimmt die Qualität des Zementsteins resp. der Betonmatrix ab. Dies zeigt sich bspw. in der Druckfestigkeit des konventionell hergestellten Betons und lässt sich näherungsweise nach Locher [114] mit folgender Formel berechnen:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \left(1 - \frac{p}{100}\right)^n \quad (2-18)$$

Dabei ist

- $\sigma$  die Druckfestigkeit [MPa]
- $\sigma_0$  die Festigkeit des porenfreien Zements [MPa]  
(Anhaltswert nach [114] = 200 MPa)
- $p$  der Volumenanteil der Poren [%]
- $n$  die Konstante (Anhaltswert nach [114] = 4,7)

Auf Grundlage dieses Zusammenhangs kann ebenfalls der Einfluss des w/z-Wertes sowie des Hydratationsgrades auf die Zementsteinfestigkeit abgeleitet werden, welcher nach Locher [114] in Abb. 2-22 resultiert. Die vorhandene Wassermenge hat zudem einen Einfluss auf die entstehenden Hydratationsprodukte. Ein weiterer Aspekt bzgl. des Wasseranteils in der Zusammensetzung ergibt sich mit der Frühfestigkeit. Diese entsteht erst infolge der Verflechtung herauswachsender Hydratationsprodukte aus der Oberfläche der Zementpartikel [79]. Je höher der w/z-Wert ist, desto größer ist der wassergefüllte Porenraum zwischen den Zementkörnern, was zu einer reduzierten Grunddruckfestigkeit sowie zu einer geringeren Frühfestigkeit im Verhältnis zur Endfestigkeit führt. Weitere Einflüsse hinsichtlich der Stand- bzw. Frühfestigkeit, die für einen optimalen Herstellungsprozess beim 3DP-Verfahren essentiell ist, sind in Abschnitt 2.5.4 erläutert.

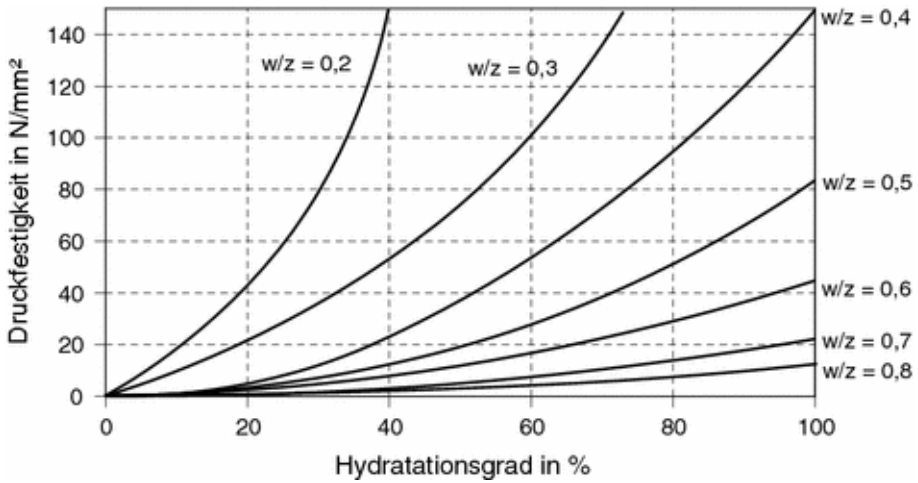


Abb. 2-22: Einfluss des Wasser-Zement-Wertes sowie des Hydratationsgrades auf die Druckfestigkeit nach [114]

## 2.5 Pulveranalyse

### 2.5.1 Packungsdichte

Bei der Pulveranalyse von polydispersen, nicht-kugelförmigen Partikelsystemen werden hinsichtlich der maximal möglichen Packungsdichte  $\phi_m$  unterschiedliche Einflussfaktoren eines Kornhaufwerks, wie bspw. das Größtkorn, die Korngrößenverteilung, die Form der Körner sowie das Packungsverfahren, untersucht, welche nach [115] und [116] die maßgebenden Parameter für die Packungsdichte sind. Die maximale Packungsdichte  $\phi_m$  des Beton- oder Mörtelgemischs bestimmt in dem zufällig entstehenden Partikelsystem den geringsten Hohlraumgehalt des Kornhaufwerks und steht in engem Zusammenhang mit der erreichbaren Grünstandfestigkeit erdfeuchter Betone (siehe Abb. 2-23). Des Weiteren trägt die maximale Packungsdichte  $\phi_m$  im Allgemeinen zu einer Verringerung der Porosität der Betonmatrix bei und verbessert in Kombination mit einer idealen Aushärtung die Dauerhaftigkeit eines Betonbauteils [117]. Die optimale Packungsdichte steht hingegen im direkten Spannungsverhältnis zur Benetzbarkeit der einzelnen Partikel, da mit einer Verringerung des Hohlraumgehaltes erschwerte Bedingungen für die Durchdringung der einzelnen Layer erzeugt werden und Faktoren wie die Viskosität sowie die Oberflächenspannung der Bindemittelflüssigkeit an Bedeutung gewinnen.

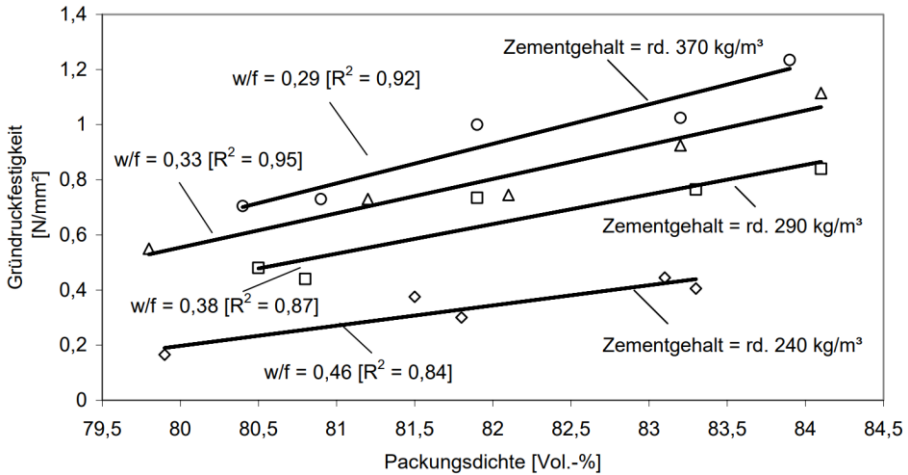


Abb. 2-23: Zusammenhang zwischen Packungsdichte, Wasser-Feinstoffwert sowie Gründruckfestigkeit [117]

Da beim 3DP-Verfahren keine Mischenergie induziert werden kann und die einzelnen Körner Schicht für Schicht optimal ineinander fallen müssen, wird der Packungsdichte eine wesentliche Bedeutung beigemessen. Hierzu bedarf es einer angepassten Abstufung der Partikelgrößen sowie einer genauen Abstimmung der reaktiven und inerten Bestandteile des Compounds. Nach Geisenhanslücke [118] weisen Mischungen mit Stoffen, deren Verteilung sich deutlich unterscheiden, einen geringeren Hohlraumgehalt auf. Zur Charakterisierung der unterschiedlichen Compounds werden werkstoffliche sowie schüttguttechnologische Aspekte wie bspw. die spezifische Oberfläche  $S$  nach Blaine, der Hausner-Faktor  $H$  oder der Kompressibilitätsindex  $K_I$  ermittelt. Die letzten beiden Parameter dienen als dimensionslose physikalische Kennzahlen zur Spezifizierung von Feststoffen. Sie errechnen sich zum einen für den Kompressibilitätsindex  $K_I$  aus der Differenz von Stampfdichte zur Schüttdichte dividiert durch die Stampfdichte und zum anderen für den Hausner-Faktor  $H$  aus dem Quotienten von Stampfdichte zur Schüttdichte oder aus dem Verhältnis von Schüttvolumen zum Stampfvolumen:

$$K_I = \frac{\rho_{st} - \rho_{sch}}{\rho_{st}} \cdot 100 \% \quad (2-19)$$

Dabei ist

- $K_I$         der Kompressibilitätsindex
- $\rho_{st}$        die Stampfdichte [g/cm<sup>3</sup>]
- $\rho_{sch}$       die Schüttdichte [g/cm<sup>3</sup>]

$$H = \frac{\rho_{st}}{\rho_{sch}} = \frac{\frac{m}{V_{st}}}{\frac{m}{V_{sch}}} = \frac{m}{V_{st}} \cdot \frac{V_{sch}}{m} = \frac{V_{sch}}{V_{st}} \geq 1 \quad (2-20)$$

Dabei ist

- H            der Hausner-Faktor
- $\rho_{st}$         die Stampfdichte [g/cm<sup>3</sup>]
- $\rho_{sch}$         die Schüttdichte [g/cm<sup>3</sup>]

Die Analysemethoden werden u. a. in der Pharmazie oder Chemie zur Dosiergenauigkeit von Feststoffen verwendet, wobei ein Wert von  $H = 1$  oder ein Wert  $K_1 = 0 \%$  auf ein besseres Fließverhalten des Pulvers hinweisen [119], da Vibrationen und Erschütterungen das Volumen bzw. die Packungsdichte des Schüttgutes nicht beeinflussen. Zwei der relevantesten Einflussfaktoren für die resultierende Schüttdichte und Fließfähigkeit des trockenen Compounds sind die Partikelform sowie die Korngrößenverteilung, da sie die van-der-Waals-Kräfte (dominierende Kraft bei trockenen, feinkörnigen Schüttgütern) beeinflussen [119]. Des Weiteren sind die Schüttdichte sowie die Fließfähigkeit Indikatoren für die letztendliche Dichte des 3D-gedruckten Betons [120]. Für einen Schichtauftrag von oben bzw. ein Herabrieseln des trockenen Compounds auf den jeweiligen Layer mithilfe eines Powder-Recoaters ist die Fließfähigkeit des Pulvergemischs ein wesentlicher Bestandteil der Untersuchung, um den erforderlichen Schichtauftrag gewährleisten zu können. Im vorliegenden Herstellungsprozess (siehe Abschnitt 3.2.2) wird der Compound mittels Walze aufgetragen, sodass die Problematik einer Verstopfung des Beschichters (z. B. Trichter) nicht gegeben ist, jedoch die Fließfähigkeit im Punkte Kohäsionskräfte einen signifikanten Einfluss am entstehenden Porenvolumen (siehe Abschnitt 2.5.1) einnehmen kann.

### 2.5.2 Fließfähigkeit

Der innere Fließwiderstand eines Schüttgutes bzw. Pulvers wird mit der Kohäsionsstärke beschrieben und ist demnach ein Maß für das Fließverhalten eines Compounds. Für die pulverbett-basierten additiven Fertigungsverfahren ist die Menge der feinkörnigen Bestandteile, die ein kohäsives Verhalten aufweisen, ein zu berücksichtigender Faktor hinsichtlich eines geringen Porenvolumens. Nach [121] zufolge haben stark kohäsive Pulver hohe Porenvolumina. Dies zeigt sich insbesondere in Abb. 2-24. In diesem Versuch wurden Schüttungen unterschiedlich fein gemahlener Pulver desselben Materials mit identischer Gesamtmasse in Messgläser gefüllt. Mit jeder Abstufung der Korngröße steigert sich das Volumen der Schüttung sowie der Porosität infolge der eingeschlossenen Poren.

Zur Charakterisierung, wie kohäsiv ein entsprechendes Schüttgut ist, wird die Fließfähigkeit  $ff_c$  aus dem Verhältnis von Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  zur

Schüttgutfestigkeit  $\sigma_c$  berechnet [119] und kann nach Abb. 2-25 entsprechend eingruppiert werden:

$$ff_c = \frac{\sigma_1}{\sigma_c} \quad (2-21)$$

Dabei ist

- $ff_c$  die Fließfähigkeit
- $\sigma_1$  die Verfestigungsspannung [MPa]
- $\sigma_c$  die Schüttgutfestigkeit [MPa]

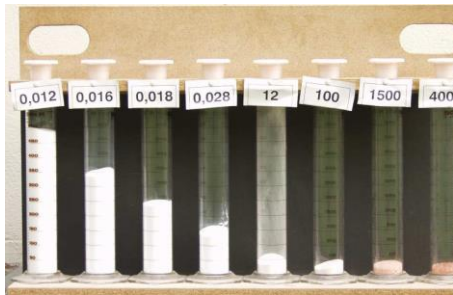


Abb. 2-24: Volumenänderung eines sukzessiv feiner gemahlene Schüttgutes. An den Schüttguten sind jeweils die mittleren Partikelgrößen in  $\mu\text{m}$  angegeben. [121]

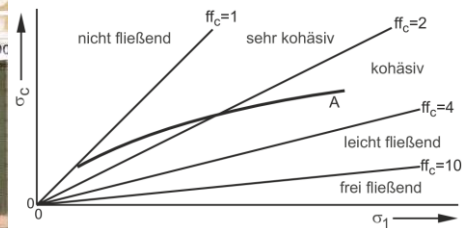


Abb. 2-25: Bereiche unterschiedlicher Fließfähigkeiten [122]

Da die Bindemittelbestandteile im Trockenmörtelgemisch einen relativ hohen Feinheitsgrad aufweisen, sind im Gegensatz zum leicht fließenden bzw. frei fließenden Quarzmehl und Quarzsand Fließfunktionswerte  $ff_c$  zwischen eins und vier zu erwarten. Dieses kohäsive Verhalten der Bindemittelbestandteile kann im Herstellungsprozess des 3DP-Verfahrens bedeuten, dass ein erhöhtes Porenvolumen erzeugt wird, welches wiederum nachteilig für die erreichbare Druckfestigkeit der gedruckten Betonstrukturen sein kann. Kohäsionslose Materialien bzw. Pulver mit einer geringen Kohäsionskraft (wie z. B. Quarzsand) zeigen hingegen nur eine geringe Zunahme des Porenvolumens [121]. Eine beispielhafte Eingruppierung differierender Schüttgüter ist in Tab. 2-9 enthalten. Kriterien für eine optimale Fließfähigkeit sind die Korngröße sowie die Partikelform der differierenden Bestandteile eines Compounds. Strukturierte Partikel haben viel häufiger interpartikulären Kontakt als kugelförmige Körner [123], sodass die erhöhte innere Reibung die Streufähigkeit von Pulvern verringert bzw. einen optimalen Schichtauftrag beeinträchtigt, jedoch kann dies dennoch zu erhöhten Packungsverhältnissen führen [90, 124]. Maßgebend ist somit ein Optimum zwischen Fließfähigkeit des Compounds für einen gleichmäßigen Schichtauftrag sowie eine geeignete Korngrößenverteilung hinsichtlich einer idealen Kraftübertragung zu entwickeln.



Tab. 2-9: Exemplarische Einteilung differierender Schüttgüter nach [122]

Beispiel	Fließfähigkeit $ff_c$	Kennzeichnung
Trockener Sand	$10 \leq ff_c$	Freifließend (rieselfähig)
Feuchter Sand	$4 \leq ff_c < 10$	Leichtfließend
Trockener Zement	$2 \leq ff_c < 4$	Kohäsiv
Feuchtes Pulver	$1 \leq ff_c < 2$	Sehr kohäsiv, nicht fließend
Gealterter Zement	$ff_c < 1$	Verhärtet mit Festkörpereigenschaften

### 2.5.3 Korngrößenverteilung

Ein weiterer Faktor der Pulveranalyse ist die Korngrößenverteilung. Sie ist neben dem konventionellen Verfahren auch bei der additiven Fertigung ein wesentlicher Bestandteil der Forschung nach einer idealen Vernetzung bzw. einem optimalen Korngefüge, um letztendlich eine geringere Porosität der Betonmatrix zu erzielen. Abb. 2-26 veranschaulicht den Einfluss unterschiedlicher Zusammensetzungen der Gesteinskörnung resp. des Compounds beim 3DP-Verfahren und dessen Auswirkung auf die Betonmatrix. Das Traggerüst auf der linken Seite zeigt ein Korngefüge ohne Feinanteile, welches somit eine hohe Porosität aufweist. In der zweiten Abbildung von links bedeckt ein geringer Feinkornanteil die gröbere Gesteinskörnung und verleiht diesem System eine gewisse, jedoch geringe Stabilität, da noch ein signifikanter Anteil an Hohlräumen vorhanden ist. Auf der rechten Seite befindet sich die Partikelzusammensetzung mit dem höchsten Feinkornanteil. Dieser geringe Überschuss am Mehlkorn- bzw. Feinkornanteil sorgt beim konventionellen Frischbeton für einen Schmierfilm zwischen der gröberen Gesteinskörnung, sodass sich diese ausreichend verschieben kann und letztendlich die Betonmatrix infolge einer dynamischen Verdichtung eine Verringerung der Porosität sowie eine Steigerung der Rohdichte erfährt [125]. Da im Prozessablauf des 3DP-Verfahrens keine Verdichtung vorgenommen werden kann (siehe Abschnitt 3.2.2), besteht die Möglichkeit, dass der Überschuss des Feinkornanteils in Bezug auf die Thematik der Druckfestigkeit nicht notwendig ist – im Gegenteil – sich sogar negativ auswirken kann. Das Korngefüge der dritten Abbildung von links ist für die Verarbeitbarkeit bei der konventionellen Fertigung hinderlich, weist jedoch hinsichtlich der Verformungsbeständigkeit die optimale Struktur auf, da die feinkörnigen Bestandteile die Hohlräume ausfüllen und die grobe Gesteinskörnung stützt. Demnach bietet dieses Gebilde hypothetisch die Grundlage für eine ideale Standfestigkeit der 3D-gedruckten Betonkörper sowie die ideale Zusammensetzung für die maximale Lastübertragung.

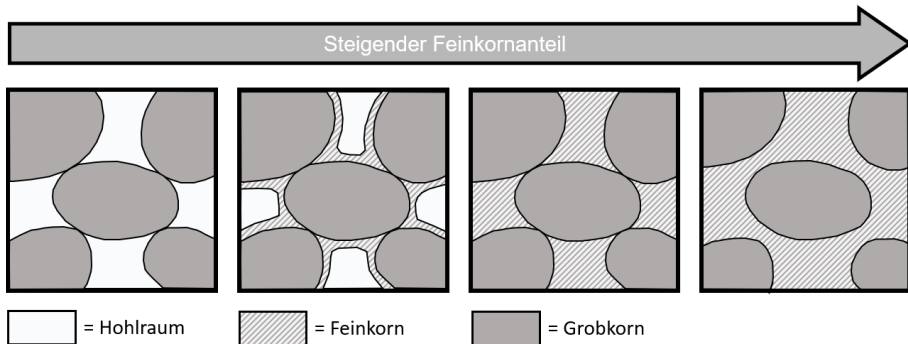


Abb. 2-26: Betonmatrix mit steigendem Feinkornanteil (vgl. [126])

#### 2.5.4 3DP-Standfestigkeit

Der Beton wird im frühen Stadium, vor Beginn eines merklichen Erstarrens, als grüner Beton bezeichnet. In der Praxis des konventionellen Fertigungsverfahrens ist die Grünstandfestigkeit primär bei der Produktion von früh zu entformenden Betonbauteilen von Bedeutung [103]. Da beim 3DP-Verfahren gänzlich auf eine Schalung verzichtet werden kann, ist die Standfestigkeit bzw. der Erhärtungsprozess des 3D-gedruckten Betons ebenfalls von großer Relevanz. Kongruent zum Wunsch der frühzeitigen Entschalung bei der konventionellen Fertigung besteht beim 3DP-Verfahren das Bestreben, die Exponate schnell aus dem Druckraum zu entnehmen, um u. a. Zeit und Geld bei der Produktion von Fertigteilen einzusparen. Hierbei ist es essentiell, dass die Betonkörper standfest sind und dass keine Formveränderung nach Entfernung der Schalungen bzw. bei der Nachbearbeitung der 3D-gedruckten Exponate eintritt. Die Festigkeit liegt in diesem Stadium im Allgemeinen wie die Gründruckfestigkeit der konventionell gefertigten Betonkörper zwischen 0,1 und 0,5 MPa. Da bei der Entschalung konventionell, produzierter Betonkörper der Begriff Grünstandfestigkeit einen Zustand vor Beginn der Hydratation beschreibt und bei der Entnahme der 3D-gedruckten Probekörper bereits eine Hydratation begonnen hat, wird im Rahmen dieser Arbeit der Begriff 3DP-Standfestigkeit eingeführt und im Weiteren verwendet. Dieser Parameter beschreibt den Zustand bei der Entnahme und Nachbearbeitung der 3D-gedruckten Probekörper.

Für die typische Betonproduktion kann der Einfluss der Verdichtung sowie des Wassergehaltes auf die Grünstandfestigkeit aus Abb. 2-27 entnommen werden. Je länger die Verdichtungsarbeit betrieben wird, desto höher ist die erreichbare Grünstandfestigkeit. Des Weiteren wirkt sich nach Sarmiento [103] ein höherer Zementgehalt günstig auf die Grünstandfestigkeit aus, sodass dieser bei der additiven Fertigung eventuell auch zu einer höheren 3DP-Standfestigkeit bzw. zu einem besseren Erhalt der gewünschten Geometrie bei der Nachbearbeitung der 3D-gedruckten Exponate führen kann. Ein weiterer Faktor hinsichtlich eines vorzeitigen Erstarrens und somit einer frühzeitigen 3DP-Standfestigkeit ist die in Abschnitt 2.3.2 aufgeführte Zusammensetzung des Zements, da Klinkerphasen wie das  $C_3S$  und  $C_3A$

sehr reaktiv sind und bereits in der frühen Phase des chemischen Reaktionsablaufs (siehe Abschnitt 2.4.2) hydratisieren. Zu berücksichtigen ist in diesem konträren Spannungsfeld auf der einen Seite der Wunsch nach einer schnellen 3DP-Standfestigkeit sowie einer optimalen Auflösung des bedruckten Querschnittes (siehe Abschnitt 2.2.4) und auf der anderen Seite die mögliche Beeinträchtigung weiterer Phasenbildungen sowie die letztendlich erreichbare Festigkeit des 3D-gedruckten Betons.

Mit einer intensiven bzw. vollständigen Verdichtung können bei der üblichen Betonherstellung trockenere sowie steifere Betonzusammensetzungen verarbeitet werden [127], um letztendlich in einem Bereich niedrigerer Wassergehalte das Grünstandfestigkeitsmaximum zu erhalten. Dennoch besteht die Gefahr, dass beim Verarbeiten von Betonen mit einem niedrigen Wassergehalt und einer hohen Grünstandfestigkeit Schädigungen im Gefüge entstehen können, sodass die Probekörper eine reduzierte Druckfestigkeit nach 28-Tagen aufweisen [79]. Für das 3DP-Verfahren bedeutet dies im Umkehrschluss, dass eine hohe 3DP-Standfestigkeit ebenfalls nicht zwingend zu hohen Endfestigkeiten führen muss, sofern das Betongefüge im Inneren der Matrix gestört ist.

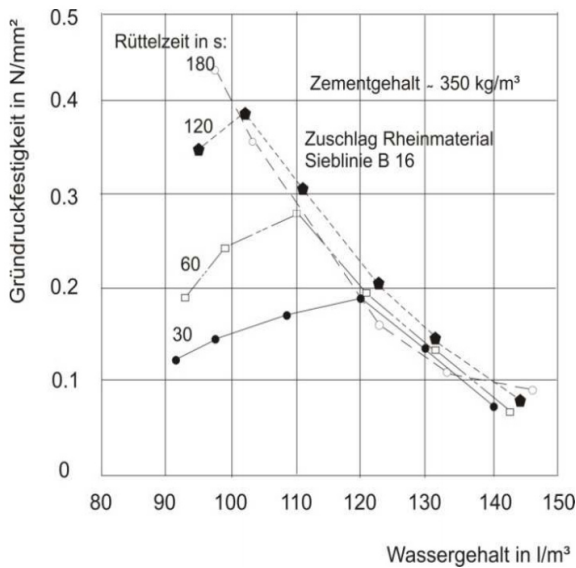


Abb. 2-27: Grünstandfestigkeit von konventionell hergestelltem Beton in Abhängigkeit von der Rüttelzeit und dem Wassergehalt [79]

### 3 Experimentelle Untersuchungen

#### 3.1 Allgemeines

In über 250 Versuchsreihen wurden die 3D-gedruckten Betonstrukturen auf bekannte Materialeigenschaften aus der konventionellen Betonprüfung untersucht. Des Weiteren wurden neben den differierenden Kennwerten der Pulveranalyse noch der Bindemittelflüssigkeitsanspruch des jeweiligen Compounds ermittelt sowie die spezifischen AF-Parameter hinsichtlich des 3DP-Verfahrens bestimmt und bewertet. Für diese Arbeit wurden 58 Versuchsreihen ausgewählt und in zehn separate Versuchsserien eingruppiert. Die systematische Herstellung der Versuchsserien ist in Abb. 3-1 und Abb. 3-2 veranschaulicht. Zur Reduzierung von Wiederholungen sind die Versuchsserien im Rahmen dieser Arbeit themenbezogen in sechs Abschnitte zusammengefasst. Die Abschnitte 3.3 bis 3.6 beziehen sich auf die Entwicklung eines optimalen Compounds sowie dessen idealer Druckrichtung (Isotropie der 3D-gedruckten Betonstrukturen).

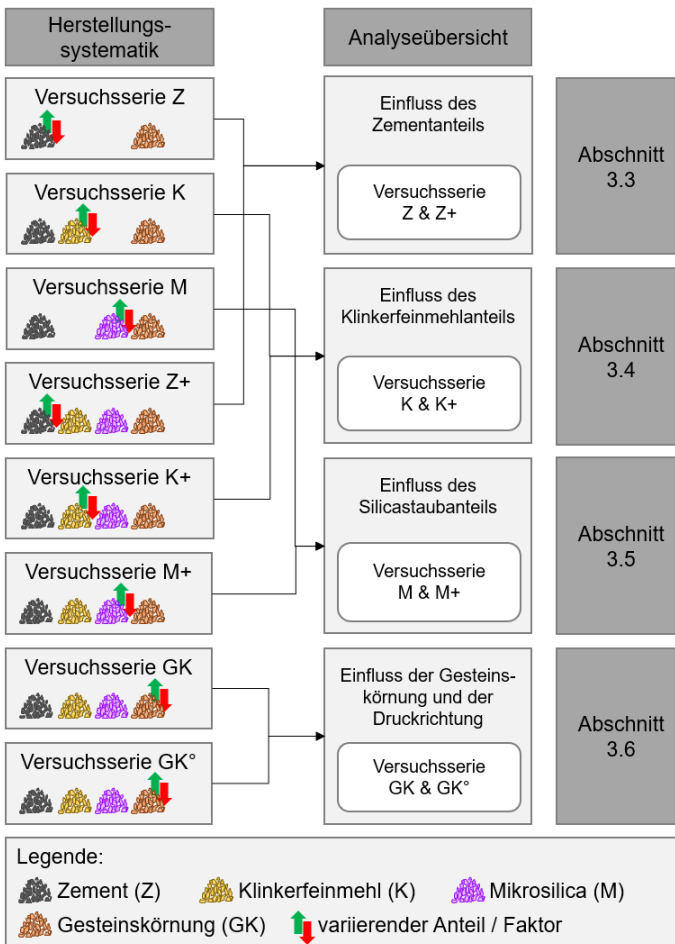


Abb. 3-1: Übersicht der Herstellungssystematik und Analyse – Teil 1

In den daran anschließenden Versuchsserien wurde, wie in Abb. 3-2 dargestellt, die optimierte Trockenmörtelzusammensetzung auf weitere Einflussfaktoren untersucht. Hierzu zählen zum einen die Analyse des Verhältnisses von w/z-Wert zur erreichbaren Druckfestigkeit sowie zum anderen die Untersuchung der Festigkeitsentwicklung additiv gefertigter Probekörper in einem definierten Zeitraum, um folglich die Erkenntnisse mit den bekannten Zusammenhängen aus der konventionellen Betonproduktion vergleichen zu können.

Wesentlicher Bestandteil des Versuchsprogramms ist es, anhand der Modifikation jeweils eines Parameters in der Zusammensetzung des Compounds dessen Einfluss auf die charakteristischen Festbetonkenngrößen zu ermitteln sowie die Vielzahl an Einflussfaktoren für einen optimalen Druckprozess feststellen zu können. Mithilfe der erbrachten Erkenntnisse sind die Grundvoraussetzungen gegeben, um abschließend einen Entwurf für ein Herstellungskonzept im 3DP-Verfahren definieren zu können.

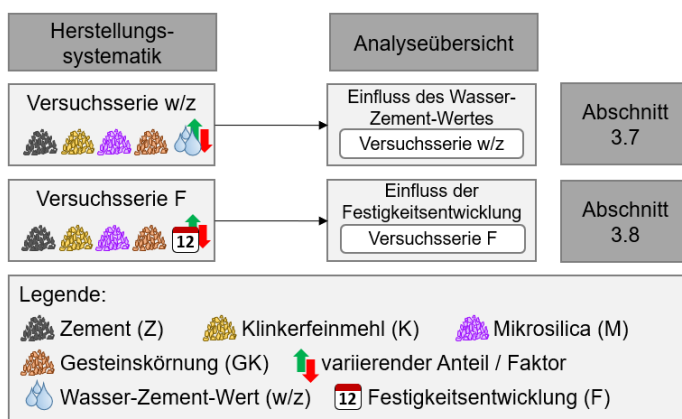


Abb. 3-2: Übersicht der Herstellungssystematik und Analyse – Teil 2

## 3.2 Vorgehensweise

### 3.2.1 Allgemeines

Da im Rahmen dieser Arbeit der Produktionsprozess der Probekörper, die Form der Exponate sowie die Untersuchungsmethoden je Versuchsreihe nahezu identisch sind, wird nachfolgend die Vorgehensweise des Versuchsprogramms vorangeführt, um Wiederholungen innerhalb der jeweiligen Analyseabschnitte zu vermeiden.

Dabei wird in Abschnitt 3.2.2 der Herstellungsprozess im Detail erläutert, für den sich im Allgemeinen nur in Versuchsserie GK<sup>o</sup> die Lage der diagonal zu belastenden Probekörper während der Produktion ändert. In Abschnitt 3.2.3 sind exemplarisch die 3D-gedruckten Betonstrukturen veranschaulicht, die sich in ihrer Form in allen Versuchsserien grundsätzlich nicht unterscheiden. Aufgrund von entstandenen Fehlstellen beim finalen Arbeitsschritt der Produktion – der geometrischen Optimierung – kann die Form jedoch minimal variieren. Die durchgeführten

Untersuchungsmethoden aus Abschnitt 3.2.4 unterteilen sich, wie in Abb. 3-3 dargestellt, in vier Hauptgruppen.

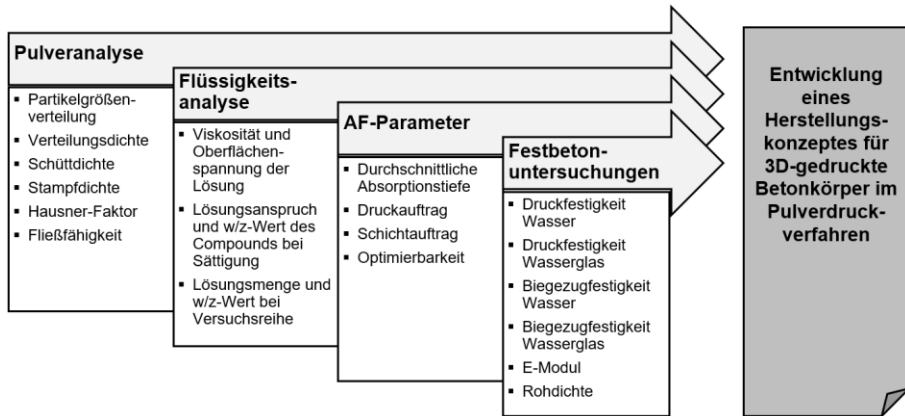


Abb. 3-3: Untersuchungsmethoden innerhalb der Versuchsreihen

In Abschnitt 3.2.4.1 sind die Untersuchungsmethoden hinsichtlich der Pulveranalyse für die fünf eingesetzten Bestandteile aufgeführt, die u. a. Rückschlüsse auf die betontechnologischen Kennwerte geben können sowie die AF-Parameter beim 3DP-Verfahren beeinflussen. Die Trockenmörtelzusammensetzungen der Versuchsreihen innerhalb einer Versuchsserie sowie deren Analysen werden im entsprechenden Abschnitt des zu untersuchenden Einflussfaktors dargestellt.

Ein weiterer Faktor, der sich maßgeblich auf den Herstellungsprozess auswirken kann, ist die Zusammensetzung der Bindemittelflüssigkeit sowie die Menge, die während dem Druckprozess je Probekörper aufgebracht wird. In dieser Arbeit wurden drei verschiedene Bestandteile verwendet, die im Einzelnen und ihrer verwendeten Zusammensetzung für alle Versuchsreihen hinsichtlich ihrer Oberflächenspannung und Viskosität untersucht wurden. Die Analyse der Bindemittelflüssigkeit sowie die Vorgehensweise zur Bestimmung des Bindemittelflüssigkeitsanspruchs der entsprechenden Trockenmörtelzusammensetzung ist in Abschnitt 3.2.4.2 erläutert.

Zur Analyse des Druckprozesses im 3DP-Verfahren sind in Abschnitt 3.2.4.3 unterschiedliche AF-Parameter definiert, um im Ergebnis- bzw. Auswertungsteil der jeweiligen Versuchsserie eine kongruente Beurteilungsbasis hinsichtlich des zu untersuchenden Parameters darstellen zu können.

Abschließend werden in Abschnitt 3.2.4.4 die betontechnologischen Untersuchungsmethoden spezifiziert, die am 3D-gedruckten Festkörper durchgeführt wurden. Zu den charakteristischen Parametern der Betontechnologie gehören zum einen die Druckfestigkeit, die bei allen Versuchsreihen ermittelt wurde, sowie zum anderen Kennwerte wie die Biegezugfestigkeit, Porosität und Rohdichte der Betonstrukturen, die zum Teil ergänzend bestimmt wurden.

### 3.2.2 Herstellungsprozess

Für alle Versuchsserien wurden die trockenen Bestandteile jeder Versuchsreihe auf eine Differenz von  $\pm 0,1$  g genau abgewogen und mit einem Intensivmischer vermengt. Die Mischdauer betrug dabei mindestens 5 min, um einen möglichst homogenen Compound zu erhalten. Dieses homogenisierte Trockenmörtelgemisch wurde nachfolgend in den „Feed“-Behälter des 3D-Druckers ZPrinter310 oder 310plus der Firma ZCorporation Inc., USA (jetzt im Besitz von 3D Systems Inc., USA) eingefüllt. Danach wurde mittels Abstrichstreifen das Pulver glattgezogen und im Anschluss ein gleichmäßig, homogener Untergrund im „Build“-Behälter (siehe Abb. 3-4) erzeugt.

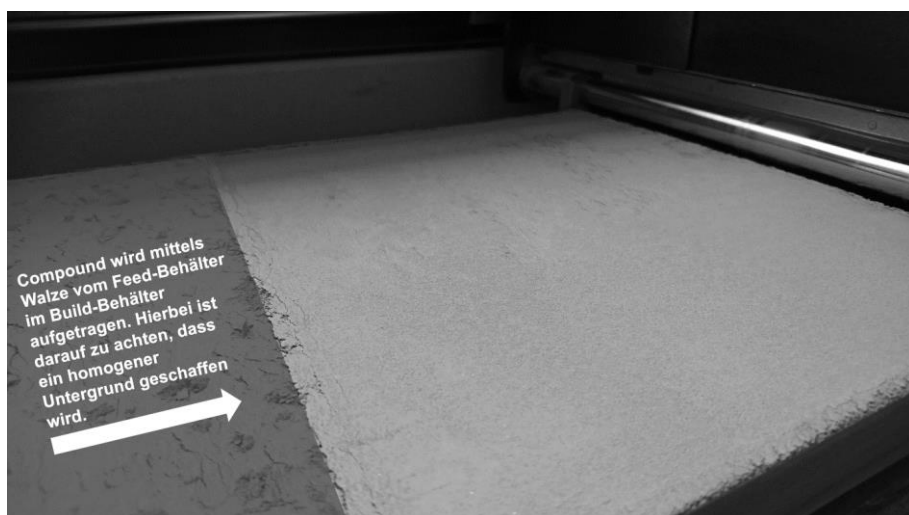


Abb. 3-4: Erzeugen eines gleichmäßigen, homogenen Untergrunds im „Build“-Behälter

Die Bindemittelflüssigkeit wurde ebenfalls mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1$  g zusammengestellt und nach dem Mischvorgang in das Schlauchsystem des 3D-Druckers infiltrierte. Zur Sicherung, dass mit Beginn des Druckprozesses die gemischte Bindemittelflüssigkeit auf dem entsprechenden Querschnitt des Layers aufgebracht wird, wurde zudem noch ein „Purge“-Vorgang der HP10-Kartusche vorgenommen. Bei dem s. g. „Purge“-Vorgang spült sich der Druckkopf, damit das destillierte Wasser, welches in den Ruhephasen zwischen den Druckvorgängen zur Schonung der Kartusche eingefüllt wurde, wieder aus dem Drucksystem gelangt und der Druckkopf ausschließlich mit der erforderlichen Bindemittelflüssigkeit befüllt ist. Zur weiteren Überprüfung der Funktionalität des Druckkopfes wurde noch ein „Stripe-Test“ durchgeführt, bei dem der Druckkopf ein definiertes Streifenmuster zur Überprüfung des Feuchtigkeitsauftrages auf ein untergelegtes Papier druckt.

Nach Abschluss der Vorbereitungen des Compounds sowie der Bindemittelflüssigkeit wurden für den Druckprozess die maschinentechnischen Randbedingungen bzw.

Einstellungen aus Tab. 3-1 justiert. Die erforderlichen STL-Dateien wurden jeweils mit dem integrierten CAD-Programm „SpaceClaim“ von ANSYS modelliert. Nach der Konvertierung des CAD-Modells in eine STL-Datei wurden jeweils sechs Probekörper, wie in Abb. 3-5 veranschaulicht, im virtuellen Bauraum platziert. Die Anordnung und Nummerierung der Probekörper wurde stets zur Analyse hinsichtlich des Einflusses der Probekörperposition im Bauraum beibehalten.

Tab. 3-1: 3D-Pulverdrucker Einstellungen

Beschreibung	Kennwerte
Schichtstärke	0,1 mm
Walzengeschwindigkeit	255 U/min
Geschwindigkeitsmodus (Z310)	0,15
Service nach X Schichten	20 Schichten
Max. Druckkopftemperatur	82 °C

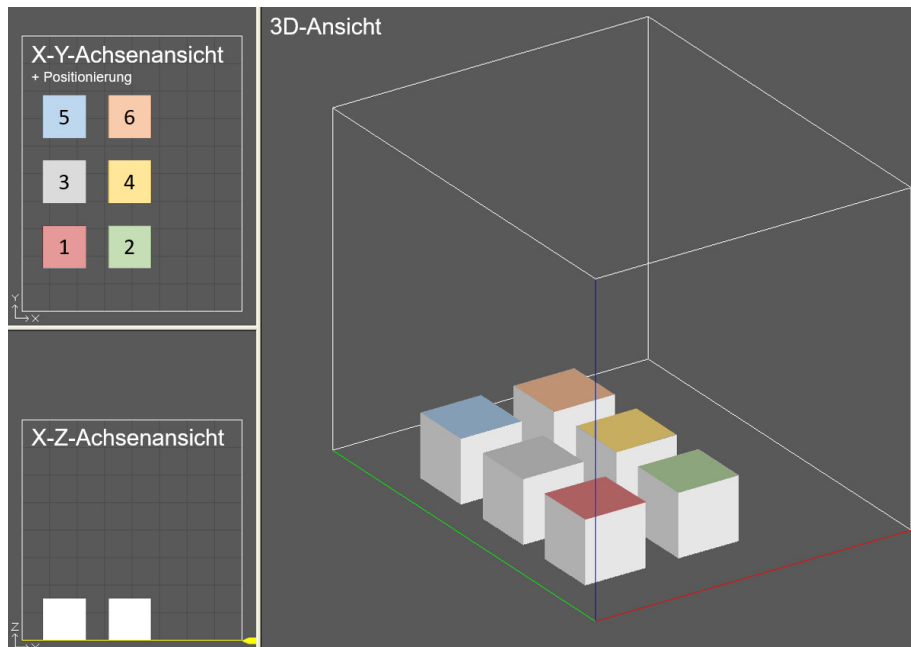


Abb. 3-5: Exemplarische Positionierung und Nummerierung der Probekörper im virtuellen Bauraum



Bevor der Druckprozess eingeleitet werden konnte, wurde noch mithilfe der ZPrint Software die aufzutragende Feuchtigkeitsmenge definiert sowie die gesamte Struktur entsprechend der spezifischen Prozessparameter in Schichten zerlegt, sodass jede Scheibe als 2D-Layer betrachtet und auf Fehlstellen überprüft werden konnte. Die Feuchtigkeitsmenge wurde über die Einstellungsmöglichkeiten in der ZPrint-Software hinsichtlich des Shell/Core-Verhältnisses gesteuert. Hierzu wurde in Vorversuchen der Feuchtigkeitsaustrag beim entsprechenden Shell/Core-Verhältnis ermittelt, um in dieser Arbeit die Feuchtigkeitsmenge in die typische Bezeichnung des w/z-Wertes übertragen zu können. Ein weiterer Prozessabschnitt bzgl. der Planung von temporären Stützkonstruktionen war aufgrund der verwendeten Verfahrensart nicht relevant.

Mit Beginn des Druckvorgangs wurden die Schichten der virtuell zerlegten Probekörper entsprechend der spezifischen Prozessparameter als Pakete von mehreren 2,5D-Layern an den 3D-Pulverdrucker geleitet. Die Übersetzung der geschnittenen STL-Dateien in Druckbefehle erfolgte dabei über einen Algorithmus in der Druckersteuerung. Die daraus resultierenden Schichtdaten bilden ein monochromes Bitmap, wie exemplarisch in Abschnitt 2.2.2 dargestellt. D. h. dass der Druckkopf die Bindemittelflüssigkeit entweder aufsprüht oder nicht abgibt und demnach die Erhärtung einer definierten Position in der jeweiligen Schicht herbeiführt. Die verwendeten 3D-Drucker nutzten dafür eine der „Drop-on-Demand Ink-Jet“-Technologien – das thermische Verfahren bzw. die s. g. Bubble Jet Technologie [128].

Jede einzelne Schicht beinhaltet demnach einen Maschinencode, der aus den Konturen der zu druckenden zweidimensionalen Fläche sowie aus der aufzutragenden Pulverschichtstärke besteht. Die Druckvorgänge wurden auf Basis von Vektoren (wie beim Plotten) verarbeitet, sodass die Bewegungen immer in einer geraden Linie  $X_a$ ,  $Y_a$  bis  $X_b$ ,  $Y_b$  verlaufen. Die Y-Achse ist als s. g. Streifenrichtung definiert, in der sich der Druckkopf bewegt, wenn er die Bindemittelflüssigkeit entlang des Portals aufsprüht, sodass letztendlich alle Streifen parallel zur Y-Achse liegen. Die X-Achse steht in der Ebene einer Druckschicht senkrecht zur Streifen(Y)-Richtung, d. h. der Richtung, in der sich der Druckkopf von einem Streifen zum nächsten bewegt. Die Z-Achse ist die vertikale Richtung, die senkrecht zur Druckschicht verläuft (siehe Abb. 3-6).

Zur Optimierung des Herstellungsablaufs wurde die Anordnung der Probekörper, wie bereits in Abb. 3-5 dargestellt, in einer linearen Positionierung vorgenommen.

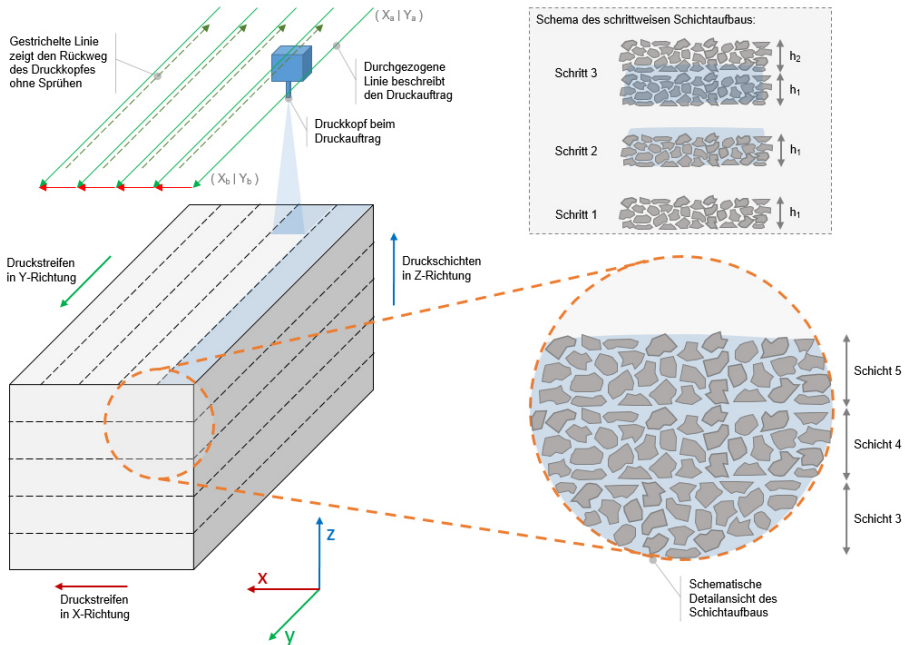


Abb. 3-6: Schematische Darstellung des Druckprozesses [23]

Die Materialverfestigung des additiven Fertigungsverfahrens erfolgte ausschließlich durch den Austritt der Bindemittelflüssigkeit in den berechneten Segmenten sowie einer anschließenden chemischen Reaktion mit dem schichtweise aufgetragenen Trockencompound. Wichtig war es hierbei, dass zwischen den einzelnen Layern der zeitliche Abstand gering gehalten wurde und die aufgetragenen Partikel die Feuchtigkeit des vorherigen Druckauftrags aufnehmen, um einen s. g. „frisch in frisch“ Schichtaufbau gewährleisten zu können.

Als Schichtstärke wurde für alle Versuchsserien ein Maß von 0,1 mm gewählt, das nach Vaezi et al. [18] u. a. im Gegensatz zu geringeren Schichtstärken eine Steigerung der Biegezugfestigkeit erbrachte. Demnach senkte sich mit jedem Layer der „Build“-Behälter um die vorgegebene Schichtstärke und dem gegenüber hob sich die „Feed“-Einheit um das definierte Maß. Im Anschluss an den letzten Layer des ersten Pakets wurden weitere Daten angefordert bzw. übertragen und in Maschinenoperatoren umgewandelt. Die additive Fertigungsmaschine konstruierte somit die 3D-Objekte, indem sie die einzelnen 2,5D-Pulverschichten sequentiell miteinander ver kittete.

Nach Beendigung des Druckvorgangs wurde der Boden des „Build“-Behälters angehoben, um die Probekörper aus dem Pulverbett zu entfernen. Der überschüssige trockene Compound wurde hinsichtlich des ressourcenschonenden Grundgedankens aus dem Bauraum mittels Sauger, Pinsel und Schaufel entnommen und für weitere Versuchsreihen und Analysen wiederverwendet. Die weiterhin anhaftenden Partikel

am Probekörper wurden in einer Absaugstation entfernt, sodass die Probekörper je nach Ausgangsfaktoren eine Rohdichte zwischen  $1,1 - 1,8 \text{ g/cm}^3$  aufwiesen.

Der nächste Bearbeitungsschritt mit der Nachbearbeitung der Probekörper erfolgte zur Vergleichbarkeit der 3DP-Standfestigkeit und geometrischen Optimierbarkeit 30 min nach Beendigung des letzten Schichtauftrags. Die in Abb. 3-7 exemplarisch veranschaulichte geometrische Optimierung war jedoch abhängig von Form bzw. Struktur des generierten Baukörpers sowie der definierten Maschineneinstellungen und der Zusammensetzung des trockenen Compounds. Zu beachten war in diesem Bearbeitungsprozess, dass die Probekörper für die Biegezug- und Druckfestigkeitsprüfung anschließend eine möglichst glatte Seitenfläche aufwiesen, um eine konstante Lastverteilung gewährleisten zu können. Im Anschluss an die Nachbearbeitung schloss der Herstellungsprozess für die Hälfte der Probekörper einer Versuchsreihe mit der typischen Wasserlagerung ab und die andere Hälfte erhielt eine optimierte Nachbehandlung in Wasserglas. Die Lagerung in Wasserglas sollte als zusätzliche Variante einen Vergleich zur konventionellen Wasserlagerung bieten und zeigen, ob eine Verdichtung sowie eine Steigerung der Druckfestigkeit erzielt werden kann.

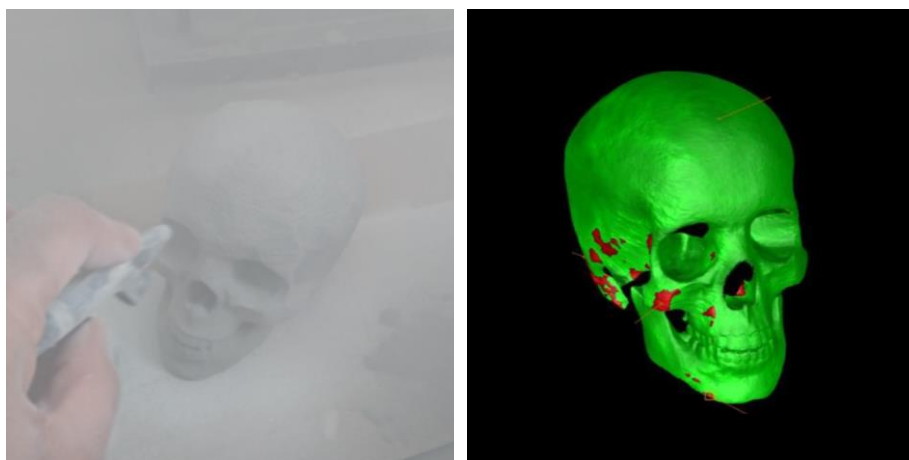


Abb. 3-7: Exemplarische Nachbearbeitung (links) und geometrische Überprüfung der gedruckten Betonstrukturen (rechts) [23]

### 3.2.3 Probekörper

Die Probekörper wurden, wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert, mit den beiden 3D-Druckern ZPrinter310 und 310plus hergestellt. Im Bauraum der additiven Fertigungsmaschinen konnten Exponate bis zu einer Größe von  $26,5 \times 22,5 \times 28,0 \text{ cm}$  gedruckt werden, wobei für einen ressourcenschonenden Produktionszyklus der Versuchsserien dieser Arbeit nicht die gesamte Bauhöhe verwendet wurde, sondern ausschließlich die notwendige Menge, die für die Produktion der Probekörper erforderlich war.

Zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit der 3D-gedruckten Probekörper wurden Prismen mit den Abmessungen 160 x 40 x 40 mm in Anlehnung an DIN EN 196-1 [129] produziert. Die Prüfung erfolgte im 3-Punkt-Biegezugversuchsaufbau, sodass im Anschluss mit den beiden Bruchhälften zusätzlich die Druckfestigkeit der Betonproben ermittelt werden konnte. Die realen Abmessungen und die Oberflächenbeschaffenheit der Prismen sind in Abb. 3-8 exemplarisch dargestellt.

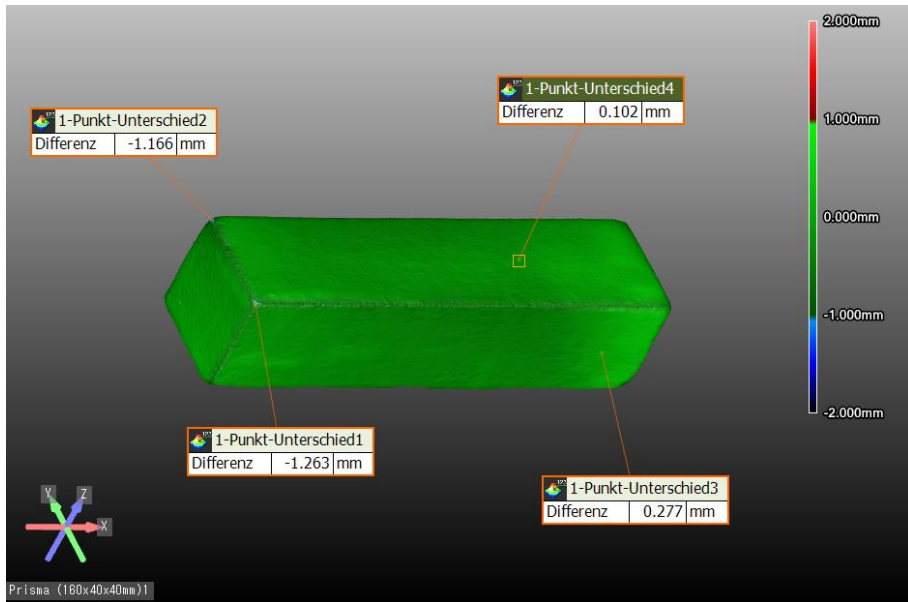


Abb. 3-8: Exemplarische Untersuchung eines Prismas inkl. Differenzabgleichung zur generierten STL-Datei

Da der Fokus der betontechnologischen Kennwerte auf der Druckfestigkeit lag, wurden im Sinne der Ressourcenschonung primär Würfel mit den Abmessungen 40 x 40 x 40 mm erstellt. Die Druckfestigkeit der 3D-gedruckten Betonproben wurde anschließend in Anlehnung an DIN EN 196-1 [129] bestimmt. Die realen Abmessungen sowie die Oberflächenbeschaffenheit der Würfel sind in Abb. 3-9 exemplarisch veranschaulicht.

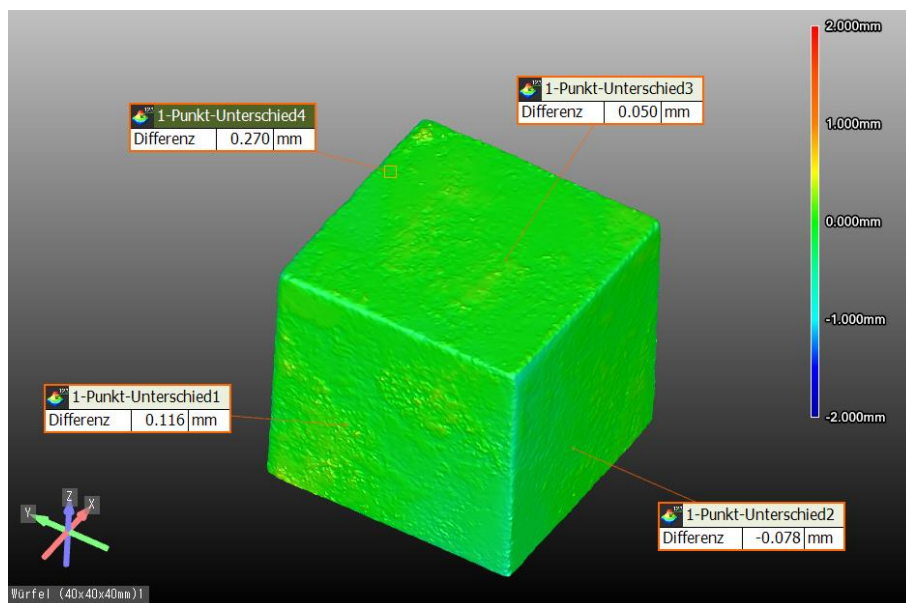


Abb. 3-9: Exemplarische Untersuchung eines Würfels inkl. Differenzabgleichung zur generierten STL-Datei

### 3.2.4 Untersuchungsmethoden

#### 3.2.4.1 Pulveranalyse

Da die Pulveranalyse ein wesentlicher Faktor ist, um eine Aussage zur Prozessfähigkeit des jeweiligen Compounds treffen zu können, wurden sowohl die Bindemittelbestandteile als auch die Gesteinskörnung in der Beton- bzw. Trockenmörtelzusammensetzung hinsichtlich ihrer schüttgut- sowie werkstoff-technologischen Parameter charakterisiert.

Zur grundlegenden Klassifizierung der Trockenmörtelgemische wurden zunächst die einzelnen Bestandteile hinsichtlich der Korngrößenverteilung mittels Laserbeugung untersucht. Hierbei wurde darauf geachtet, dass die fünf Bestandteile der verschiedenen Compounds während dem Untersuchungsprozess sowohl dispergiert, als auch in anschließenden Durchläufen ohne Dispergierung analysiert wurden, um die realen Vorkommnisse, wie eine Agglomeration der feinsten Partikel, im Herstellungsprozess zu berücksichtigen. Im Anschluss wurden die homogen durchmischten Trockenmörtel ebenfalls stichprobenartig untersucht, sodass mittels Vergleichsprüfung zwischen realen Untersuchungen sowie der analytischen Berechnung Rückschlüsse auf den Zerfall von Agglomeraten beim intensiven Mischprozess gezogen werden konnten. Anhand der verwendeten Streulichtmessmethode wurden die Partikelgrößenverteilungen in einem Größenbereich von 0,1  $\mu\text{m}$  bis 1 mm erstellt. Die Auswertungen wurden in einem

Excel-Programm zusammengeführt, sodass je nach Compound die entsprechende Korngrößenverteilungskurve berechnet werden konnte. Die Partikelgrößenverteilung der einzelnen Bestandteile ist in Abb. 3-10 dargestellt. Die Darstellung der Ergebnisse der differierenden Partikelgrößenanalysen erfolgt nach DIN ISO 9276-1 [130].

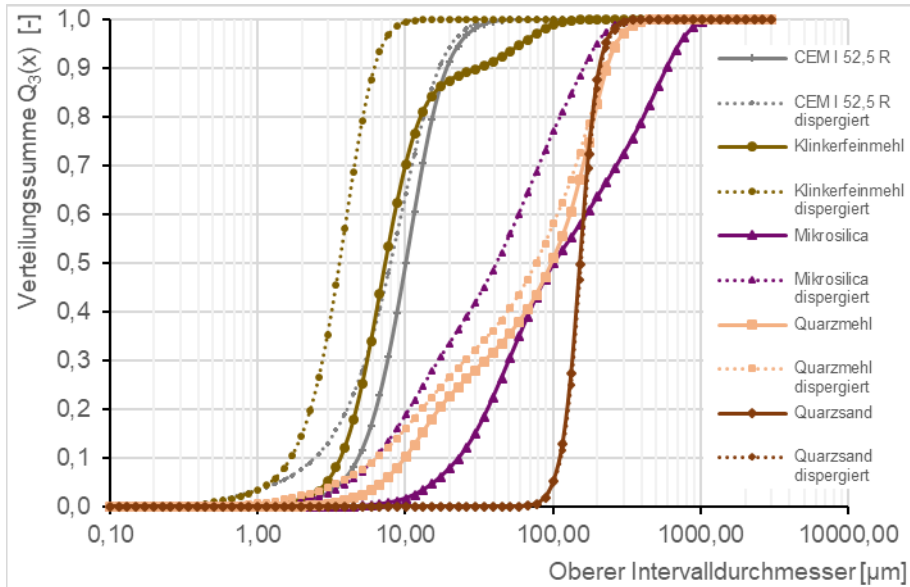


Abb. 3-10: Partikelgrößenverteilung der verwendeten Bestandteile

Eine quantitative Auswertung der charakteristischen Kennzahlen  $d_{10,3}$ ,  $d_{50,3}$  und  $d_{90,3}$  ist in Tab. 3-2 aufgelistet. Der zweite Index zeigt hierbei an, dass für die Verteilungsfunktion das Volumen aller gemessenen Partikel zugrunde liegt. Der Parameter  $d_{10,3}$  gibt folglich an, dass 10 % aller Partikel einen kleineren Durchmesser als diesen aufweisen. Der Median der gemessenen Durchmesser wird durch den Wert  $d_{50,3}$  repräsentiert und die Kenngröße  $d_{90,3}$  gibt den Durchmesser an, über dem 10 % der Partikel liegen. Der letzte Parameter  $k_{\mu\text{m}}$  ist abgeleitet von der Körnungsziffer und verhält sich analog zur Berechnung des betontechnologischen Kennwertes von Gesteinskörnungen, jedoch in einem kleineren Maßstab. D. h. die typischen Rückstände wurden nicht auf einem Siebsatz mit den Sieben 0,25 – 0,5 – 1 – 2 – 4 – 8 – 16 – 31,5 – 63 mm vorgenommen, sondern mithilfe der beschriebenen Streulichtmessmethode im Mikrometerbereich ausgewertet und anschließend durch 100 geteilt. Der  $k_{\mu\text{m}}$ -Werte dient somit als ergänzendes Maß, um den Feinheitsgrad der unterschiedlichen Trockenmörtelzusammensetzungen auf einen Vergleichswert zu reduzieren.

Tab. 3-2: Kennzahlen der Verteilungsfunktion der verwendeten Bestandteile im dispergierten und nicht dispergierten Zustand

Material/ Bestand- teil	Nicht dispergiert				Dispergiert			
	$d_{10,3}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$d_{50,3}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$d_{90,3}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$k_{\mu\text{m}}$	$d_{10,3}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$d_{50,3}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$d_{90,3}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$k_{\mu\text{m}}$
CEM I 52,5 R	4,82	10,11	19,27	585,36	2,45	7,98	17,05	536,29
Klinker- feinmehl	3,65	7,36	31,23	563,37	1,68	3,60	6,23	427,37
Mikro- silica	23,11	101,81	589,51	840,59	6,30	41,69	162,01	747,02
Quarz- mehl	10,01	98,01	233,15	806,23	6,46	77,12	225,83	778,37
Quarz- sand	110,77	152,76	209,09	899,86	112,98	155,84	214,30	899,84

Neben der Partikelgrößenverteilung ist die Form der feinen Bestandteile im Compound einer der maßgebenden Einflussfaktoren auf die resultierende Schüttdichte und Fließfähigkeit des Pulvergemischs. Des Weiteren beeinflussen die beiden Kenngrößen wiederum die Dichte des 3D-gedruckten Betonkörpers, die letztendlich potenziell mit der Porosität und der Betondruckfestigkeit korreliert.

Zur detaillierten Analyse der Partikelform und -struktur der einzelnen Bestandteile im Compound wurden diese mittels Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen (REM-Aufnahmen) visualisiert und untersucht. Dazu wurde jeweils zunächst ein Foto aus einer größeren Distanz aufgenommen, um einen Eindruck über die Partikelform und Diversität zu erhalten. Im Anschluss wurden noch Detailaufnahmen der Bestandteile dargestellt sowie die chemische Zusammensetzung tendenziell anhand einer energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDX-Analyse) ermittelt.

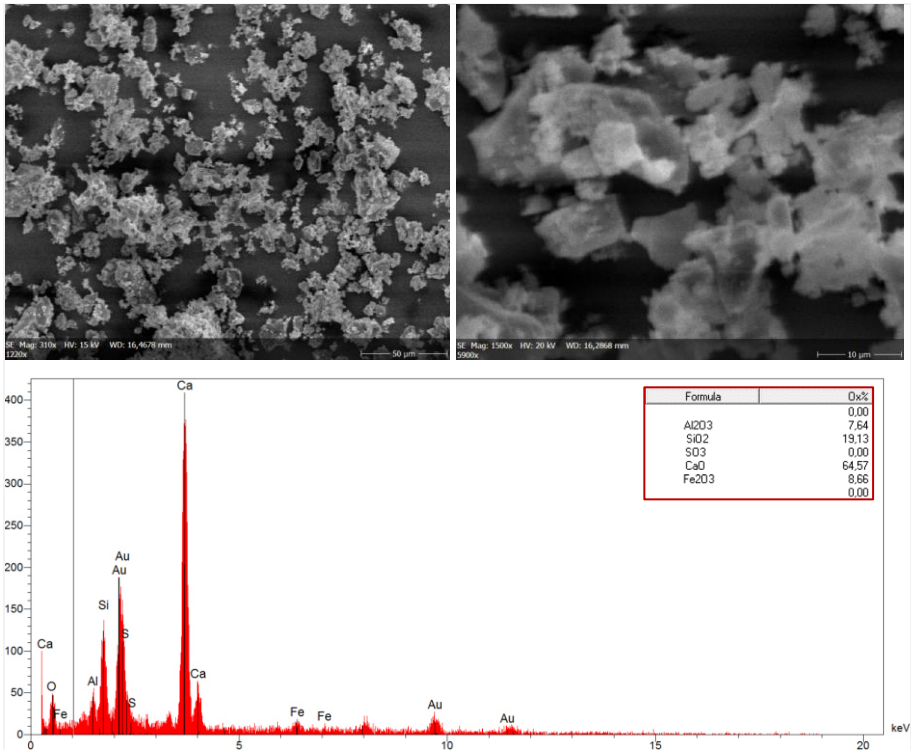


Abb. 3-11: REM- und EDX-Aufnahmen des verwendeten Portlandzementes CEM I 52,5 R

Anhand der REM-Aufnahmen des verwendeten Portlandzementes CEM I 52,5 R ist bei einer 1.220-fachen Vergrößerung zu erkennen, dass die Diversität der Partikelgröße gering ausfällt und die Zementpartikel in Relation zu den weiteren Bestandteilen sehr fein sind. In der Detailaufnahme ist mit einem 5.900-fachen Zoom (siehe Abb. 3-11 oben rechts) die kantige Kristallstruktur des Zements sowie ein verhältnismäßig geringer Anteil an Agglomeraten festzustellen. Dies bestätigt zum einen die geringe Differenz bei der Korngrößenverteilung mit und ohne Dispergierung des Pulvers und zum anderen induziert die Partikelstruktur ein kohäsives Fließverhalten. Die Auswertung der EDX-Analyse bestätigt mit geringeren Abweichungen die chemische Zusammensetzung, die mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA-Analyse) durchgeführt wurde.



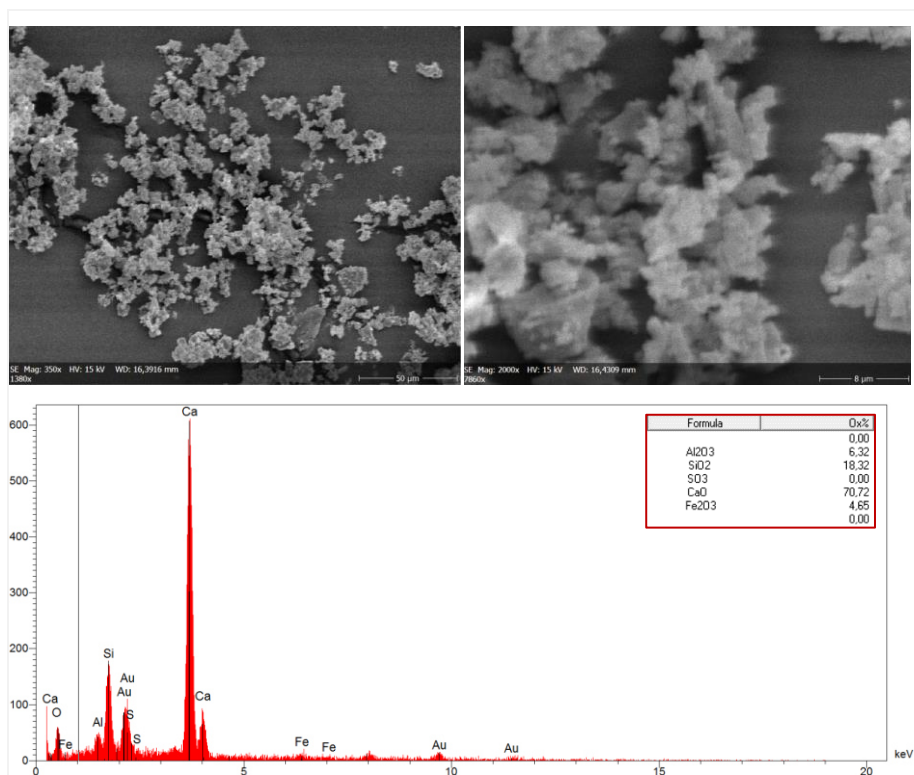


Abb. 3-12: REM- und EDX-Aufnahmen des verwendeten Klinkerfeinmehls

Die Beobachtungen des Klinkerfeinmehls spiegeln erwartungsgemäß in Bezug auf die Diversifikation der Partikelgrößen sowie die Partikelstruktur größtenteils die Erkenntnisse aus der CEM I 52,5 R Analyse wider (siehe Abb. 3-12 oben links und rechts). Die minimalen Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung bestätigen die Abweichungen aus den RFA-Analysen. Aufgrund der noch feineren Partikelgrößenverteilung sowie einer engeren Verflechtung der Partikel besteht ebenfalls die Tendenz zu einem kohäsiven Fließverhalten sowie einer stärkeren Agglomerat-Bildung, welche sich in den differierenden Untersuchungsvarianten der Partikelgrößenverteilung bestätigen lässt.

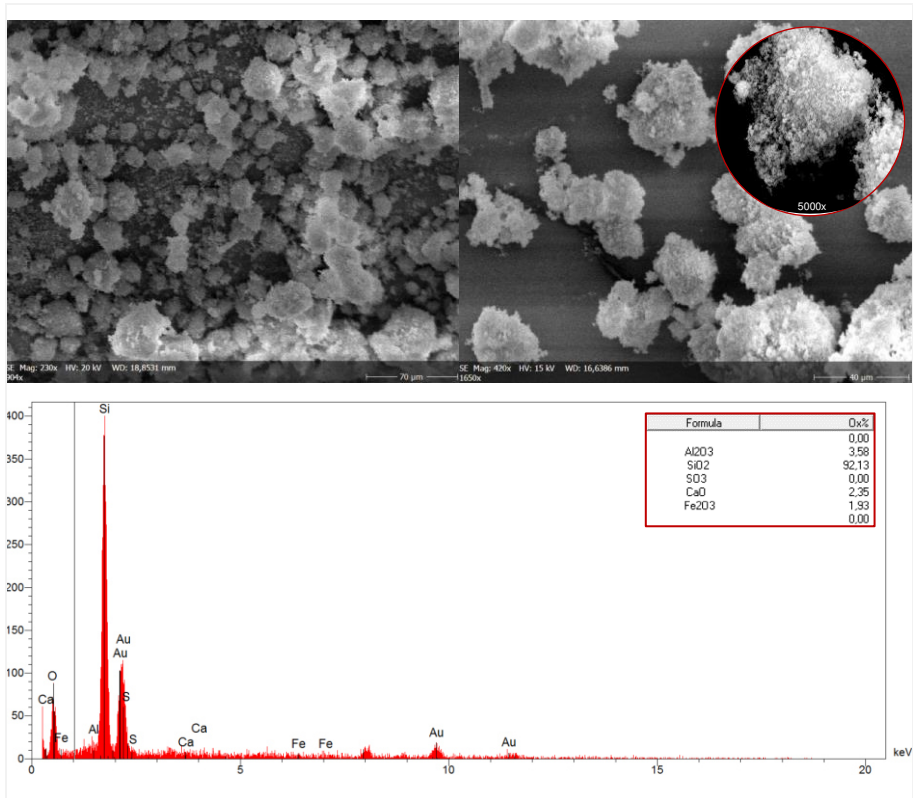


Abb. 3-13: REM- und EDX-Aufnahmen des verwendeten Silicastaubs

Bei der Betrachtung der Silicastaubpartikel unter dem REM wird mit einer 1.650-fachen bzw. 5.000-fachen Vergrößerung (siehe Abb. 3-13 oben rechts) deutlich, dass die kugelförmigen Formen des Silicastaubs in einem Bereich liegen, der einen Mikrometer deutlich unterschreitet. Die Partikel neigen daher, wie in Abschnitt 2.3.3 und 2.5.2 erläutert, bedingt durch die interpartikularen Anziehungskräfte stark zu agglomerieren. Die Partikelgrößenverteilung mit dem dispergierten Material weist auch den größten Unterschied zum nicht dispergierten Pulver im Vergleich zu den weiteren Bestandteilen auf. Dennoch lässt sich nur ein geringer Prozentsatz an Partikeln mit einem Durchmesser von ca. 1  $\mu\text{m}$  feststellen. Da dies den REM-Aufnahmen widerspricht, wäre eine Messung mittels Flüssigmesszelle eine weitere Option, um die bestehenden Agglomerate vollständig auflösen zu können. Auf diese Variante wurde jedoch in dieser Arbeit verzichtet, da der ideale Zustand ohne Agglomerate in der realen Produktion der 3D-gedruckten Betonstrukturen ausgeschlossen werden kann. Aufgrund der sehr feinen Partikel sowie der bereits erwähnten Erkenntnisse kennzeichnet sich Silicastaub als ein Pulver mit kohäsiven Fließigenschaften.

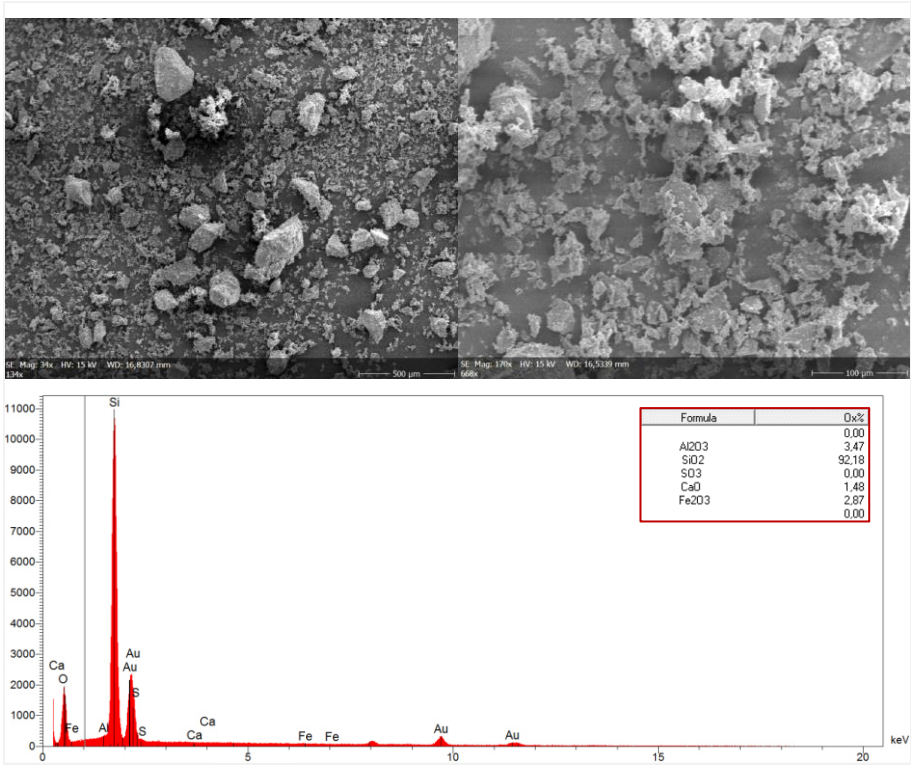


Abb. 3-14: REM- und EDX-Aufnahmen des verwendeten Quarzmehls (0 – 0,4 mm)

Die REM-Aufnahmen des Quarzmehls zeigen eine Variationsbreite von Partikeln im einstelligen bis dreistelligen Mikrometerbereich. Dies deckt sich mit den Ergebnissen aus der Streulichtmessung und zeigt ebenfalls, dass mit der Zunahme an verhältnismäßig größeren Partikeln die Differenz der Ergebnisse zwischen dispergierten und nicht dispergierten Durchläufen abnimmt. Im Allgemeinen reduziert sich mit zunehmender Partikelgröße die spezifische Oberfläche und damit die Agglomerationsneigung (Kohäsion) sowie die Wandhaftung (Adhäsion). Demnach steigt die Fließfähigkeit des Quarzmehls im Gegensatz zu den feineren Bindemitteln in der Trockenmörtelzusammensetzung.

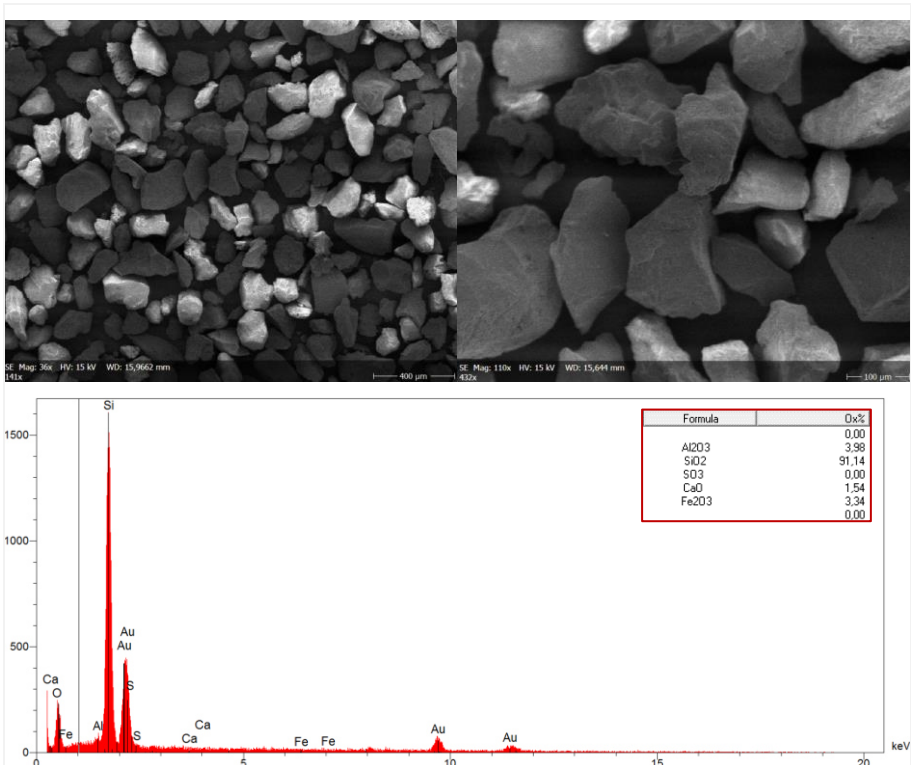


Abb. 3-15: REM- und EDX-Aufnahmen des verwendeten Quarzsands (0 – 0,25 mm)

Beim größten Bestandteil im Compound kann man bereits bei einer 141-fachen Vergrößerungen feststellen, dass die Diversität der Korngröße sehr gering ausfällt und eine Agglomeration beim Quarzsand ausgeschlossen ist. Zudem sind auch in den Detailaufnahmen keine feinen Partikel in den Zwischenräumen zu erkennen, sodass erwartungsgemäß die uniaxiale Druckfestigkeit ( $\sigma_c$ ) bei der Ermittlung der Fließfähigkeit zu null verlaufen wird. Dies bedeutet, dass es sich um ein sehr fließfähiges Material handelt. Eine Abweichung der Korngrößenverteilung vom dispergierten zum nicht dispergierten Durchgang wäre aus besagten Gründen nicht zu erwarten und bestätigt sich mit der Analyse in Abb. 3-10.

Neben der Verifizierung bzw. Quantifizierung des prognostizierten Fließverhaltens aus den REM-Aufnahmen wurde der Fließfunktionswert ( $f_c$ ) der unterschiedlichen Pulverbestandteile mit dem Powder Flow Tester (PFT) ermittelt, um mögliche Probleme im Herstellungsprozess beim 3DP-Verfahren vorhersagen und vermeiden zu können.

Die wichtigsten Fließeigenschaften sind neben der Druckfestigkeit (Schüttgutfestigkeit  $\sigma_c$ ) und Verfestigungsspannung  $\sigma_1$ , aus deren Verhältnis sich die Fließfähigkeit bestimmt, die Schüttdichte sowie die Verdichtbarkeit (Kompressibilität), wobei letzterer Parameter beim Herstellungsprozess mit den verwendeten 3D-Druckern bzw. bei den

produzierbaren Dimensionen in dieser Arbeit ohne zusätzlichen maschinellen Aufwand potenziell nicht ins Gewicht fällt. Dennoch kann der Aspekt der Kompressibilität in Form der Stampfdichte eine relevante Rolle einnehmen, sofern die Korrelation zwischen einer verringerten Verdichtbarkeit des Compounds mit einer gesteigerten Betondruckfestigkeit einhergeht. Hierzu wurde für jeden Compound der s. g. Hausner-Faktor aus Abschnitt 2.5.1 – mittels Quotienten aus Stampfdichte zu Schüttdichte Gl. (2-14) – bestimmt, um im Anschluss an die Betondruckfestigkeitsprüfung der jeweiligen Versuchsserie eine gegenseitige Wechselwirkung feststellen zu können. Die Schüttdichte wurde hierbei in Anlehnung an DIN EN 459-2 [131] ermittelt und die anschließende Stampfdichte in Anlehnung an DIN EN ISO 787-11 [132]. Die Auswertung der einzelnen Bestandteile ist in Abb. 3-16 zusammengefasst. Wesentliche Einflussfaktoren für die ermittelten Schüttdichten sind neben der Kornform und Rohdichte u. a. der Feinheitsgrad der verschiedenen Pulver. Anhand der Auswertung ist ersichtlich, dass die feineren Pulver eine geringere Schüttdichte aufweisen. Diese relativ eindeutige Beobachtung kann nicht auf die Stampfdichte sowie auf den berechneten Hausner-Faktor übertragen werden, da zusätzlich die Korngrößenverteilung sowie die interpartikulären Haftkräfte eine relevante Rolle einnehmen. Hervorzuheben ist in dieser Zusammenstellung der Quarzsand, der aufgrund seiner sehr engen Sieblinienkurve und den geringen Kohäsionskräften nur einen Hausner-Faktor von 1,10 aufweist.

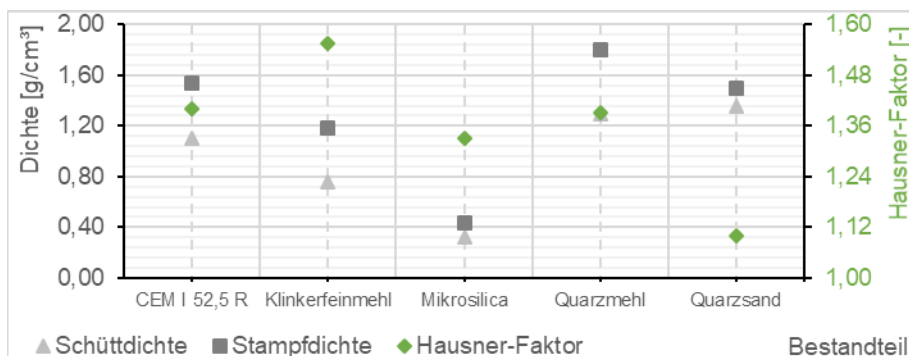


Abb. 3-16: Auswertung der Schütt- und Stampfdichte sowie des Hausner-Faktors der einzelnen Bestandteile

Nach Hesse et al. [133] kann man potenziell mithilfe der granulometrischen Eigenschaften wie der Partikelgrößenverteilung, der Partikelform, den Oberflächeneigenschaften sowie dem Feuchtegehalt des Produktes Rückschlüsse auf die Fließfähigkeit des jeweiligen Bestandteils ziehen, jedoch müsste man dazu die interpartikulären Haftkräfte anhand einer DEM-Simulation bestimmen. Daher wurde die Fließfähigkeit  $ff_c$  für jeden möglichen Bestandteil im Compound mittels PFT ermittelt und in Abb. 3-17 dargestellt. Für die feinkörnigen Bindemittel stellte sich jeweils ein kohäsives ( $2 \leq ff_c < 4$ ) bis sehr kohäsives ( $1 \leq ff_c < 2$ ) Fließverhalten heraus, das die Prognosen anhand der Partikelgrößenverteilungen und REM-Aufnahmen

bestätigte. Zudem wies die Gesteinskörnung erfahrungsgemäß ein leicht fließendes ( $4 \leq ff_c < 10$ ) bzw. frei fließendes ( $10 \leq ff_c$ ) Materialverhalten auf. Da die Diversität der Partikelgrößen beim Quarzmehl größer ausfällt, entsteht durch die feineren Bestandteile im Vergleich zum allgemein relativ grobkörnigen Quarzsand ein kohäsiveres Fließverhalten. Infolge dieser Erkenntnisse können für die jeweiligen Versuchsreihen wiederum Rückschlüsse auf den Schichtauftrag gezogen werden.

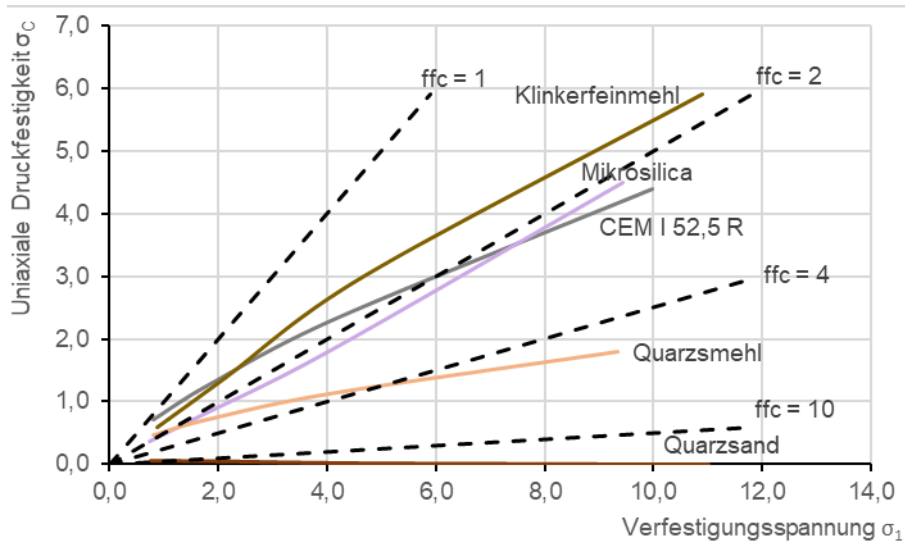


Abb. 3-17: Fließfähigkeitsanalyse der einzelnen Bestandteile

### 3.2.4.2 Flüssigkeitsanalyse

Die Humiditäts- bzw. Flüssigkeitsanalyse stellt einen signifikanten Beitrag zum Gelingen eines 3D-gedruckten Betonkörpers dar, der neben der detailgetreuen Auflösung eine ausreichende Druckfestigkeit erzielen soll. Im ersten Schritt muss daher die Bindemittelflüssigkeit auf den Druckkopf abgestimmt werden, um zum einen das Aufsprühen der Flüssigkeit auf das Pulverbett zu ermöglichen und zum anderen den Verschleiß möglichst gering zu halten. In dieser Arbeit wurde eine Zusammensetzung aus destilliertem Wasser (91,2 M.-%), einem mehrwertigen Alkohol (6,9 M.-%) sowie einem Tensid (2,0 M.-%) gewählt. Die wesentlichen Eigenschaften der verwendeten Bindemittelflüssigkeit sind in Tab. 3-3 zusammengestellt.

Tab. 3-3: Eigenschaften der Bindemittelflüssigkeit

Material	Dichte $\left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right]$	Oberflächen- spannung $\left[\frac{\text{mN}}{\text{m}}\right]$	Dynamische Viskosität $\eta$ $[\text{mPa}\cdot\text{s}]$	Kinematische Viskosität $\nu$ $\left[\frac{\text{mm}^2}{\text{s}}\right]$
Bindemittel- flüssigkeit	1,0033	26,4	1,268	1,264

Die Dichte wurde dabei mithilfe einer Dichtemessapparatur (DMA) nach der Biegeschwinger-Methode bestimmt und blieb erwartungsgemäß im Bereich der drei, beinhaltenden Fluiden. Im Anschluss an die Dichtebestimmung wurde die Oberflächenspannung anhand der Pendant-Drop-Methode ermittelt. Bei dieser Methode wird aus dem Schattenbild des hängenden Tropfens mittels Tropfenkonturanalyse die Oberflächenspannung, wie in Abb. 3-18 dargestellt, berechnet. Wesentlicher Bestandteil dieser Untersuchung war es die Oberflächenspannung der Bindemittelflüssigkeit zu reduzieren, um eine optimale Benetzung der feinen Partikel des Compounds zu erzeugen sowie eine bessere Durchdringung der Bindemittelflüssigkeit in die vielschichtigen Layer zu gewährleisten. Dieser Gedanke wurde mithilfe der Zugabe des Tensids verfolgt, wobei in weiteren Vorversuchen zu dieser Arbeit festgestellt werden konnte, dass infolge eines zu hohen Tensid-Anteils die aufgedruckte Bindemittelflüssigkeit extrem weit ausblutet und die gewünschte Detailgenauigkeit des 3D-gedruckten Betonkörpers nicht realisierbar wäre. Zur Untersuchung der Viskosität der verwendeten Flüssigkeit wurde das Kapillarviskosimeter nach Oswald verwendet. Bei dem zugrundeliegenden Messprinzip wurde neben der kinematischen auch die dynamische Viskosität bestimmt. Der Unterschied zwischen den beiden Kennwerten ist, dass sich die dynamische Viskosität durch den quantitativen Ausdruck des Strömungswiderstands der Flüssigkeit definiert, während die kinematische Viskosität das Verhältnis der viskosen Kraft der Flüssigkeit zur Trägheitskraft darstellt [134]. Da es sich bei den verwendeten Fluiden um keine hochviskosen Materialien handelte, wies die verwendete Bindemittelflüssigkeit eine dynamische und kinematische Viskosität annähernd vom Hauptbestandteil Wasser auf.

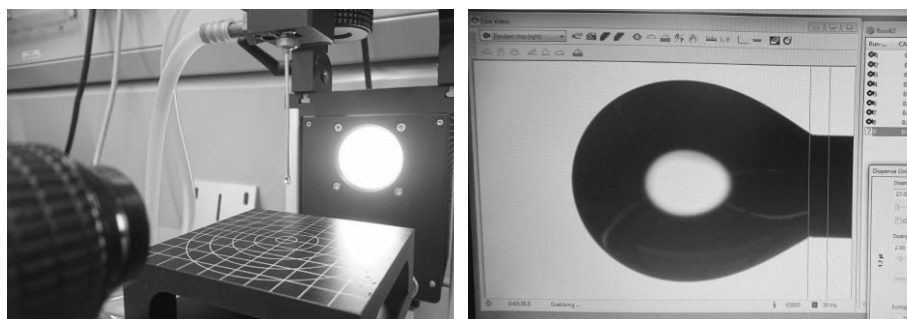


Abb. 3-18: Bestimmung der Oberflächenspannung mittels Pendant-Drop-Methode

Anschließend wurde unter Verwendung der definierten Bindemittelflüssigkeit, die in ihrer prozentualen Zusammensetzung in den dargestellten Versuchsserien dieser Arbeit gleichgeblieben ist, der Feuchtigkeitsanspruch des jeweiligen Compounds untersucht. Zur Bestimmung des Bindemittelflüssigkeitsanspruchs von feinen Kornhaufwerken wie den verwendeten Trockenmörtelmischungen wurde die Prüf- und Auswertemethode in Anlehnung an das Punkte-Verfahren angewandt [135]. Das Verfahren basiert auf der Theorie, dass sich ein feines kohäsionsfreies Kornhaufwerk ohne Auflast erst dann bis zu einer stoffspezifischen Packungsdichte verdichten lässt, wenn der Wassergehalt resp. der Bindemittelflüssigkeitsgehalt zur Sättigung des dichten Korngefüges ausreicht. Da im Herstellungsprozess des Pulverdruckverfahrens keine zusätzliche Verdichtungsarbeit geleistet wird, besteht die Annahme, dass sich bei einem gesättigtem Compound eine dichtere Betonmatrix einstellt und sich somit höhere Druckfestigkeiten erzielen lassen. Die Untersuchungen zu dieser Hypothese werden in Abschnitt 3.7 behandelt.

Hinsichtlich der physikalischen Eigenschaften ist davon auszugehen, dass die verwendeten Haufwerke bei Oberflächentrockenheit keine kohäsiven Eigenschaften aufweisen und nur noch über Reibungskräfte zusammengehalten werden. Sofern die feinkörnigen Haufwerke feucht, aber noch nicht gesättigt sind, behindert die Oberflächenspannung des Wassers bzw. die s. g. Kapillarspannung die Umlagerung der Körner. Dies wird in der Bodenmechanik, z. B. bei feuchten Sanden, als scheinbare Kohäsion bezeichnet. Sobald das Haufwerk den Sättigungspunkt erreicht hat, verliert sich die Kapillarspannung, sodass sich die Prüfgutmenge zur charakteristischen, dichtesten Packung umlagern lässt. Da die Umlagerung der Körner eine Verringerung des Haufwerkporenvolumens sowie eine Reduzierung des Sättigungsbedarfs verursacht, ist es bei dieser Prüfmethode essentiell die Feuchtigkeitszugabe in kleinen Schritten zu erhöhen.

Im ersten Arbeitsschritt wurde der trockene Compound in einem ebenen Behälter auf 0,01 g genau abgewogen. Die notwendige Prüfgutmenge beschränkte sich pro Versuchsdurchgang auf 100 g beim reinen Quarzsand und auf 50 g bei Pulvern wie den verwendeten Trockenmörtelmischungen. Die Luft- und Prüfguttemperatur lag bei ca.  $(20 \pm 2)$  °C. Im zweiten Arbeitsschritt wurde schrittweise die Bindemittelflüssigkeit mittels Spritzflasche hinzugegeben. Im Anschluss wurden die Komponenten mit einem Rührwerkzeug, bspw. einem Spatel, miteinander vermengt. Sobald das Kornhaufwerk die gesamte Feuchtigkeit aufgenommen hat, wurde der Behälter aus einer Höhe von ungefähr 5 cm mehrfach aufgestoßen. Diese Arbeitsschritte wurden, wie bereits erwähnt, in möglichst kleinen Feuchtigkeitszugaben wiederholt, um den Sättigungspunkt bzw. die maximale Verdichtbarkeit des Trockengemischs anzustreben. Dieser wurde erreicht, wenn sich die Oberfläche der Mischung beim wiederholten Aufstoßen des Bechers ebnete und sich ein leichter Glanz abzeichnete. Gleichzeitig sollte die Textur eine Rauigkeit, wie in Abb. 3-19 (links) illustriert, aufweisen, da eine spiegelglatte Oberfläche auf einen Feuchtigkeitsüberschuss hindeutet (siehe Abb. 3-19 rechts). Infolge einer Rückwägung konnte die Feuchtigkeitsmenge sowie der entsprechende w/z-Wert für den jeweiligen Compound bestimmt werden.





Abb. 3-19: Exemplarische Darstellung des Kornhaufwerks bei Sättigung (links) sowie bei einem Überschuss an Feuchtigkeit (rechts)

Da beim ersten Durchgang der Sättigungspunkt häufig überschritten wird, wurde das Verfahren an allen Trockenmischungen sowie den einzelnen Bestandteilen dreimal durchgeführt. Beim zweiten und dritten Durchgang wurde jeweils geprüft, ob sich der Sättigungspunkt auch mit einem geringeren Feuchtigkeitseintrag erreichen lässt. Der kleinste, ermittelte Wert aus drei Einzelbestimmungen war letztendlich maßgebend für die geprüfte Trockenmörtelmischung. Zur Vergleichbarkeit und einfacheren Hochrechnung auf größere Compoundmengen wurde der Bindemittelflüssigkeitsanspruch wie folgt zusätzlich bestimmt:

$$n_L = \frac{V_L}{V_K} = \frac{\frac{m_L}{\rho_L}}{\frac{m_K}{\rho_K}} \quad (3-1)$$

Dabei ist

- $n_L$  der Bindemittelflüssigkeitsanspruch, in Volumenteil von 1
- $V_L$  das Volumen des Bindemittelflüssigkeitsbedarfs bei Sättigung [cm<sup>3</sup>]
- $V_K$  das Volumen des Kornhaufwerks [cm<sup>3</sup>]
- $m_L$  die Masse des Bindemittelflüssigkeitsbedarfs bei Sättigung [g]
- $m_K$  die Masse des Kornhaufwerks [g]
- $\rho_L$  die Dichte der Bindemittelflüssigkeit [g/cm<sup>3</sup>]
- $\rho_K$  die Schüttdichte des Kornhaufwerks [g/cm<sup>3</sup>]

Die Gleichung (3-1) lässt sich noch vereinfachen, da die Dichte der Bindemittelflüssigkeit mit  $1,00 \text{ g/cm}^3$  ermittelt wurde. Somit ergibt sich folgende reduzierte Gleichung:

$$n_L = \frac{m_L}{\frac{m_K}{\rho_K}} \quad (3-2)$$

Die Auswertung zu den einzelnen Bestandteilen in Anlehnung an den Punkte-Versuch ist in Abb. 3-20 zusammengefasst und gibt einen potenziellen Hinweis auf den Bindemittelflüssigkeitsanspruch je nach Zusammensetzung des entsprechenden Compounds. Auffällig ist hierbei, dass die Silicastaubpartikel prinzipiell viel Feuchtigkeit binden, jedoch ist dies nicht direkt aus dem Diagramm ersichtlich. Maßgebend für den geringen Bindemittelflüssigkeitsanspruch ist die Berechnung der Feuchtigkeitsmenge auf ein Volumen. Da die Schüttdichte beim Silicastaub sehr gering ist, entsteht somit der Eindruck des niedrigen Bindemittelflüssigkeitsanspruchs. Die Analyse der einzelnen Versuchsreihen sind im Ergebnisteil der jeweiligen Versuchsserie dargestellt.

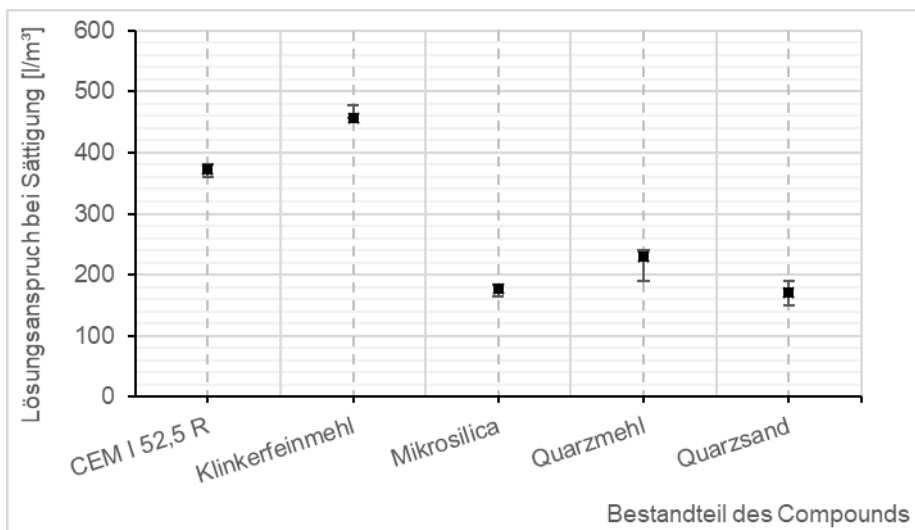


Abb. 3-20: Bindemittelflüssigkeitsanspruch der einzelnen Bestandteile des Compounds

Zuzüglich zu den Ergebnissen des Bindemittelflüssigkeitsanspruchs ist zu jeder Versuchsreihe die Feuchtigkeitsmenge je Probekörper definiert worden. Diese Auswertung beruht auf den bereits in Abschnitt 3.2.2 erwähnten Vorversuchen zu den unterschiedlichen Einstellungen am 3D-Drucker. Des Weiteren sind zum Abschluss der Flüssigkeitsanalyse jeder Versuchsserie der w/z-Wert bei Sättigung des

Compounds sowie der vorhandene w/z-Wert je Probekörper berechnet worden. Wesentliche Parameter bei der Bestimmung des w/z-Wertes sind die Schüttdichte der jeweiligen Trockenmörtelzusammensetzung, die vorhandene Feuchtigkeitsmenge sowie die Zusammensetzung der Bindemittelflüssigkeit und des Compounds. Zu berücksichtigen ist bei dieser Annahme, dass die Bindemittelflüssigkeitsmenge sowie der w/z-Wert auf das Volumen des Probekörpers zzgl. der ermittelten Schüttdichte bezogen wurde. D. h. die reale Feuchtigkeitsmenge im Probekörper sowie der w/z-Wert kann davon abweichen, da umliegende Partikel ebenso Feuchtigkeit ziehen bzw. die Bindemittelflüssigkeit dahin ausblutet. Da diese Menge nicht quantifizierbar ist, wurde zur einheitlichen Betrachtung die Bindemittelflüssigkeitsmenge sowie der w/z-Wert auf das Volumen des Probekörpers zzgl. der ermittelten Schüttdichte bezogen.

$$\frac{w}{z} = \frac{m_W}{m_Z + m_{KI}} = \frac{m_L \cdot p_W}{m_C \cdot (p_Z + p_{KI})} = \frac{m_L \cdot p_W}{V_P \cdot \rho_C \cdot (p_Z + p_{KI})} \quad (3-3)$$

Dabei ist

$\frac{w}{z}$	der Wasser-Zement-Wert
$m_W$	die Masse des Wassers [g]
$m_Z$	die Masse des Zements [g]
$m_{KI}$	die Masse des Klinkerfeinmehls [g]
$m_L$	die Masse der Bindemittelflüssigkeit [g]
$m_C$	die Masse des Compounds [g]
$p_W$	die prozentuale Menge des Wassers [%]
$p_Z$	die prozentuale Menge des Zements [%]
$p_{KI}$	die prozentuale Menge des Klinkerfeinmehls [%]
$V_P$	das Volumen des Probekörpers [cm <sup>3</sup> ]
$\rho_C$	die Schüttdichte des verwendeten Compounds [g/cm <sup>3</sup> ]

### 3.2.4.3 Additive Fertigungsparameter beim 3D-Pulverdruckverfahren

Zur vergleichbaren Auswertung der Versuchsreihen im Herstellungsprozess des 3DP-Verfahrens wurden folgende AF-Parameter festgelegt und analysiert:

- Druck- bzw. Feuchtigkeitsauftrag
- Schichtauftrag des Compounds
- Ausbluten bzw. Absorptionseffekt der angrenzenden Partikel
- Optimierbarkeit bzw. Geometrieinhaltung

Der erste Parameter beschreibt und bewertet den Feuchtigkeitsauftrag, der Schicht für Schicht auf dem Compound zu erkennen ist. In Zusammenhang mit dem

Bindemittelauftrag wurde mit Abschluss des Herstellungsprozesses die maximale Druckkopf-temperatur notiert, um Rückschlüsse auf das Ausmaß des Druckkopf-Verschleißes ziehen zu können. Die Auswertung erfolgte in fünf Abstufungen, wobei der Wert „1“ eine optimale Ausführung darstellt und mit dem Wert „5“ ein suboptimaler Feuchtigkeitsauftrag beschrieben wird. Eine exemplarische Beschreibung und Visualisierung des angewandten Schemas sind in Tab. 3-4 aufgeführt. Da in der Analyse der verschiedenen Versuchsserien ein ungesättigter bzw. fehlerhafter Druckauftrag einen maßgebenden Einfluss auf das Druckergebnis nimmt, wurden alle Versuchsreihen wiederholt, bei denen die Druckauftragsbewertung schlechter als „2“ ausfiel. Somit sollte eine spezifischere Analyse des zu untersuchenden Einflussparameters gewährleistet und eine signifikante Einflussnahme auf die resultierende Druckfestigkeit des additiv gefertigten Exponates vermieden werden.

Zur Bestimmung und Einordnung der Druckaufträge in das Bewertungssystem wurde nicht nur das optische Erscheinungsbild beurteilt, sondern auch die durchschnittliche Absorptionstiefe berücksichtigt. Dieser Parameter beschreibt inwieweit die aufgedruckte Bindemittelflüssigkeit in den unbedruckten Bereich ausblutet und somit die definierte Formgebung verändert. Hierfür wurde bei jeder Versuchsreihe der Druck- bzw. Feuchtigkeitsauftrag zu Beginn sowie zum Ende des Druckvorgangs mittels Fotoaufnahmen festgehalten. Zur Analyse und Eingruppierung in das Bewertungssystem wurden die Fotoaufnahmen am Ende des Herstellungsprozesses verwendet, da sich erst gegen Abschluss des Druckvorgangs die maximal, mit Bindemittelflüssigkeit benetzte Fläche ausbildete. Die Analyse erfolgte, wie in Abb. 3-21 exemplarisch veranschaulicht, mittels Vermessung des Bildmaterials am Computer, um etwaige Rückschlüsse auf die Bindemittelflüssigkeit oder den Compound ziehen zu können.

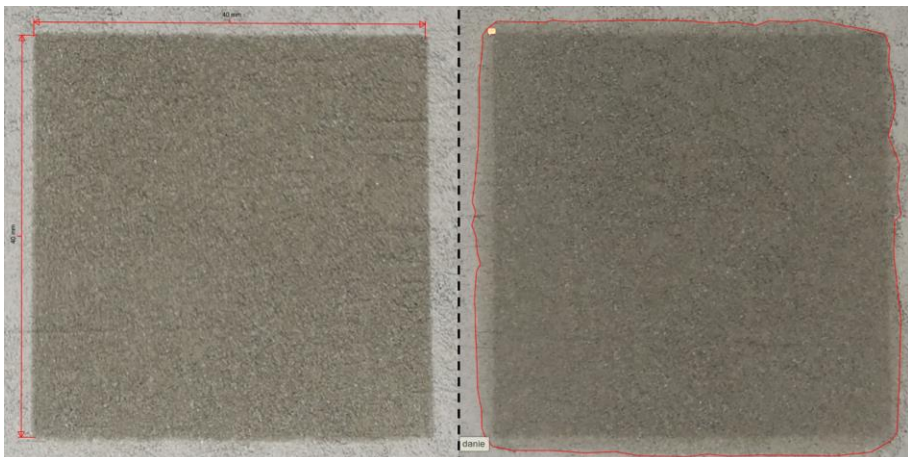

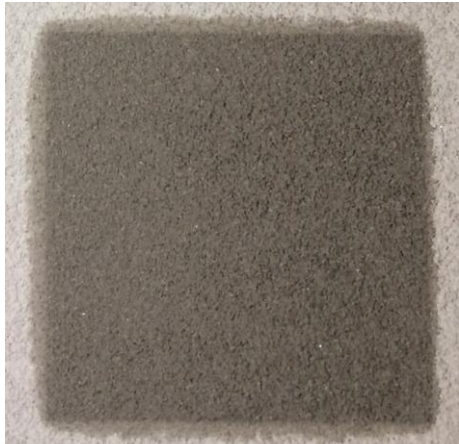

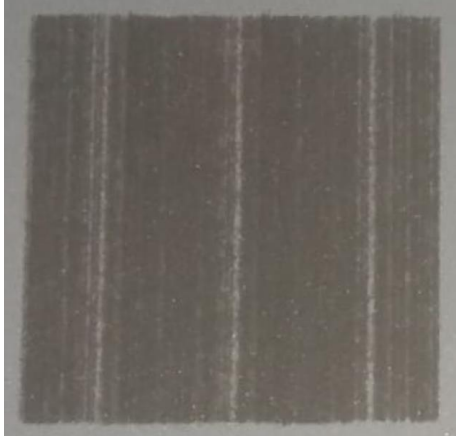
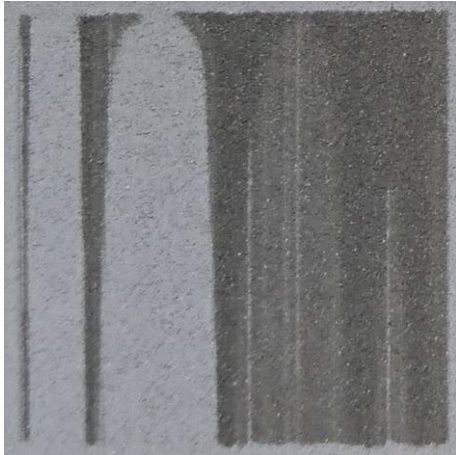


Abb. 3-21: Exemplarischer Druckauftrag am Anfang des Herstellungsprozesses (links) sowie die Analyse des Absorptionseffektes am Ende (rechts)

Hierbei wurde zunächst der bedruckte Querschnitt mit der Fläche von 1.600 mm<sup>2</sup> bestimmt und daraufhin das Bildmaterial kalibriert. Anschließend wurde die ausgeblutete Fläche ermittelt sowie die durchschnittliche Absorptionstiefe berechnet. Bei einer Flächenvergrößerung von über 10 % resp. einer durchschnittlichen Absorptionstiefe von ca. 0,98 mm wurde der gesättigte Druckauftrag nicht mehr mit „1“ bewertet, sondern erhielt den Wert „2“. Da diese Abwertung bzw. die Vergrößerung der durchschnittlichen Absorptionstiefe einen Einfluss auf die gewünschte Detailtreue des 3D-gedruckten Exponates nimmt, findet sich diese Abstufung ebenfalls in der Analysierung der geometrischen Optimierbarkeit wieder. Die Auswertung der durchschnittlichen Absorptionstiefe eines jeweiligen Compounds bei entsprechendem Feuchtigkeitseintrag bzw. w/z-Wert wird im Ergebnisteil der jeweiligen Versuchsserie dargestellt.


Tab. 3-4: Bewertungsschema des Feuchtigkeitsoauftrags



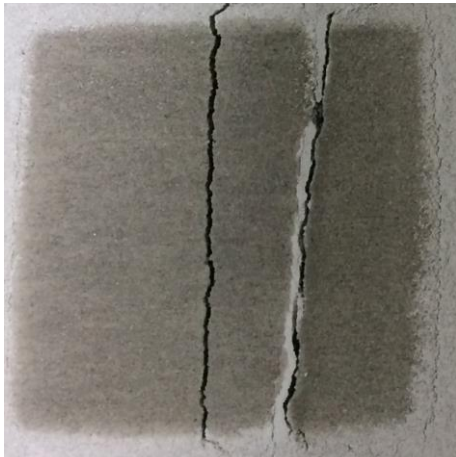
Bewertung	Beschreibung	Exemplarische Aufnahme
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Optimaler Druck- bzw. Feuchtigkeitsoauftrag</li> <li>- Gesättigtes Pulverbett</li> <li>- Exakte Kantenausführung</li> <li>- Durchschnittliche Absorptionstiefe &lt; 0,98 mm</li> </ul>	
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gesättigtes Pulverbett</li> <li>- Kein exakte Kantenausführung aufgrund von Ausbluten / Absorption angrenzender Partikel</li> <li>- Durchschnittliche Absorptionstiefe &gt; 0,98 mm</li> </ul>	

3	<ul style="list-style-type: none"><li>- Teilweise gesättigtes Pulverbett</li><li>- Feine Streifen sind im Druckbild zu erkennen</li><li>- Unregelmäßige Kantenausführung</li></ul>	
4	<ul style="list-style-type: none"><li>- Kein gesättigtes Pulverbett</li><li>- Deutliche Streifen im Druckbild erkennbar</li><li>- Unregelmäßige Kantenausführung</li><li>- Erste Anzeichen für den Ausfall des Druckkopfes</li></ul>	
5	<ul style="list-style-type: none"><li>- Druckauftrag ist unvollständig</li><li>- Eindeutiger Hinweis auf verschlissenen Druckkopf</li></ul>	

Der zweite AF-Parameter, der s. g. Schichtauftrag, steht in Verbindung zum erst genannten und komplettiert den Produktionsprozess eines Layers. Dieser beschreibt den schichtweisen Auftrag des Compounds und wurde wie der Feuchtigkeitsauftrag immer am Anfang und am Ende des Herstellungsprozesses in Form von Fotoaufnahmen festgehalten sowie stichprobenartig während des Druckvorgangs kontrolliert. Die Bewertung erfolgte aufgrund der übersichtlicheren Darstellbarkeit kongruent zum Feuchtigkeitsauftrag, wie in Tab. 3-5 illustriert, in fünf Abstufungen, wobei auch hier der Wert „1“ eine optimale Ausführung symbolisiert und der Wert „5“ das negative Pendant beschreibt. Bei der Bewertung wurden zwei Faktoren berücksichtigt. Zum einen betrifft dies die Feuchtigkeitsaufnahme des neuen Layers, um einen „frisch in frisch“ Auftrag zu gewährleisten und zum anderen wurde die Schicht im Gesamten auf Fehlstellen geprüft.

Tab. 3-5: Bewertungsschema des Schichtauftrags

Bewertung	Beschreibung	Exemplarische Aufnahme
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Optimaler Schichtauftrag</li> <li>- Aufgebrachte Partikel nehmen sofort die Feuchtigkeit des vorherigen Layers auf, um einen „frisch in frisch“ Auftrag zu gewährleisten</li> </ul>	
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schichtauftrag weist keine Striemen auf, jedoch nehmen die aufgebrachten Partikel die Feuchtigkeit nicht optimal auf, was sich im Herstellungsprozess partiell verbessert</li> </ul>	

3	<ul style="list-style-type: none"><li>- Schichtauftrag ist nicht ideal</li><li>- Aufgebrachte Partikel nehmen nicht direkt die Feuchtigkeit des vorherigen Layers auf, sodass der „frisch in frisch“ Auftrag nicht gänzlich gewährleistet ist</li></ul>	
4	<ul style="list-style-type: none"><li>- Schichtauftrag weist Striemen auf</li><li>- Aufgebrachte Partikel nehmen kaum bis gar nicht die Feuchtigkeit des vorherigen Layers auf, sodass der „frisch in frisch“ Auftrag nicht gewährleistet ist</li></ul>	
5	<ul style="list-style-type: none"><li>- Schichtauftrag ist unvollständig oder die Schicht reißt auf</li></ul>	



Beim letzten additiven Fertigungsparameter des 3DP-Verfahrens wurde nach Abschluss des automatisierten Druckprozesses die äußere Erscheinung der Probekörper kontrolliert und hinsichtlich der Optimierbarkeit bewertet. Dies beinhaltet Aspekte bzgl. der Funktionalität bei der Nachbearbeitung der Probekörper sowie die Geometrieerhaltung der definierten Probekörperabmessung, welche in Tab. 3-6 exemplarisch aufgeführt sind. Die Bewertung der jeweiligen Versuchsreihe ist im Ergebnisteil des zu untersuchenden Einflussparameters erläutert.

Tab. 3-6: Bewertungsschema der Optimierbarkeit

<b>Bewertung</b>	<b>Beschreibung</b>
1	<ul style="list-style-type: none"><li>- Ausreichende 3DP-Standfestigkeit zur Optimierung nach 30 min</li><li>- Exakte Kantenausführung</li><li>- Durchschnittliche Absorptionstiefe &lt; 0,98 mm</li></ul>
2	<ul style="list-style-type: none"><li>- Ausreichende 3DP-Standfestigkeit zur Optimierung nach 30 min</li><li>- Kein exakte Kantenausführung aufgrund von Ausbluten / Absorption angrenzender Partikel</li><li>- Durchschnittliche Absorptionstiefe &gt; 0,98 mm</li></ul>
3	<ul style="list-style-type: none"><li>- Anhaftende Partikel am gedruckten Probekörper sind bereits erhärtet und führen zu Problemen bei der Optimierung</li><li>- Beschädigungen am Probekörper</li><li>- Unregelmäßige Kantenausführung</li></ul>
4	<ul style="list-style-type: none"><li>- Unzureichende 3DP-Standfestigkeit nach 30 min</li><li>- Unregelmäßige Kantenausführung</li><li>- Größere Beschädigungen am Probekörper</li></ul>
5	<ul style="list-style-type: none"><li>- Unzureichende 3DP-Standfestigkeit nach 30 min</li><li>- Probekörper zerbrechen teilweise bei der Optimierung</li><li>- Probekörper zerfallen teilweise im Wasserbehälter</li></ul>

Des Weiteren wurde zu Beginn und zum Ende des Druckprozesses die Temperatur des Druckkopfes aufgenommen, um einen Verschleiß bzw. eine Überhitzung feststellen zu können. Dies zeichnet sich zum einen durch eine Druckkopftemperatur von ca. 80 °C aus und zum anderen durch die optische Analyse des Druckauftrags, der sich, wie bereits in Tab. 3-4 dargestellt, durch einen suboptimalen Streifen Auftrag

abzeichnet. Eine weitere Auswertung der Druckkopftemperaturen unterhalb des kritischen Bereichs brachte zum derzeitigen Stand der Forschung keine Korrelationen hinsichtlich der resultierenden Druckfestigkeit, sodass in den folgenden Versuchsserien dieser Parameter unberücksichtigt blieb.

#### 3.2.4.4 Festbetonuntersuchungen

Wesentlicher Bestandteil der Analysen hinsichtlich eines optimalen Compounds für das 3DP-Verfahren ist die Untersuchung zur Druckfestigkeit der additiv gefertigten Probekörper, die bei allen Versuchsreihen durchgeführt wurde. Des Weiteren wurden für die grundlegenden Materialkennwerte und mechanischen Eigenschaften des 3D-gedruckten Betons in Abschnitt 4.3 neben der Biegezug- und Druckfestigkeit der Elastizitätsmodul (Druckmodul) sowie die Porosität und Rohdichte aufgenommen.

Die Druckfestigkeitsuntersuchungen wurden, wie in Abb. 3-22 schematisch dargestellt, in Anlehnung an DIN EN 196-1 [129] primär mit den kubischen Probekörpern aus Abschnitt 3.2.3 durchgeführt. Des Weiteren wurden partiell die Bruchhälften im Anschluss an die Biegezugfestigkeitsprüfungen ebenfalls zur Druckbelastungsprüfung verwendet. Die Druckauflagefläche betrug jeweils 40 x 40 mm und die Belastungsrate lag zwischen  $(2.400 \pm 200)$  N/s. Die Druckfestigkeit  $\sigma_c$  ergibt sich aus der maximalen Belastung  $F$  dividiert durch die Stirnfläche  $A$  der Würfel bzw. durch die Auflagefläche der Druckplatten. Abweichungen der Auflagefläche infolge von Beschädigungen am Probekörper blieben unberücksichtigt und bieten daher aufgrund von Festigkeits-einbußen Rückschlüsse auf einen positiven wie auch negativen Compound.

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (3-4)$$

Dabei ist

$\sigma_c$	die Druckfestigkeit [MPa]
$F$	die maximale Belastung [N]
$A$	die Auflagefläche [mm <sup>2</sup> ]

Die Proben wurden zur Vergleichbarkeit in z-Richtung resp. orthogonal zum Schichtauftrag belastet (ausgenommen Versuchsserie GK°). Jede Probe bekam eine eindeutige Bezeichnung zugewiesen, beginnend mit der Abkürzung für die Versuchsserie, gefolgt von der Proben- bzw. Positionsnummer.

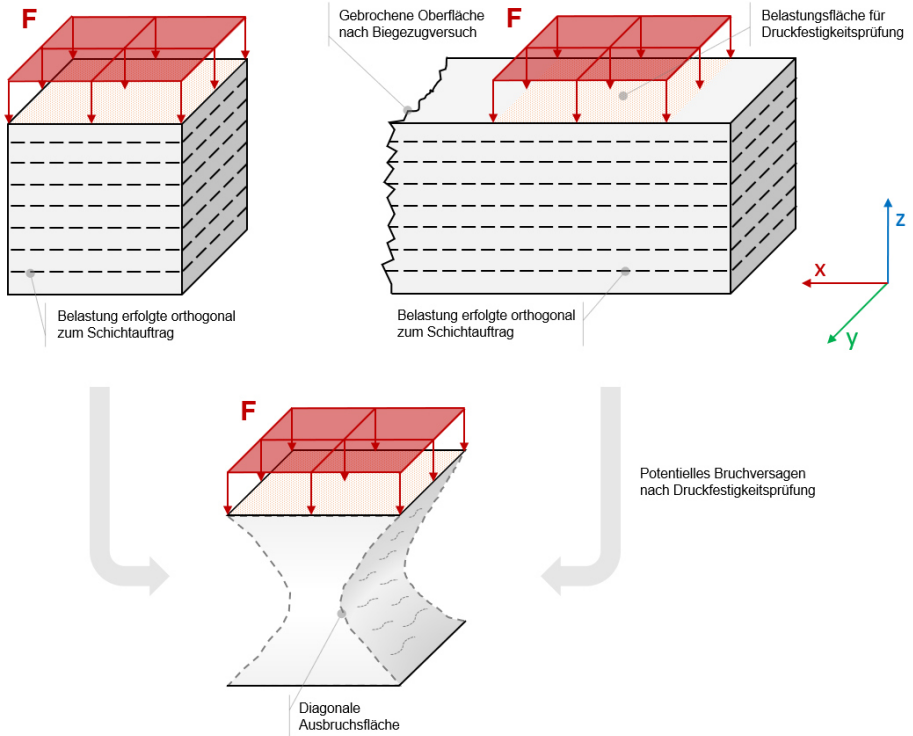


Abb. 3-22: Schematische Darstellung der Druckfestigkeitsprüfung inkl. exemplarischen Bruchversagens

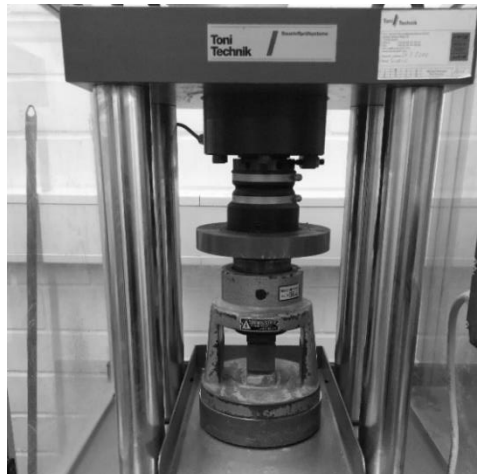


Abb. 3-23: Reale Umsetzung der Druckfestigkeitsprüfung

Für die Bestimmung der Biegezugfestigkeit wurden die Quaderformen mit den genormten Abmessungen 160 x 40 x 40 mm in Anlehnung an DIN EN 196-1 [129]

hergestellt. Die Belastungsrate betrug etwa  $(0,05 \pm 0,01)$  MPa/s. Die Biegezugfestigkeit  $\sigma_{ct,f}$  berechnet sich im 3-Punkt-Biegezugversuchsaufbau bei mittlerer Belastung aus dem Quotienten von maximaler Auflast  $F$  multipliziert mit dem 1,5-fachen Abstand zwischen den Auflagerrollen dividiert durch die Multiplikation aus Breite  $b$  und quadrierter Höhe  $h$ :

$$\sigma_{ct,f} = \frac{M}{I_y} \cdot x = \frac{F \cdot \frac{l}{4}}{\frac{b \cdot h^3}{12}} \cdot \frac{h}{2} = \frac{1,5 \cdot F \cdot l}{b \cdot h^2} \quad (3-5)$$

Dabei ist

- $\sigma_{ct,f}$  die Biegezugfestigkeit [MPa]
- $F$  die maximale Belastung [N]
- $l$  der Abstand zwischen den Auflagerrollen [mm]
- $b$  die Breite des Querschnittes [mm]
- $h$  die Höhe des Querschnittes [mm]

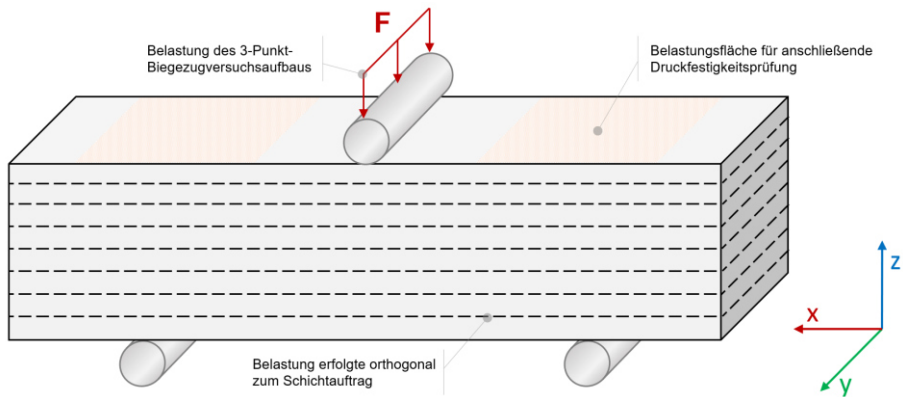


Abb. 3-24: Schematische Darstellung des 3-Punkt-Biegezugversuchsaufbaus

Der Elastizitätsmodul (E-Modul) wurde aus dem Spannungs-Dehnungs-Verlauf in Anlehnung an DIN EN 12390-13 [136] berechnet. Die Messung des E-Moduls wurde an prismatischen Probekörpern parallel zum Schichtauftrag ( $0^\circ$ ) mit identischen Abmessungen wie für die Biegezugfestigkeitsprüfung durchgeführt.

Die Versagenscharakteristika sowie die einzelnen Ergebnisse der geprüften Probekörper werden in den jeweiligen Abschnitten zu den differierenden Versuchsserien beschrieben. In Kapitel 4 folgt die Schlussfolgerung und Ursachenermittlung, um abschließend ein Herstellungskonzept in Bezug auf die ermittelten Ergebnisse zu definieren.

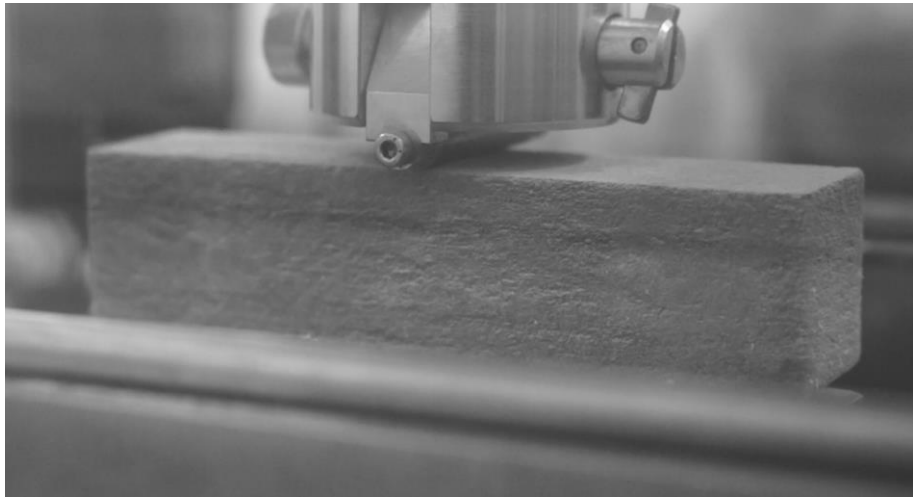


Abb. 3-25: Reale Umsetzung der Biegezugfestigkeitsprüfung

### **3.3 Einfluss des Zementanteils**

#### **3.3.1 Allgemeines**

Die ersten beiden Versuchsserien behandeln den Einfluss des Zementanteils im Compound. Wesentlicher Bestandteil der Untersuchungen war, die Auswirkungen der Trockenmörtelmischung auf die Druckfestigkeit der 3D-gedruckten Betonstrukturen zu prüfen sowie hinsichtlich der AF-Parameter zu analysieren. Begleitend zu den Festbetonuntersuchungen sowie den Analysen während des Druckprozesses wurden im Vorhinein die Pulver- und Flüssigkeitsanalyse aus Abschnitt 3.2.4.1 und 3.2.4.2 durchgeführt.

Der maßgebende Unterschied zwischen den beiden Versuchsserien Z und Z+ besteht in der Trockenmörtelzusammensetzung. Die Versuchsserienbezeichnung verdeutlicht durch das Plus hinter dem zu untersuchenden Einflussparameter (Z+), dass in dieser Versuchsserie alle verwendeten Bestandteile dieser Arbeit im Compound verwendet wurden. Für Versuchsserie Z bedeutet dies, dass die Zusammensetzungen der Versuchsreihen kein Klinkerfeinmehl und keinen Silicastaub beinhalten. Eine detaillierte Übersicht wird im nachfolgenden Versuchsprogramm dargestellt.

#### **3.3.2 Versuchsprogramm**

Das Versuchsprogramm zum Einfluss des Zementanteils besteht, wie in der Übersicht der Herstellungssystematik und Analyse – Teil 1 (siehe Abb. 3-1) aufgeführt, aus zwei verschiedenen Versuchsserien. Die Versuchsserien unterteilen sich hinsichtlich des zu analysierenden Parameters in fünf Abstufungen. Jede einzelne Abstufung bzw. Versuchsreihe besteht aus sechs Versuchskörpern. Diese sechs Versuchskörper

variieren noch in der Lagerung, sodass entsprechend drei Würfel einer identischen Nachbehandlungsmaßnahme unterzogen wurden.

Bei Versuchsserie Z wurde ein Trockenmörtelgemisch aus Zement zzgl. Gesteinskörnung verwendet und mit einer Bindemittelflüssigkeit bestehend aus destilliertem Wasser, 1,2-Propandiol sowie einem Tensid Schicht für Schicht benetzt. Der aufgebrauchte Feuchtigkeitseintrag entsprach bei allen Versuchsreihen der Versuchsserie Z jeweils einem w/z-Wert von 0,49.

Aus herstellungstechnischen Gründen sowie zur besseren Reproduzierbarkeit der Trockenmörtelzusammensetzung beziehen sich die nachfolgenden Prozentangaben auf die Masse.

Der Compound der Versuchsreihe Z1 bestand zu 20 M.-% aus dem Zement CEM I 52,5 R und wurde mit 80 M.-% Gesteinskörnung vervollständigt. Die Gesteinskörnung setzte sich mit 55 M.-% aus dem aufgeführten Quarzsand und zu 25 M.-% aus dem verwendeten Quarzmehl zusammen. Für Versuchsreihe Z2 wurde der Zementanteil um 5 M.-% erhöht sowie im Gegenzug der Gesteinskörnungsanteil zu gleichen Teilen (je 2,5 M.-%) verringert. Diese Vorgehensweise wurde antiproportional bei den weiteren Versuchsreihen fortgeführt, sodass die Zusammensetzung des Trockenmörtels von der letzten Versuchsreihe Z5 40 M.-% Zement, 45 M.-% Quarzsand und 15 M.-% Quarzmehl beinhaltete.

In Versuchsserie Z+ wurde der Compound um die Ausgangsstoffe Klinkerfeinmehl sowie Silicastaub ergänzt. Ziel war es, die Probekörper hinsichtlich der AF-Parameter zu optimieren und zugleich die Festigkeit des 3D-gedruckten Betons zu steigern. Für Serie Z+ wurde die identische Bindemittelflüssigkeit bestehend aus destilliertem Wasser, 1,2-Propandiol und dem Tensid verwendet. Der w/z-Wert lag bei Versuchsserie Z+ im Vergleich zur Serie Z mit 0,51 geringfügig höher. Ein konstanter w/z-Wert für alle Versuchsserien konnte aufgrund limitierter Maschineneigenschaften und Druckkopfmengen nicht realisiert werden, sodass der Ansatz eines einheitlichen w/z-Wertes innerhalb jeder Versuchsserie verfolgt wurde.

Zur Ermittlung der Bindemittelflüssigkeitsmenge je Probekörper war die Bestimmung der Schüttdichte aus der Pulveranalyse der Versuchsreihen essentiell. Da im Herstellungsprozess der Compound nicht verdichtet wird und die Partikel über den Walzenauftrag praktisch lose ineinander fallen, dient die Schüttdichte zur Quantifizierung der Zement- bzw. Klinkermasse im definierten Probekörper. Die Berechnung erfolgte auf Grundlage von Gl. (3-3) aus der Flüssigkeitsanalyse und wurde zur erforderlichen Bindemittelflüssigkeitsmenge umgestellt:

$$m_L = \frac{w}{z} \cdot \frac{m_Z + m_{KI}}{\rho_W} = \frac{w}{z} \cdot \frac{m_C \cdot (\rho_Z + \rho_{KI})}{\rho_W} = \frac{w}{z} \cdot \frac{V_P \cdot \rho_C \cdot (\rho_Z + \rho_{KI})}{\rho_W} \quad (3-6)$$

Dabei ist

$\frac{w}{z}$	der Wasser-Zement-Wert
$m_W$	die Masse des Wassers [g]
$m_Z$	die Masse des Zements [g]
$m_{KI}$	die Masse des Klinkerfeinmehls [g]
$m_L$	die Masse der Bindemittelflüssigkeit [g]
$m_C$	die Masse des Compounds [g]
$p_W$	die prozentuale Menge des Wassers [%]
$p_Z$	die prozentuale Menge des Zements [%]
$p_{KI}$	die prozentuale Menge des Klinkerfeinmehls [%]
$V_P$	das Volumen des Probekörpers [cm <sup>3</sup> ]
$\rho_C$	die Schüttdichte des verwendeten Compounds [g/cm <sup>3</sup> ]

Die Zusammensetzung des Compounds ergibt sich für Versuchsserie Z+ nach dem gleichen Verfahren wie in Serie Z. Das Trockenmörtelgemisch der Versuchsreihe Z+1 setzt sich mit 20 M.-% Zement, 7,5 M.-% Klinkerfeinmehl, 7,5 M.-% Silicastaub und 65 M.-% Gesteinskörnung zusammen. Der Gesteinskörnungsanteil besteht zu 17,5 M.-% aus Quarzmehl und 47,5 M.-% aus Quarzsand. Bei Erhöhung des Zementanteils je Versuchsreihe um 5 M.-% wurden die Anteile der weiteren Ausgangsstoffe anteilig verringert. Eine detaillierte Übersicht der beschriebenen Versuchsserien ist in Abb. 3-26 visualisiert.

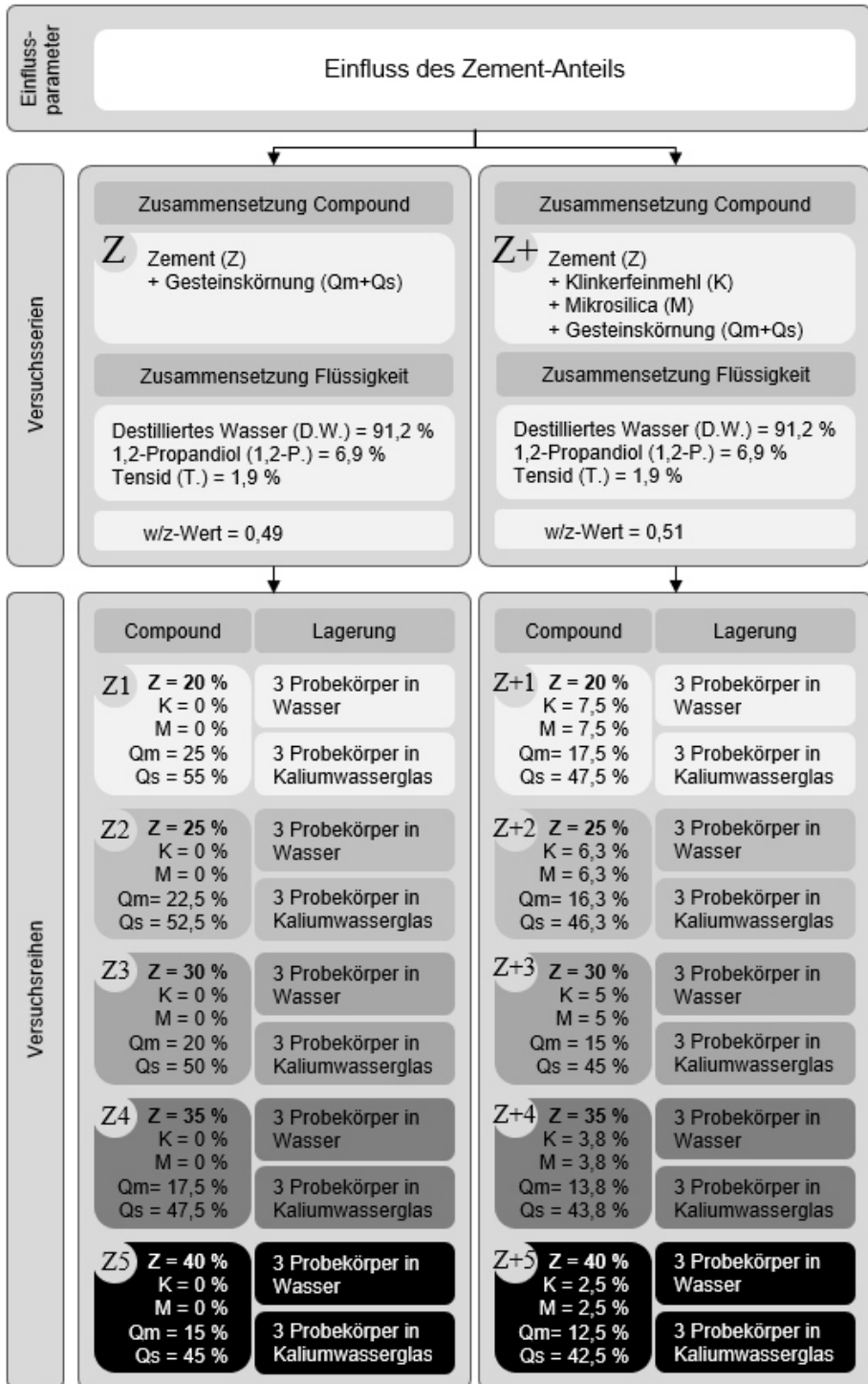


Abb. 3-26: Übersicht der Versuchsserien Z und Z+



### 3.3.1 Versuchsergebnisse und Auswertung

#### 3.3.1.1 Pulveranalyse

Die Auflistung der Versuchsergebnisse erfolgt nach der definierten Reihenfolge aus Abb. 3-3 beginnend mit der Pulveranalyse. Die Auswertungen der Partikelgrößenverteilungen in Abb. 3-27 und Abb. 3-28 zeigen, dass mit gesteigertem Zementanteil erwartungsgemäß der Feinheitsgrad des Compounds zunimmt. Bei Versuchsserie Z+ liegen die Verteilungen näher beieinander, da sich im Gegensatz zur Serie Z die Zunahme des Zementanteils und die gleichzeitige Abnahme der weiteren Bestandteile anteilig nicht nur auf die gröbere Gesteinskörnung bezieht, sondern zusätzlich ein Austausch mit den feinen Bestandteilen wie dem Klinkerfeinmehl und Silicastaub stattfindet. Durch die Zugabe der zusätzlichen Bindemittelbestandteile weisen die Trockenmörtelzusammensetzungen der Versuchsserie Z+ im Verhältnis zur Serie Z einen höheren Gehalt an feineren Partikeln auf, die im Folgenden einen signifikanten Einfluss auf weitere Parameter des Herstellungsprozesses einnehmen.

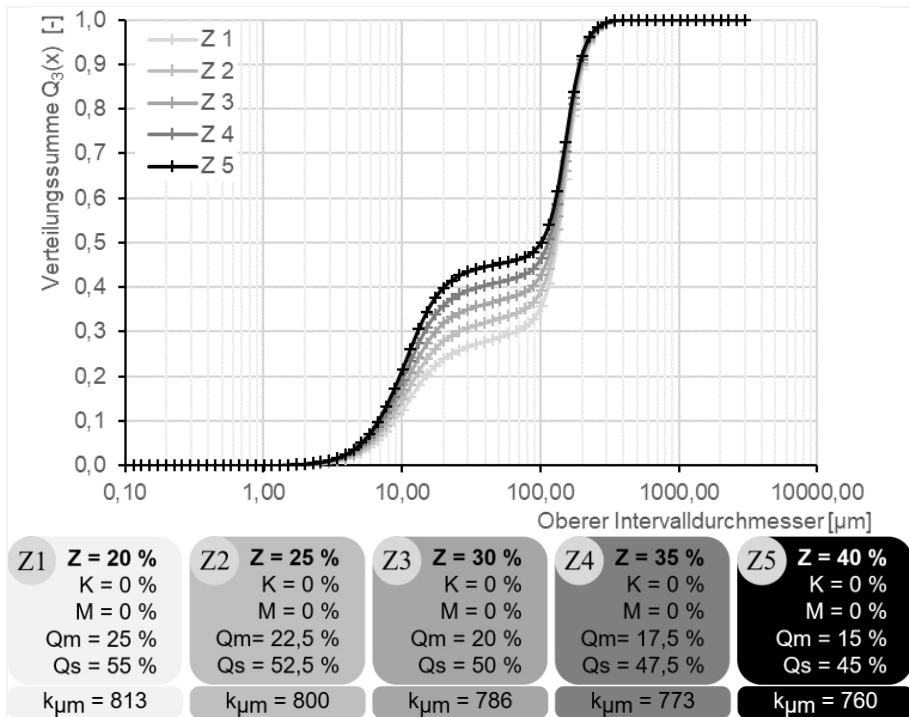


Abb. 3-27: Partikelgrößenverteilung der Versuchsserie Z

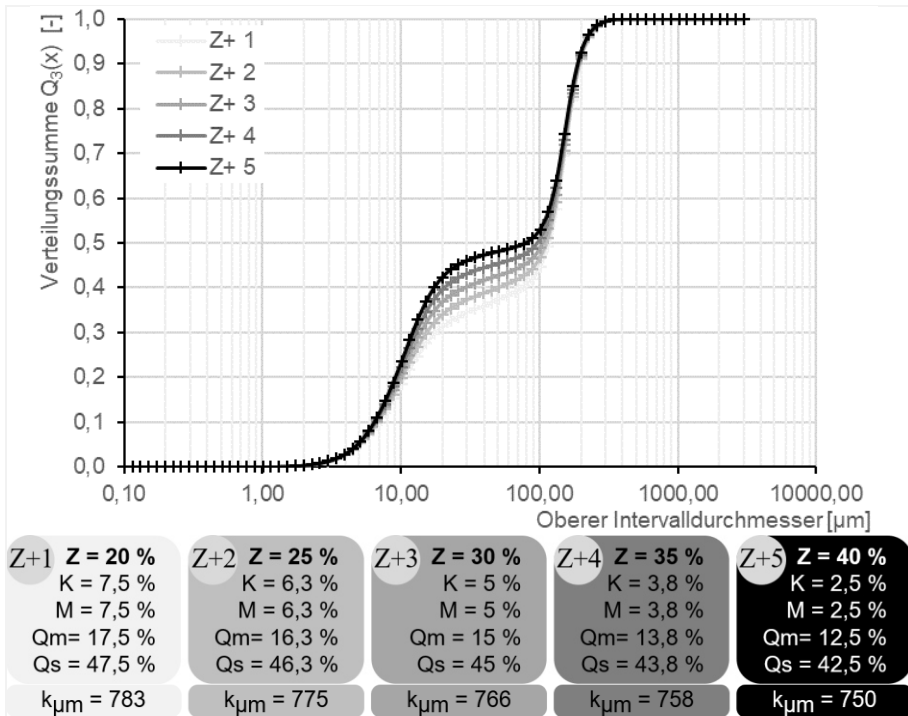


Abb. 3-28: Partikelgrößenverteilung der Versuchsserie Z+

Der erste signifikante Einfluss eines Compounds mit einem höheren Bindemittelanteil bezieht sich primär auf die Fließfähigkeit der Trockenmörtelzusammensetzung. Diese weist bei einer insgesamt feineren Zusammensetzung ein kohäsiveres Fließverhalten auf und kann sich demnach maßgeblich auf den Schichtauftrag während des Herstellungsprozesses auswirken. Die Analyse des Schichtauftrages wird hierzu in Abschnitt 3.3.1.3 zum Thema der AF-Parameter erfolgen. Die signifikanten Unterschiede zeigen sich in der reduzierten Gegenüberstellung der beiden Versuchsserien in Abb. 3-29 im Hinblick auf die Fließfähigkeit der Trockenmörtelzusammensetzungen mit dem höchsten und niedrigsten Zementanteil. Der Unterschied der Fließfähigkeit zwischen Versuchsreihe Z1 und Z5 fällt im Gegensatz zur Differenz der Versuchsreihen Z+1 und Z+5 geringer aus. Dies spiegelt ebenfalls das Verhältnis bzw. die Spannweite der Partikelgrößenverteilungen innerhalb der Versuchsserien wider. Dass die Fließfähigkeit der Versuchsreihe Z5 und Z+1 sehr nah beieinander liegen, lässt sich auch durch den Feinheitsgrad ablesen. Die Versuchsreihe Z5 weist einen  $k_{\mu m}$ -Wert von 760,01 auf und ist damit geringfügig feiner und kohäsiver als die Versuchsreihe Z+1 mit einem  $k_{\mu m}$ -Wert von 783,87.

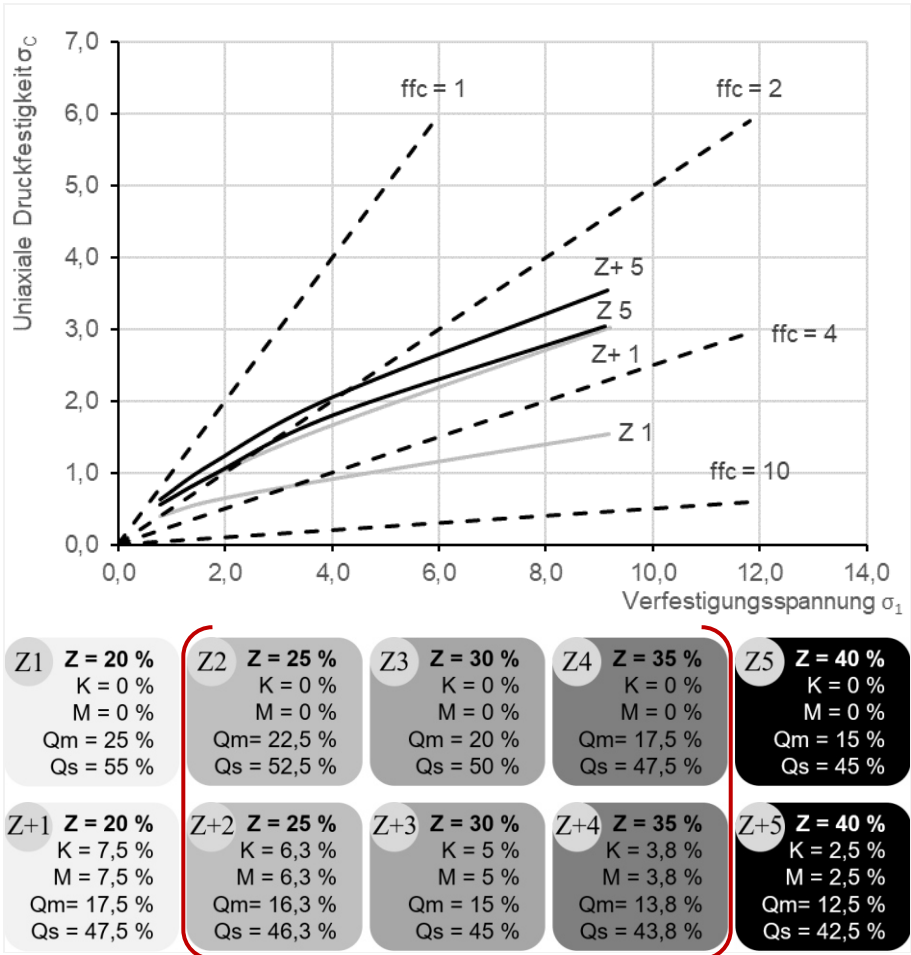


Abb. 3-29: Analyse der Fließfähigkeit der Versuchsserien Z und Z+

Der nächste signifikante Einfluss, der durch einen höheren Gehalt an feinen Bestandteilen im Compound entstehen kann, ist die Reduzierung der Schüttdichte. Dass sich dies jedoch nicht pauschalisieren lässt, zeigen die Ergebnisse aus Abb. 3-30 in Gegenüberstellung zur Auswertung in Abb. 3-31. Die Analyse der Schüttdichte aus Versuchsserie Z+ zeigt ein konträres Verhalten zur Serie Z, da hier die Schüttdichte durch den Silicastaubanteil determiniert wird. Aufgrund der geringeren Dichte des Silicastaubs mit 2,20 g/cm<sup>3</sup> sowie einer wesentlich kleineren Schüttdichte von 0,29 g/cm<sup>3</sup> weisen die Trockenmörtelzusammensetzungen trotz des höheren Feinheitsgrades eine höhere Schüttdichte auf. Kongruent verhalten sich hingegen die Auswertungen zur Stampfdichte und zum Hausner-Faktor. In beiden Versuchsserien steigen die Kennwerte, was den Einfluss der besseren Verdichtbarkeit des Zements aus den Vorversuchen zur Pulveranalyse in Abschnitt 3.2.4.1 bestätigt.

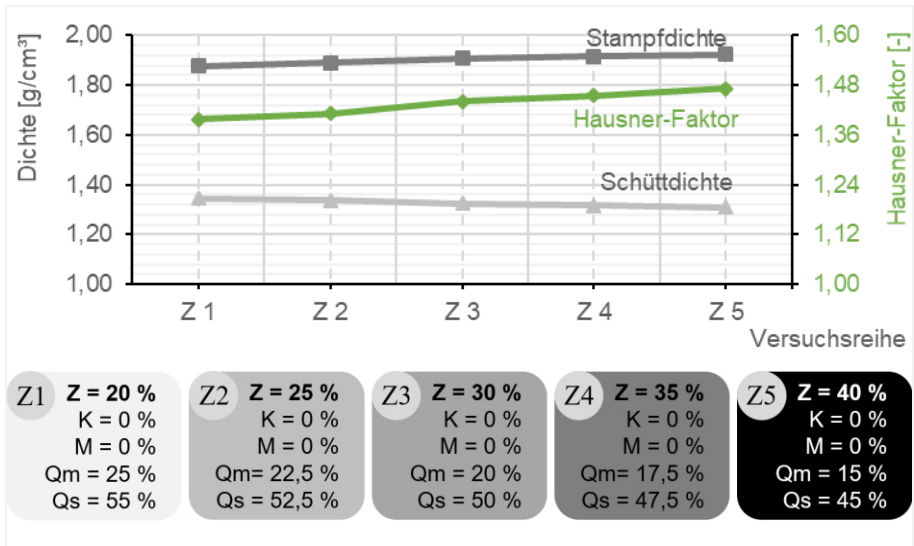


Abb. 3-30: Auswertung der Schütt- und Stampfdichte sowie des Hausner-Faktors von Versuchsserie Z

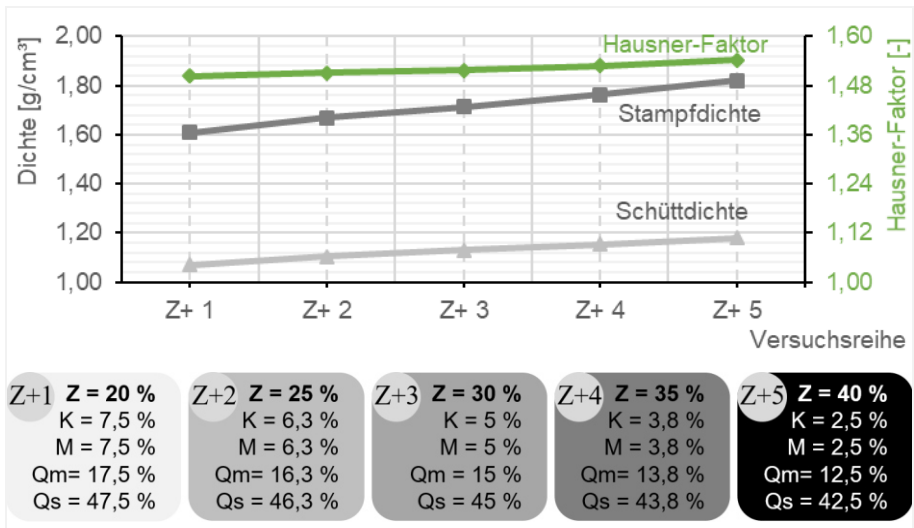


Abb. 3-31: Auswertung der Schütt- und Stampfdichte sowie des Hausner-Faktors von Versuchsserie Z+

### 3.3.1.2 Flüssigkeitsanalyse

Mit der Flüssigkeitsanalyse folgt ein erwartungsgemäß signifikanter Parameter in Bezug auf die Auflösung des gedruckten Querschnittes bzw. auf die Minimierung der

durchschnittlichen Absorptionstiefe, die systematisch mit der Bewertung zum Druckauftrag korreliert. Anhand der Untersuchungen in Anlehnung an den Punkte-Versuch zeigt sich bei beiden Versuchsserien, dass die Partikelgrößenverteilung resp. der Feinheitegrad des Compounds sowie die Kornform der unterschiedlichen Bestandteile einen essentiellen Einfluss auf den Wasseranspruch des jeweiligen Compounds einnimmt. Aufgrund der verringerten interpartikulären Haftkräfte, die sich bereits beim Fließverhalten der grobkörnigeren Zusammensetzung von Versuchsreihe Z1 abzeichnete, binden die Trockenmörtelmischungen mit einer höheren Körnungsziffer weniger Feuchtigkeit, sodass potenziell ein geringerer Feuchtigkeitseintrag notwendig ist, um den Compound vollständig zu sättigen. Bspw. kann für den Zusammenhang zwischen  $k_{\mu m}$ -Wert und Feuchtigkeitanspruch anhand der statistischen Auswertung der Versuchsserien Z und Z+ mithilfe des Korrelationskoeffizienten nach Pearson ein r-Wert von unter -0,9 festgestellt werden. Dieser negative Korrelationskoeffizient bestätigt, dass der Feuchtigkeitanspruch mit steigendem  $k_{\mu m}$ -Wert abnimmt und umgekehrt.

Zur Bestimmung des Wasseranspruchs in Anlehnung an den Punkte-Versuch wurde die Schüttdichte zur Berechnung berücksichtigt und anschließend auf das Volumen des zu druckenden Probekörpers reduziert. Folglich benötigt der Compound der Versuchsreihe Z1 bis zum Sättigungspunkt einen Feuchtigkeitseintrag von 15,62 ml. Da jedoch innerhalb der Versuchsserien der w/z-Wert – außer bei der Versuchsserie zum Einfluss des w/z-Wertes – konstant bleiben sollte, wurde beim Herstellungsprozess der kubischen Probekörper von Versuchsreihe Z1 eine Bindemittelflüssigkeitsmenge von insgesamt 9,25 ml aufgedruckt und für die letzten Probekörper dieser Serie ergab sich eine einzubringende Feuchtigkeitmenge von 18 ml. Die Berechnung der erforderlichen Bindemittelflüssigkeitsmenge für die weiteren Versuchsreihen ermittelt sich aus der bereits aufgeführten Gl. (3-3).

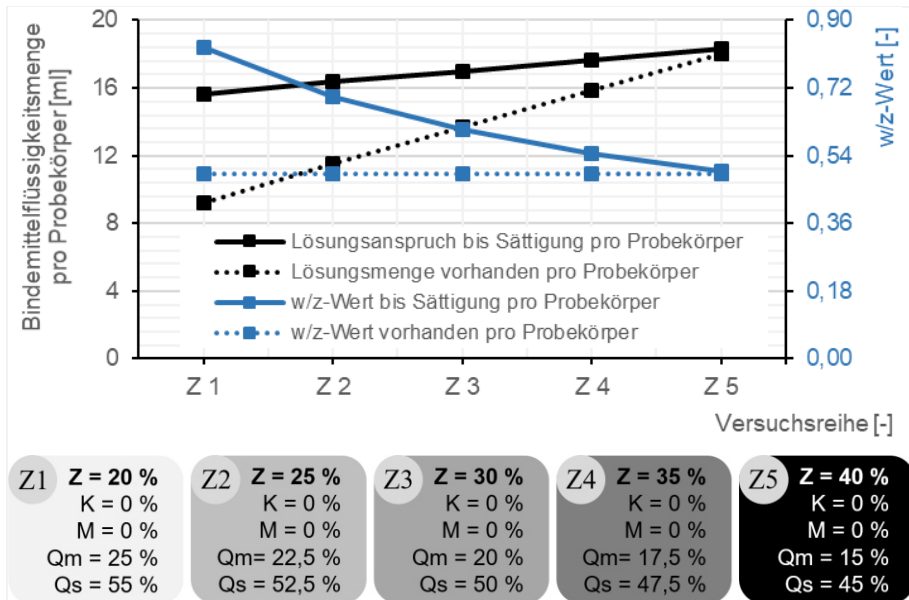


Abb. 3-32: Auswertung der Flüssigkeitsanalyse von Versuchsserie Z

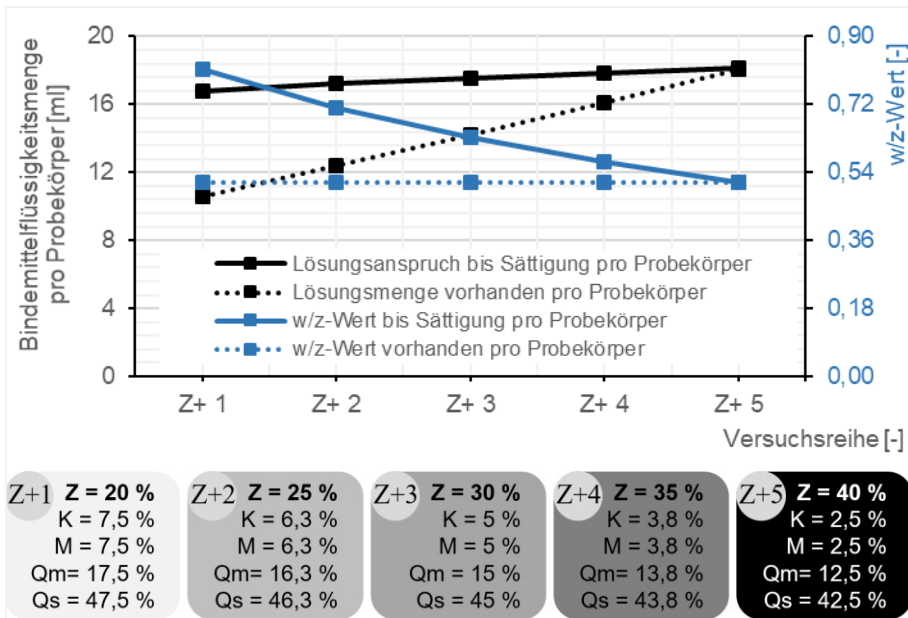


Abb. 3-33: Auswertung der Flüssigkeitsanalyse von Versuchsreihe Z+

Wie in Abb. 3-32 visualisiert, steigt der Bindemittelflüssigkeitsanspruch bei Sättigung mit der prozentualen Zunahme des Zementanteils in der Trockenmörtelzusammensetzung. Im Gegensatz dazu sinkt der w/z-Wert bei Sättigung, da der Bindemittelflüssigkeitsanspruch von Versuchsreihe Z1 zu Versuchsreihe Z5 prozentual wesentlich geringer ausfällt wie die Zunahme der Zementmenge im Probekörper. Für Versuchsreihe Z+ ist dies ebenfalls zu beobachten (siehe Abb. 3-33) und lässt sich wie folgt exemplarisch quantifizieren:

$$\left(\frac{w}{z}\right)_{Z+1} = \frac{m_L \cdot p_W}{V_P \cdot \rho_C \cdot (p_Z + p_{Kl})} = \frac{m_W}{m_Z + m_{Kl}} \overset{\pm\%}{\leftrightarrow} \frac{m_W}{m_Z + m_{Kl}} = \frac{m_L \cdot p_W}{V_P \cdot \rho_C \cdot (p_Z + p_{Kl})} = \left(\frac{w}{z}\right)_{Z+5} \quad (3-7)$$

$$0,81 = \frac{16,77 \cdot 0,912}{64 \cdot 1,069 \cdot (0,20 + 0,075)} = \frac{15,29}{18,81} \overset{+8,17\%}{\leftrightarrow} \frac{16,54}{32,09} = \frac{18,14 \cdot 0,912}{64 \cdot 1,180 \cdot (0,40 + 0,025)} = 0,52$$

Dabei ist

- $\left(\frac{w}{z}\right)_V$  der Wasser-Zement-Wert inkl. Index zur Versuchsreihe
- $m_W$  die Masse des Wassers [g]
- $m_Z$  die Masse des Zements [g]
- $m_{Kl}$  die Masse des Klinkerfeinmehl [g]

$m_L$	die Masse der Bindemittelflüssigkeit [g]
$m_C$	die Masse des Compounds [g]
$p_W$	die prozentuale Menge des Wassers [%]
$p_Z$	die prozentuale Menge des Zements [%]
$p_{KI}$	die prozentuale Menge des Klinkerfeinmehls [%]
$V_P$	das Volumen des Probekörpers [cm <sup>3</sup> ]
$\rho_C$	die Schüttdichte des verwendeten Compounds [g/cm <sup>3</sup> ]

Anhand der exemplarischen Berechnung ist ersichtlich, dass die Gl. (3-7) mit der Schüttdichte der jeweiligen Trockenmörtelzusammensetzung einen weiteren Einflussfaktor auf die Zementmenge im Compound beinhaltet. Dieser Parameter nimmt im Vergleich zur prozentualen Zunahme des Zementanteils eine untergeordnete Rolle ein, was jedoch nicht für alle Versuchsserien pauschalisiert werden kann und somit je nach zu untersuchendem Einflussfaktor variiert.

Inwieweit sich die Zugabe der Feuchtigkeitsmenge auf den Druckauftrag und die abschließende geometrische Optimierung der Probekörper auswirkt, ist im Bereich der AF-Parameter analysiert.

### **3.3.1.3 AF-Parameter**

Die AF-Parameter dienen als selbst definiertes Bewertungstool, um die determinierten Einstellungsparameter hinsichtlich der Trockenmörtel- und Bindemittelflüssigkeitszusammensetzung, der Feuchtigkeitsmenge sowie der Druckereinstellungen im Nachgang an den Herstellungsprozess der Probekörper beurteilen zu können. Die Erkenntnisse aus den unterschiedlichen Parametern dienen folglich zur zukünftigen Bestimmung eines Herstellungskonzeptes, das einerseits die Optimierung der Druckfestigkeit verfolgt sowie andererseits auch die Realisierbarkeit der gewünschten Betonstruktur und den Produktionsaufwand berücksichtigen soll.

Mit dem ersten definierten Parameter wird der Druckauftrag klassifiziert. Dieser liegt bei beiden Versuchsserien im Bewertungsbereich von „1“ und „2“ und unterscheidet sich ausschließlich durch die größere Absorptionstiefe bzw. den sich ausweitenden Ausblutungsbereich. Da der Parameter, wie in Abschnitt 3.2.4.3 beschrieben, im Bewertungsbereich zwischen „1“ und „2“ in direkter Relation zur durchschnittlichen Absorptionstiefe steht, kann durch diesen Kennwert potentiell die Optimierbarkeit sowie die Detailgenauigkeit der 3D-gedruckten Exponate abgeleitet werden. Nach dem gewählten Bewertungskriterium bedeutet dies exemplarisch für die Versuchsserien Z und Z+, dass aufgrund des gesättigten Druckauftrags sowie einer durchschnittlichen Absorptionstiefe von über einem Millimeter die Detailgenauigkeit der 3D-gedruckten Probekörper aus den Versuchsreihen Z3 bis Z5 bzw. Z+4 und Z+5 abnimmt und die Optimierbarkeit verhältnismäßig schwieriger wird. Somit werden die Versuchsreihen hinsichtlich des Druckauftrags mit „2“ bewertet (siehe Abb. 3-34 und Abb. 3-35, schwarzer Balken = Bewertung Druckauftrag).

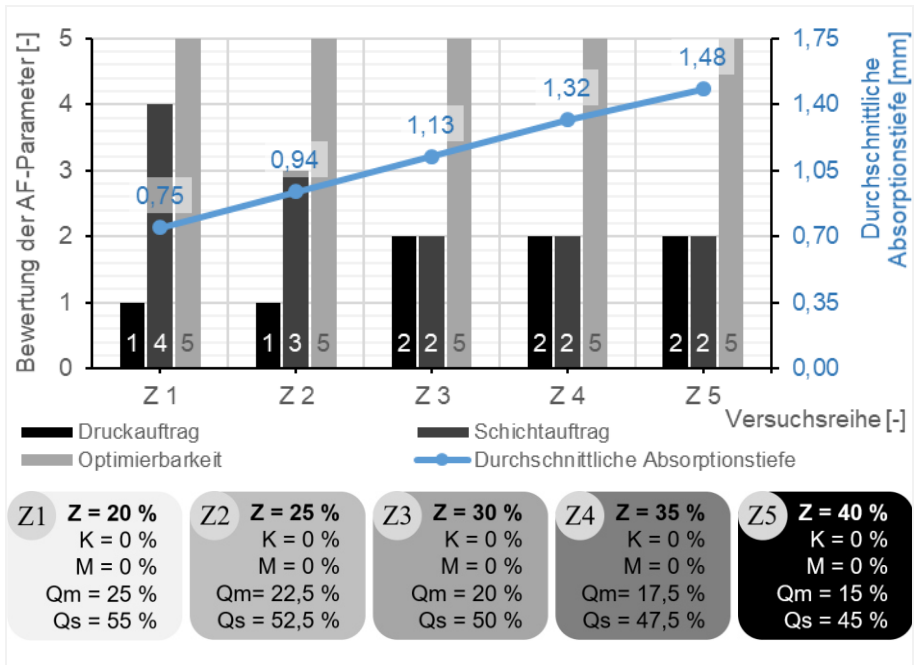


Abb. 3-34: Auswertung der AF-Parameter von Versuchsserie Z

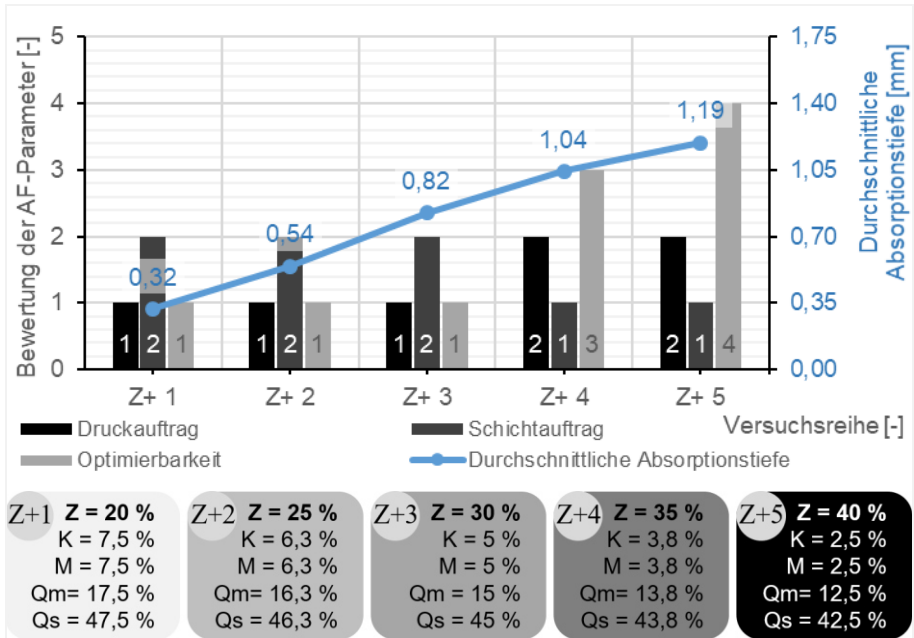


Abb. 3-35: Auswertung der AF-Parameter von Versuchsserie Z+



Dass sich die Optimierbarkeit nicht ausschließlich auf den Druckauftrag bezieht, lässt sich bei der Auswertung von Versuchsserie Z beobachten. Selbst bei einer geringen durchschnittlichen Absorptionstiefe wurde die Optimierbarkeit mit „5“ bewertet. Die konstant negative Optimierbarkeit dieser Versuchsserie kann vermutlich darauf zurückgeführt werden, dass sich der einzige Bindemittelbestandteil in dieser Versuchsserie (CEM I 52,5 R) trotz der relativ hohen Reaktivität 30 min nach Druckvorgangsende hinsichtlich des Hydratationsgrades noch in der Dormanten- bzw. Induktionsperiode befindet. Somit konnte sich vermutlich in der Start- bzw. Prä-Induktionsperiode, wie in Abschnitt 2.4 erläutert, bisher nur eine kolloidale Schicht aus den freigesetzten Ionen bilden, in der spontan die ersten Ettringitkeime heranwuchsen. Diese konnten zwar prinzipiell etwas Feuchtigkeit für einen geringeren Absorptionseffekt binden, für eine optimale Nachbehandlung entstand dadurch jedoch keine ausreichende Verzahnung des Gefüges. Auch mit einem höheren Zementgehalt konnte sich keine höhere 3DP-Standfestigkeit einstellen. Demnach zerfielen die Probekörper teilweise bei der geometrischen Optimierung oder bspw. bei der anschließenden Lagerung im Wasser. Der Zerfall der Probekörper im Wasser verdeutlicht, dass zum einen während dem Druckvorgang Luft zwischen den einzelnen Schichten eingeschlossen wird und zum anderen die übereinander liegenden Layer einen noch unzureichenden Verbund aufweisen. Die Problematik der Entlüftung ist beim konventionellen Fertigungsverfahren zwar eine andere, jedoch lässt sich das Verhalten der Luftbläschen beim Aufstieg übertragen. Bei der Selbstentlüftung im konventionellen Herstellungsprozess können die Luftblasen nicht nur an der Wandung der Gesteinskörner abgebremst werden, sondern auch an der Oberfläche anhaften [115]. Dies lässt sich ebenfalls beim AF-Verfahren nicht vermeiden. Zudem verhindern die rauen sowie bereits hydratisierten Bestandteile, dass die Luft ungehindert aus den 3D-gedruckten Exponaten entweichen kann. Sofern nun die Verbundfestigkeit zwischen den einzelnen Schichten zu gering ist, brechen die Betonstrukturen, wie in Abb. 3-36 illustriert, auf.

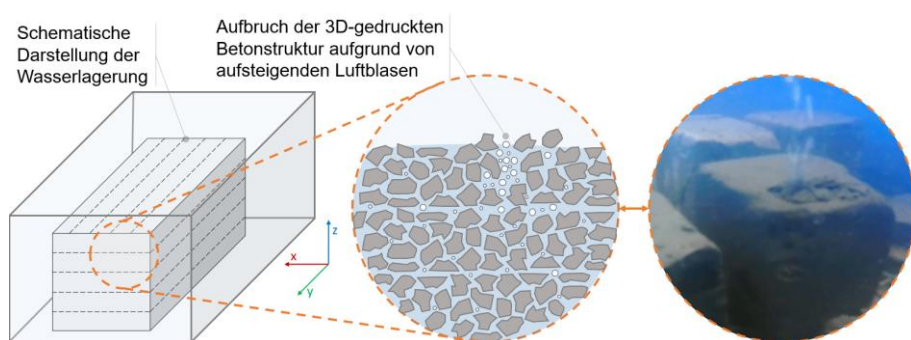


Abb. 3-36: Zerstörung der Betonstruktur aufgrund von aufsteigenden Luftblasen

Hinsichtlich des Schichtauftrages zeigen die Versuchsreihen beider Versuchsserien größtenteils ein gutes bis sehr gutes Schichtauftragsverhalten mit einer

entsprechenden Durchfeuchtung des Layers, um den s. g. „frisch in frisch“ Auftrag gewährleisten zu können. Einzig die ersten beiden Abstufungen der Serie Z weisen einen mittelmäßigen bis schlechten Schichtauftrag auf. Dies lässt sich potenziell mit dem leicht fließenden Compound begründen, da bei einem fließfähigeren Compound die interpartikulären Haftkräfte mitunter geringer ausfallen und somit Schäden bzw. Fehler im Schichtbild durch den Walzauftrag forciert werden.

Im Vergleich der durchschnittlichen Absorptionstiefe der beiden Versuchsserien ist anhand von Abb. 3-37 zu erkennen, dass mit einem sinkenden Verhältnis zwischen der Bindemittelflüssigkeitsmenge bei Sättigung und der eingebrachten Bindemittelflüssigkeitsmenge die durchschnittliche Absorptionstiefe steigt. Zu beachten ist bei dieser Auswertung, dass die ermittelte Trendlinie aus allen Versuchsserien dieser Arbeit resultiert. Die Versuchsreihen der Serie Z+ weisen in Gegenüberstellung zur Versuchsserie Z konstant geringere Abweichungen des definierten Querschnittes auf. Dies lässt sich primär mit dem höheren Reaktionsvermögen des Klinkerfeinmehls sowie dem zugesetzten Silicastaub begründen. Der Silicastaub reagiert zwar, wie in Abschnitt 2.3.3 beschrieben, erst nach drei oder sieben Tagen chemisch mit dem Zement, jedoch hat dieser Bestandteil nach Roberts [137] zusätzlich eine beschleunigende Wirkung auf den Hydratationsverlauf, wodurch die chemische Bindung sowie die daraus resultierende Verringerung der durchschnittlichen Absorptionstiefe verstärkt wird. Des Weiteren zeichnet sich mithilfe der beiden Versuchsserien möglicherweise noch ein physikalischer Einfluss ab. Wie in der Analyse zum Feuchtigkeitsanspruch sowie in der Auswertung von Puntke [135] beschrieben, nimmt die Korngröße und -form der Partikel einen Einfluss auf den Wasseranspruch und somit ebenfalls auf die Absorptionstiefe des bedruckten Layers. Wie deutlich sich diese physikalischen Einflussparameter auf die durchschnittliche Absorptionstiefe auswirken, zeigt sich in den Untersuchungen bzw. Versuchsserien zum Einfluss des Silicastaubs.

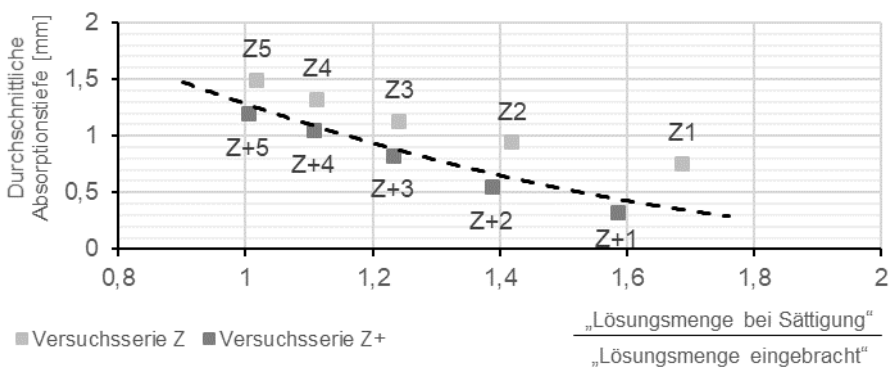


Abb. 3-37: Vergleich der Versuchsserien Z und Z+ hinsichtlich der Absorptionstiefe

### 3.3.1.4 Festbetonuntersuchungen

Wie u. a. in den Grundlagen zur Zementehärtung beschrieben, sind die wichtigsten Einflussgrößen zur Bildung einer stabilen Betonmatrix die Temperatur, der w/z-Wert, die Mahlfineinheit des Zements, die Kornverteilung und natürlich die Zusammensetzung des Zements resp. des Compounds. In Bezug auf die Ursachenfindung hinsichtlich der differierenden Druckfestigkeiten aus den Auswertungen in Abb. 3-38 und Abb. 3-39 lässt sich im Vergleich der beiden Versuchsserien festhalten, dass die Temperatur und der w/z-Wert vernachlässigt werden können, da zum einen die Temperatur aufgrund des gleichen additiven Fertigungsprozesses im selben Bereich lag und zum anderen der geringe Unterschied des w/z-Wertes von 0,02 nicht so stark ins Gewicht fallen kann. Des Weiteren kann die Hauptursache ebenfalls nicht an der Partikelgrößenverteilung oder einem anderen Kennwert der Pulveranalyse liegen, da bspw. die Versuchsreihen Z5 und Z+1 in jedem Parameter der Pulveranalyse vergleichbare Werte lieferten. Die maßgebliche Diskrepanz der beiden Versuchsreihen zeigte sich erst bei der Analyse der AF-Parameter und abschließend in den Ergebnissen der Druckfestigkeitsprüfung. Die Ursache der geringen Festigkeiten der Versuchsserie Z in Gegenüberstellung zur Serie Z+ liegen somit aufgrund der grundsätzlich mangelhaften Optimierbarkeit primär bei der Mahlfineinheit des Zements sowie der Trockenmörtelzusammensetzung.

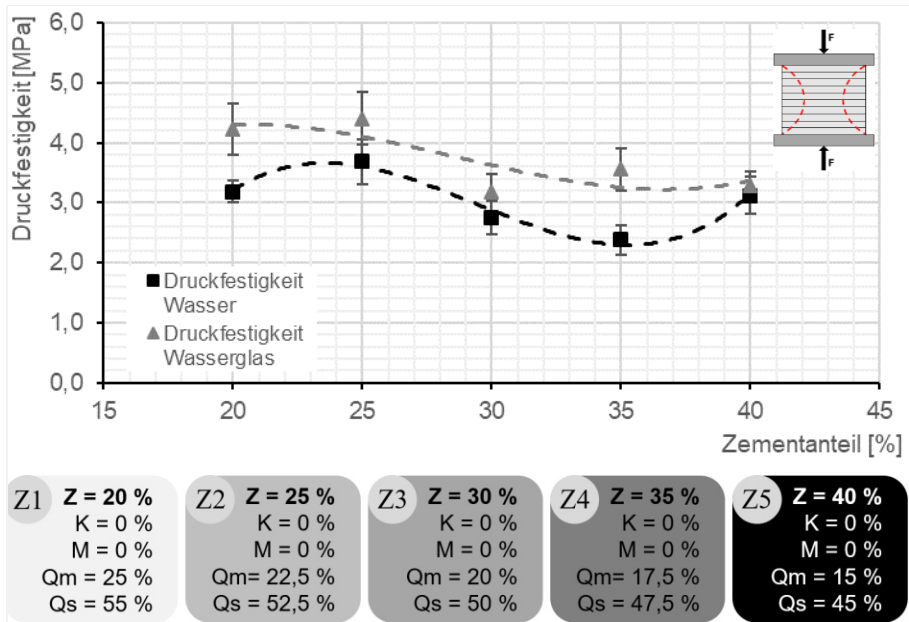


Abb. 3-38: Auswertung der Druckfestigkeit von Versuchsserie Z

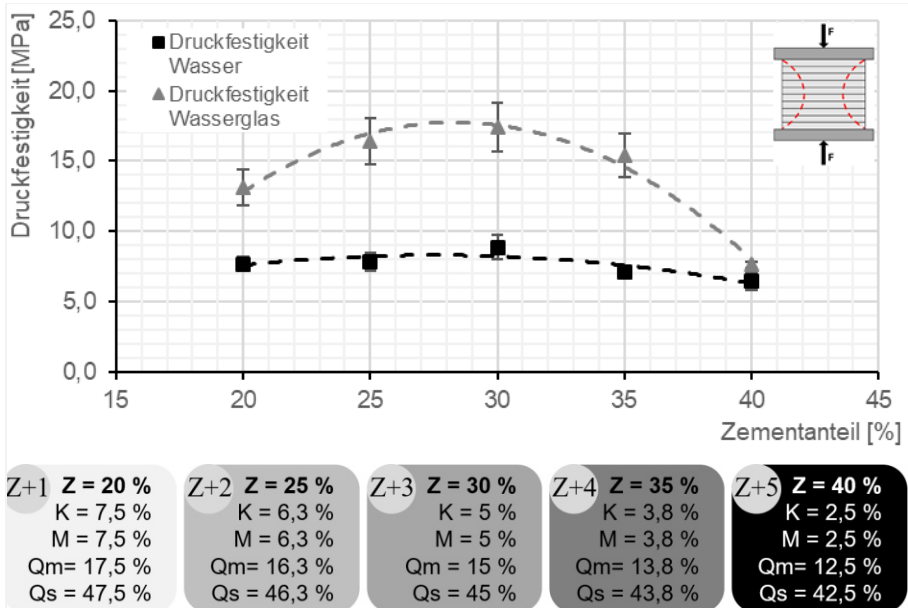


Abb. 3-39: Auswertung der Druckfestigkeit von Versuchsserie Z+

Der in Versuchsserie Z als einziges Bindemittel verwendete Zement – CEM I 52,5 R – weist zwar bereits eine hohe Mahlfineinheit und Reaktivität auf, jedoch zeigen die Ergebnisse, dass die Reaktionsgeschwindigkeit nicht ausreicht, um nach 30 min eine notwendige 3DP-Standfestigkeit zu gewährleisten. Aufgrund der deformierten Probekörper konnte keine eindeutige Tendenz der Druckfestigkeitsentwicklung in Bezug auf einen gesteigerten Zementanteil innerhalb der Versuchsserie Z ermittelt werden. Die Beschädigungen der kubischen Proben entstanden infolge einer suboptimalen geometrischen Optimierbarkeit sowie durch aufsteigende Luftblasen aus den Probekörpern bei der Wasserlagerung und einem anschließenden Aufbrechen der Oberfläche (siehe Abb. 3-36). Eine spätere Entnahme wäre theoretisch möglich, jedoch würde dies im Hinblick auf den größeren Ausblutungsgrad sowie einer anschließenden Erhärtung dieser Bereiche zu unförmigen Probekörpern führen.

Das noch feinere Klinkerfeinmehl in Versuchsserie Z+ hingegen hat bereits zum Zeitpunkt der Entnahme aufgrund des geringeren Sulfatanteils vermehrt C-A-H-Phasen gebildet, die den Porenraum überbrücken und die 3DP-Standfestigkeit steigern. Des Weiteren kann das Klinkerfeinmehl angesichts der schnelleren Reaktionsfähigkeit potenziell die Induktionsperiode überschritten haben, sodass die 20 bis 30 nm große Reaktionsschicht um das Alit-Korn bereits von ersten vereinzelt, kristallinen C-S-H-Phasen durchbrochen wurde und sich ein verstärkter Verbund zwischen den einzelnen Partikeln und Schichten entwickeln konnte. Eine detaillierte Betrachtung dieses Sachverhaltes ist Bestandteil der Untersuchungen zum Einfluss des Klinkerfeinmehlgehalts. Den Ergebnissen dieser Serie nach zu urteilen, ergab sich bei Versuchsreihe Z+3 ein optimales Mengenverhältnis der verwendeten Materialien, sodass unter Berücksichtigung einer optimalen Nachbehandlung die maximale

Festigkeit erzielt wurde. Die höhere 3DP-Standfestigkeit sowie die gesteigerte Druckfestigkeit nach 28 Tagen lassen sich ebenfalls auf die Zugabe des Silicastaubs zurückführen, da zum einen mit diesem puzzolanischen Zusatzstoff der Hydratationsprozess beschleunigt wird und zum anderen das Portlandit als chemisches Reaktionsprodukt aus der Hydratation vom Alit und Belit weitere festigkeitssteigernde C-S-H-Phasen mit dem Silicastaub bilden kann. Zudem beeinflussen größere Mengen an Silicastaub bzw. Puzzolan signifikant das Ca/Si-Verhältnis und damit die Stöchiometrie der C-S-H-Phasen, wodurch potenziell bei kalkärmeren C-S-H-Phasen eine gesteigerte Bindungskapazität entsteht und sich mit ausreichendem Wassergehalt ebenfalls größere nadelförmige Kristalle entwickeln, die den Porenraum überbrücken und somit eine dichtere Betonmatrix erzeugen [54, 138, 139].

Essentiell in diesem chemischen Reaktionsablauf ist der erwähnte, ausreichende Wassergehalt, da sich die Hydratationsprodukte nur in einem flüssigen Medium bilden. Wenn folglich während dem Hydratationsprozess für den Zement zu wenig Feuchtigkeit aufgrund von Wasserbindungen (siehe Abschnitt 2.4.7) vorhanden ist oder ein vorzeitiger Wasserverlust, bspw. infolge von Austrocknung, auftritt, so wirkt sich dies negativ auf die Festigkeitsentwicklung sowie die Dauerhaftigkeit des 3D-gedruckten oder konventionell hergestellten Betons aus. In Bezug auf die beiden Versuchsserien zum Einfluss des Zementgehaltes könnte sich demnach bei den Probekörpern mit einem geringeren Zementanteil ein zu niedriger Wassergehalt eingestellt haben. In diesen Versuchsreihen war das Verhältnis zwischen „Bindemittelflüssigkeitsmenge bei Sättigung“ und „Bindemittelflüssigkeitsmenge eingebracht“ vergleichsweise am größten. Dies würde bedeuten, dass mit einem höheren w/z-Wert bzw. einem höheren Feuchtigkeitseintrag jene Probekörper mit einem Zementgehalt von unter 40 % hinsichtlich der Druckfestigkeit nach 28 Tagen noch ein gewisses Steigerungspotential besitzen. In diesem Kontext ist dennoch im Hinblick auf die Versuchsserie Z zu berücksichtigen, dass die Probekörper bei Entnahme aus dem Bauraum sowie bei der anschließenden Nachbehandlung eine ausreichende 3DP-Standfestigkeit aufweisen müssen. Da der w/z-Wert auch beim konventionellen Fertigungsverfahren ein signifikanter Einflussfaktor für die Betondruckfestigkeit ist, wird dieser Faktor nochmal in Abschnitt 3.7 isoliert betrachtet.

Die Annahme, dass sich eine höhere Schüttdichte aufgrund der nicht vorhandenen Verdichtung während dem Herstellungsverfahren positiv auf die Porosität und somit auf die Druckfestigkeit des 3D-gedruckten Probekörpers auswirkt, kann anhand der beiden Serien nicht eindeutig beantwortet werden. Grundsätzlich steigt die Druckfestigkeit sowie die Schüttdichte von Versuchsreihe Z+1 bis Z+3, jedoch verringert sich auch das angesprochene Verhältnis von „Bindemittelflüssigkeitsmenge bei Sättigung“ zu „Bindemittelflüssigkeitsmenge eingebracht“, sodass der positive Effekt nicht einzig der höheren Schüttdichte zugesprochen werden kann. Des Weiteren kann wie bei der gesamten Serie Z auch bei den Versuchsreihen Z+4 und Z+5 in Bezug auf die Druckfestigkeit keine klare Tendenz entnommen werden, da die Proben im Anschluss an die Optimierung bzw. Nachbehandlung teilweise Beschädigungen aufwiesen. Diese Defizite beeinträchtigen somit eine eindeutige Auswertung.

Festhalten lässt sich nach Abschluss der Auswertungen zum Einfluss des gesteigerten Zementgehalts, dass zum einen die Probekörper mit einer Wasserglasnachbehandlung durchgehend höhere Druckfestigkeiten erzielen und dass zum anderen eine ausreichende 3DP-Standfestigkeit sowie eine unproblematische, geometrische Optimierung der Probekörper unerlässlich sind. Sofern die Probekörper beim Nachbehandlungsprozess keine ausreichende Festigkeit aufweisen, nehmen die weiteren Faktoren eine untergeordnete Rolle in Bezug auf die Festbetoneigenschaften ein.

### **3.4 Einfluss des Klinkerfeinmehlanteils**

#### **3.4.1 Allgemeines**

Der zweite Einflussparameter, der Klinkerfeinmehlanteil, korreliert hinsichtlich der chemisch vergleichbaren Zusammensetzung thematisch mit dem ersten (Zementanteil), jedoch weisen die Klinkerfeinmehlpartikel einen noch höheren Feinheitsgrad in Relation zum zuvor untersuchten Zement auf, wodurch das Reaktionspotenzial gesteigert wird. In welchem Maße sich die gesteigerte Reaktionsgeschwindigkeit auf die relevante und in Versuchsserie Z dürftige 3DP-Standfestigkeit auswirkt, ist u. a. Bestandteil dieses Versuchsprogramms. Weitere zu untersuchende Bereiche betreffen die Pulver- und Flüssigkeitsanalyse sowie die AF-Parameter während der Produktion mit dem 3D-Pulverdrucker und abschließend die Druckfestigkeit der 3D-gedruckten Betonstrukturen.

Der signifikante Unterschied zwischen Versuchsserie K und K+ liegt auch hier in der Trockenmörtelzusammensetzung. In Versuchsserie K wird die Zusammensetzung aus Serie Z mit dem Klinkerfeinmehlanteil erweitert, um im Vergleich den Einfluss des reaktiveren Bindemittels analysieren zu können. Für Versuchsserie K+ werden die gleichen Materialien wie bei Serie Z+ verwendet, jedoch wird hierbei nicht der CEM I 52,5 R Gehalt gesteigert, sondern in Gegenüberstellung der Klinkerfeinmehlanteil. Eine detaillierte Übersicht wird im nachfolgenden Versuchsprogramm dargestellt.

#### **3.4.2 Versuchsprogramm**

Die Versuchsserien K und K+ unterteilen sich hinsichtlich des zu analysierenden Parameters in fünf bis acht Abstufungen. Für Versuchsserie K wurde zur Berücksichtigung bzw. Analysierung minimaler Zugabemengen des Zusatzstoffes die Abstufung bis zu einem fünf prozentigen Masseanteil im Compound kleinteiliger gefahren. Versuchsserie K+ hingegen wurde in fünf Versuchsreihen unterteilt, um den Einfluss des Klinkerfeinmehls im Vergleich zur vorangegangenen Serie Z+ untersuchen zu können. Jede einzelne Abstufung bzw. Versuchsreihe besteht erneut aus sechs Versuchskörpern. Diese sechs Versuchskörper variieren noch in der Lagerung, sodass entsprechend drei kubische Proben einer identischen Nachbehandlungsmaßnahme unterzogen werden konnten.

Die Versuchsserie K besteht aus Zement, Klinkerfeinmehl und der Gesteinskörnung, die sich in Quarzmehl und Quarzsand aufteilt. Die Trockenmörtelzusammensetzung

wurde jeweils mit einer Bindemittelflüssigkeit aus destilliertem Wasser, 1,2-Propandiol sowie einem Tensid schichtweise besprüht. Der w/z-Wert von 0,45 wurde für alle Probekörper der Serie K beibehalten. Die Versuchsreihe K1 wurde im Vergleich zur Versuchsreihe Z5 mit einem Masseprozent Klinkerfeinmehl ergänzt. Um die Zugabe des additiven Bestandteils in der Trockenmörtelzusammensetzung auf alle anderen Materialien gleichermaßen zu verteilen, wurden diese einheitlich um ein Drittelmasseprozent reduziert. In den Abstufungen von K1 bis K5 wurde der Klinkerfeinmehlgehalt, wie in Abb. 3-40 aufgeführt, jeweils um ein Prozent erhöht, sodass die Versuchsreihe K5 letztlich zu 5 % aus Klinkerfeinmehl, 38,3 % aus CEM I 52,5 R sowie 56,6 % aus Gesteinskörnung bestand, die sich wiederum zu 13,3 % Quarzmehl und 43,3 % Quarzsand unterteilte. Die daran anschließenden Versuchsreihen K6 bis K8 wurden entsprechend der Analogie der Zugabemengen mit Klinkerfeinmehlanteilen von 10 %, 15 % und 20 % im Compound generiert.

Die Versuchsserie K+ entstand in der Herstellungssystematik nach Serie Z+, sodass die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Untersuchungen in die Bestimmung der Trockenmörtelzusammensetzung einfließen konnten. Demnach ergab sich in Anlehnung an die positiven Ergebnisse aus Versuchsserie Z+ und unter Berücksichtigung des zu untersuchenden Einflussparameters folgende Zusammensetzung bei Versuchsreihe K+1: 31,3 % CEM I 52,5 R, 0 % Klinkerfeinmehl, 6,3 % Silicastaub, 16,3 % Quarzmehl und 46,3 % Quarzsand.

Die Steigerung des Klinkerfeinmehlanteils wurde, wie erwähnt, mit fünf Masseprozent definiert, sodass der Zuwachs zwischen dem minimalen und maximalen Gehalt kongruent zu den weiteren Versuchsserien bei 20 % lag. Infolge der Erhöhung des zu untersuchenden Einflussparameters wurden wiederum die weiteren Bestandteile antiproportional reduziert. Der w/z-Wert lag bei Versuchsserie K+ bei 0,49 und wurde über die Feuchtigkeitsabgabe mittels Druckkopf reguliert. Zur Bestimmung des erforderlichen Bindemittelflüssigkeitseintrags wurde Gleichung (3-3) verwendet und die entsprechenden Einstellungen am 3D-Drucker vorgenommen. Ziel war es hinsichtlich der systematischen Reihenfolge der Versuchsserien gerade im Vergleich zwischen Serie K und Z die potenzielle Verbesserung der 3DP-Standfestigkeit zu untersuchen, um letztendlich eine problemlose Produktion bzw. Optimierbarkeit nach 30 min gewährleisten zu können. Zudem standen für beide Versuchsserien dieses Einflussparameters die realisierbare Druckfestigkeit nach 28 Tagen sowie die mögliche Modifikation des Schichtauftrags aufgrund der zu erwartenden feineren Partikelgrößenverteilung des Compounds bei großen Klinkerfeinmehlgehalten im Fokus.

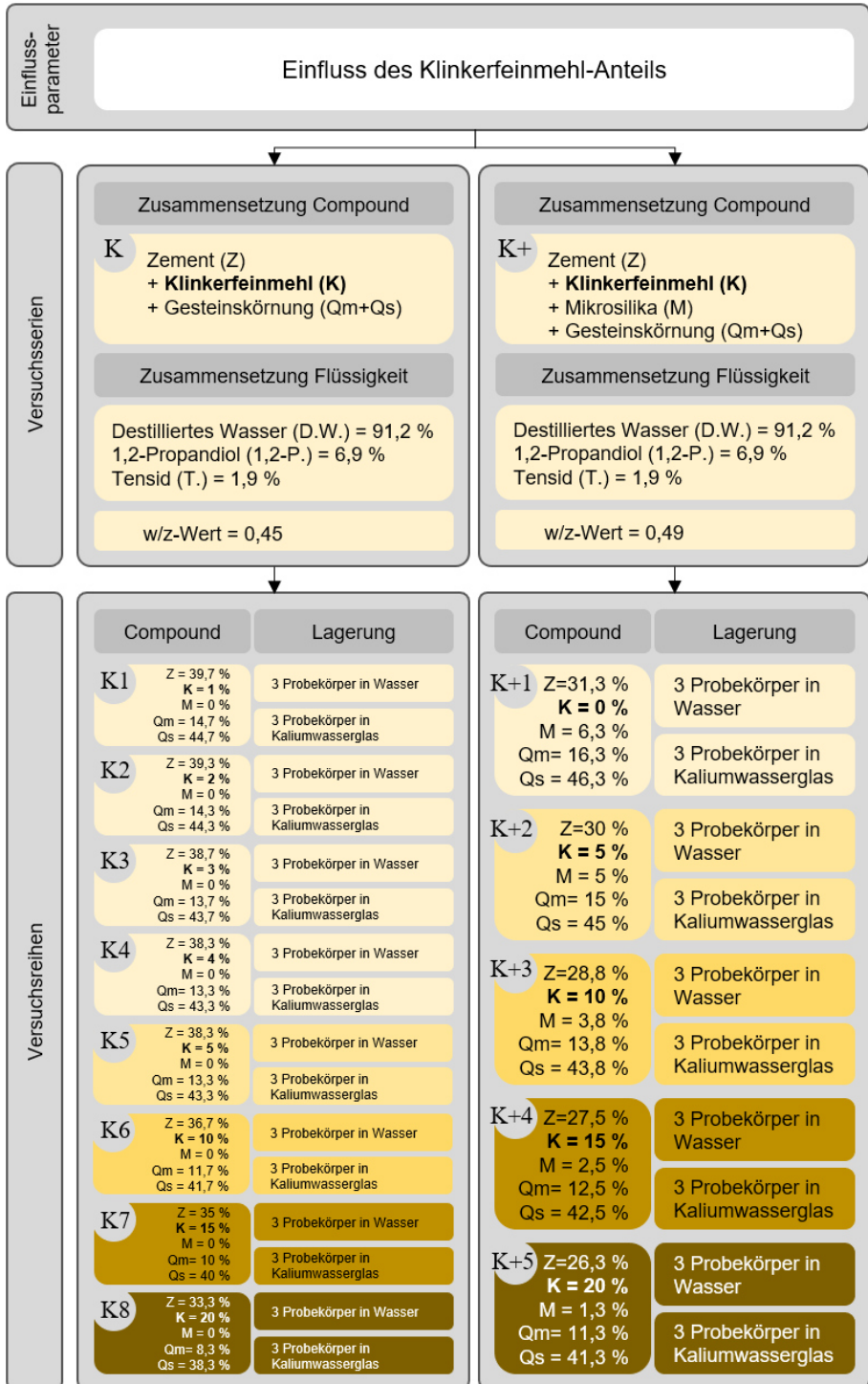


Abb. 3-40: Übersicht der Versuchsserien K und K+



### 3.4.3 Versuchsergebnisse

#### 3.4.3.1 Pulveranalyse

Die Analyse des Klinkerfeinmehlanteils erfolgt kongruent zum Untersuchungsprogramm des Zementanteils beginnend mit der Pulveranalyse. Wie zu erwarten, steigert sich mit der Zunahme des Klinkerfeinmehlgehalts der Feinheitsgrad des Compounds. In den ersten fünf Versuchsreihen sind die Unterschiede aufgrund der geringen Dosierung noch relativ überschaubar. Dies zeigt sich zum einen in Abb. 3-41 und zum anderen in der Berechnung des  $k_{\mu\text{m}}$ -Wertes, der sich von Versuchsreihe K1 bis K5 nur um ca. 8 % verringert. Vergleicht man jedoch die  $k_{\mu\text{m}}$ -Werte der Versuchsreihen mit dem minimalen und maximalen Klinkerfeinmehlgehalt liegen diese bereits über 38 % auseinander, was u. a. zu einer Steigerung der spezifischen Oberfläche von rund 50 % führt.

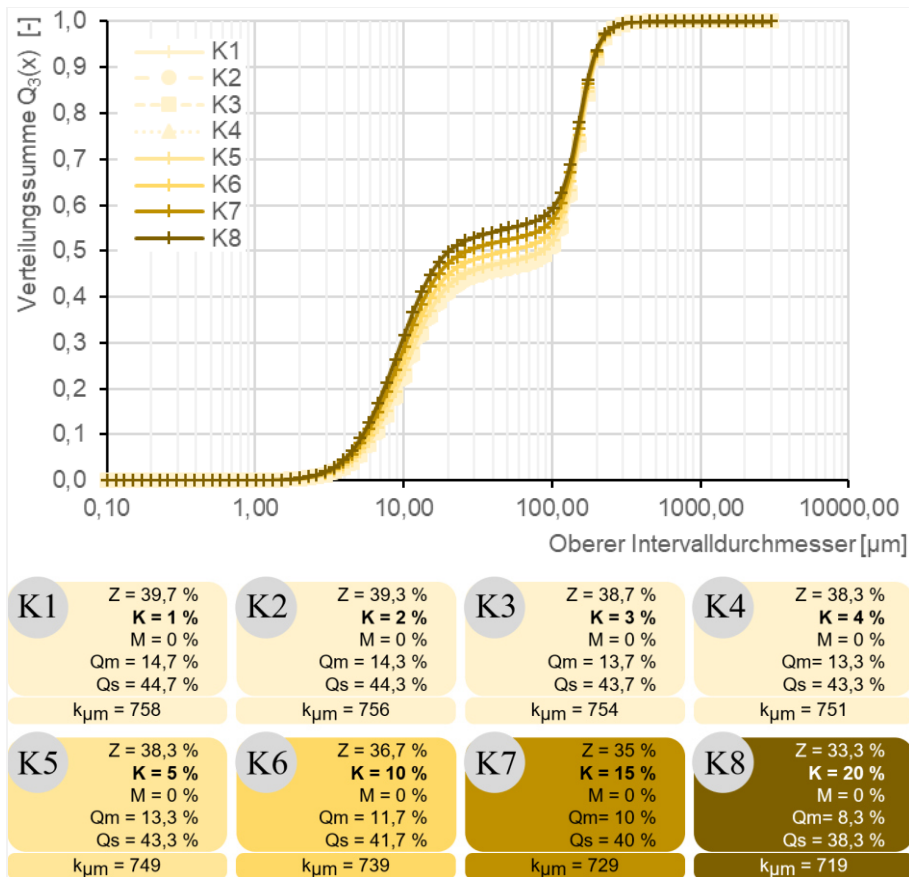


Abb. 3-41: Partikelgrößenverteilung der Versuchsserie K

Versuchsserie K+ knüpft an die Modifikation der spezifischen Oberflächenvergrößerung an und steht hinsichtlich der Korngrößenverteilung in engem Zusammenhang zur Serie Z+. Ob jedoch diese Vergrößerung der Oberfläche bzw. die damit in Zusammenhang stehende höhere Reaktivität des Bindemittels die notwendige Steigerung der 3DP-Standfestigkeit mit sich bringt, wird in Abschnitt 3.4.3.3 in Bezug zur Optimierbarkeit der 3D-gedruckten Betonstrukturen behandelt.

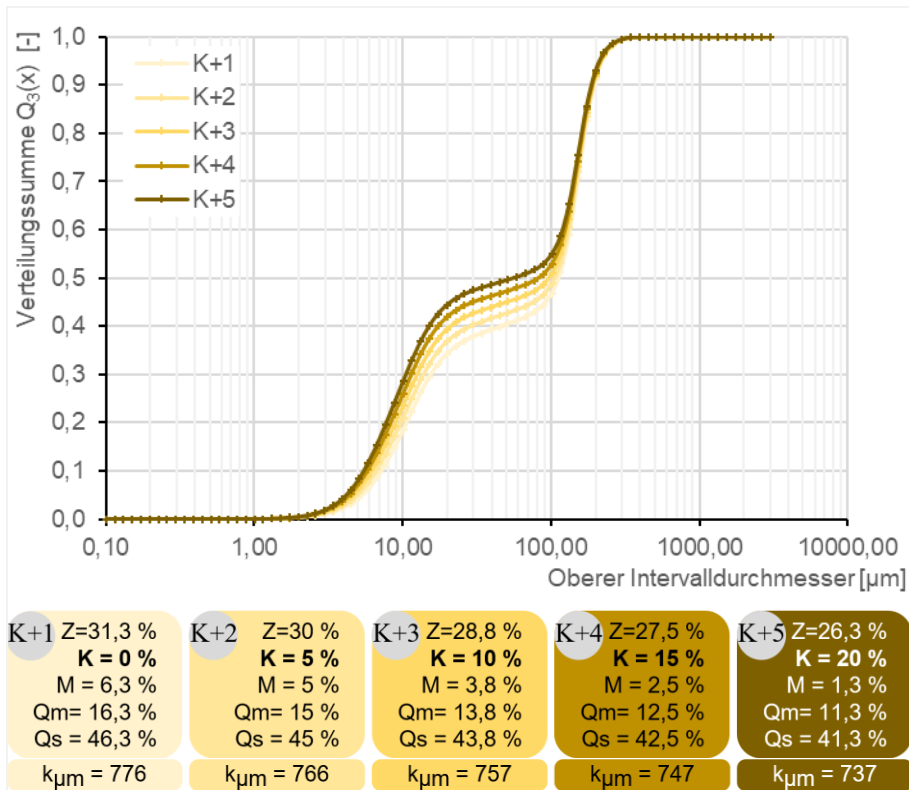


Abb. 3-42: Partikelgrößenverteilung der Versuchsserie K+

Wie für Versuchsserie Z und Z+ gilt es bei der Analyse des Klinkerfeinmehlanteils im Anschluss an die Ermittlung der Korngrößenverteilung die Veränderung der Fließfähigkeit mit der Variation des Compounds zu bestimmen, um letztendlich in Kooperation mit den Ergebnissen der AF-Parametern ein Herstellungs-konzept empfehlen zu können.

In der reduzierten Gegenüberstellung der beiden Versuchsserien (siehe Abb. 3-43) ist zu erkennen, dass mit einem erhöhten Feinheitsgrad die Fließfähigkeit geringer ausfällt. Dies bestätigt die Erkenntnisse aus den Untersuchungen zum Einfluss des Zementanteils. Dass Versuchsreihe K1 ein kohäsiveres Fließverhalten aufweist als Versuchsreihe K+1, lässt sich primär auf den höheren Zementanteil und somit auf eine

geringere Körnungsziffer zurückführen. Im Vergleich der bereits untersuchten Versuchsreihen mit ähnlichen  $k_{\mu m}$ -Werten zeichnet sich ebenfalls analog dazu ein konvergierendes Fließverhalten ab (z. B.  $k_{\mu m, Z5} = 760 \rightarrow ff_c = 2,99$ ;  $k_{\mu m, Z+1} = 783 \rightarrow ff_c = 3,03$ ;  $k_{\mu m, K1} = 758 \rightarrow ff_c = 2,67$ ;  $k_{\mu m, K+1} = 776 \rightarrow ff_c = 3,13$ ). Dass sich das Fließverhalten resp. der Fließfunktionswert ( $ff_c$ ) nicht proportional zur Körnungsziffer verhält, verdeutlichen die vielfältigen Einflussfaktoren. Wie in Abschnitt 2.5.2 beschrieben, nimmt u. a. die Partikelform der differierenden Bestandteile eines Compounds einen signifikanten Einfluss auf die Fließfähigkeit ein, da infolge strukturierter Partikel die interpartikulären Haftkräfte wesentlich stärker ausfallen als bei kugelförmigen Körnern. Dies verdeutlichen auch die REM-Aufnahmen aus Abschnitt 3.2.4.2, bei denen die feinkörnig, strukturierten Partikel (wie bspw. Zement oder Klinkerfeinmehl) im Gegensatz zu den grobkörnigen Haufwerken (z. B. Quarzsand) stärker aneinanderhaften. Inwiefern sich jedoch das sehr kohäsive Fließverhalten der Versuchsreihen K8 und K+5 auf den Schichtauftrag auswirken kann, wird in Abschnitt 3.4.3.3 ausgewertet.

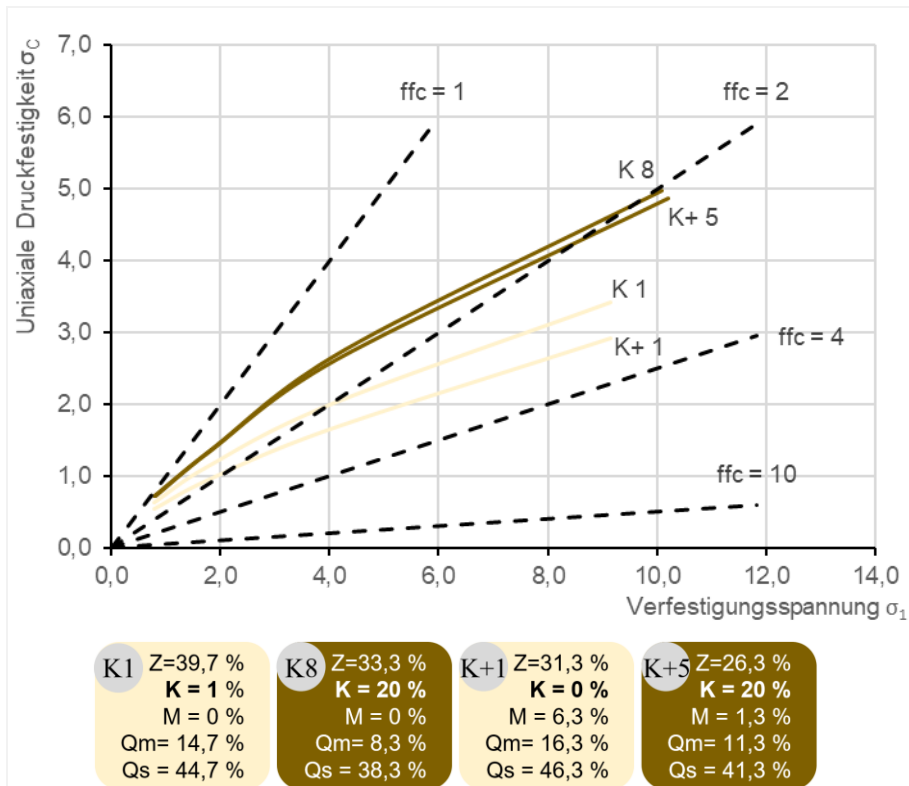


Abb. 3-43: Analyse der Fließfähigkeit der Versuchsserien K und K+

Die nächsten Einflussparameter behandeln primär die Packungsdichte des Compounds. Für die Versuchsserie K ergibt sich mit der Steigerung des Klinker-

feinmehlanteils eine Verringerung der Schüttdichte. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Klinkerfeinmehlpartikel stärker agglomerieren als die Zementpartikel des CEM I 52,5 R und die Agglomerate durch das Aufstoßen beim Untersuchungsprozess nicht zerfallen. Dies spiegelt das erwartete Verhältnis zwischen einem feinkörnigeren Haufwerk und einer Verringerung der Schüttdichte wider. Des Weiteren gilt es bei Abb. 3-44 zu beachten, dass die Versuchsreihen K1 bis K5 in kleineren Klinkerfeinmehlzugaben erstellt wurden, um die Einflüsse bei minimalen Anteilen feststellen zu können. Daraus folgt eine leichte Verzerrung der Verläufe im Liniendiagramm in Bezug auf die schüttguttechnologischen Einflussparameter.

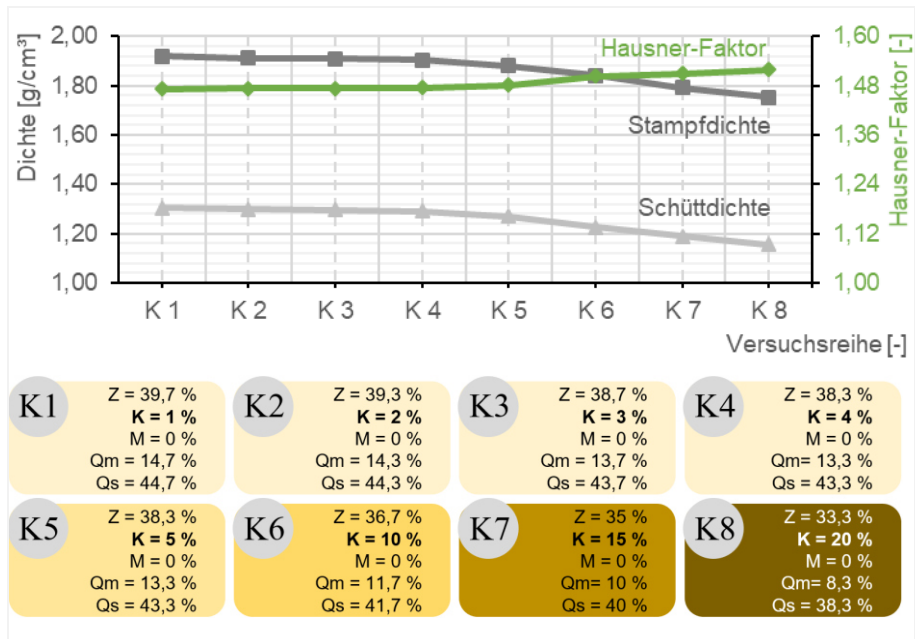


Abb. 3-44: Auswertung der Schütt- und Stampfdichte sowie des Hausner-Faktors von Versuchsserie K

Dementgegen steht Versuchsserie K+, bei der infolge des konstant, anwachsenden Klinkerfeinmehlanteils von fünf Prozent die zu untersuchenden Indikatoren auf einem nahezu stetigen Niveau verweilen (siehe Abb. 3-45). Dies deutet daraufhin, dass trotz der Minimierung des Silicastaubgehalts und einer daraufhin potenziell steigenden Schütt- und Stampfdichte eine Regulierung der Kennwertegrößen infolge der zunehmenden Klinkerfeinmehlglomeraten stattfindet. Dass die Schütt- und Stampfdichte nicht exakt gleichgeblieben ist, lässt sich anhand des Hausner-Faktors determinieren. Die geringfügige Steigerung verdeutlicht, dass die Stampfdichte im Gegensatz zur Schüttdichte etwas weniger abnimmt und die Packungsdichte sich ebenfalls mit der Zugabe des Klinkerfeinmehls verringert.

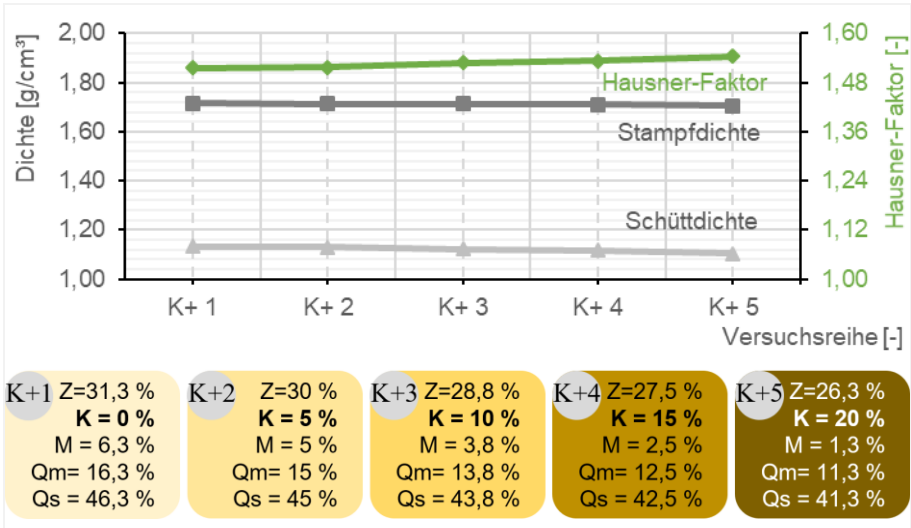


Abb. 3-45: Auswertung der Schüttdichte und Stampfdichte sowie des Hausner-Faktors von Versuchsserie K+

### 3.4.3.2 Flüssigkeitsanalyse

In der Auswertung zur Versuchsserie Z und Z+ konnte bereits der Zusammenhang zwischen dem Feinheitsgrad des Compounds und dem zugehörigen Feuchtigkeitsanspruch anhand des Korrelationskoeffizienten nach Pearson bestätigt werden. Dieses antiproportionale Verhältnis zeichnet sich ebenfalls durch die Ergebnisse aus Versuchsserie K und K+ ab, sodass mit einem niedrigeren  $k_{\mu m}$ -Wert eine höhere Feuchtigkeitsmenge bis zur Sättigung des Compounds erforderlich wird. Dennoch unterscheiden sich die Diagramme zur Auswertung der Flüssigkeitsanalyse deutlich. Bei den Versuchsserien Z und Z+ laufen die Auswertungskurven der eingebrachten Feuchtigkeitsmenge und der Feuchtigkeitsanspruch bis zur Sättigung der Trockenmörtelzusammensetzung sowie die davon abgeleiteten w/z-Werte jeweils stark aufeinander zu. Für die Serien zum Einfluss des Klinkerfeinmehlgehalts, wie in Abb. 3-46 und Abb. 3-47 dargestellt, lässt sich hingegen nur eine Annäherung bzw. ein nahezu paralleler Verlauf der Auswertungskurven feststellen. Worin der maßgebende Einfluss für die konträren Verläufe liegt, zeigt sich in der Gegenüberstellung der Gleichungen (3-7) und (3-8).

$$\left(\frac{w}{z}\right)_{K1} = \frac{m_L \cdot p_W}{V_P \cdot \rho_C \cdot (p_Z + p_{K1})} = \frac{m_W}{m_Z + m_{K1}} \overset{\pm \%}{\longleftrightarrow} \frac{m_W}{m_Z + m_{K1}} = \frac{m_L \cdot p_W}{V_P \cdot \rho_C \cdot (p_Z + p_{K1})} = \left(\frac{w}{z}\right)_{K8} \quad (3-8)$$

$$0,50 = \frac{18,59 \cdot 0,912}{64 \cdot 1,303 \cdot (0,397 + 0,01)} = \frac{16,95}{33,94} \overset{+17,76 \%}{\longleftrightarrow} \frac{19,96}{39,37} = \frac{21,89 \cdot 0,912}{64 \cdot 1,154 \cdot (0,333 + 0,20)} = 0,51$$

Dabei ist

- $\left(\frac{w}{z}\right)_V$  der Wasser-Zement-Wert inkl. Index zur Versuchsreihe
- $m_W$  die Masse des Wassers [g]
- $m_Z$  die Masse des Zements [g]
- $m_{KI}$  die Masse des Klinkerfeinmehls [g]
- $m_L$  die Masse der Bindemittelflüssigkeit [g]
- $m_C$  die Masse des Compounds [g]
- $p_W$  die prozentuale Menge des Wassers [%]
- $p_Z$  die prozentuale Menge des Zements [%]
- $p_{KI}$  die prozentuale Menge des Klinkerfeinmehls [%]
- $V_P$  das Volumen des Probekörpers [cm<sup>3</sup>]
- $\rho_C$  die Schüttdichte des verwendeten Compounds [g/cm<sup>3</sup>]

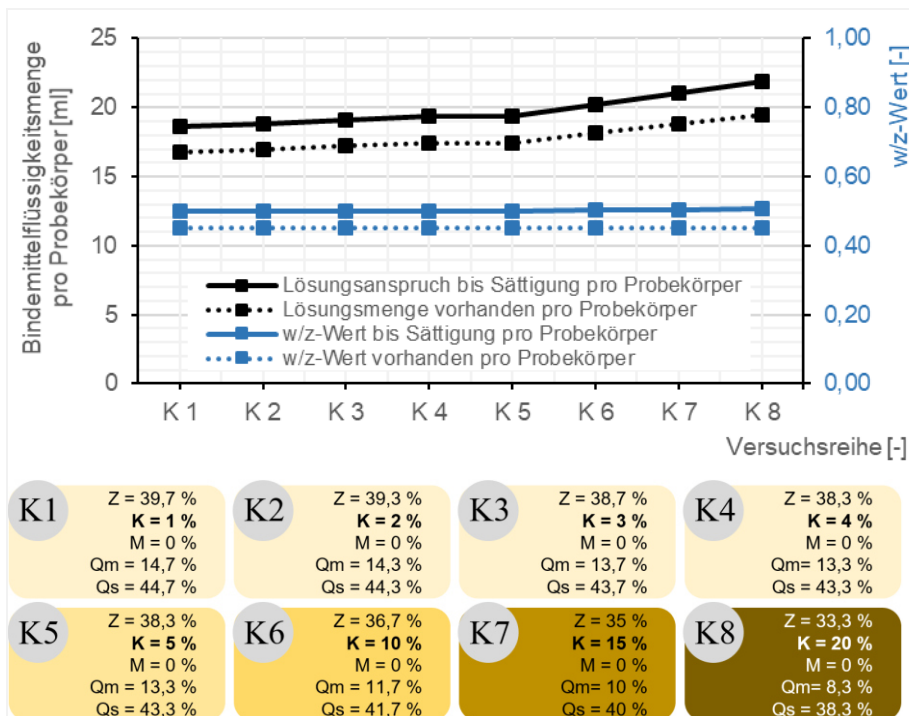


Abb. 3-46: Auswertung der Flüssigkeitsanalyse von Versuchsserie K

Signifikant für die Versuchsreihen Z1 und Z+1 sind in Relation zu den Abstufungen Z5 und Z+5, wie bereits in Abschnitt 3.3.1.2 analysiert, die geringe Menge an zementösen Bindemitteln in den Probekörpern. Dass sich dieser Verlauf trotz der erneuten Steigerung des zementösen Bindemittelanteils nicht wiederholt, kann mit der Vergrößerung des Porenvolumens durch die Agglomeration der Klinkerfeinmehlpartikel begründet werden. Die um etwa 11,5 % verringerte Schüttdichte zwischen dem minimalen und maximalen Klinkerfeinmehlgehalt bei Versuchsserie K mindert u. a. den Anstieg an zementösen Bindemittelpartikeln im Compound, sodass dieser ähnlich zur Steigerung der Wassermenge bei rund 16 % liegt. Dies bedeutet, dass sich der potenziell positive Effekt der Erhöhung des Bindemittelgehalts aufgrund der Begleitumstände, wie bspw. die Verringerung der Schüttdichte, relativieren oder sich auch negativ auf die Festigkeit der Betonmatrix auswirken kann.

Bei Versuchsserie K+ konnte bereits in der Pulveranalyse eine minimale Verringerung der Schüttdichte festgestellt werden. Dies führt nun in Kombination mit der Steigerung des zementösen Bindemittelgehalts dazu, dass der Zementgehalt ca. 44,48 % zulegt und demgegenüber erhöht sich der Bindemittelflüssigkeitsanspruch bis zur Sättigung des Compounds um etwa 23,54 %. Im Vergleich zur Versuchsserie Z+ ist deutlich zu erkennen, dass der Feuchtigkeitsanspruch aufgrund des feineren Compounds stärker zunimmt und der Zementgehalt einen geringeren Zuwachs erfährt.

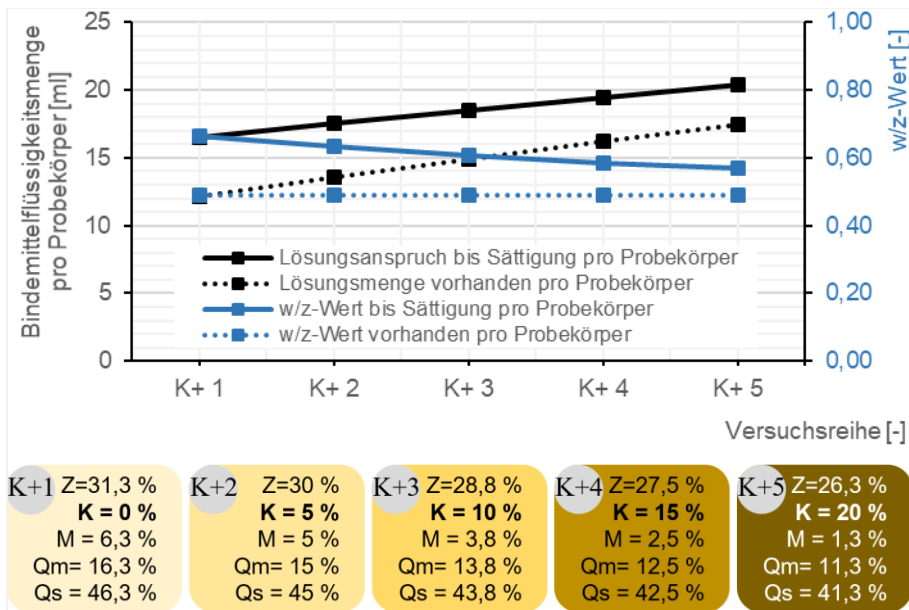


Abb. 3-47: Auswertung der Flüssigkeitsanalyse von Versuchsserie K+

Inwieweit sich die leicht annähernden oder parallel verlaufenden Auswertungskurven der Flüssigkeitsanalyse positiv bzgl. des durchschnittlichen Absorptionseffektes sowie der geometrischen Optimierung der Probekörper äußert, zeigt die Analyse zu den AF-Parametern.

### 3.4.3.3 AF-Parameter

In der Analyse der AF-Parameter von Versuchsserie K und K+ werden die Erkenntnisse der Serien Z und Z+ aufgegriffen, um den fortschreitenden Entwicklungsprozess eines optimalen Compounds darzustellen.

Die Auswertungen des Druckauftrags zeigen, dass im Vergleich zwischen Serie Z und K bzw. Z+ und K+ kaum Unterschiede festzustellen sind. Die einzigen Differenzen, die sich in dieser Gegenüberstellung darstellen, beruhen zum einen auf der höheren Reaktivität des Klinkerfeinmehls und zum anderen auf dem jeweiligen Verhältnis zwischen der Bindemittelflüssigkeitsmenge bei Sättigung der Trockenmörtelzusammensetzung und der eingebrachten Bindemittelflüssigkeitsmenge während dem Druckvorgang.

In Bezug auf den Schichtauftrag ergeben sich gerade bei den extremen Anteilsmengen der Versuchsserie K und Z Unterschiede. Diese basieren hauptsächlich auf den Gegensätzen hinsichtlich der Fließfähigkeit. Bei Versuchsreihe Z1 führte ein fließfähiges Materialverhalten zu einem negativeren Schichtauftrag und bei Versuchsreihe K8 und K+5 entsteht aufgrund eines sehr kohäsiven Fließverhaltens potenziell ein unvollständiger Layer, der in einem mangelhaften Druckbild enden kann. Der unvollständige Schichtauftrag bei solch feinen Compounds lässt sich u. a. mit der erhöhten Kontaktfläche zwischen den Partikeln sowie einer schlechteren Fließfähigkeit begründen. Die Zahl der Partikelkontakte pro Flächeneinheit ist nämlich umgekehrt proportional zum Quadrat der Partikelgröße, sodass die van-der-Waals-Kräfte zwischen den Partikeln zunehmen. Des Weiteren steigen die Haftkräfte der befeuchteten Bereiche durch Flüssigkeitsbrücken [119]. Dass dieser suboptimale Sachverhalt im Fall von Versuchsreihe K8 und K+5 nicht direkt der Auswertung zu entnehmen ist, lässt sich mithilfe von Abb. 3-48 begründen. Anhand der Aufnahme ist die Problematik des unvollständigen Schichtauftrags zu erkennen, jedoch beeinträchtigt dies im analysierten Bereich nicht den bedruckten Querschnitt. Für größere Strukturen sollte dieses Risiko dennoch berücksichtigt werden.

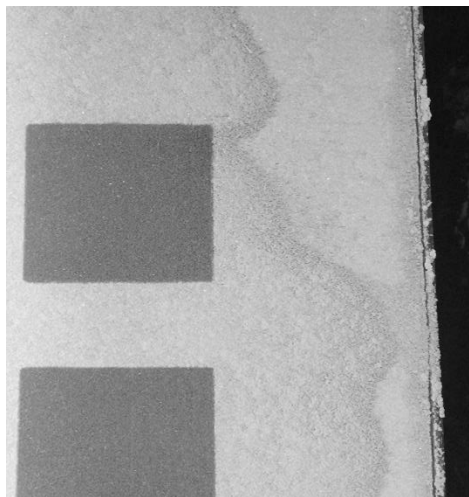


Abb. 3-48: Exemplarische Darstellung eines unvollständigen Schichtauftrags



Für den nächsten signifikanten AF-Parameter – die s. g. Optimierbarkeit – lag der Fokus darauf, ob sich zum einen aufgrund des feineren resp. reaktiveren Bindemittels eine notwendige Steigerung der 3DP-Standfestigkeit im Vergleich zur Serie Z einstellt und zum anderen welche Anteilsmenge des Klinkerfeinmehls notwendig ist, um mindestens eine gute bzw. einfache Optimierbarkeit der 3D-gedruckten Probekörper erwarten zu können. Hierbei ergab sich für Serie K, dass sich ab einem Klinkerfeinmehlanteil von mindestens 4 M.-% eine ausreichende 3DP-Standfestigkeit einstellt. Dies spricht dafür, dass sich aufgrund des geringeren Sulfatanteils im Klinkerfeinmehl in den ersten Minuten vermehrt C-A-H-Phasen bilden konnten oder dass die Hydratation der extrem feinen Klinkerfeinmehlpartikel im Gegensatz zum CEM I 52,5 R schon so weit fortgeschritten ist, sodass sich selbst die Partikel aus dem letzten Layer des Druckvorgangs bei Entnahme aus dem Bauraum in der Accelerationsperiode befinden. Sofern sich vermehrt kubische oder monokline C-A-H-Kristallstrukturen entwickeln konnten, würde dies zur Folge haben, dass die Strukturen zwar den wassergefüllten Porenraum überbrücken und somit eine höhere 3DP-Standfestigkeit erzeugen, jedoch die Endfestigkeit darunter leiden wird, da sich kein dichtes Faserbündel wie beim Reißverschlussprinzip der C-S-H-Phasen einstellt. Anhand der Ergebnisse zu den AF-Parametern ist dies noch nicht zu beurteilen, sodass die Auswertung der Festbetonuntersuchungen zur Beantwortung notwendig ist.

Eindeutig ist hingegen, dass sich die Probekörper der Versuchsserie K mit einem Klinkerfeinmehlgehalt von 4 M.-% bis 10 M.-% besser optimieren lassen als die Probekörper mit einem geringeren Anteil. Negativ entwickelt sich der Zusammenhang einer gesteigerten Frühfestigkeit mit einem höheren Klinkerfeinmehlgehalt ab einem Anteil von über 10 M.-%. Die anhaftenden Partikel an den Probekörpern absorbieren Feuchtigkeit, wie bereits in Abb. 3-21 dargestellt, wodurch sich die Abmessungen des gewünschten Probekörpers geringfügig verändern. Sofern die chemischen und physikalischen Verbindungen zwischen diesen Partikeln und der definierten Struktur noch gering sind, lassen sie sich einfach abstreifen, einsaugen oder wegblasen. Dies ist jedoch bei sehr hohen Klinkerfeinmehlgehalten nicht mehr so einfach möglich, sodass die Optimierbarkeit nur noch als befriedigend eingestuft werden kann. Gleiche Komplexität lässt sich ebenfalls auf die Versuchsserie K+ übertragen, wobei die Versuchsreihe K+1 ohne Klinkerfeinmehl im Compound keine negative Bewertung hinsichtlich der Optimierbarkeit erhielt. Dies ist hingegen potenziell auf die positiven Eigenschaften des höheren Silicastaubgehalts zurückzuführen, die in der Analyse der AF-Parameter von Versuchsserie Z+ thematisiert wurden und in den noch folgenden Untersuchungen zum Silicastaub näher vertieft werden.

Für die durchschnittliche Absorptionstiefe lässt sich zum einen wie zuvor bei den Untersuchungen zum Einfluss des Zementgehaltes feststellen, dass die Absorptionstiefe mit einer Verringerung des Verhältnisses zwischen der Bindemittelflüssigkeitsmenge bei Sättigung und der eingebrachten Bindemittelflüssigkeitsmenge ansteigt und zum anderen bestätigt sich, dass bei einem nahezu gleichbleibenden Verhältnis wie bei Versuchsserie K der feuchtigkeitsbindende Einfluss vom Klinkerfeinmehl zum Tragen kommt und somit die durchschnittliche Absorptionstiefe geringfügig sinkt.

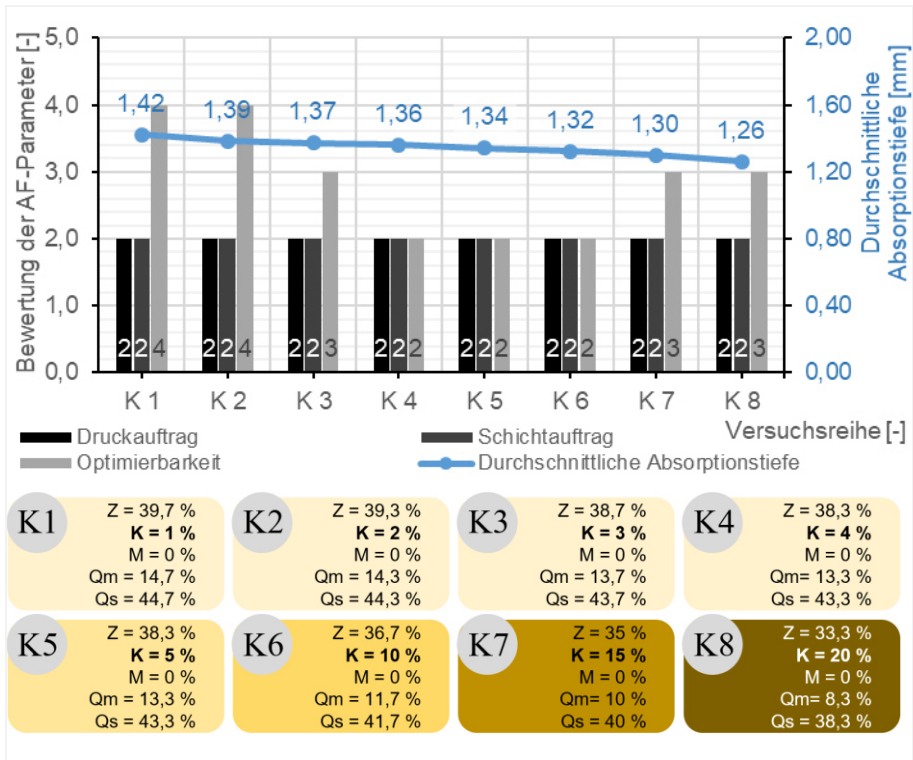


Abb. 3-49: Auswertung der AF-Parameter von Versuchsserie K

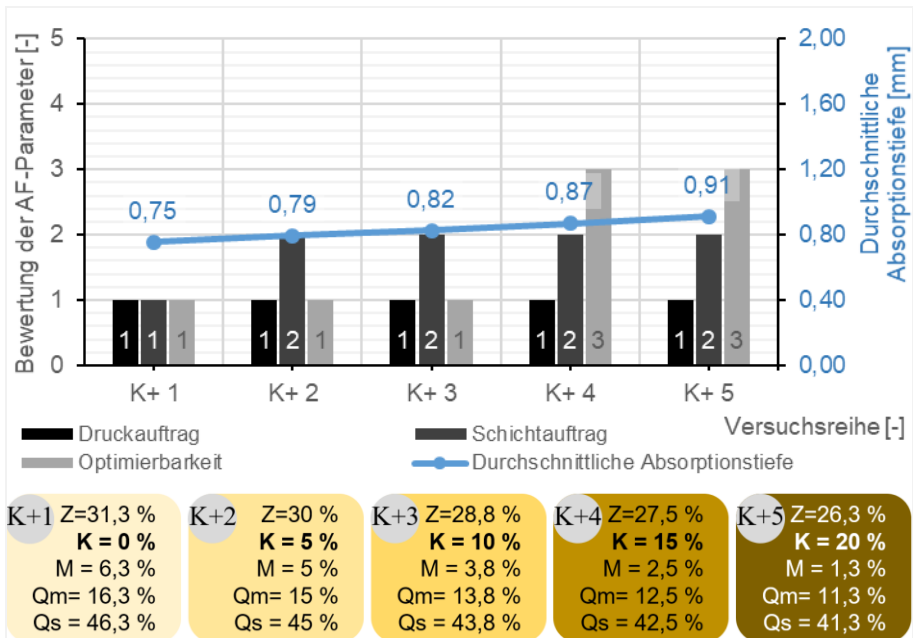


Abb. 3-50: Auswertung der AF-Parameter von Versuchsserie K+

#### **3.4.3.4 Festbetonuntersuchungen**

Die in Versuchsserie K und K+ durchgeführten Festbetonuntersuchungen verdeutlichen abschließend, welcher Klinkerfeinmehlanteil neben einer Optimierung des Herstellungsablaufs zusätzlich eine Festigkeitssteigerung impliziert.

Neben der Bestätigung, dass mit der Zugabe vom Klinkerfeinmehl bei Serie K die 3DP-Standfestigkeit in Relation zur Versuchsserie Z zunimmt und mit einem gewissen Anteil des Zusatzstoffes die geometrische Optimierbarkeit verbessert wird, lassen sich die positiven Veränderungen zunächst auf die Festbetoneigenschaften übertragen. In den ersten fünf Versuchsreihen konnte mit einem steigenden Klinkerfeinmehlgehalt die Druckfestigkeit der Probekörper sowohl bei Lagerung in Wasser als auch in Wasserglas erhöht werden. Da das Verhältnis, wie in der Flüssigkeitsanalyse ermittelt, zwischen der Bindemittelflüssigkeitsmenge bei Sättigung und der eingebrachten Bindemittelflüssigkeitsmenge nur minimal variiert, kann dieser Faktor in dieser Versuchsserie keinen deutlichen Einfluss auf die Druckfestigkeit nehmen. Die geringeren Festigkeiten der Versuchsreihen K1 bis K3 beziehen sich eher auf die verringerte 3DP-Standfestigkeit und der daraus resultierenden schlechteren Optimierbarkeit bzw. Beschädigungen der Probekörper. Der Unterschied zwischen den Druckfestigkeiten der Probekörper von Versuchsreihe K4 und K5 ist erwartungsgemäß minimal, da sich die ermittelten Kenngrößen und Parameter kaum oder gar nicht unterscheiden. Für Versuchsreihe K6 können zwar hinsichtlich der AF-Parameter noch die identischen Bewertungsgrößen vergeben werden, jedoch ist schon eine negative Tendenz der Druckfestigkeit zu erkennen. Dies lässt vorerst auf die Verringerung der Schüttdichte sowie eine potenziell größere Porosität schließen. Ein weiterer Faktor, der gerade bei den folgenden Versuchsreihen K7 und K8 noch deutlicher wird und dabei die erreichbare Druckfestigkeit senkt, ist der verstärkte Einfluss der C-A-H-Phasenbildung. Das Klinkerfeinmehl weist im Vergleich zum Zement einen über sechsfach geringeren Schwefeltrioxidanteil auf. Demzufolge entstehen potenziell vermehrt C-A-H-Phasen, die wesentlich schneller reagieren und durch ihre porenüberbrückenden Kristallstrukturen dem 3D-gedruckten Beton bereits nach kurzer Zeit eine ausreichende 3DP-Standfestigkeit zur Nachbearbeitung verleihen können. Jedoch entsteht, wie in der Festbetonanalyse zum Einfluss vom Zementgehalt vermutet, mit einem höheren Klinkerfeinmehlanteil keine dichtere und stabilere Betonmatrix, da die C-A-H-Morphologien kein dichtes Faserbündel wie beim Reißverschlussprinzip der C-S-H-Phasen bilden. Somit sinkt die Druckfestigkeit der Probekörper mit weiter ansteigendem Klinkerfeinmehlanteil.

Die Ergebnisse der Versuchsserie K lassen sich ebenfalls auf die Serie K+ übertragen. Wie Abb. 3-52 verdeutlicht, ist zunächst mit einer geringen Klinkerfeinmehlzugabe von 5 % eine Steigerung der Druckfestigkeit zu erwarten, jedoch sinkt der charakteristische Kennwert erneut bei einem Anteil von  $\geq 10\%$ , was sich wiederum mit den veränderten Kristallstrukturen begründen lässt. Gleichbedeutend zur Serie K steigt auch bei Versuchsserie K+ die 3DP-Standfestigkeit mit einem höheren Klinkerfeinmehlgehalt, was ebenfalls zu einer diffizileren Optimierbarkeit führt, da die anhaftenden Partikel am gewünschten Querschnitt erhärten.

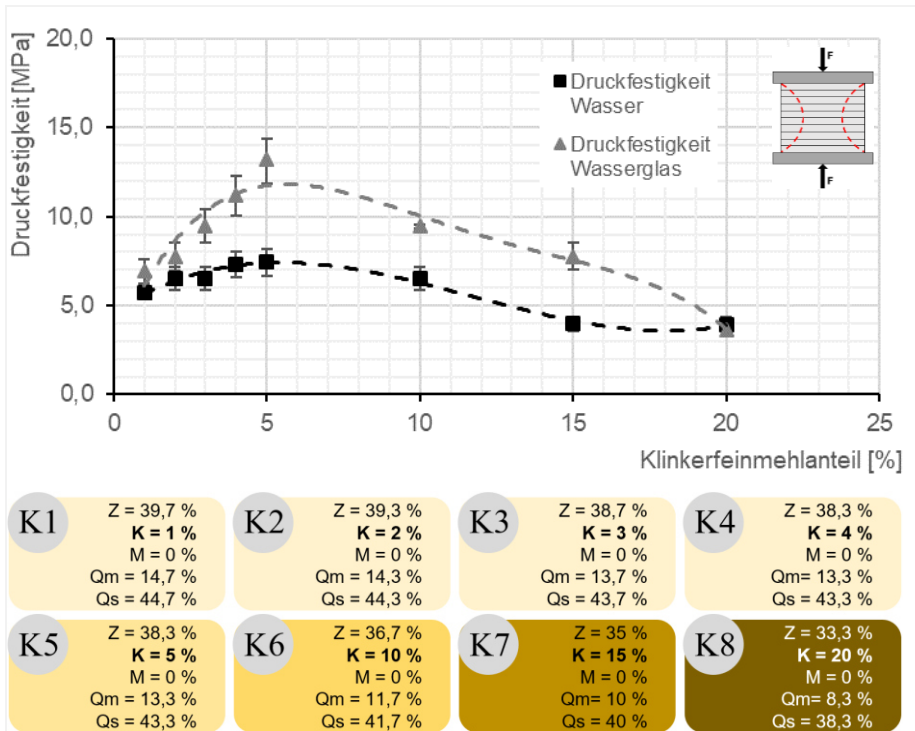


Abb. 3-51: Auswertung der Druckfestigkeit von Versuchsserie K

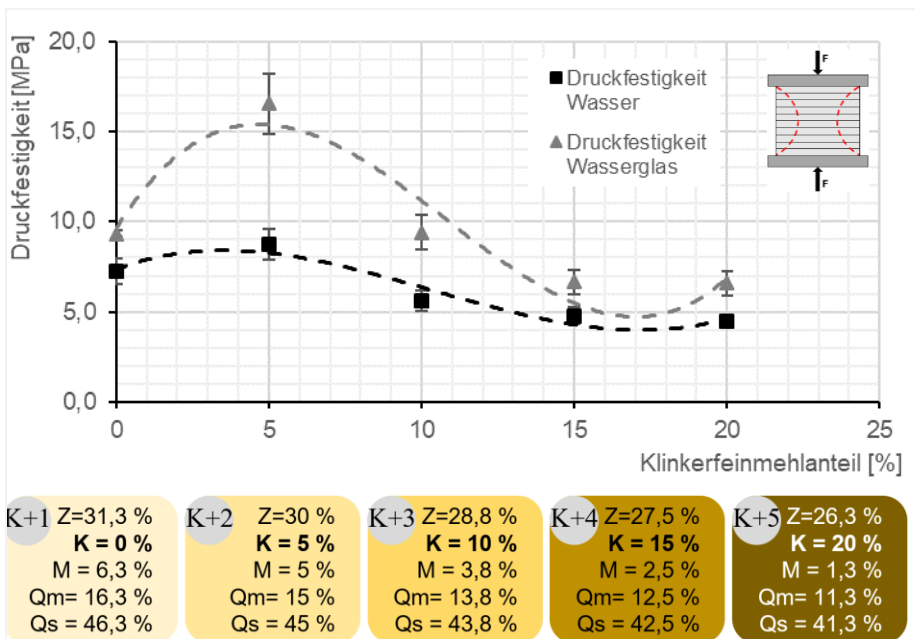


Abb. 3-52: Auswertung der Druckfestigkeit von Versuchsserie K+

Im Vergleich der beiden Serien bestätigt sich analog zur Gegenüberstellung der Serien Z und Z+, dass sich mit dem Silicastaub sowohl die Endfestigkeiten erhöht als auch die geometrische Optimierbarkeit aufgrund der interpartikulären Haftkräfte erleichtert. Zudem lassen sich die Vorteile in gewissem Maße isolierter betrachten, da bspw. in Relation zwischen Versuchsreihe K5 und K+2 die primäre Veränderung bei der Zugabe eines Zusatzstoffes in Form von Silicastaub lag und bei Versuchsserie Z zur Serie Z+ neben dem Silicastaub auch das Klinkerfeinmehl ergänzt wurde. Ob ein noch höherer Silicastaubanteil verschiedene Eigenschaften des 3D-gedruckten Betons im 3DP-Verfahren positiv beeinflussen kann, ist Bestandteil der Untersuchungen im Abschnitt 3.5.

## **3.5 Einfluss des Silicastaubanteils**

### **3.5.1 Allgemeines**

Mit dem dritten Einflussparameter wird eine weitere Bindemittelkomponente in Form eines Zusatzstoffes im Detail analysiert, die bereits Bestandteil in den Versuchsserien Z+ und K+ war. In den beiden Versuchsserien konnten zum Teil signifikante Einflüsse in Bezug auf den Silicastaub festgestellt werden, jedoch nahm dieser Zusatzstoff hinsichtlich der Trockenmörtelzusammensetzung jeweils eine untergeordnete bzw. abhängige Rolle zum analysierenden Einflussparameter ein oder blieb wie in den ersten beiden Versuchsserien Z und K unberücksichtigt.

Mit der gesonderten Betrachtung des Silicastaubanteils soll die Einflussnahme des Zusatzstoffes auf den Herstellungsprozess sowie die Festigkeit des 3D-gedruckten Betons analysiert werden. Die Wirkung des reaktiven Zusatzstoffes bei der konventionellen Herstellung von Beton wird im Allgemeinen pauschal durch einen s. g. k-Wert nach DIN EN 206-1 [140] bzw. DIN 1045-2 [141] berücksichtigt, der für diese Arbeit in Anlehnung an die Untersuchungsergebnisse aus [60] ebenfalls mit 1,0 festgelegt wurde. Die Zugabemengen des Silicastaubs korrelieren in dieser Versuchsserie mit denen der Analyse zum Einfluss des Klinkerfeinmehls, um im direkten Vergleich die Wirkung des Zusatzstoffes beurteilen zu können. Eine detaillierte Übersicht wird im nachfolgenden Versuchsprogramm dargestellt.

### **3.5.2 Versuchsprogramm**

Mit den Versuchsserien M und M+ wurde der Einfluss des Silicastaubanteils gesondert betrachtet. Für dieses Versuchsprogramm wurden erneut alle Analyseschritte angefangen von der Pulveranalyse bis zu den finalen Festbetonuntersuchungen durchlaufen. Da der Silicastaubgehalt aufgrund der Vergleichbarkeit kongruent zum Klinkerfeinmehlanteil in den Versuchsserien K und K+ gesteigert werden sollte, wurde in den Trockenmörtelzusammensetzungen partiell der maximale Gehalt an Silicastaub hinsichtlich der Vorgabe nach DIN 1045-2 [141] überschritten.

Für Versuchsserie M bedeutet dies, dass die Abstufungen von M1 bis M5 in 1 M.-% Steigerungen gefahren wurden, um die Auswirkung auf die Druckfestigkeit sowie weiterer Parameter im 3DP-Verfahren bei minimalen Zugabemengen untersuchen zu können. Die weiteren Versuchsreihen verfolgten, wie in Abb. 3-53 zusammengefasst, die prozentualen Anteile von 10, 15 und 20 M.-%.

Zum Abschluss der Versuchsserien hinsichtlich des Bindemiteleinflusses wurde Serie M+ zunächst mit einem Zementgehalt von ca. 31,3 M.-%, einem Klinkerfeinmehlanteil von rund 6,3 M.-% sowie einem Gesteinskörnungsanteil von ca. 62,6 M.-% erstellt, wobei sich der Betonzuschlag zu 16,3 M.-% Quarzmehl und 46,3 M.-% Quarzsand aufteilte. Daraufhin wurde der Silicastaubgehalt konstant um 5 M.-% bis zu einem Massenanteil von insgesamt 20 M.-% gesteigert und die weiteren Bestandteile im Compound wie in den vorangegangenen Versuchsprogrammen anteilig reduziert.

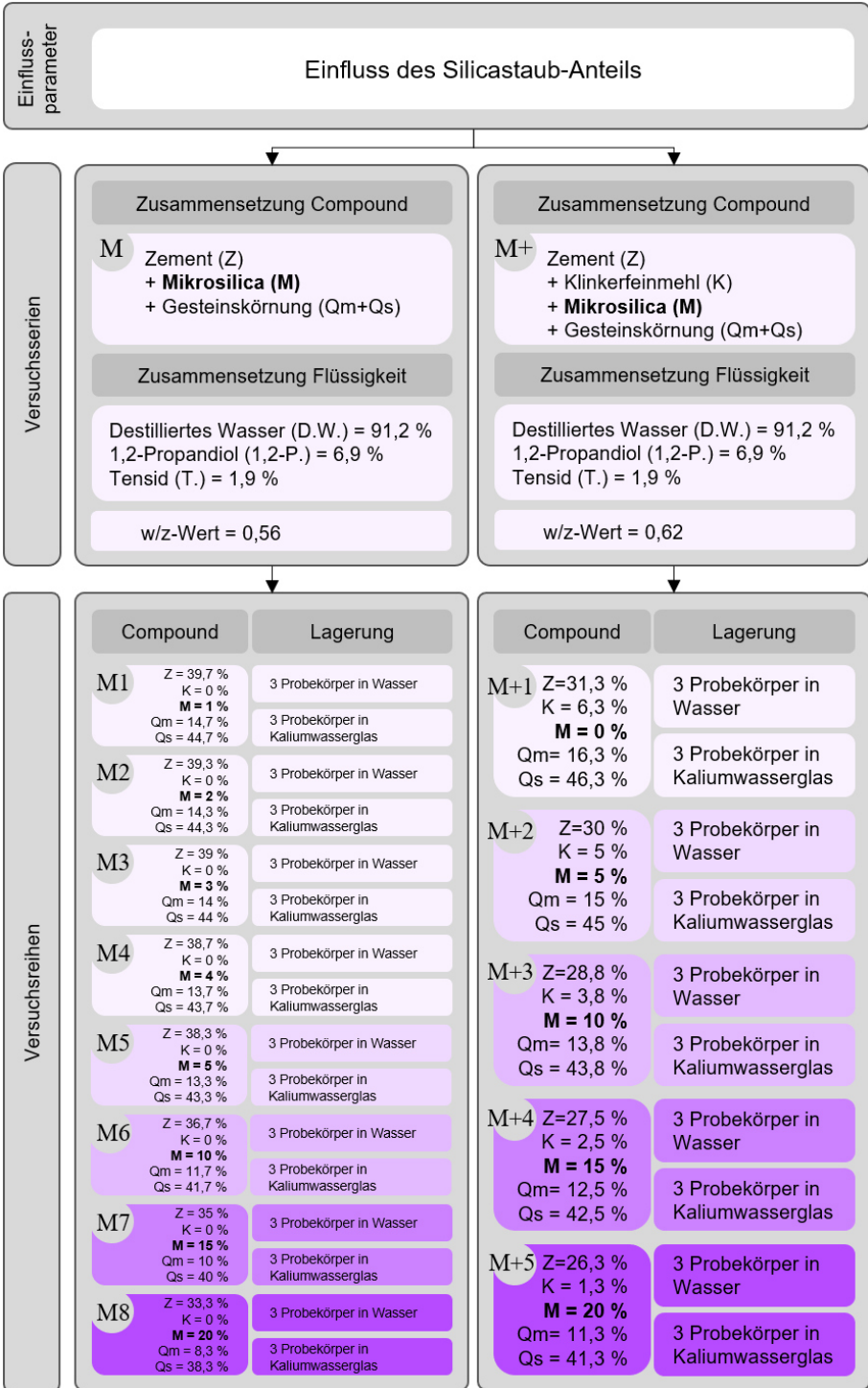


Abb. 3-53: Übersicht der Versuchsserien M und M+

### 3.5.3 Versuchsergebnisse und Auswertung

#### 3.5.3.1 Pulveranalyse

Bei der Analyse der Partikelgrößenverteilung für die Versuchsserien zum Einfluss des Silicastaubgehalts kann ein konträres Verhalten zu den vorherigen Pulveranalysen festgestellt werden. Wie in den vorangegangenen REM-Aufnahmen zu den verwendeten Materialien illustriert, weisen die Silicastaubpartikel aufgrund der van-der-Waals-Kräfte eine starke Neigung zur Agglomeration auf.

Sofern nun die Ergebnisse der Streulichtmessmethode zugrunde gelegt werden, entsteht der Eindruck, dass die Silicastaubpartikel grobkörniger sind als die Zement- oder Klinkerfeinmehlpartikel. Jedoch muss bei der Betrachtung der Partikelgrößenverteilungen berücksichtigt werden, dass die Pulver, wie in Abschnitt 3.2.4.1 beschrieben, trocken untersucht und etwaige Agglomerate beim Durchgang ohne Dispergierung nicht zerkleinert wurden, um die realen Gegebenheiten in der Produktion zu erfassen. Dass diese zusammenhängenden Partikel trotz des intensiven Mischprozesses gerade bei großen Anteilmengen nicht zerfallen, bestätigen die Ergebnisse aus der Partikelgrößenverteilung in Abb. 3-54 und Abb. 3-55.

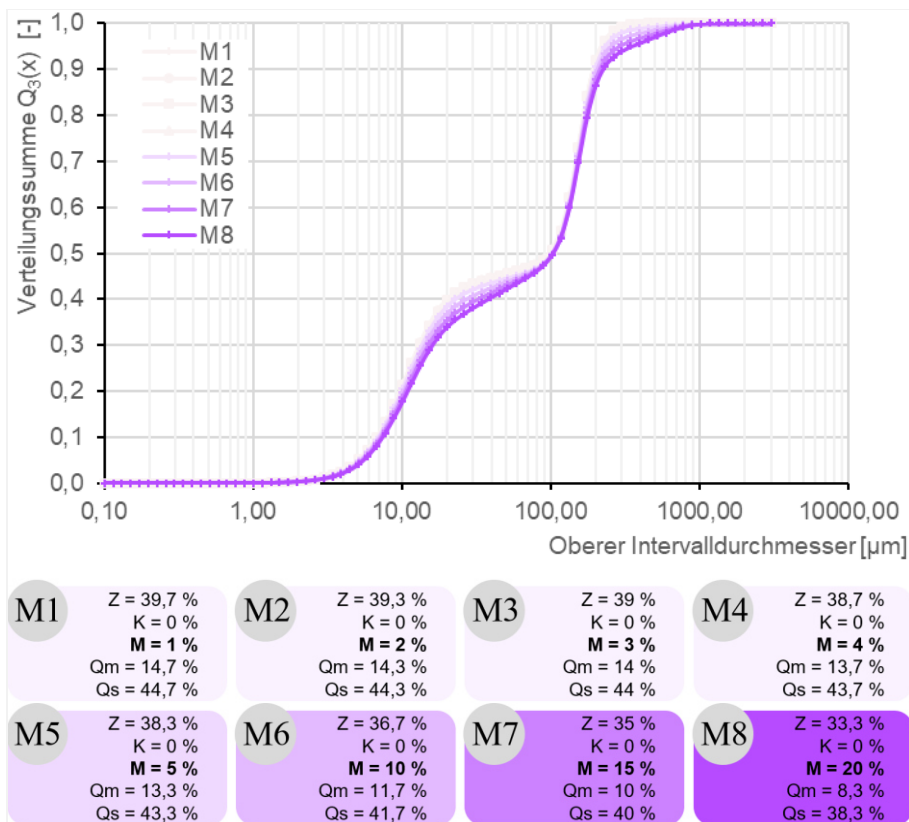


Abb. 3-54: Partikelgrößenverteilung der Versuchsserie M



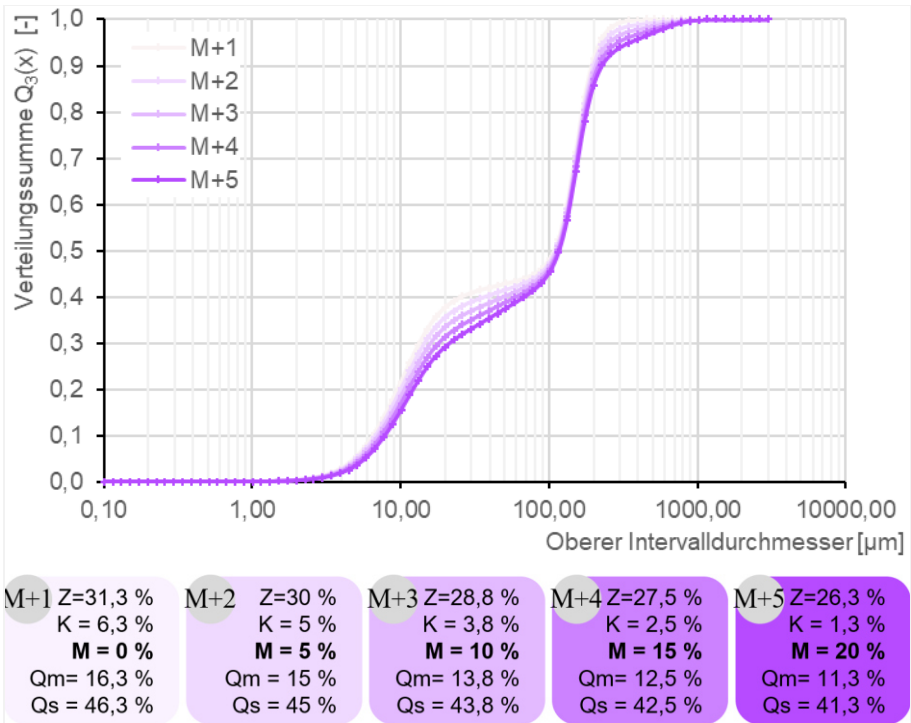


Abb. 3-55: Partikelgrößenverteilung der Versuchsserie M+

Das konträre Materialverhalten zu den bereits analysierten Einflussparametern spiegelt sich ebenfalls im Fließverhalten der Versuchsserien M und M+ wider und bestätigt somit die Erkenntnisse aus der Analyse zur Partikelgrößenverteilung. Denn einerseits würde man mit der Zugabe eines feineren Pulvermaterials wie bei den Untersuchungen zum Einfluss des Zement- oder Klinkerfeinmehlgehalts ein kohäsiveres Fließverhalten erwarten, jedoch zeigen andererseits die Analysen der Partikelgrößenverteilungen, dass mit der Zunahme an Silicastaubpartikeln der prozentuale Anteil an Agglomeraten ansteigt und sich somit eine vermeintlich, grobkörnigere Trockenmörtelzusammensetzung einstellt. Dass dies kein untypisches Materialverhalten ist, bestätigen die Untersuchungen von Schulze [119]. Die sehr feinkörnigen Schüttgüter, bei denen die interpartikulären Haftkräfte zu einem schlechten Fließverhalten führen, bilden häufig schon von sich aus Agglomerate, wenn sie bewegt werden. Grund für die interpartikulären Haftkräfte sind die van-der-Waals-Kräfte, die bei sehr feinkörnigen, trockenen Haufwerken dominant sind. Da diese Agglomerate jedoch nur bei begrenzter Beanspruchung stabil bleiben, zerfallen sie in der Regel auch während dem intensiven Mischprozess. Dies trifft auch für die zuvor untersuchten Versuchsserien zu, jedoch konnte bei der Analyse dieses Einflussparameters eine zunehmende Entstehung von Agglomeraten festgestellt werden, was sich anhand des besseren Fließverhaltens der Versuchsserien mit höherem Silicastaubgehalt verdeutlichen lässt.

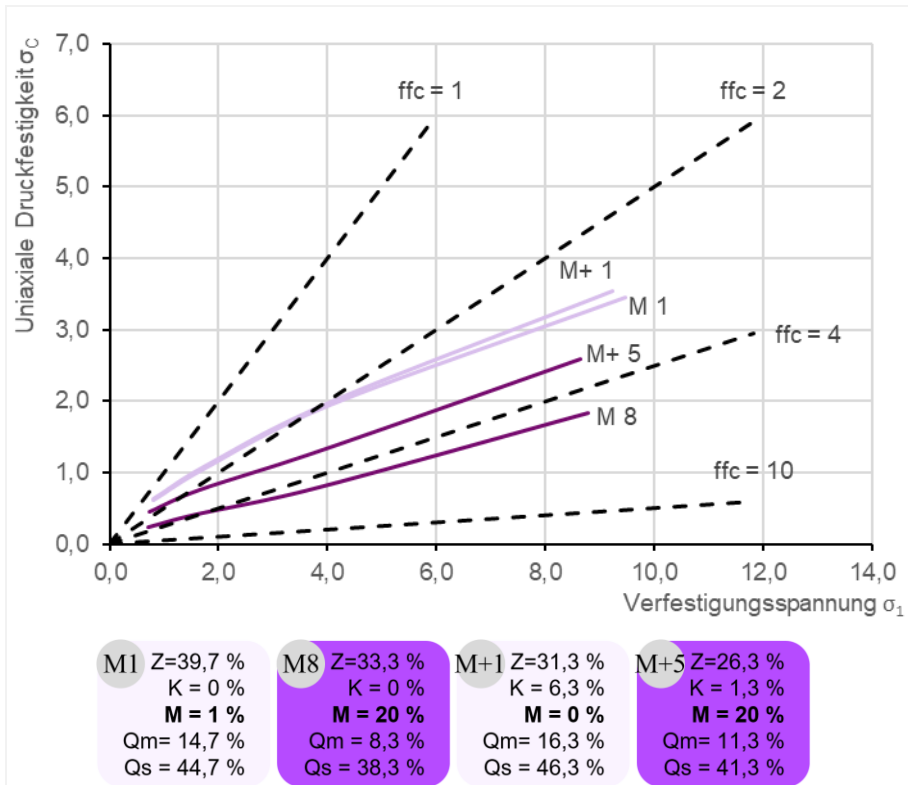


Abb. 3-56: Analyse der Fließfähigkeit der Versuchsserien M und M+

Die Erkenntnisse hinsichtlich der Agglomeratbildung aus der Partikelgrößenverteilung sowie dem Fließverhalten der differierenden Trockenmörtelzusammensetzungen setzen sich in der Analyse zur Packungsdichte des Compounds fort. Sowohl bei Versuchsserie M als auch bei Serie M+ sinken mit der Zugabe des Silicastaubs die Schüttdichte, Stampfdichte sowie der Hausner-Faktor.

Die minimale Verringerung der drei Faktoren zwischen den ersten Versuchsreihen bei Serie M sind auf die geringe Steigerung des Silicastaubanteils zurückzuführen. In Gegenüberstellung zu den vergleichbaren Versuchsreihen K1 und Z5 weist die Abstufung M1 aufgrund der geringeren Kornrohichte des Silicastaubs sowie der verstärkten Agglomeratbildung jeweils eine niedrigere Schütt- und Stampfdichte auf. Inwieweit sich dies im Vergleich auf die AF-Parameter und folglich auf die Druckfestigkeit auswirkt, wird in Abschnitt 3.5.3.3 und 3.5.3.4 dargestellt.

Bei Versuchsserie M+ fällt die Reduzierung der Schütt- und Stampfdichte, wie in Abb. 3-58 illustriert, etwas geringer aus. Dies kann potenziell auf den höheren Anteil der Gesteinskörnung im Compound zurückgeführt werden, da die Zuschlagstoffe in Form von Quarzmehl und Quarzsand kaum bis gar nicht agglomerieren (siehe Abb. 3-10). Des Weiteren decken sich die Erkenntnisse mit der Analyse zur vergleichbaren

Versuchsserie K+, bei der sich ebenfalls geringere Veränderungen zwischen dem minimalen und maximalen Gehalt des zu untersuchenden Einflussparameters ergeben.

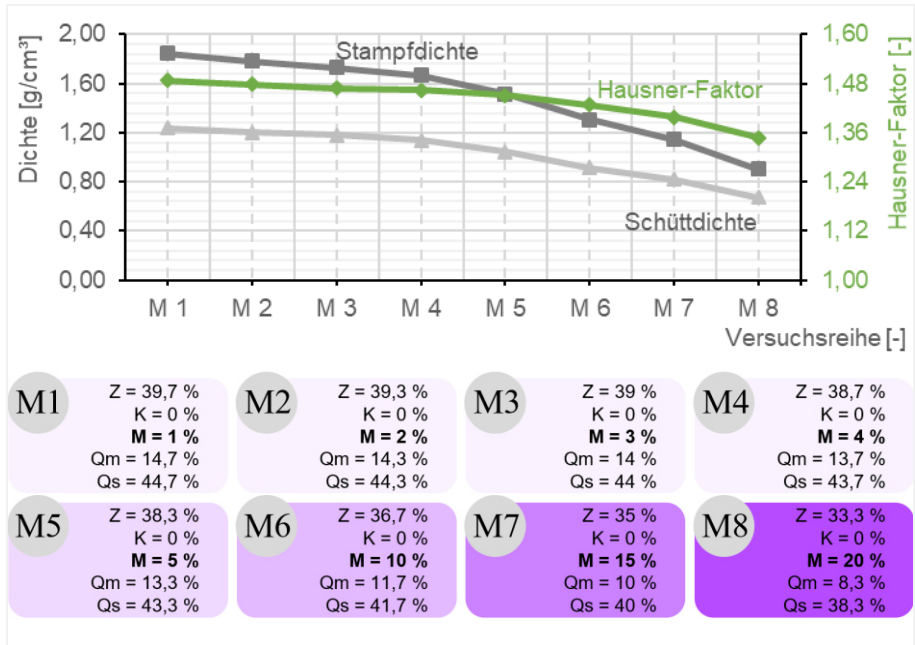


Abb. 3-57: Auswertung der Schütt- und Stampfdichte sowie des Hausner-Faktors von Versuchsserie M

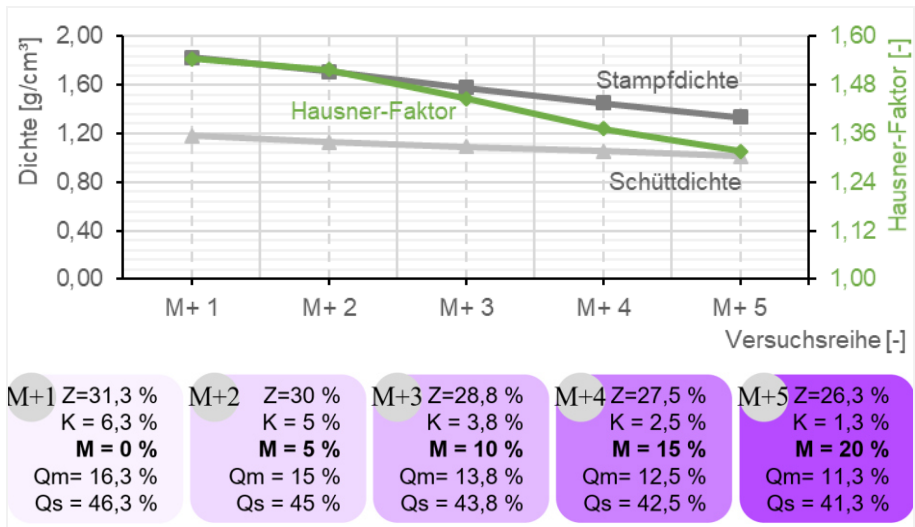


Abb. 3-58: Auswertung der Schütt- und Stampfdichte sowie des Hausner-Faktors von Versuchsserie M+

### 3.5.3.2 Flüssigkeitsanalyse

Die Ergebnisse der Flüssigkeitsanalyse grenzen sich hinsichtlich der erforderlichen Bindemittelflüssigkeitsmenge und dem daraus resultierenden w/z-Wert von den Untersuchungen zum Einfluss des Zement- bzw. Klinkerfeinmehlteils ab. Prinzipiell weist Silicastaub aufgrund des hohen Feinheitsgrads resp. der sehr großen, spezifischen Oberfläche eine hohe Affinität zur Wasserbindung auf, sodass potenziell hinsichtlich der verstärkten elektrostatischen oder van-der-Waals-Kräfte der Bindemittelflüssigkeitsanspruch steigen müsste. Basis für den gegensätzlichen Verlauf ist jedoch neben der Reduktion der Schüttdichte die Verringerung des Zement- bzw. Klinkerfeinmehlsgehalts bei steigendem Silicastaubanteil.

Für Versuchsserie M bedeutet dies, dass im Gegensatz zu allen vorherigen Versuchsserien zum einen der Bindemittelflüssigkeitsanspruch bei Sättigung sowie die vorhandene Bindemittelflüssigkeitsmenge im Probekörper abnimmt und zum anderen gleichzeitig der w/z-Wert bei Sättigung ansteigt. Ein wesentlicher Faktor, der bei der Betrachtung der Ergebnisse in Abb. 3-59 berücksichtigt werden muss, ist, dass sich der Bindemittelflüssigkeitsanspruch sowie die vorhandene Feuchtigkeitsmenge auf den Probekörper beziehen. D. h. dass im Gegensatz zum Punkte-Versuch das Volumen identisch bleibt und dadurch infolge der differierenden Schüttdichte die Masse variiert. Somit ist es essentiell, dass beim Punkte-Versuch die ermittelten Feuchtigkeitsmengen in einen dimensionslosen Parameter konvertiert werden, um anschließend die Ergebnisse in die Bestimmung des Bindemittelflüssigkeitsanspruchs eines Probekörpers übersetzen zu können. In welchem Maß sich die einzelnen Faktoren hinsichtlich des zu ermittelnden w/z-Wertes bei Sättigung verändern, verdeutlicht auch hier die exemplarische Beispielrechnung der Versuchsreihen mit dem minimalen und maximalen Anteil des zu untersuchenden Materials:

$$\left(\frac{w}{z}\right)_{M1} = \frac{m_L \cdot p_W}{V_P \cdot \rho_C \cdot (p_Z + p_{Kl})} = \frac{m_W}{m_Z + m_{Kl}} \overset{\pm \%}{\longleftrightarrow} \frac{m_W}{m_Z + m_{Kl}} = \frac{m_L \cdot p_W}{V_P \cdot \rho_C \cdot (p_Z + p_{Kl})} = \left(\frac{w}{z}\right)_{M8} \quad (3-9)$$

$$0,51 = \frac{17,65 \cdot 0,912}{64 \cdot 1,240 \cdot (0,397 + 0,0)} = \frac{16,10}{31,51} \overset{-30,43 \%}{\longleftrightarrow} \frac{11,20}{14,30} = \frac{12,30 \cdot 0,912}{64 \cdot 0,671 \cdot (0,333 + 0,0)} = 0,78$$

Dabei ist

- $\left(\frac{w}{z}\right)_V$  der Wasser-Zement-Wert inkl. Index zur Versuchsreihe
- $m_W$  die Masse des Wassers [g]
- $m_Z$  die Masse des Zements [g]
- $m_{Kl}$  die Masse des Klinkerfeinmehls [g]
- $m_L$  die Masse der Bindemittelflüssigkeit [g]
- $m_C$  die Masse des Compounds [g]
- $p_W$  die prozentuale Menge des Wassers [%]

- $p_Z$  die prozentuale Menge des Zements [%]
- $p_{Kl}$  die prozentuale Menge des Klinkerfeinmehls [%]
- $V_P$  das Volumen des Probekörpers [cm<sup>3</sup>]
- $\rho_C$  die Schüttdichte des verwendeten Compounds [g/cm<sup>3</sup>]

Dass der Feuchtigkeitsbedarf sowie der damit in Verbindung stehende w/z-Wert bei den Versuchsserien mit allen verwendeten Bestandteilen geringeren Schwankungen unterliegt, bestätigt sich ebenfalls in der Auswertung der Flüssigkeitsanalyse von Serie M+.

Wie in Abb. 3-59 und Abb. 3-60 zu erkennen, befindet sich im Gegensatz zu den vorangegangenen Versuchsserien die vorhandene Bindemittelflüssigkeitsmenge sowie der vorhandene w/z-Wert teilweise über dem Bindemittelflüssigkeitsanspruch bzw. w/z-Wert bei Sättigung pro Probekörper. Inwieweit sich dies auf die AF-Parameter und im Speziellen auf den Absorptionseffekt negativ auswirkt und ob im Umkehrschluss die Reduzierung der aufzudruckenden Bindemittelflüssigkeitsmenge bei konstantem w/z-Wert einen geringeren Absorptionseffekt impliziert, zeigen die Analysen im nachfolgenden Abschnitt 3.5.3.3.

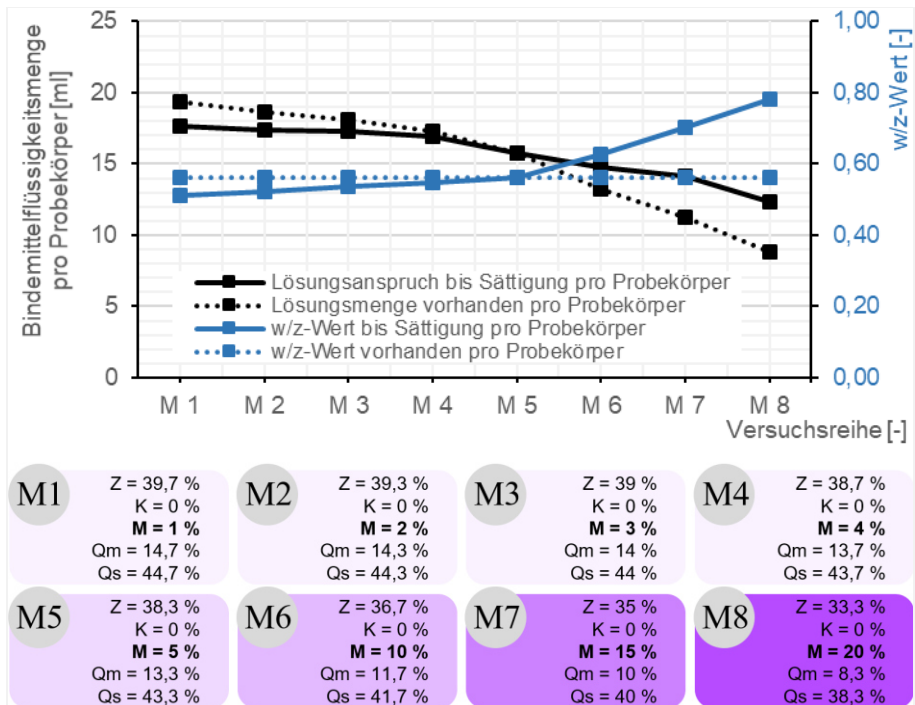


Abb. 3-59: Auswertung der Flüssigkeitsanalyse von Versuchsserie M

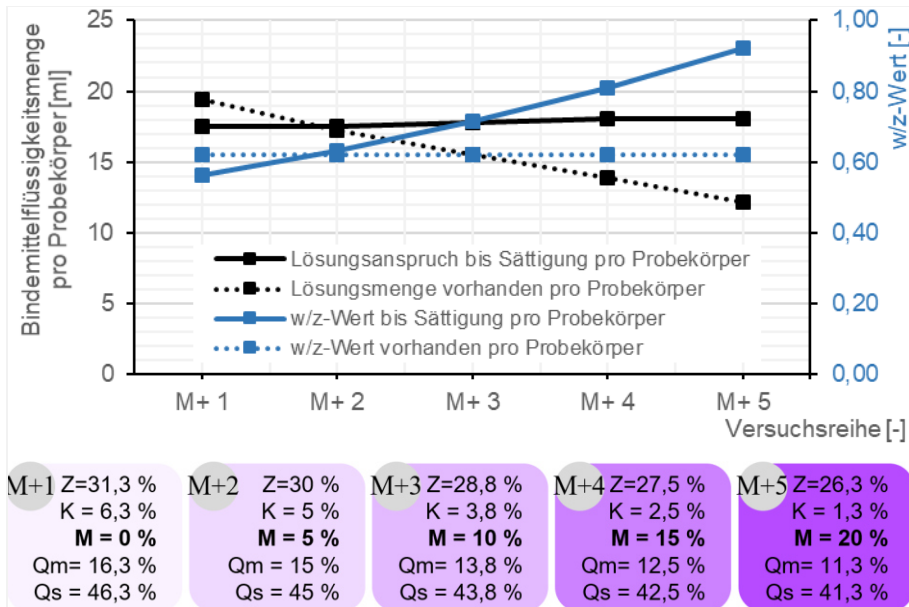


Abb. 3-60: Auswertung der Flüssigkeitsanalyse von Versuchsserie M+

### 3.5.3.3 AF-Parameter

In den vorangegangenen Versuchsserien konnte bereits in gewissem Maße der Einfluss des Silicastaubs auf die AF-Parameter prognostiziert werden, jedoch ließ sich bisher nicht feststellen, welche Anteilsmenge sich positiv wie auch negativ auf die Produktion der 3D-gedruckten Probekörper auswirkt. Zudem fehlte bislang eine möglichst isolierte Betrachtung des Zusatzstoffes, um im Hinblick auf das Herstellungskonzept hinreichende Erkenntnisse gewinnen zu können.

In Bezug auf die durchschnittliche Absorptionstiefe bei Versuchsserie M lässt sich zunächst feststellen, dass der Ausblutungsgrad in Relation zur Serie K stärker abnimmt, da mit jeder Steigerung des Silicastaubanteils auch die eingebrachte Feuchtigkeitsmenge verringert wurde, um den w/z-Wert innerhalb der Versuchsserie konstant zu halten. Bei der Versuchsserie zum Klinkerfeinmehlanteil musste hingegen die eingebrachte Feuchtigkeitsmenge pro Steigerung des Klinkerfeinmehlanteils erhöht werden, um den gleichen w/z-Wert innerhalb der Versuchsserie beizubehalten. Auf das Verhältnis zwischen durchschnittlicher Absorptionstiefe und dem Quotienten aus Bindemittelflüssigkeitsmenge bei Sättigung und eingebrachter Bindemittelflüssigkeitsmenge hat dies hingegen keinen konträren Einfluss. Im Gegenteil – die Auswertung aller vorherigen Versuchsreihen manifestiert, wie in Abb. 3-61 dargestellt, diesen Zusammenhang und verdeutlicht, dass mit einem ähnlichen Quotienten aus Bindemittelflüssigkeitsmenge bei Sättigung und eingebrachter Bindemittelflüssigkeitsmenge der Feinheitsgrad des Pulvers wiederum potenziell für einen weiteren positiven Effekt hinsichtlich einer geringeren durchschnittlichen Absorptionstiefe beiträgt.

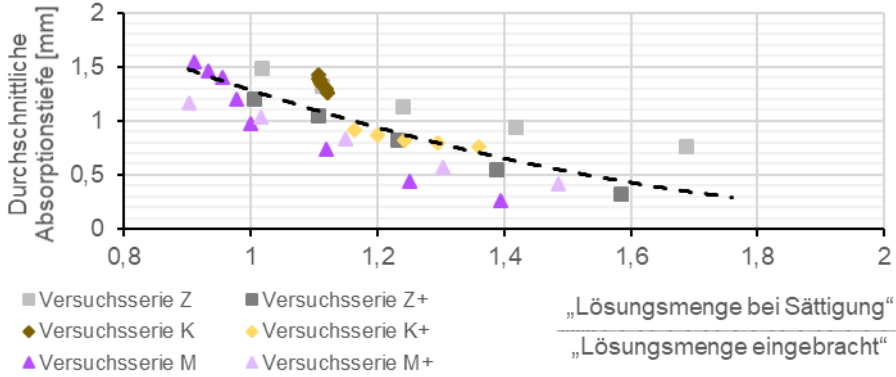


Abb. 3-61: Vergleich differierender Versuchsserien hinsichtlich der Absorptionstiefe

Für den Druckauftrag zeichnet sich bei Versuchsserie M ab einem Silicastaubanteil von 5 M.-% angesichts der durchschnittlichen Absorptionstiefe von  $\leq 0,98$  mm und einem gesättigten Feuchtigkeitsauftrag ein optimales Druckbild ab. Analog dazu weist in Serie M+ die Abstufung mit einem Silicastaubgehalt von 5 M.-% ebenfalls eine nahezu identische Absorptionstiefe auf. Dennoch wurde der Druckauftrag mit „2“ bewertet, da die durchschnittliche Absorptionstiefe bei 1,03 mm lag und die Abgrenzung zwischen einem guten und sehr guten Druckauftrag, wie in den Erläuterungen zu den AF-Parametern beschrieben, bei  $> 0,98$  mm gesetzt wurde. Bei höheren Zugabemengen zeigte sich danach jeweils ein ideales Druckbild.

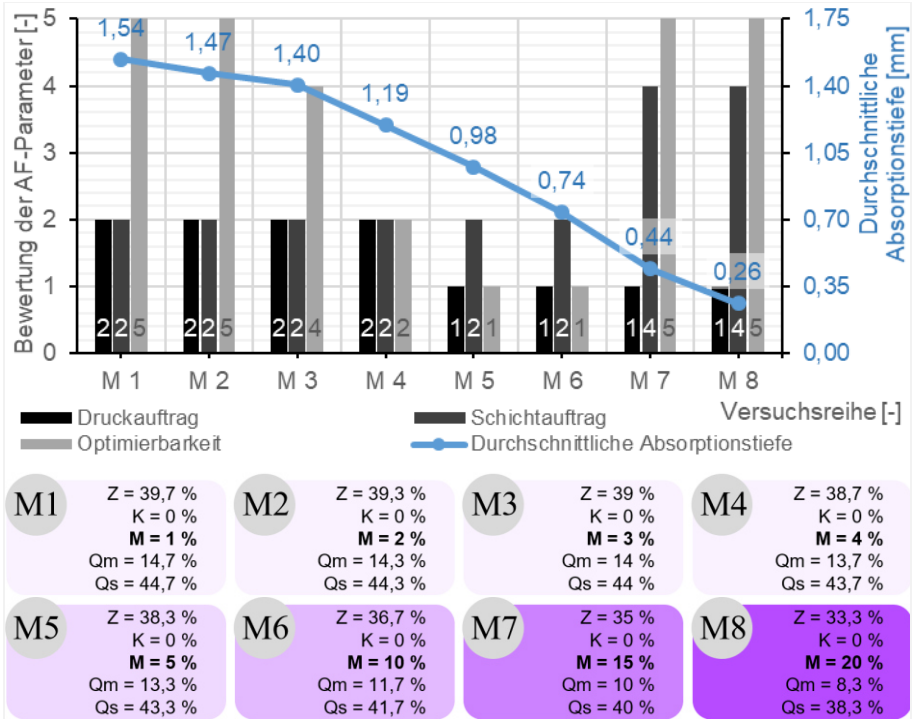


Abb. 3-62: Auswertung der AF-Parameter von Versuchsserie M

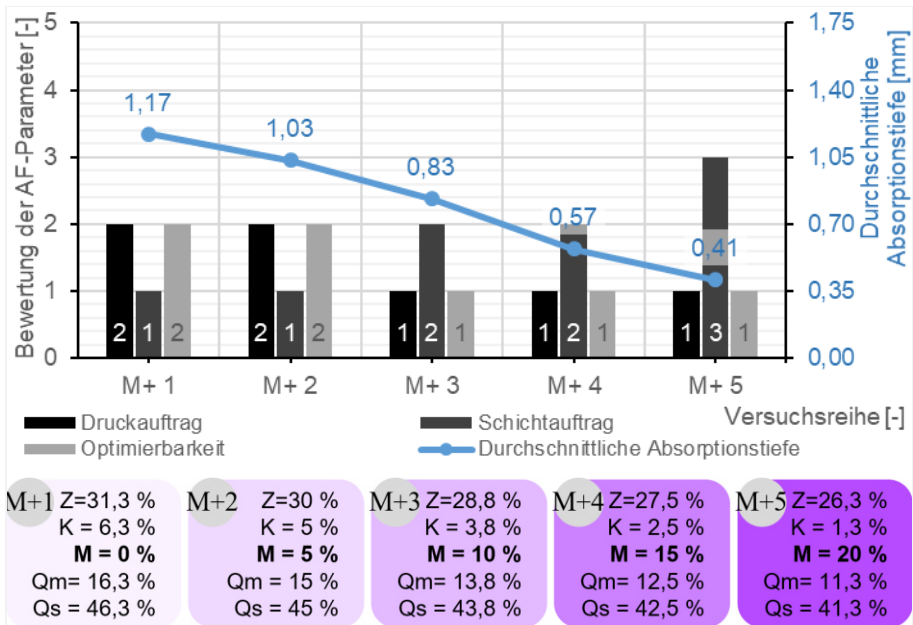


Abb. 3-63: Auswertung der AF-Parameter von Versuchsserie M+

Der Schichtauftrag bei Versuchsserie M wurde bis zu einem Silicastaubanteil von 15 M.-% nach dem definierten Bewertungsschema mit „2“ bewertet, was sich anhand der Analyse zur Fließfähigkeit der unterschiedlichen Trockenmörtelzusammensetzungen in gewissem Maße ableiten lässt. Wie in der Pulveranalyse bereits erkannt, neigt Silicastaub sehr stark zur Agglomeration, sodass bei einem zu großen Gehalt ein negativer Schichtauftrag forciert wird, der im ungünstigsten Fall aufreißt. Für Versuchsserie M7 und M8 konnte dies bei der analysierten Produktion nicht festgestellt werden, jedoch zeigten sich bereits deutliche Striemen im Schichtauftrag. Des Weiteren nahmen die aufgetragenen Partikel kaum bis gar nicht die Feuchtigkeit des vorherigen Layers auf, sodass der „frisch in frisch“ Auftrag nicht gewährleistet werden konnte. Zwangsläufig verlief die anschließende Optimierbarkeit bei den Versuchsserien mit einem schlecht bewerteten Schichtauftrag (mindestens „4“) ebenfalls suboptimal. In Versuchsserie M+ ließ sich gleichermaßen eine negative Entwicklung des Schichtauftrages mit zunehmenden Silicastaubgehalt feststellen. Anhand der erbrachten Ergebnisse konnte somit die in Abschnitt 2.3.3 prognostizierte Verbesserung des Schichtauftrages infolge eines erhöhten Silicastaubgehalts nicht bestätigt werden. Sobald die Zugabe einen Anteil von 15 M.-% im Compound überschreitet, wirkt sich dies zum Teil in einem erheblicheren Maße negativ auf den AF-Parameter aus.

Bei der Analyse der Optimierbarkeit von Versuchsserie M zeigen sich insgesamt Parallelen zur Auswertung von Serie K. Für beide Versuchsserien gilt, dass mit einem extremen Anteil des Zusatzstoffes – entweder ein sehr geringer oder ein sehr großer Anteil – keine gute Optimierbarkeit sichergestellt werden kann. Ein weiterer, relevanter



Einflussfaktor für die Optimierbarkeit war in vergangenen Versuchsserien die durchschnittliche Absorptionstiefe. Für Serie M stellte sich jedoch kein positiver Zusammenhang zwischen einer geringeren Absorptionstiefe und einer verbesserten Optimierbarkeit ein, da die Probekörper mit einem Silicastaubanteil von  $\geq 15\%$  keine ausreichende 3DP-Standfestigkeit aufwiesen. Dies lässt wiederum darauf zurück-schließen, dass die Relevanz der 3DP-Standfestigkeit für die Optimierbarkeit höher einzustufen ist als die durchschnittliche Absorptionstiefe. Da die Probekörper der Versuchsserie M kein Klinkerfeinmehl enthielten, zeigten sich gerade bei den Abstufungen mit sehr geringen Silicastaubgehalten vergleichbare Probleme zur Versuchsserie Z bzgl. der Optimierbarkeit sowie einer geringen 3DP-Standfestigkeit. Die Probekörper waren bei der geometrischen Nachbearbeitung teilweise zu weich und zerfielen, wie bereits in Abb. 3-36 veranschaulicht, aufgrund von aufsteigenden Luftblasen während der Lagerung im Wasser.

Die Optimierbarkeit verbesserte sich zwar mit einem höheren Anteil des Zusatzstoffes, jedoch kehrte sich der positive Einfluss, wie in Abb. 3-62 illustriert, ab Versuchsreihe M7 wieder um. Die zwischenzeitliche Verbesserung kann nicht wie bei Serie K auf eine chemische Reaktion zurückgeführt werden, sondern beruht eher auf den physikalischen Effekten bzw. interpartikulären Haftkräften. Den allgemeinen Erkenntnissen nach beginnt nämlich die chemische Reaktion von Silicastaub und Portlandit nicht in den ersten Stunden der Hydratation. Da die einzelnen Silicastaubpartikel jedoch als Kristallisationskeime für die Hydratationsprodukte des Zements dienen, haben die mit Silicastaub angereicherten Betone bzw. Trockenmörtelzusammensetzungen potenziell eine erhärtungsbeschleunigende Wirkung, sodass im Gegensatz zu den Probekörpern der Serie Z früher eine ausreichende Festigkeit zu erwarten ist, die eine optimale Nachbearbeitung ermöglicht. Sofern dem Compound zusätzlich das sehr feine und schnell reagierende Klinkerfeinmehl zugesetzt wird, fällt die Auswertung der Optimierbarkeit, wie in der Analyse von Versuchsserie M+ (Abb. 3-63) dargestellt, durchweg positiv aus.

Die mangelnde Optimierbarkeit der Proben aus Versuchsreihe M7 und M8 entsteht als Konsequenz aus dem unzureichenden Schichtenverbund. Dies bedeutet, dass voraussichtlich die sehr feinen Silicastaubpartikel Feuchtigkeit gebunden haben und somit die notwendige Hydratation zur Festigkeitsentwicklung behindert oder sogar verhindert wird. Demzufolge dürfte bei einem höheren Feuchtigkeitseintrag resp. einem geringeren Verhältnis zwischen „Bindemittelflüssigkeitsmenge bei Sättigung“ und „eingebrachter Bindemittelflüssigkeitsmenge“ sowohl der Schichtauftrag als auch die anschließende Optimierbarkeit positiver ausfallen.

### **3.5.3.4 Festbetonuntersuchungen**

Hinsichtlich der Auswertung zur Druckfestigkeitsentwicklung lassen sich Parallelen zwischen den Versuchsserien zum Silicastaubgehalt und Klinkerfeinmehlanteil ziehen. Zum einen wirkt sich der Einsatz des jeweiligen Zusatzstoffes bis zu einem geringen Anteil in der Trockenmörtelzusammensetzung positiv auf die Druckfestigkeit nach 28 Tagen aus und zum anderen kann diese Festigkeit nochmals gesteigert werden, wenn alle Bindemittelbestandteile im Compound berücksichtigt wurden.

Im Detail zeigt sich in der Auswertung zur Druckfestigkeit von Versuchsserie M, dass sich die Festigkeitsentwicklung bis zu einem Anteil von 5 M.-% positiv entwickelt. Dies lässt sich grundsätzlich auf die Kombination aus einer höheren 3DP-Standfestigkeit sowie einer besseren Optimierbarkeit beziehen. Ab einem Silicastaubgehalt von 15 M.-% fiel diese Kombination wie bei den sehr geringen Anteilsmengen negativ aus, sodass die Probekörper erneut zwangsläufig Beschädigungen aufwiesen und sich letztendlich die Druckfestigkeit der 3D-gedruckten Betonstrukturen reduzierte. Hintergrund für die geringe 3DP-Standfestigkeit war, wie bereits in den AF-Parametern thematisiert, der negative Schichtauftrag sowie der daraus resultierende, mangelhafte Verbund zwischen den einzelnen Layern. Die Versuchsreihen M4 bis M6 zeigten in dieser Hinsicht keine Beeinträchtigungen, sodass die relativ geringen Festigkeitsunterschiede anderen Faktoren zu zuordnen sind. Neben einer potenziellen Auswirkung der Schüttdichte bzw. einer Steigerung der Porosität der Betonmatrix wirkt sich, wie in Abschnitt 3.3.1.4 prognostiziert, die Bindemittelflüssigkeitsmenge bei Sättigung in Verbindung mit der aufgedruckten Feuchtigkeitsmenge resp. dem w/z-Wert auf die Druckfestigkeit aus. In diesem Zusammenhang zeigt sich, dass bei Versuchsserie M mit einem ausgeglichenen Verhältnis zwischen „Bindemittelflüssigkeitsmenge bei Sättigung“ und „Bindemittelflüssigkeitsmenge eingebracht“ die höchste Druckfestigkeit zu erwarten ist. Gleiches lässt sich bei Versuchsserie M+ feststellen. Die Abstufung mit einem Silicastaubanteil von 5 M.-% weist neben der höchsten Druckfestigkeit dieser Serie ebenfalls ein nahezu ausgeglichenes Verhältnis der beiden Feuchtigkeitsfaktoren auf.

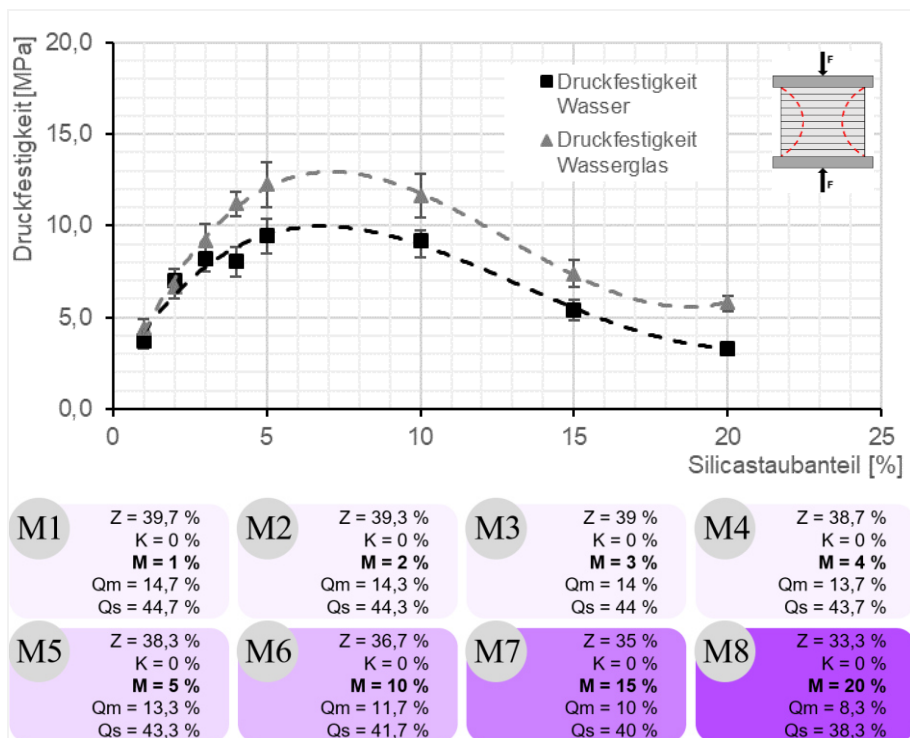


Abb. 3-64: Auswertung der Druckfestigkeit von Versuchsserie M

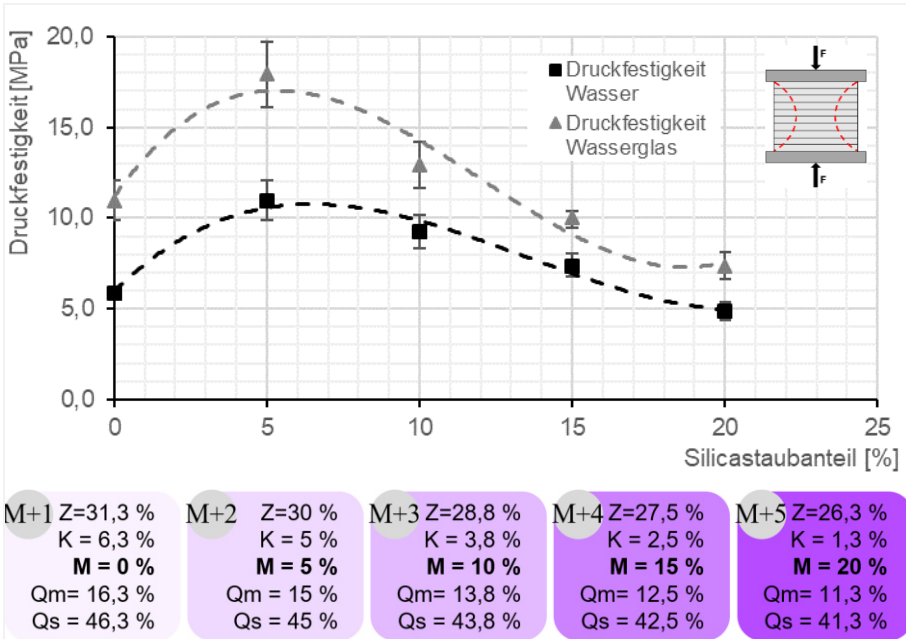


Abb. 3-65: Auswertung der Druckfestigkeit von Versuchsserie M+

Im direkten Vergleich der realisierbaren Druckfestigkeiten von Versuchsserie K und M sowie in Gegenüberstellung der weiterführenden Serien K+ und M+ zeigt sich im Allgemeinen, dass die Probekörper zum Einfluss des Silicastaubanteils höhere Festigkeiten erreichen. Für diese Gegenüberstellung eignen sich alle Versuchsreihen, bei denen die AF-Parameter mindestens mit „2“ eingestuft wurden, um etwaige Einflüsse infolge von Beschädigungen der Proben oder negativen Druck- und Schichtaufträgen ausschließen zu können. Somit fallen zunächst in die engere Betrachtung die Versuchsreihen M4 bis M6 und K4 bis K6, die jeweils nur 4 – 10 % des jeweiligen Zusatzstoffes beinhalten. Anhand der Analyse zu den wassergelagerten Proben errechnet sich eine durchschnittliche Druckfestigkeitssteigerung von rund 26 %. Die prozentuale Erhöhung der Festigkeit reduziert sich bei den Probekörpern aus dem Wasserglas auf ca. 5 %. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Rückschlüsse nicht einzig auf den Zusatzstoff und die Feuchtigkeitsmenge gezogen werden können. Wie in den Grundlagen zum Silicastaub erläutert, reagiert der puzzolanische Zusatzstoff während der Hydratation mit dem zuvor entwickelten Portlandit zu weiteren wasserunlöslichen C-S-H-Phasen. Die dabei neu entstehende Kristallbildung optimiert die Betonmatrix, da die hexagonalen CH-Kristallblättchen (Abb. 3-66 c) eine wesentlich geringere Festigkeit als die engmaschigen C-S-H-Nadeln (Abb. 3-66 d) aufweisen. Des Weiteren bewirken die feinen Elemente potenziell eine Vergleichmäßigung der Materialstruktur, in der weniger, große Poren bzw. ein gesteigerter Gelporenanteil entsteht und dadurch letztendlich eine geringere Wasserdurchlässigkeit, höhere Festigkeit sowie ein besserer Widerstand gegen mechanischen Abrieb erreicht wird.

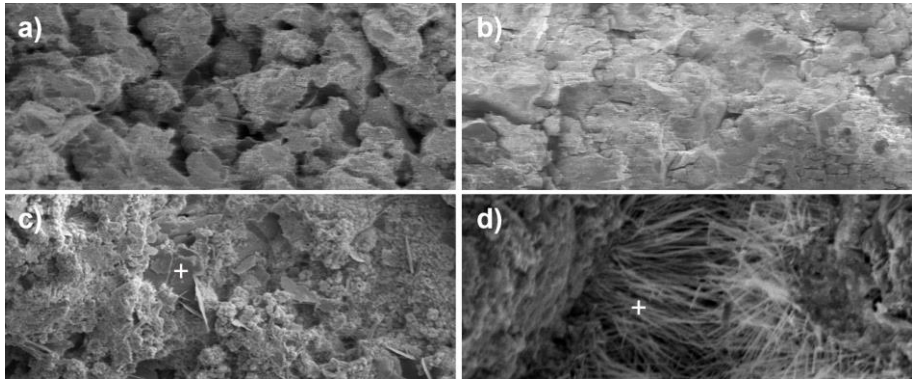


Abb. 3-66: REM-Analyse [14]:

- a) offenporige Betonmatrix infolge unzureichender Nachbehandlung
- b) dichte Betonmatrix infolge der Wasserglas-Nachbehandlung
- c) Exemplarisch dargestelltes Portlanditkristall (mit + gekennzeichnet)
- d) Exemplarisch dargestellte C-S-H-Nadeln (mit + gekennzeichnet)

Vorteile der Wasserglasnachbehandlung waren neben der abriebfesteren Oberflächenstruktur die Abdichtung im Randbereich bzw. die Porositätsminimierung der Probekörper. Dies resümiert grundsätzlich aus zwei Grundvarianten. Zum einen aus der physikalischen Verfestigung infolge Dehydratation bzw. Trocknung oder Wasserentzug sowie zum anderen aus einer chemischen Verfestigung bzw. Härtung [142]. Im Randbereich können beide Varianten unter dem Rasterelektronenmikroskop, wie in Abb. 3-66 b) illustriert, beobachtet werden. Neben der Verdunstung des Wassers und einer prinzipiellen Ausgelierung reagiert das Wasserglas mit dem Kohlendioxid aus der Umgebungsluft und startet die chemische Erhärtung. Im Inneren hingegen reagiert der Silicatbestandteil des Wasserglases mit dem Calciumhydroxid, um weitere C-S-H-Phasen bilden zu können. Da mithilfe der Wasserglasnachbehandlung u. a. eine vergleichbare chemische Verfestigung zur Silicastaubreaktion induziert wird, verringert sich der Einfluss des Silicastaubs, wie beschrieben von 26 % auf 5 %.

## **3.6 Einfluss der Gesteinskörnung und der Belastungsrichtung**

### **3.6.1 Allgemeines**

Nachdem in den vorangegangenen Versuchsserien die Einflüsse der divergierenden Bindemittel auf die Voruntersuchungen (Pulver- und Flüssigkeitsanalyse), den Herstellungsprozess sowie die Festbetoneigenschaften analysiert wurden, liegt nun der Fokus auf der Gesteinskörnung. Des Weiteren wird in der begleitenden Versuchsserie GK° die Belastbarkeit der gedruckten Probekörper in verschiedenen Richtungen geprüft, um eine etwaige Isotropie der 3D-gedruckten Betonstrukturen feststellen zu können. Wesentlicher Bestandteil der Versuchsserie GK und GK° ist, dass die prozentualen Bindemittelanteile konstant bleiben, um den Einfluss der Gesteinskörnung isoliert betrachten zu können.

### **3.6.2 Versuchsprogramm**

Für das folgende Versuchsprogramm galt es vorab zu eruieren, welche anteilmäßige Zusammensetzung sich in Bezug auf den Bindemittel- und Zuschlagstoffgehalt für die weiteren Analysen eignet. Da im Allgemeinen grobkörnigere Gemische neben einem reduzierten Wasseranspruch je Volumeneinheit eine verringerte spezifische Oberfläche besitzen und dadurch prozentual weniger Zementleim notwendig ist, um die einzelnen Partikel miteinander zu verkitten, wurde Versuchsreihe GK1 neben dem Bindemittelanteil von 40 M.-% ausschließlich mit dem grobkörnigeren Quarzsand ergänzt. Infolgedessen besteht die Möglichkeit, dass mit einem höheren Quarzsandanteil die einzelnen Layer besser miteinander verbunden sind und die Betonmatrix dichter wird. Dementgegen steht, dass mit einer zu grobkornreichen Mischung wie im konventionellen Fertigungsverfahren der Compound potenziell stärker zum Entmischen neigt und mit einer feinkörnigeren Zusammensetzung die Gefahr von Wasserabsonderungen minimiert wird. Zur Analyse dessen wurde der Quarzmehlanteil konstant je Versuchsreihe um 5 M.-% erhöht und antiproportional dazu der Quarzsandgehalt verringert.

Da sich die Packungsdichte prinzipiell steigern lässt, wenn die Haufwerke nicht aus annähernd gleich großen Körnern bestehen, galt es auch in diesem Versuchsprogramm zu untersuchen, inwiefern die Korngrößenverteilung im 3DP-Verfahren einen Einfluss auf eine dichtere Betonmatrix nimmt. Des Weiteren reduziert sich infolge einer gemischtkörnigen bzw. dichteren Trockenmörtelzusammensetzung der Zementleimbedarf, da weniger Hohlräume vorhanden sind, die gefüllt werden können. Ferner sind wiederum mit einer dichteren Matrix verbesserte Festbetoneigenschaften zu erwarten.

Zur begleitenden Analyse der Belastungsrichtung wurden die Probekörper für den Lasteintrag parallel sowie orthogonal zur Schicht nach demselben Schema hergestellt wie alle Proben zuvor. Für die Probekörper, die bei der Druckfestigkeitsprüfung diagonal zum Schichtaufbau geprüft werden sollten, wurde die STL-Datei in der 3D-Druck-Software digital um 45° gedreht. Somit veränderte sich der gedruckte Layer angefangen von der Spitze einer Kante bis zum diagonalen Querschnitt und wieder zurück.

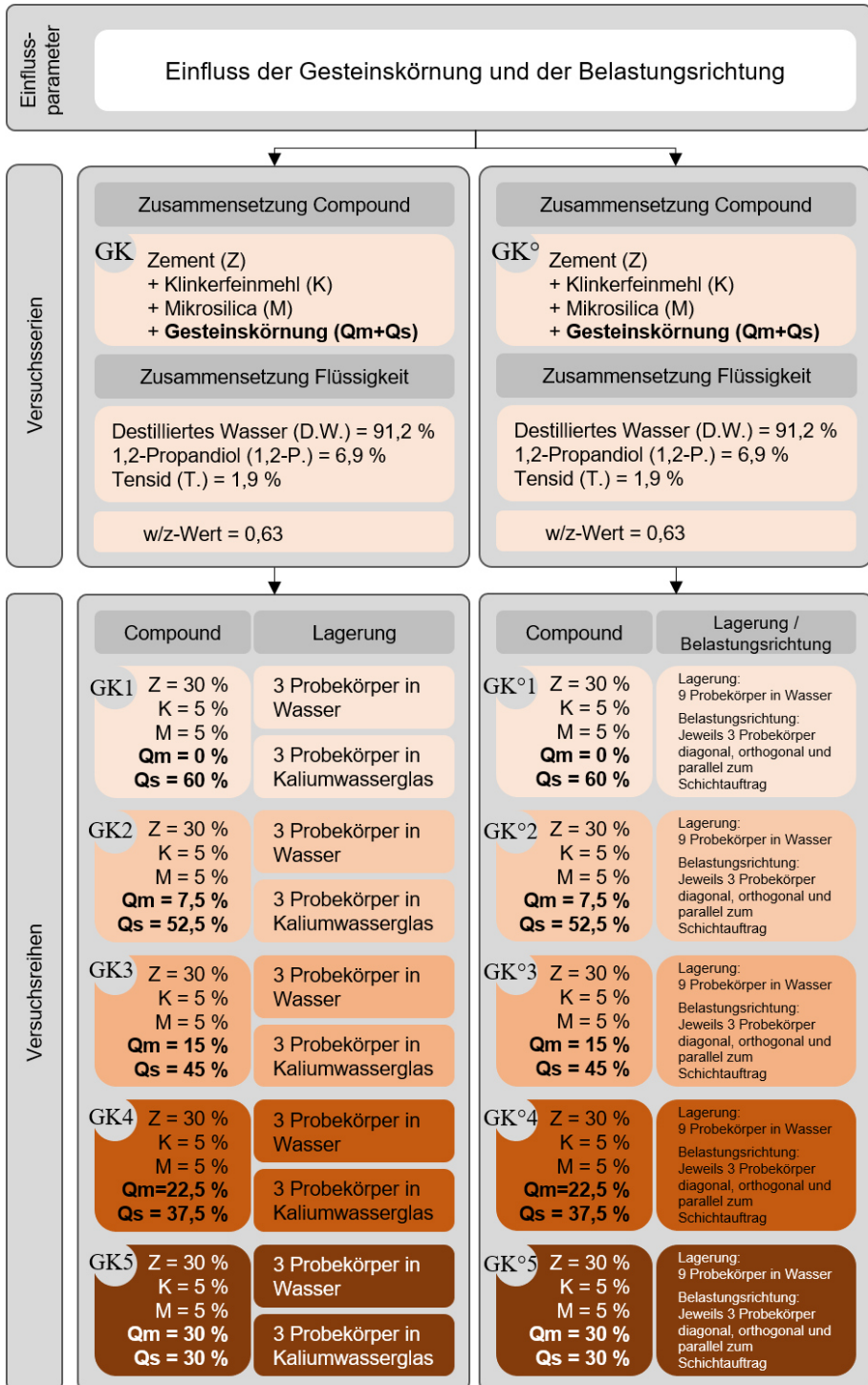


Abb. 3-67: Übersicht der Versuchsserien GK und GK°

### 3.6.3 Versuchsergebnisse und Auswertung

#### 3.6.3.1 Pulveranalyse

Die Pulveranalyse für Versuchsserie GK und GK<sup>o</sup> wird aufgrund der identischen Trockenmörtelmischungen zusammengefasst, sodass im Folgenden nur die Ergebnisse der Versuchsserie GK analysiert werden. Eine Ausnahme ergibt sich aufgrund der variierenden Belastungsrichtung bei der Festbetonanalyse.

Die Unterschiede in der Partikelgrößenverteilung spiegeln die entsprechenden Anteile der beiden Gesteinskörnungssorten wider und bestätigen die Erwartung, dass mit einem höheren Quarzsandgehalt die Trockenmörtelzusammensetzung insgesamt grobkörniger ausfällt. Wesentlicher Unterschied zur Versuchsserie M ist, dass der Zuschlag nicht zur Agglomeration neigt und sich somit kein gegensätzliches Verhalten hinsichtlich der Partikelgrößenverteilung einstellen kann.

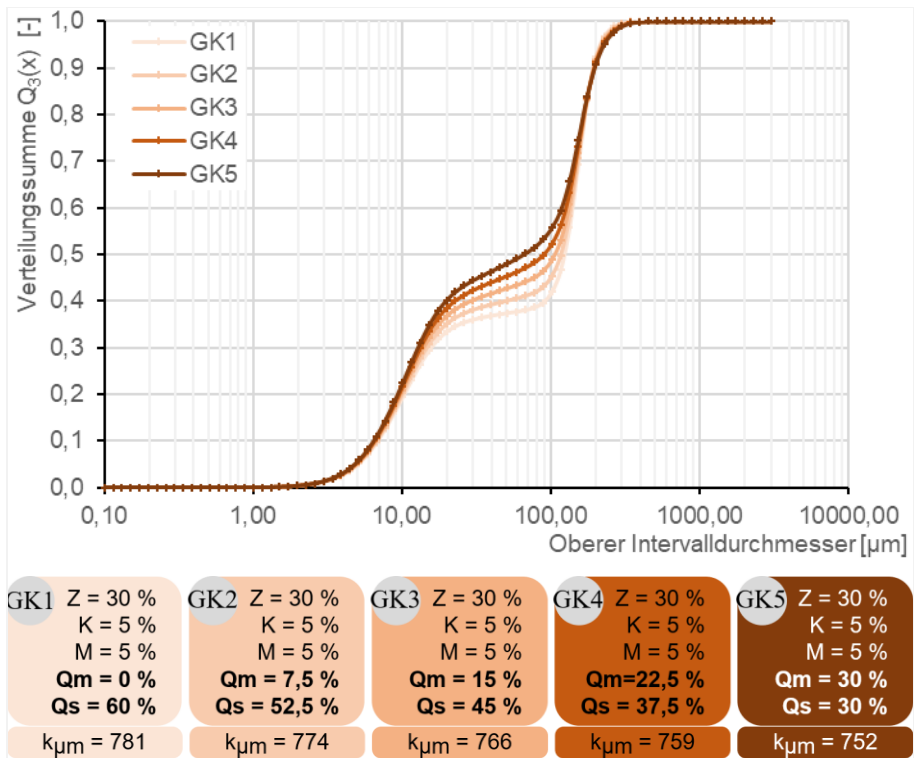


Abb. 3-68: Partikelgrößenverteilung der Versuchsserie GK

In Bezug auf die Fließfähigkeit setzen sich die Ergebnisse aus den Vorversuchen zu den einzelnen Bestandteilen sowie den bereits begutachteten Versuchsserien in der Analyse zum Einfluss der Gesteinskörnung fort. Denn auch hier bestätigt sich die Korrelation zwischen einer feinkörnigeren Partikelgrößenverteilung bzw. einem

geringeren  $k_{\mu m}$ -Wert und einem kohäsiveren Fließverhalten. In der reduzierten Übersicht der Fließfähigkeit der unterschiedlichen Trockenmörtelzusammensetzungen weist Versuchsreihe GK1 ein ähnlich fließfähiges Verhalten auf wie Versuchsreihe Z+1 bei analogem Feinheitsgrad ( $k_{\mu m, GK1} = 781 \rightarrow ff_c = 2,77$ ;  $k_{\mu m, Z+1} = 783 \rightarrow ff_c = 3,03$ ). Mit zunehmendem Quarzmehlgehalt steigen die Kohäsionskräfte, sodass bei ausgeglichenem Verhältnis von Quarzmehl zu Quarzsand und einem Bindemittelgehalt von weiterhin 40 M.-% der Compound ein sehr kohäsives Materialverhalten aufweist.

Hinsichtlich der Verarbeitbarkeit beim konventionellen Herstellungsverfahren wäre je nach Wassergehalt eine steif, klebrige Konsistenz zu erwarten. Für das 3DP-Verfahren besteht hingegen in Bezug auf die Erfahrungen vergleichbarer Fließfähigkeiten potenziell keine Beeinträchtigung für den Schichtauftrag. Inwiefern sich diese Prognose bestätigt, wird in der Auswertung der AF-Parameter beschrieben.

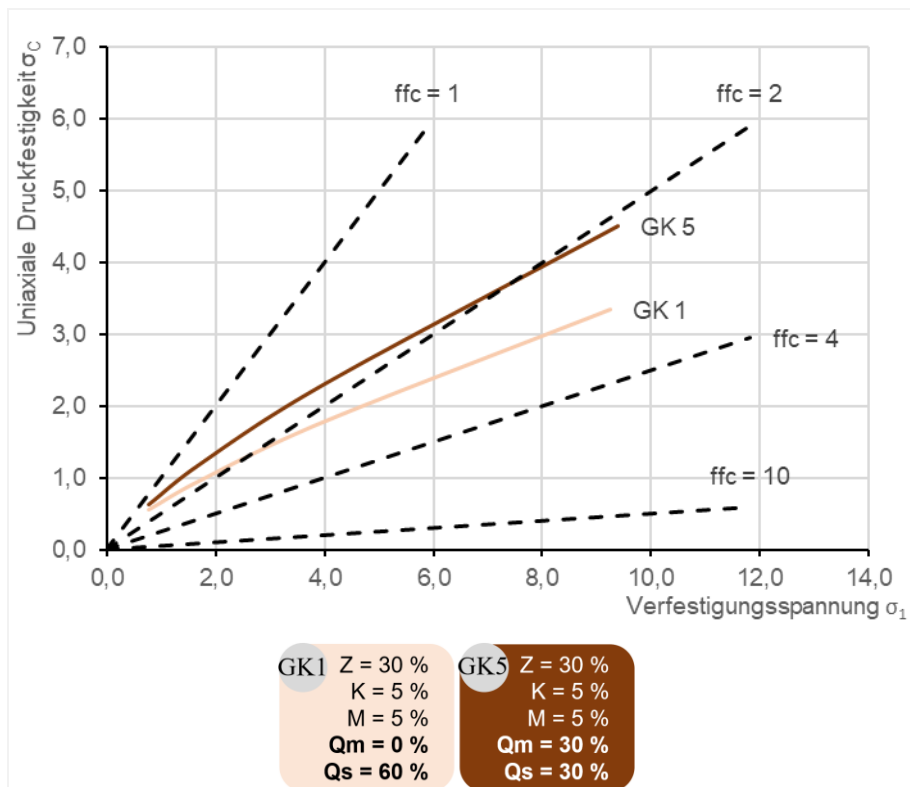


Abb. 3-69: Analyse der Fließfähigkeit der Versuchsserien GK

Die Analyse der Packungsdichte war für die vorliegende Versuchsserie ein wesentlicher Untersuchungsaspekt in Bezug auf die resultierende Druckfestigkeit der 3D-gedruckten Betonstrukturen. Da die Schüttdichte in den vorangegangenen Untersuchungen ein potenzieller Faktor für die Endfestigkeit war und dieser aufgrund



der zusätzlichen Modifikationen des Bindemittelgehalts in der Analyse zum Teil überlagert wurde, konnte mit der Versuchsserie zum Einfluss der Gesteinskörnung erstmals eine isoliertere Betrachtung vorgenommen werden.

Im Allgemeinen zeigt sich, dass bei einer stetigen Kornverteilung und flacher werdenden Summenlinie der Feinstoffe die Packungsdichte gegenüber steileren Summenlinien zunimmt. Dies würde prinzipiell für die Zusammensetzungen mit einem höheren Quarzmehlanteil (wie bspw. in GK5) sprechen, da die Verteilungskurve keinerlei Ausfallkörnung und einen nahezu stetigen Anstieg der Summenlinie vorweist. Andererseits lässt sich nach Reschke [143] auch eine größere Packungsdichte durch eine Mischung aus normalfeinen Bestandteilen zuzüglich Ersatzstoffen deutlich höherer Feinheit realisieren.

Beides bestätigte sich mit der Auswertung der Schütt- und Stampfdichte sowie des Hausner-Faktors von Versuchsserie GK. Zum einen zeigt sich in Abb. 3-70 ein leichter Anstieg der Stampfdichte mit zunehmendem Quarzmehlgehalt und demgegenüber steht die höhere Schüttdichte bei der Abstufung mit dem höchsten Quarzsandanteil. Da während dem Herstellungsprozess keine Verdichtungsenergie induziert werden kann, deutet dies auf eine mögliche Steigerung der Druckfestigkeit mit höherem Quarzsandgehalt hin.

Ein weiterer, zu berücksichtigender Faktor ist der Hausner-Faktor. Pulver weisen mit einem niedrigeren Quotienten aus Stampfdichte und Schüttdichte (= Hausner-Faktor) im Allgemeinen eine bessere Fließfähigkeit auf. Dies bestätigte sich bereits in allen Versuchsserien zuvor, jedoch konnte auch dieser Einfluss nur in der Serie GK nahezu isoliert betrachtet und nachgewiesen werden.

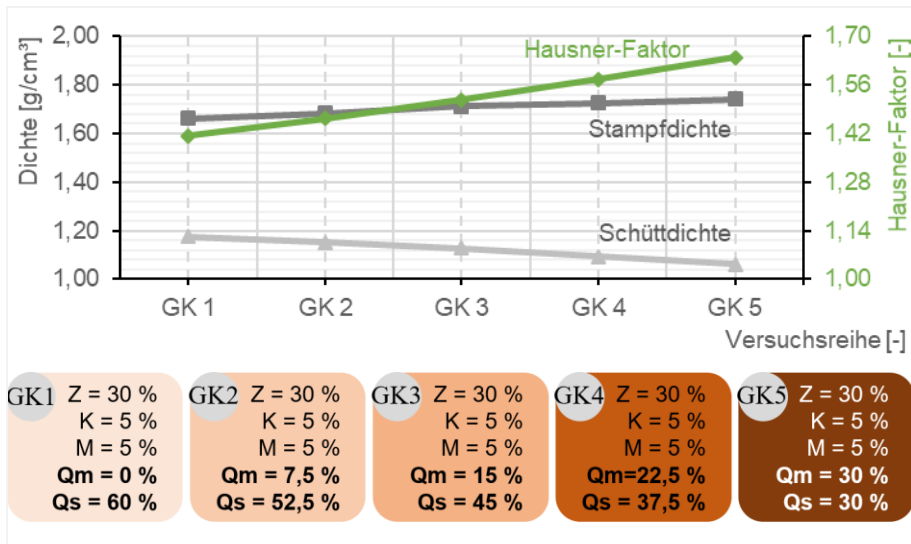


Abb. 3-70: Auswertung der Schütt- und Stampfdichte sowie des Hausner-Faktors von Versuchsserie GK

### 3.6.3.2 Flüssigkeitsanalyse

Bei der Betrachtung der Ergebnisse aus der Flüssigkeitsanalyse ergibt sich erstmals sowohl für den Bindemittelflüssigkeitsanspruch bei Sättigung in Kombination mit der vorhandenen Bindemittelflüssigkeitsmenge je Probekörper als auch für die in Abhängigkeit stehenden w/z-Werte ein relativ stetiges Verhältnis. Dies kann zunächst damit begründet werden, dass die erforderliche Bindemittelflüssigkeitsmenge bis zur Sättigung beim Punkte-Versuch für beide Gesteinskörnungsvarianten auf einem sehr geringen Niveau waren und sich zudem kaum unterschieden. Wesentlicher Einflussparameter für die Unterschiede hinsichtlich des Bindemittelflüssigkeitsanspruchs sowie des zugehörigen w/z-Wertes sind neben den höheren Kontaktwinkelwerten beim Quarzmehl die verringerte Packungsdichte resp. Schüttdichte der Versuchsreihe GK5 im Gegensatz zur Abstufung GK1. Obwohl der feinere Compound von Versuchsreihe GK5 prinzipiell mehr Feuchtigkeit bei Sättigung benötigen würde, zeigt sich insbesondere in der Gegenüberstellung der erforderlichen w/z-Werte in Gleichung (3-10) bei Sättigung des Compounds mit dem minimalen und maximalen Quarzmehl- bzw. Quarzsandanteil, dass die Schüttdichte als signifikanter Einflussparameter fungiert. Demzufolge weisen die Probekörper der Versuchsreihe GK5 im Gegensatz zur Abstufung GK1 eine geringere Masse auf. Des Weiteren bestätigt sich, dass sich mit einer geringeren Masse die Partikelanzahl im Probekörper reduziert und somit eine Verringerung der erforderlichen Bindemittelflüssigkeitsmenge eintritt.

$$\left(\frac{w}{z}\right)_{\text{GK1}} = \frac{m_L \cdot p_W}{V_P \cdot \rho_C \cdot (p_Z + p_{\text{KI}})} = \frac{m_W}{m_Z + m_{\text{KI}}} \overset{\pm \%}{\longleftrightarrow} \frac{m_W}{m_Z + m_{\text{KI}}} = \frac{m_L \cdot p_W}{V_P \cdot \rho_C \cdot (p_Z + p_{\text{KI}})} = \left(\frac{w}{z}\right)_{\text{GK5}} \quad (3-10)$$

$$0,61 = \frac{17,68 \cdot 0,912}{64 \cdot 1,176 \cdot (0,30 + 0,05)} = \frac{16,12}{26,34} \overset{-3,66 \%}{\longleftrightarrow} \frac{15,52}{23,79} \overset{-9,69 \%}{\longleftrightarrow} \frac{17,03 \cdot 0,912}{64 \cdot 1,062 \cdot (0,30 + 0,05)} = 0,65$$

Dabei ist

$\left(\frac{w}{z}\right)_V$	der Wasser-Zement-Wert inkl. Index zur Versuchsreihe
$m_W$	die Masse des Wassers [g]
$m_Z$	die Masse des Zements [g]
$m_{\text{KI}}$	die Masse des Klinkerfeinmehls [g]
$m_L$	die Masse der Bindemittelflüssigkeit [g]
$m_C$	die Masse des Compounds [g]
$p_W$	die prozentuale Menge des Wassers [%]
$p_Z$	die prozentuale Menge des Zements [%]
$p_{\text{KI}}$	die prozentuale Menge des Klinkerfeinmehls [%]
$V_P$	das Volumen des Probekörpers [cm <sup>3</sup> ]
$\rho_C$	die Schüttdichte des verwendeten Compounds [g/cm <sup>3</sup> ]

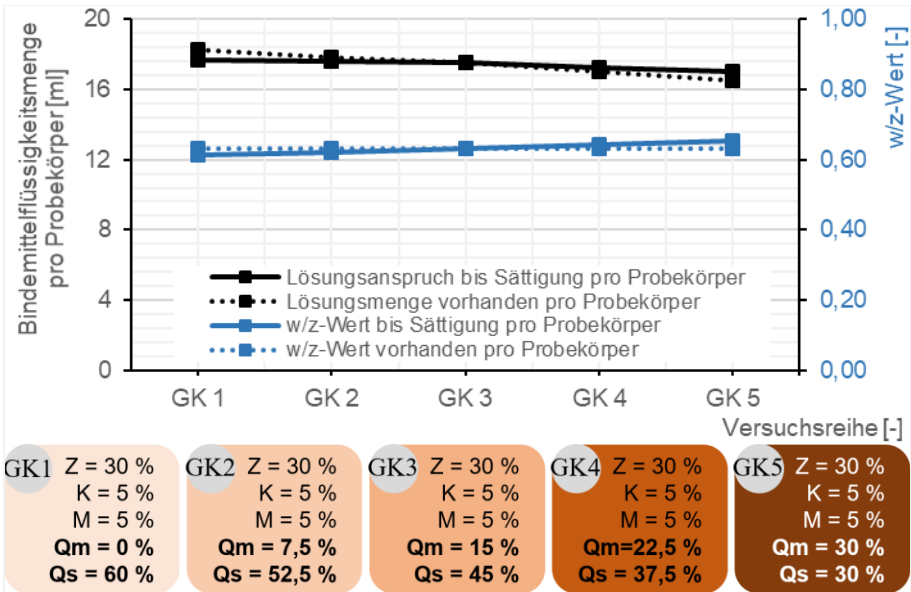


Abb. 3-71: Auswertung der Flüssigkeitsanalyse von Versuchsserie GK

3.6.3.3 AF-Parameter

Aufgrund der vorangegangenen Ergebnisse zur Flüssigkeitsanalyse ist zu erwarten, dass die Bewertung des ersten AF-Parameters – dem s. g. Druck- bzw. Feuchtigkeitsauftrag – bei allen Versuchsreihen der Versuchsserie GK identisch ausfällt. Dies lässt sich einerseits damit begründen, dass, wie in Abschnitt 3.2.4.3 im Detail erläutert, alle Druckvorgänge wiederholt wurden, bei denen der Druckauftrag schlechter „2“ ausgefallen ist. Jedoch kann andererseits im Vergleich der Versuchsserie GK und K festgehalten werden, dass sich bei ausschließlich minimalen Veränderungen des Verhältnisses zwischen „Bindemittelflüssigkeitsmenge bei Sättigung“ und „eingebachter Bindemittelflüssigkeitsmenge“ die durchschnittliche Absorptionstiefe nur geringfügig variiert und daraufhin prinzipiell keine Unterschiede in der Bewertung des Druckauftrags zu erwarten sind. Des Weiteren decken sich die Ergebnisse der Serie GK mit dem Verlauf der Trendlinie aus den vorherigen Analysen.

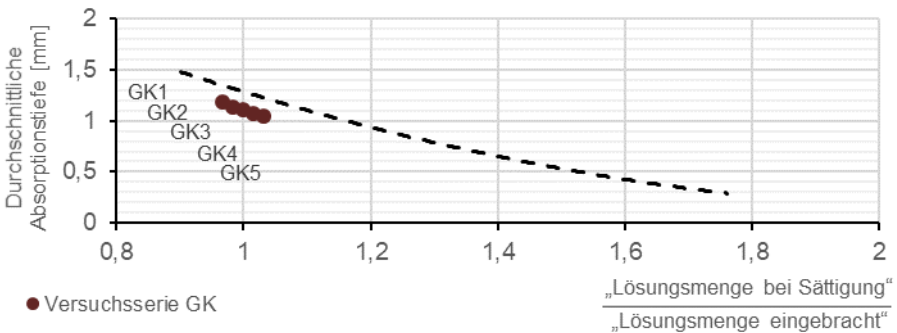


Abb. 3-72: Vergleich der Versuchsserie GK zur empirisch, ermittelten Trendlinie hinsichtlich der Absorptionstiefe

Ein weiterer Effekt mit Bezug zur physikalischen Wasserbindung ist die Sedimentation, die im übertragenen Sinne auf das 3DP-Verfahren mit der durchschnittlichen Absorptionstiefe korreliert. Bei Frischbetonuntersuchungen des konventionellen Fertigungsverfahrens kann aufgrund des großen Dichteunterschieds zwischen Wasser und Zement festgestellt werden, dass gröbere Partikel stärker zur Sedimentation neigen als feinere Bestandteile. Dieser Wasserabsonderungseffekt bzw. das Ausbluten ist beim 3DP-Verfahren in abgewandelter Form zu erwarten und nimmt eine signifikante Rolle hinsichtlich der Analyse der Geometrie- resp. Detailgenauigkeit der gedruckten Probekörper ein. Da die Versuchsreihe GK5 in Relation zur Abstufung GK1 einen höheren Feinheitsgrad besitzt, konnte demnach neben dem erläuterten Zusammenhang zum Verhältnis der Bindemittelflüssigkeitsmengen beim Compound mit einem größeren Quarzmehlanteil eine geringere durchschnittliche Absorptionstiefe erwartet werden.

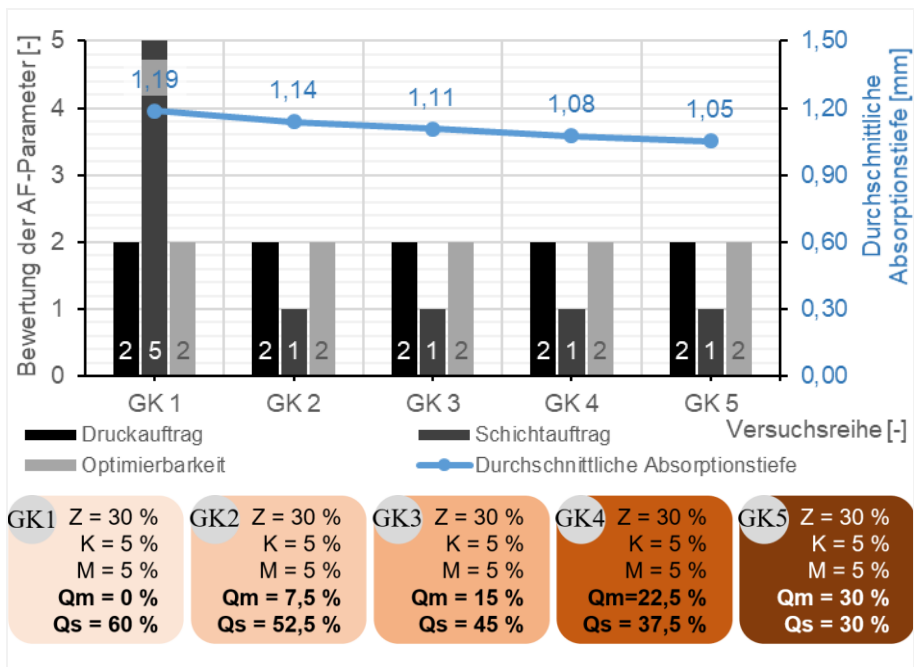


Abb. 3-73: Auswertung der AF-Parameter von Versuchsserie GK

Die mithilfe der Rasterelektronenmikroskopie-Aufnahmen gewonnene Kenntnis bzgl. der Partikelform sowie der Fließfähigkeit des Compounds bestätigt sich in der Analyse des Schichtauftrages beim Druckprozess von Versuchsserie GK. Wenn ein Compound sehr fließfähig ist bzw. einen hohen Fließfunktionswert aufweist, forciert dies ein erhöhtes Risiko, dass der Schichtauftrag suboptimal ausfällt, da mitunter die gröberen und runderen Partikel eine schlechtere Verzahnung aufweisen. Des Weiteren besitzen die Quarzsandpartikel einen größeren Durchmesser als die aufzutragende Schichtstärke. Dies führt bis zu einem Quarzsandanteil von 52,5 M.-% zu keinerlei

Problemen im Schichtauftrag und impliziert im Gegenteil einen positiven Effekt hinsichtlich einer potenziellen Verdichtung des Pulverbettes, wenn die größeren Quarzsandkörner in die vorherige Schicht gedrückt werden. Dennoch gilt es in Bezug auf ein Herstellungskonzept das Risiko eines aufgerissenen bzw. suboptimalen Schichtauftrags, wie in Abb. 3-74 schematisch dargestellt, zu minimieren, da infolge eines solchen Mangels – egal in welchem Layer – das 3D-gedruckte Bauteil unbrauchbar wird und der gesamte Herstellungsprozess theoretisch neu gestartet werden müsste.

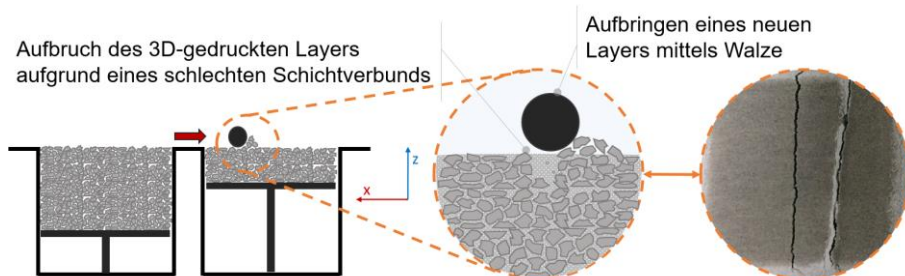


Abb. 3-74: Schematische Darstellung eines aufgebrochenen Layers

In Bezug auf die Optimierbarkeit konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden, da die Gesteinskörnung in Bezug auf die 3DP-Standfestigkeit der 3D-gedruckten Betonkörper eine geringere Relevanz darstellt und die Bindemittelzusammensetzung bei allen Versuchsreihen dieser Serie identisch bestimmt wurde.

### 3.6.3.4 Festbetonuntersuchungen

Im Allgemeinen kann die Gesteinskörnung die betontechnologischen Kennwerte aufgrund unterschiedlicher Faktoren beeinflussen. Von Relevanz sind dabei u. a. die Korngrößenverteilung, der Gehalt an Feinanteilen sowie die Oberflächentextur. Alle Faktoren wurden bereits in vorangegangenen Untersuchungen bestimmt, um abschließend den Einfluss auf ein positives wie auch negatives Druckfestigkeitsergebnis feststellen zu können.

Wie in Abschnitt 2.5.2 sowie in den Untersuchungen zum Einfluss des Silicastaubanteils thematisiert, weisen die Trockenmörtelzusammensetzungen mit einer geringeren Fließfähigkeit resp. einem stärker ausgeprägten, kohäsiven Verhalten ein höheres Porenvolumen und somit eine geringere Schüttdichte auf. Dass die Schüttdichte hinsichtlich des verwendeten additiven Fertigungsverfahrens relevanter ist als die Stampfdichte erklärt sich einerseits aus dem Herstellungsprozesses, da die einzelnen Partikel eines Layers in das Pulverbett der vorherigen Schicht fallen müssen und keine Verdichtungsenergie induziert werden kann und andererseits zeigt die Auswertung in Abb. 3-75, dass mit einem kleineren  $k_{\mu\text{m}}$ -Wert resp. einer geringeren Schüttdichte die Druckfestigkeiten sinken. Diese Erkenntnis konnte bisher nur in den Versuchsserien zum Einfluss der Gesteinskörnung isoliert betrachtet werden, da in den anderen Versuchsserien weitere Faktoren wie ein signifikanter Unterschied

zwischen der Bindemittelflüssigkeitsmenge bei Sättigung des Compounds und der eingebrachten Bindemittelflüssigkeitsmenge im Probekörper den Einfluss der Schüttdichte teilweise überlagerten bzw. vorrangig zu bewerten sind.

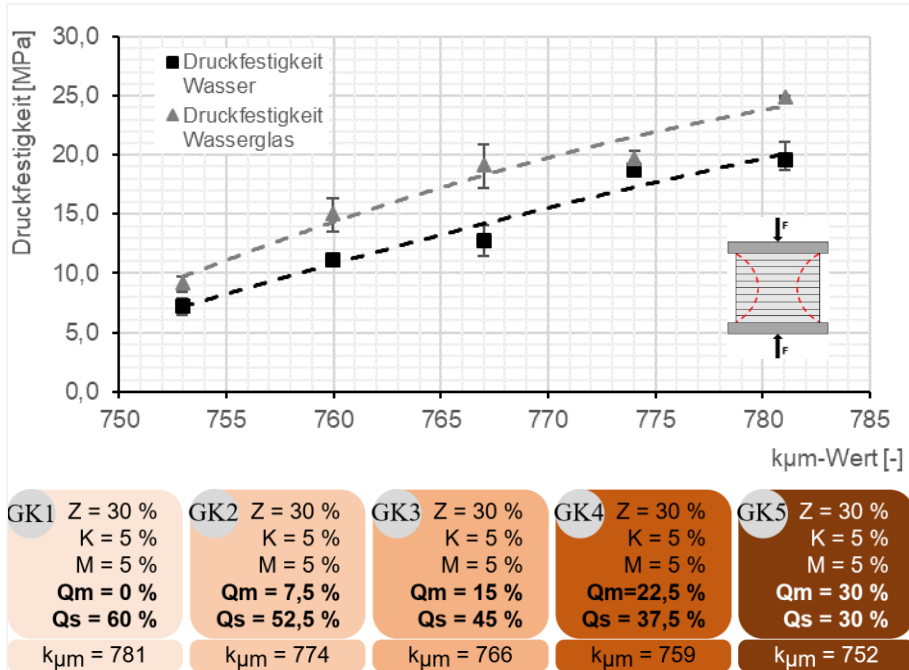


Abb. 3-75: Auswertung der Druckfestigkeit von Versuchsserie GK

Eine weitere Thematik hinsichtlich der Pulveranalyse war, dass ein Überschuss des Feinkornanteils bei der konventionellen Fertigung für eine bessere Verarbeitbarkeit sorgt und sich im Gegensatz dazu beim 3DP-Verfahren in Bezug auf die Druckfestigkeit potenziell negativ auswirken kann. Anhand der Auswertung von Versuchsserie GK und GK<sup>o</sup> bestätigt sich, dass die angenommene Betonmatrix mit einem größeren Korngefüge eine bessere Lastübertragung bietet und letztendlich höhere Druckfestigkeiten erzielen lässt. Das Korngefüge ist im Idealfall so aufgebaut, dass sich die groben Körner innerhalb der Betonmatrix stützen und nur die Hohlräume durch feinere Partikel gefüllt werden. Wesentlich ist dabei hingegen zu beachten, dass die Entwicklung der Gefügedichtigkeit sowohl von der Kornverteilung als auch von der Art der beigefügten Feinstoffe (inert oder reaktiv) abhängt. Für die Festigkeitsbildung ist die physikalische Füllerwirkung im Vergleich zur chemisch-mineralogischen Wirkung reaktiver Feinstoffe nur gering. Da in der vorliegenden Versuchsserie zum Einfluss der Gesteinskörnung die Bindemittelbestandteile konstant geblieben sind und der Zuschlag als inert einzustufen ist, weist dies zudem auf die beschriebenen Zusammenhänge zur Druckfestigkeitsentwicklung mit größerem Zuschlag hin.

Der abschließende Faktor, der hinsichtlich einer Steigerung der Druckfestigkeit mit einem größeren Zuschlag beachtet werden muss, ist die bessere Benetzbarkeit. Die Untersuchungsergebnisse aus Versuchsserie GK und GK° korrelieren mit denen von Kirchberg et al. [83] in Bezug auf den Einfluss von Partikelgröße, Korn- bzw. Partikelgrößenverteilung, Partikelform sowie Flüssigkeitseigenschaften auf das Benetzungsverhalten der Bindemittelflüssigkeit. Nach Kirchberg et al. [83] nehmen die Kontaktwinkelwerte mit größeren Partikeln ab, was folglich zu einer optimierten Benetzung u. a. der Zementpartikel führt und somit die Bildung langfaseriger C-S-H-Morphologien begünstigt. Mithilfe einer vollständigen Hydratation, bei der lange C-S-H-Nadeln den Porenraum überbrücken, bevor anschließend weitere Kristallstrukturen den Zwischenraum langsam verdichten, kann infolgedessen eine höhere Endfestigkeit der 3D-gedruckten Betonelemente erzielt werden.

Ein zu berücksichtigender Aspekt bei der Analyse von Versuchsreihe GK1 und GK°1 ist, dass aufgrund des teilweise mangelhaften Schichtauftrags nicht alle Probekörper mit in die Auswertungen von Abb. 3-75 und Abb. 3-76 einfließen konnten. D. h. dass mindestens vier Probekörper beider Versuchsreihen unbeschadet blieben und hinsichtlich ihrer Druckfestigkeit untersucht wurden.

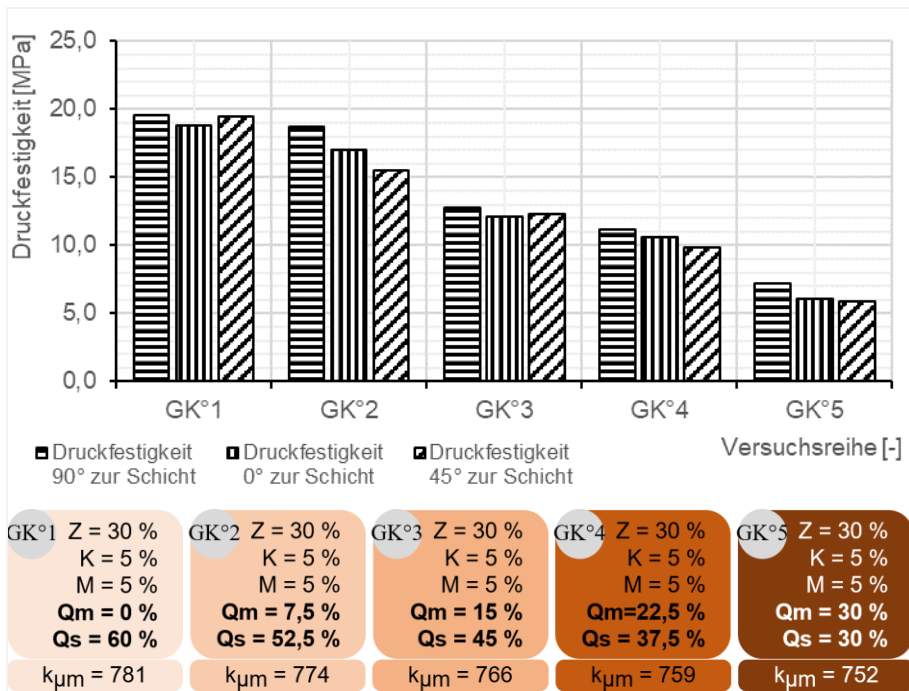


Abb. 3-76: Auswertung der Druckfestigkeit von Versuchsreihe GK°

Da der additiv gefertigte Beton im 3DP-Verfahren andere mikroskopische Strukturen als konventionell hergestellter Beton aufweist, wurden mit Versuchsreihe GK° neben

dem Einfluss unterschiedlicher Gesteinskörnungsanteile zusätzlich das mechanische Verhalten hinsichtlich der isotropen Materialeigenschaften analysiert.

Die Ausgangssituation und Belastungsrichtung der vorangegangenen Probekörper wurde orthogonal zum Schichtauftrag bzw. senkrecht zur XY-Ebene durchgeführt. Diese Lastübertragung bietet aufgrund der aufeinanderliegenden Layer sowie einer vermeintlich schlechteren Verbundfestigkeit zwischen den aufgetragenen Schichten das höchste Traglastvermögen. Dies bestätigt sich anhand der ermittelten Druckfestigkeiten in Abb. 3-76, in jeder der untersuchten Versuchsreihe, jedoch gilt es hierbei zu ergänzen, dass die prozentualen Unterschiede, wie sie in Abb. 3-77 verdeutlicht werden, teilweise nur minimal sind. Dies spricht grundsätzlich dafür, dass ein leicht anisotropes Materialverhalten vorliegt und nur bei einem optimalen Schichtenverbund eine ideal, isotrope Betonmatrix erzielt werden kann.

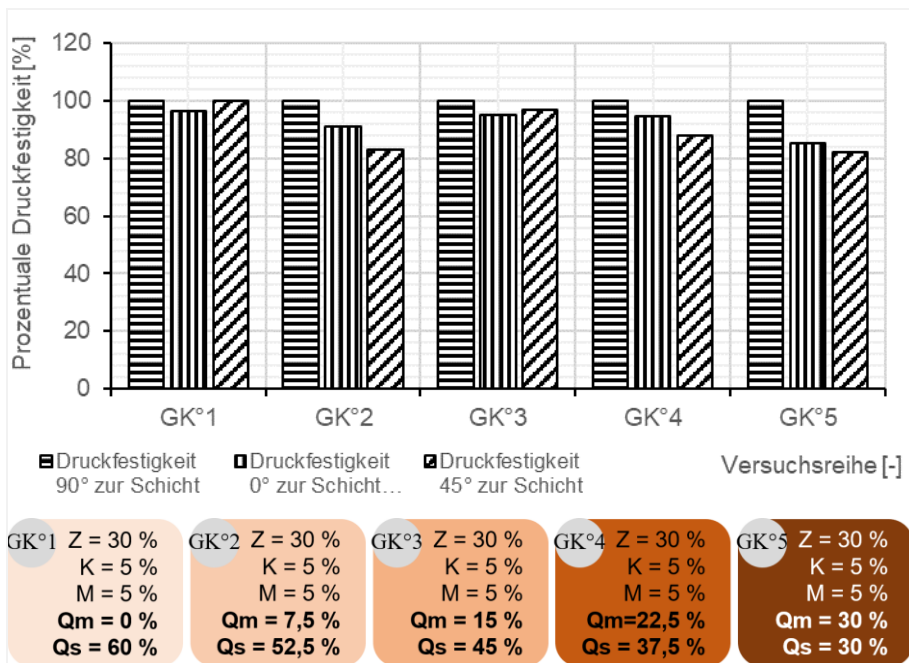


Abb. 3-77: Auswertung der prozentualen Druckfestigkeit von Versuchsserie GK°

Gründe für das geringere Traglastvermögen bei der zweiten Belastungsvariante parallel zur Schicht resp. senkrecht zur YZ-Ebene lassen sich im Herstellungsprozess erkennen. Im Allgemeinen bestehen die additiv gefertigten Elemente aus vielen dünnen Schichten, die sich bekanntermaßen nacheinander überlagern und nicht verdichtet werden können. Während dem Herstellungsprozess ist die Druckgeschwindigkeit in Y-Richtung vergleichsweise am höchsten und der Bindemittel-auftrag benachbarter Streifen in X-Richtung ist wesentlich schneller als der Schichtauftrag benachbarter Layer in Z-Richtung. Da die Rissbildung vorwiegend durch die Grenzflächen zwischen zwei Schichten in YZ-Ebene verlaufen ist, scheint



die Bindung zwischen Partikeln höher zu sein, wenn sie innerhalb einer kürzeren Zeitspanne bedrückt werden. Dies spricht folglich für eine höhere Festigkeit innerhalb eines kontinuierlichen Streifens, gefolgt von der Bindung zwischen zwei Streifen. Exemplarische Bruchbilder der Versuchsserie GK° sind in Abb. 3-78 dargestellt.



Abb. 3-78: Exemplarische Bruchbilder der Versuchsserie GK°

Die dritte und letzte Belastungsvariante wurde, wie in Abb. 3-79 schematisch veranschaulicht, diagonal zum Schichtauftrag vorgenommen. Diese Lastübertragung ist ein Hybrid aus den ersten beiden Belastungsmethoden und bietet daher auch, wie der Auswertung zu entnehmen, einerseits vergleichbare Festigkeiten zur orthogonalen Schichtbelastung und andererseits geringere Druckspannungswerte wie die parallele Belastungsvariante. Die Streuungen der Festigkeiten weisen wiederum daraufhin, dass 3D-gedruckte Betonstrukturen aus einem heterogenen Materialgefüge bestehen und dass hinsichtlich einer zukünftigen Bemessung ein größerer Sicherheitsfaktor berücksichtigt werden müsste.

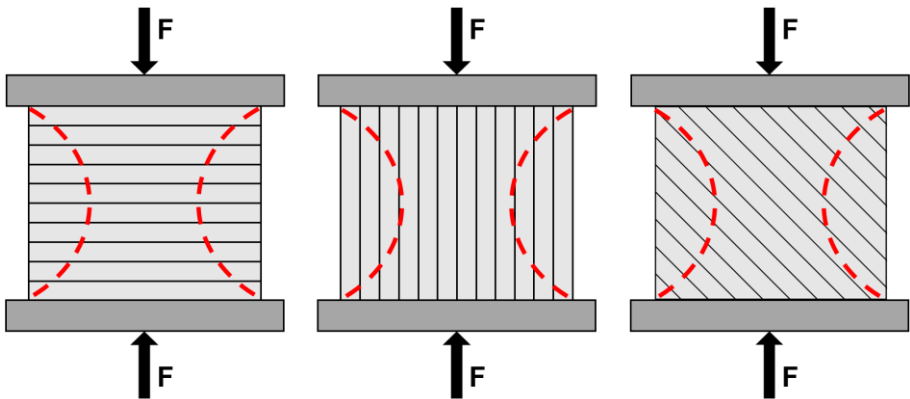


Abb. 3-79: Schematische Darstellung der diversen Belastungsrichtungen

Des Weiteren wurden die kubischen Probekörper hinsichtlich der Oberflächenstruktur untersucht. Abb. 3-80 zeigt typische Fotografien, aus denen sich die Eigenschaften der 3D-gedruckten Betonstrukturen wie folgt zusammenfassen lassen:

- Geschichtetes Mikrogefüge im Inneren des Probekörpers:  
Im Inneren der 3D-gedruckten Betonkörper können sich teilweise Trennschichten zwischen den einzelnen Layern abzeichnen bzw. lassen sich rein optisch erahnen.
- Streifen- und Layerstrukturen an der Außenseite der Probekörper:  
An der Außenseite sind partiell je nach Druck- und Schichtauftrag einzelne Layer in X- und Y-Richtung identifizierbar. Einen maßgeblichen Einfluss hat mitunter die Nachbehandlung der Druckluftpistole. Sofern mit einem hohen Luftdruck die Probekörper von den anhaftenden Partikeln befreit werden, können die unterschiedlichen Schichten aus der Oberflächenstruktur herausgearbeitet werden. Des Weiteren können aufgrund eines zu geringen Sättigungsgrads bzw. w/z-Wertes wie bei Shakor et al. [21] die äußeren Partikel infolge des Luftdrucks vom Probekörper abgetragen werden. In der XY-Ebene ist hingegen keine Streifenaufgabe ersichtlich, was die Analyse hinsichtlich eines isotropen Materialverhaltens in Schichtenebene bestätigt.
- Iso- oder Orthotropie:  
Anhand der optischen Erscheinung besteht die Annahme eines orthotropen Werkstoffes, da teilweise ein Schichtauftrag an der Außenseite zu erkennen ist. Diese Hypothese bestätigt sich mithilfe der aufgeführten Versuchsergebnisse. Jedoch ist zu beachten, dass im positiven Fall eines optimalen Verbunds zwischen den einzelnen Layern in XZ- bzw. YZ-Ebene der Unterschied zu einem isotropen Materialverhalten minimal wird. Maßgebend für einen optimalen Verbund ist, dass ein reibungsloser sowie fehlerfreier Druck- und Schichtauftrag sichergestellt werden konnte, da sonst innerhalb der geschichteten Mikrostruktur Fehlstellen entstehen, die einen unzureichenden Verbund zwischen den einzelnen Layern erzeugen und somit eine Schwachstelle bei paralleler oder diagonaler Belastung der Schichten darstellen.

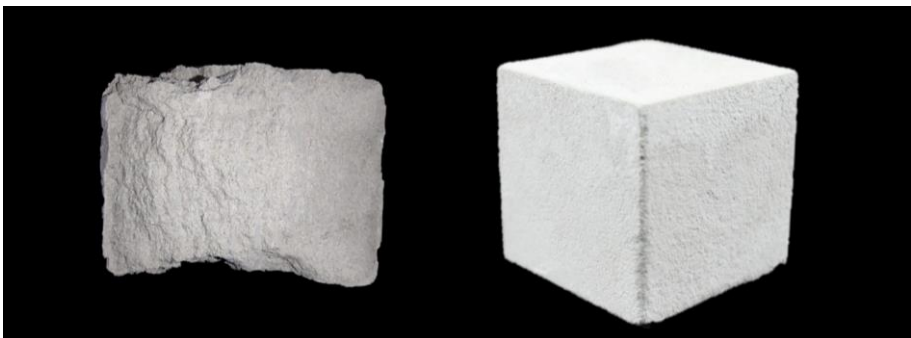


Abb. 3-80: Exemplarische Veranschaulichung der Betonstrukturen  
Links: Aufgebrochene Betonstruktur  
Rechts: Probekörper nach dem Druckvorgang

## **3.7 Einfluss des Wasser-Zement-Wertes**

### **3.7.1 Allgemeines**

Nachdem in den vorangegangenen Versuchsserien die Einflüsse des jeweiligen Trockenmörtelbestandteils untersucht wurden und der w/z-Wert innerhalb der Serie konstant blieb, liegt nun der Fokus darin einen druckfähigen Compound detailliert hinsichtlich des w/z-Wertes zu analysieren. Daher wurden neben den bekannten Vorversuchen (Pulver- und Flüssigkeitsanalyse), den Untersuchungen in Bezug auf den Herstellungsprozess (AF-Parameter) sowie den abschließenden Festbetonprüfungen (Druckfestigkeitsanalyse) zusätzlich Porositätsanalysen durchgeführt. Anhand der Quecksilberporosimetrie nach [144] lässt sich der Einfluss auf die Porenverteilung bei variierenden Feuchtigkeitsmengen im Probekörper definieren sowie ein signifikanter Unterschied zu konventionell gefertigten Proben feststellen.

### **3.7.2 Versuchsprogramm**

In Bezug auf die Wahl des Compounds, der sich für die detaillierte Analyse eignet, wurden die vielzähligen Ergebnisse der abgeschlossenen Versuchsserien miteinbezogen. In Serie Z zeichnete sich schon ab, dass die Reaktionsfähigkeit des CEM I 52,5 R trotz der hohen Mahlfineinheit nicht ausreicht, um die Probekörper nach 30 min aus dem Bauraum entnehmen zu können. Dies ändert sich mit der Zugabe vom Klinkerfeinmehl. Verschiedene Ergebnisse zeigen, dass mit einem geringen Klinkerfeinmehlgehalt von ca. 5 M.-% die 3DP-Standfestigkeit ausreichend für die Nachbehandlung bzw. die geometrische Optimierung ist. Des Weiteren liefern die Ergebnisse mit einem 5 %-igen Klinkerfeinmehlgehalt bessere Druckfestigkeiten. Sofern die Probekörper eine ausreichende 3DP-Standfestigkeit aufweisen, zeigen die Ergebnisse der Versuchsserie Z+, dass mit einem erhöhten Zementanteil eine leicht verbesserte Druckfestigkeit zu erwarten ist. Um den ökonomischen Vorteil des 3DP-Verfahrens nicht durch einen zu hohen Zementanteil wieder zu relativieren, wurde ein Zementanteil von 30 M.-% zzgl. des geringen Klinkerfeinmehlanteils gewählt.

Ein weiterer Faktor, der hinsichtlich einer hohen Auflösung sowie einer detailgetreuen Produktion essentiell ist, zeigt sich bei der Analyse des durchschnittlichen Absorptionseffektes. Da sich die Probekörper bei einem Silicastaubgehalt von ca. 5 M.-% sehr gut geometrisch optimieren lassen und zudem im Gegensatz zu geringeren Silicastaubgehalten die Absorptionstiefe sinkt, wurde dieser Anteil für den Compound im folgenden Versuchsprogramm berücksichtigt. Des Weiteren konnte neben dem Einsatz von Silicastaub die Druckfestigkeit mit einem höheren Quarzsandanteil gesteigert werden. Da jedoch mit einem zu hohen Quarzsandanteil ein negativer Schichtauftrag forciert wurde, konnte in den Versuchsserien aus dem Übersichtsdiagramm Teil 2 (siehe Abb. 3-2) nur ein Quarzsandgehalt von 45 M.-% verwendet werden, sodass die verbliebenen 15 M.-% mit Quarzmehl aufgefüllt wurden. Das Prüfalter der 3D-gedruckten Proben wurde in dieser Versuchsserie wie zuvor mit 28 Tagen festgelegt und unterscheidet sich somit nicht vom charakteristischen Prüfalter konventionell hergestellter Betonproben. Der Wassergehalt bzw. w/z-Wert wurde, wie folgt, in sechs Abstufungen variiert:

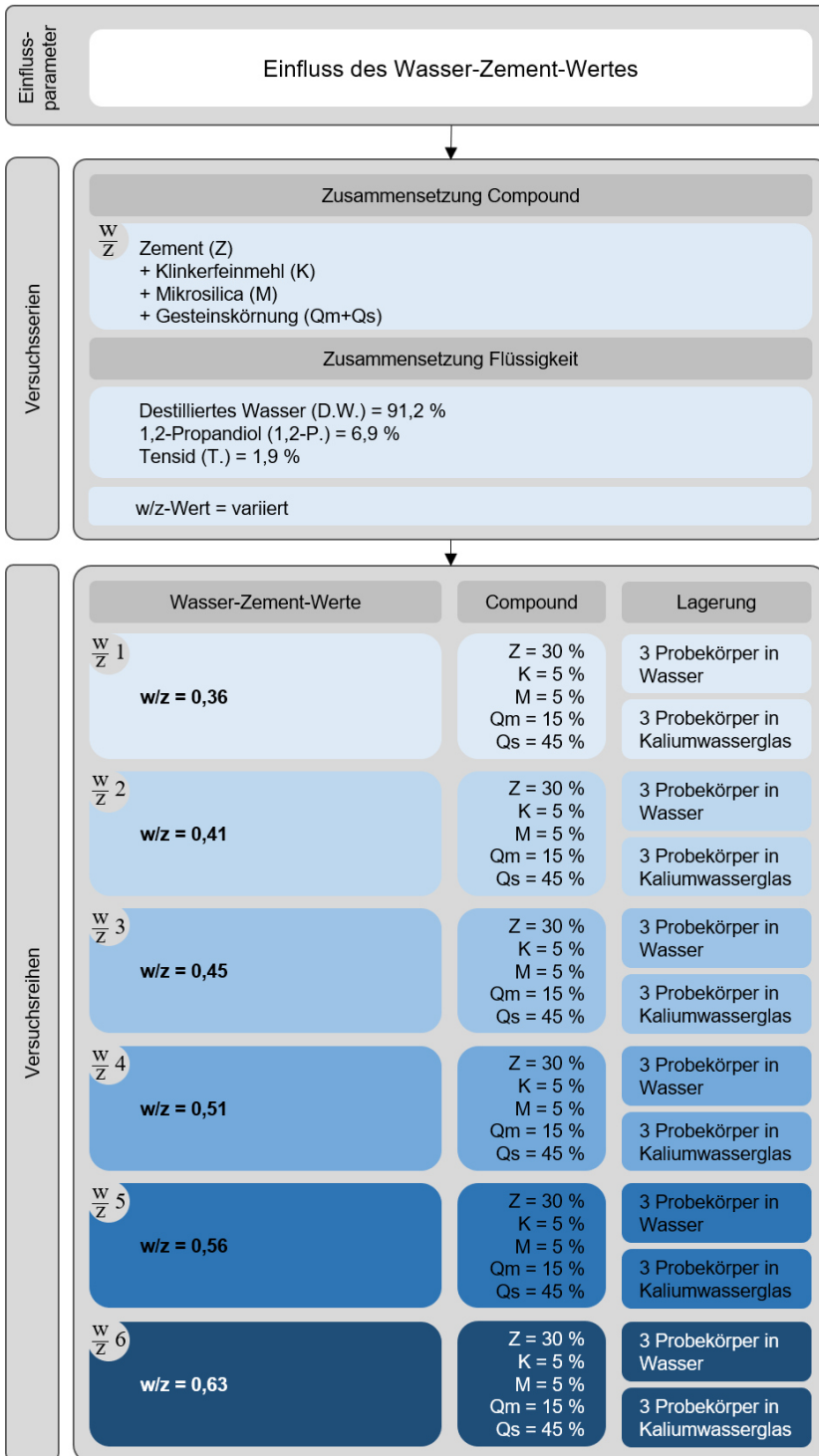


Abb. 3-81: Übersicht der Versuchsserie w/z

### 3.7.3 Versuchsergebnisse und Auswertung

#### 3.7.3.1 Pulveranalyse

Die Ergebnisse der Pulveranalyse für Versuchsserie w/z lassen sich anhand einer einzelnen Trockenmörtelzusammensetzung in einer komprimierten Übersicht darstellen, da der Compound für alle Abstufungen dieser Serie identisch war.

Des Weiteren korreliert die exemplarisch, aufgeführte Versuchsreihe w/z1 mit den zuvor untersuchten Versuchsreihen Z+3, K+2, M+2 und GK3, sodass jede gewünschte Variation eines Bestandteils sowie dessen Auswirkungen auf die Pulveranalyse der entsprechenden Versuchsserie entnommen werden kann.

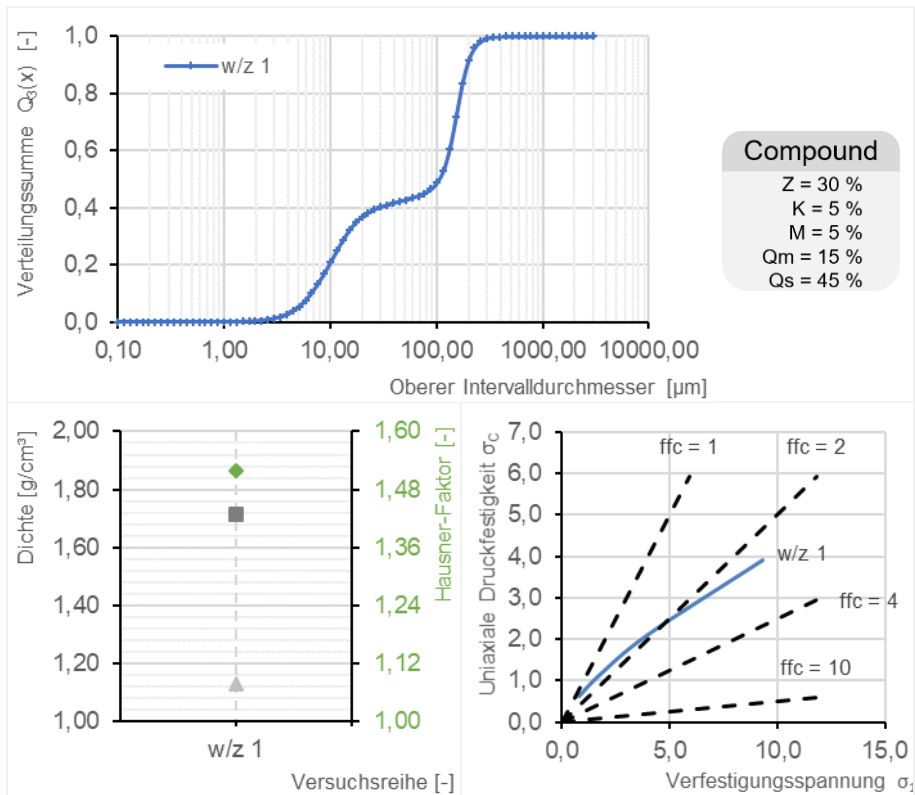


Abb. 3-82: Übersicht der Pulveranalyse von Versuchsserie w/z

#### 3.7.3.2 Flüssigkeitsanalyse

Für die Flüssigkeitsanalyse dieser Versuchsserie ergibt sich aufgrund der experimentellen Untersuchung zum Einfluss des w/z-Wertes ein paralleler Verlauf der eingebrachten Bindemittelflüssigkeitsmenge in Verbindung zum vorhandenen w/z-

Wert. Die Abstufung erfolgte entsprechend der in Abb. 3-83 aufgeführten, sechs unterschiedlichen Bindemittelflüssigkeitsmengen bis zum ermittelten Sättigungsvolumen von 17,53 ml je Probekörper (64 cm<sup>3</sup>). Der Bindemittelflüssigkeitsanspruch sowie der in Abhängigkeit stehende w/z-Wert bei Sättigung bleibt angesichts der identischen Trockenmörtelzusammensetzung in allen Abstufungen konstant. Inwiefern sich nun der erhöhte Feuchtigkeitseintrag auf die AF-Parameter auswirkt sowie die Festbetoneigenschaften beeinflusst, wird in den folgenden beiden Abschnitten aufgeführt.

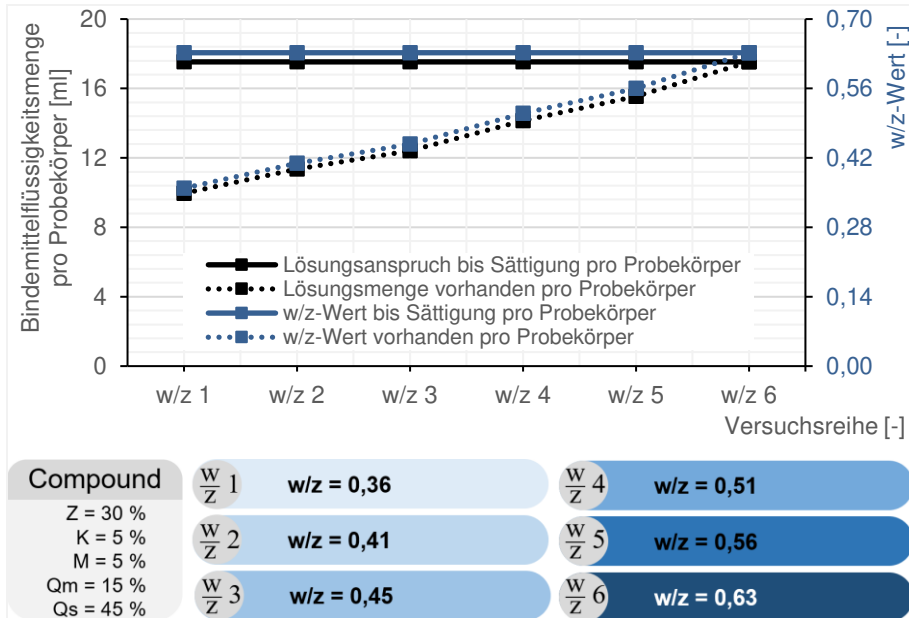


Abb. 3-83: Auswertung der Flüssigkeitsanalyse von Versuchsserie w/z

### 3.7.3.3 AF-Parameter

Die Analyse der AF-Parameter von Versuchsserie w/z reduziert sich aufgrund der identischen Trockenmörtelzusammensetzung und Bindemittelflüssigkeit in den Versuchsreihen auf die Auswirkungen hinsichtlich der differierenden Feuchtigkeitsmengen, die durch den Druckkopf auf den entsprechenden Querschnitt eines jeden Layers aufgebracht wurde.

Da der verwendete Compound in vorangegangenen Versuchsserien bereits positive Ergebnisse in Bezug auf die AF-Parameter lieferte, konnten diese ebenfalls in Serie w/z erwartet werden. Anhand eines gesättigten Druckauftrags, einem kohäsiven Fließverhalten des Compounds sowie einer ausreichenden 3DP-Standfestigkeit für die geometrische Optimierung der Probekörper bestätigt sich die Annahme konstant guter bis sehr guter Bewertungen. Von größerer Relevanz im Hinblick auf die Auswertung in Abb. 3-85 war die durchschnittliche Absorptionstiefe, die sich bei entsprechendem w/z-

Wert resp. Feuchtigkeitseintrag einstellt. Die Ergebnisse der durchschnittlichen Absorptionstiefe belegen wiederum, wie in Abb. 3-84 dargestellt, den Zusammenhang zum Quotienten aus Bindemittelflüssigkeitsmenge bei Sättigung und eingebrachter Bindemittelflüssigkeitsmenge und kongruieren dabei nahezu mit der empirisch, ermittelten Trendlinie. Daher weist Versuchsreihe w/z 6 mit einem Feuchtigkeitseintrag von 17,53 ml bzw. einem w/z-Wert von 0,63 eine durchschnittliche Absorptionstiefe von 1,11 mm auf und bei Versuchsreihe w/z 1 stellte sich durch die geringste Bindemittelflüssigkeitsmenge von 9,96 ml sowie einem zugehörigen w/z-Wert von 0,36 nur eine durchschnittliche Absorptionstiefe von 0,22 mm ein.

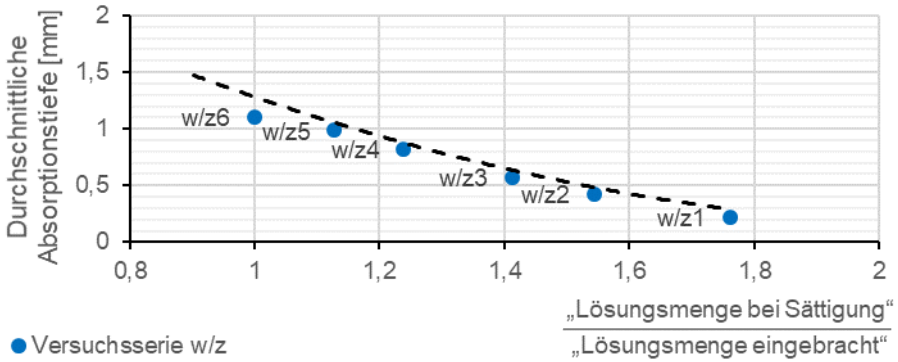


Abb. 3-84: Vergleich der Versuchsreihe w/z zur empirisch, ermittelten Trendlinie hinsichtlich der Absorptionstiefe

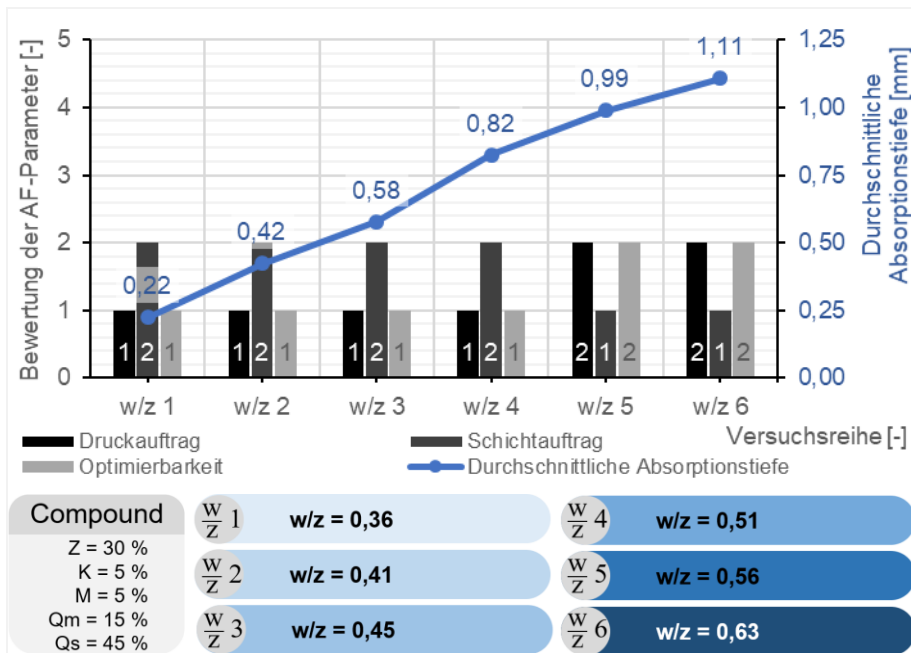


Abb. 3-85: Auswertung der AF-Parameter von Versuchsreihe w/z

### 3.7.3.4 Festbetonuntersuchungen

In der konventionellen Betonproduktion hat der w/z-Wert resp. die eingebrachte Bindemittelflüssigkeitsmenge einen signifikanten Einfluss auf die resultierende Druckfestigkeit, jedoch sind bekannte Wechselbeziehungen (wie bspw. eine Verringerung der Druckfestigkeit bei erhöhtem w/z-Wert) oder bestimmte Kenngrößen (wie eine vollständige Hydratation des Zements bei einem w/z-Wert von ca. 0,4) aufgrund der unterschiedlichen Produktionsweisen zwischen konventioneller Fertigung und dem 3DP-Verfahren nicht kongruent.

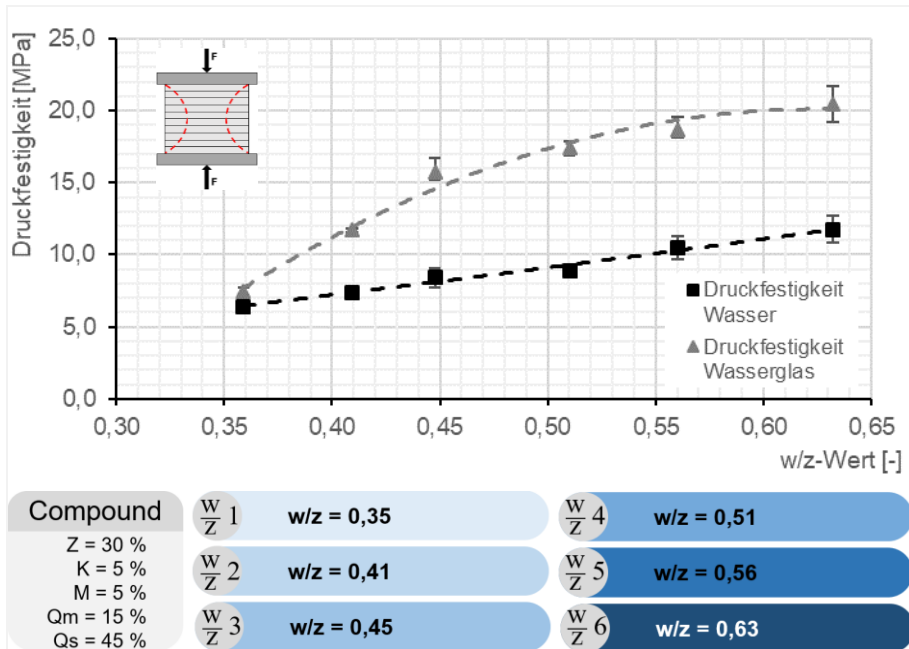


Abb. 3-86: Auswertung der Druckfestigkeit von Versuchsserie w/z

Die durchschnittlichen Druckfestigkeitsergebnisse der 3D-gedruckten Betonstrukturen bewegten sich, wie in Abb. 3-86 dargestellt, in einem Bereich von 6,4 MPa bis 20,5 MPa. Ungewöhnlich und zugleich auffällig ist die Zunahme der Druckfestigkeit mit steigendem w/z-Wert. Die bereits in Abschnitt 2.3.2 erwähnte Thematik der Druckfestigkeitsminimierung bei einer konventionellen Beton- bzw. Mörtelproduktion mit erhöhtem Wassereintrag und einer Maximierung der Kapillarporenbildung ist daher nicht direkt auf das 3DP-Verfahren zu projizieren.

Die Gründe dafür sind vielfältig und beruhen zunächst auf den Unterschieden in der Produktion. Zum einen fehlt der Mischprozess, bei dem normalerweise die Zementkörner eine gelartige Schicht inkl. erster Reaktionsprodukte um die Gesteinskörnung bilden, und zum anderen bleibt im Herstellungsprozess der pulverbett-basierten Produktion eine vergleichbare Verdichtung der Betonmatrix wie beim



konventionellen Fertigungsverfahren aus. Durch die fehlende Mischinduktion werden die in der frühen Phase entstehenden Morphologien, die nur einen geringen Beitrag zur Endfestigkeit mitbringen, nicht abgesichert. Der maschinelle Schichtauftrag des trockenen Compounds mittels Walze erzeugt lediglich eine lose Layerstruktur, in der die Partikel durch aneinanderstoßen große Hohlräume bilden, die mit nicht-physikalisch gebundenem Wasser ausgefüllt sind. Die aufgebaute Struktur kann folglich auch noch Anteile von trockenen, verklumpten Zementpartikeln enthalten. Die Stabilität dieser Flockenstruktur hängt von der Anzahl der Kontaktpunkte sowie von den in der Prä-Induktionsperiode sich bildenden Kristallstrukturen ab und stellt letztendlich die 3DP-Standfestigkeit der 3D-gedruckten Betonstrukturen dar.

Die Wasserbindung nimmt ebenfalls einen relevanten Einfluss in Bezug auf eine ausreichende Entwicklung festigkeitsfördernder Hydratationsprodukte ein. Sofern dem Zement aufgrund von physikalisch gebundenem Wasser nötige Wasserstoffoxide zur Bildung weiterer Hydratationsprodukte für die Verdichtung des Betongefüges fehlen, endet der Erhärtungsprozess gerade bei geringen Bindemittelflüssigkeitszugaben wie in Versuchsreihe w/z 1 vorzeitig, sodass potenziell eine unzureichende Auskristallisierung der Zementpartikel entsteht. Grund für die physikalische Bindung des Wassers ist die Wirkung von Adhäsionskräften und Kohäsionskräften. Die Adhäsionskräfte erzeugen eine Haftung sowie Benetzung der Kapillarwandung mit Wasser und die Kohäsionskräfte den Zusammenhalt des sich an der Oberfläche formenden Meniskus. Um generell dem entgegen zu wirken bzw. einer unzureichenden Hydratation vorzubeugen, bedarf es daher einer spezifisch für das jeweilige Verfahren und den verwendeten Compound adaptierte Bestimmung des Wasseranspruchs. Für die Ermittlung des Wasseranspruchs von feinen Kornhaufwerken wie den verwendeten Trockenmörtel-mischungen wurde die Prüf- und Auswertemethode in Anlehnung an das Puntke-Verfahren angewandt. Mit Versuchsserie w/z bestätigte sich nun, dass mit einer Erhöhung des Feuchtigkeitseintrags bis zur Sättigung des Compounds die Druckfestigkeiten steigen. Des Weiteren belegen die Festbetonuntersuchungen von Versuchsreihe K+2 und M+2, dass bei identischer Trockenmörtelzusammensetzung ein Feuchtigkeitseintrag nahe am Niveau der Sättigung des Compounds eine höhere Druckfestigkeit impliziert. Dieses gegensätzliche Verhalten mit einer Steigerung der Festigkeit bei erhöhtem Sättigungsgrad des Layers konnte zudem in weiteren Forschungsarbeiten [3, 18, 21, 91, 145] auch materialübergreifend festgestellt werden.

Weitere Gründe für den dargestellten Zusammenhang lassen sich mit den entstehenden Morphologien anführen. Die C-S-H-Phasen sind in einer igelförmigen Kristallstruktur angeordnet und weisen nach der Hydratation eine wesentlich größere Oberfläche als die Ausgangsstoffe auf. Sofern diese feinnadligen C-S-H-Faserbündel mit einer hohen spezifischen Oberfläche ineinandergreifen, ergeben sich sehr viele Kontaktflächen, die wiederum mithilfe der entstehenden Adhäsionskräfte zu einer gesteigerten Verbundfestigkeit zwischen den C-S-H-Phasen führen und dem Zementstein letztendlich die hohe Druckfestigkeit verleihen [56]. Da die 3D-gedruckten Betonkörper jedoch eine sehr offenporige Betonmatrix aufweisen, benötigt es langfaserige C-S-H-Phasen, um die Hohlräume zwischen den einzelnen Partikeln überbrücken zu können. Diese langen Faserbündel können nur mit einer ausreichenden Wassermenge entstehen, wodurch der Feuchtigkeitseintrag sowie die

Permeabilität des Compounds an Relevanz gewinnen. Da die Trockenmörtelzusammensetzung hinsichtlich der Porositätsminimierung eine möglichst hohe Dichte aufweisen sollte, wird sich die Permeabilität des Compounds mit steigender Packungsdichte nicht verbessern. Demnach sollte einerseits die Bindemittelflüssigkeit eine möglichst geringe Oberflächenspannung sowie Viskosität aufweisen und andererseits muss die Bindemittelflüssigkeitsmenge auf jedem Layer zur vollständigen Hydratation ausreichen.

In Korrelation zu dieser Thematik stehen bspw. die Ergebnisse von Vaezi und Chua sowie Lowke et al. [18, 145]. In diesen Untersuchungsergebnissen konnte ebenfalls festgestellt werden, dass sich der Verbund zwischen den Schichten aufgrund einer unzureichenden Hydratation verringert, da mit einer Steigerung der Schichtstärke bei gleichem w/z-Wert die Festigkeit der 3D-gedruckten Betonstrukturen abnahm. Die Erhöhung der Schichtdicke würde nach Withell et al. [91] eine höhere Sättigung bzw. einen höheren Feuchtigkeitseintrag erfordern, um eine vollständige Infiltration und Kohäsion zwischen den Schichten zu gewährleisten. All diese Forschungsergebnisse sowie die Auswertung aus Versuchsserie w/z lassen darauf schließen, dass neben den zuvor aufgeführten Faktoren eine sättigende Feuchtigkeitsmenge unerlässlich für eine vollständige Benetzung der Zementpartikel ist, um in Abhängigkeit davon höhere Festigkeiten zu erreichen.

Da die Porosität eines Materials im direkten Zusammenhang zur Druckfestigkeit steht, wurden die Probekörper der Versuchsserie w/z mithilfe der Quecksilberporosimetrie nach DIN ISO 15901-1 [144] analysiert, um die erbrachten Erkenntnisse hinsichtlich der Porenverteilung quantifizieren zu können. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Spektren der unterschiedlichen Porenkategorien der Literatur nach nicht eindeutig abgegrenzt sind. Um dennoch den Strukturaufbau der 3D-gedruckten Betonmatrix hinsichtlich des voluminösen Anteils an Gel-, Kapillar- und Luftporen sowie dem übrigen Festbestandteil, bestehend aus unhydratisierten sowie hydratisierten Bindemittel zzgl. des Zuschlags, bestimmen zu können, wurden folgende Grenzwerte festgelegt:

- Gelporen  $\leq 50$  nm
- Kapillarporen  $> 50$  nm und  $\leq 10.000$  nm
- Luftporen  $> 10.000$  nm

Die Auswertung für die in Wasser gelagerten Probekörper in Tab. 3-7 bestätigte die Annahme einer höheren Porosität bei geringerem Feuchtigkeitseintrag. Zudem stellte sich in Abb. 3-87 die erwartete Porenverteilung dar, sodass sich mit einem geringen w/z-Wert von 0,36 im Vergleich zu den anderen Versuchsreihen das maximale Luftporenvolumen einstellte und demgegenüber mit einem hohen w/z-Wert von 0,63 der höchste Gelporenanteil ermittelt wurde. Konsistent zur dargestellten Analyse sowie zu den Forschungsergebnissen von Maier et al. [146] stehen die vorangegangenen Erläuterungen einer potenziell größeren Hydratationsrate der Bindemittelbestandteile bei einem gesättigten Compound. Da sich durch eine verringerte Bindemittelflüssigkeitsmenge im Probekörper weniger bzw. kleinere Kristallstrukturen entwickeln, sinken in diesem Zusammenhang die prozentualen Gelporenvolumenanteile stetig mit einem niedrigeren w/z-Wert.

Tab. 3-7: Auswertung der Porositätsanalyse von Versuchsserie w/z

Versuchsreihe	Porosität [%]	Gelporenvolumen [%]	Kapillarporenvolumen [%]	Luftporenvolumen [%]	Feststoffvolumen [%]
w/z 1 (w/z = 0,36)	41,8	4,8	14,5	22,5	58,2
w/z 2 (w/z = 0,41)	38,0	5,4	17,0	15,6	62,0
w/z 3 (w/z = 0,46)	37,3	5,8	14,3	17,1	62,7
w/z 4 (w/z = 0,51)	36,8	5,9	16,8	14,0	63,2
w/z 5 (w/z = 0,56)	36,3	6,5	17,2	12,6	63,7
w/z 6 (w/z = 0,63)	34,7	8,4	17,1	9,1	65,3

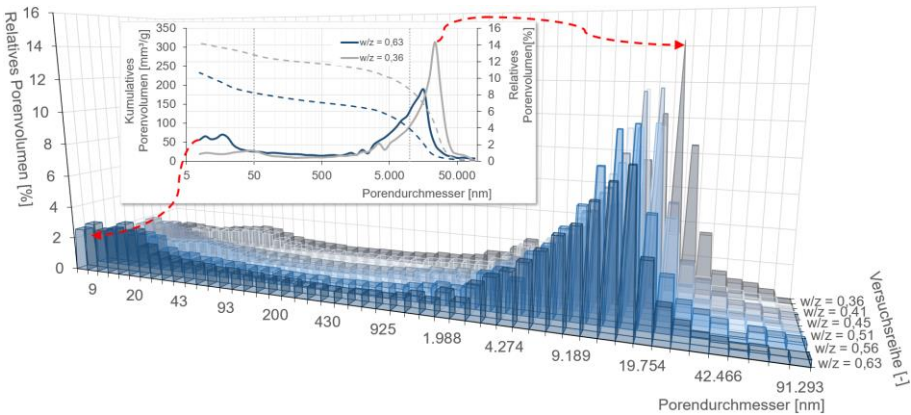


Abb. 3-87: Übersicht der Porenverteilung von Versuchsserie w/z

Mit zunehmender Hohlraumfüllung durch die Hydratationsprodukte sowie einer chemischen und physikalischen Erhärtung des fluiden Nachbehandlungsmediums, d. h. mit zunehmender Dichte des Gefüges und Verfeinerung der Porenstruktur, steigert sich ebenfalls die Druckfestigkeit der in Wasserglas gelagerten Probekörper. Da sich infolge des Wasserglaseinflusses größere Unterschiede der Porosität im jeweiligen Probekörper ergeben, eignet sich eine vergleichbare Veranschaulichung zur Abb. 3-87 nicht, um Rückschlüsse auf die Betonmatrix hinsichtlich größerer Hydratphasen ziehen zu können. Dennoch lassen sich die Ergebnisse der in Wasserglas und Wasser gelagerten Probekörper hinsichtlich der Relation zwischen

der durchschnittlichen Porosität und der zugehörigen Druckfestigkeit in einem gemeinsamen Kontext mit der bekannten Trendlinie nach [147] aus der konventionellen Produktion darstellen (siehe Abb. 3-88).

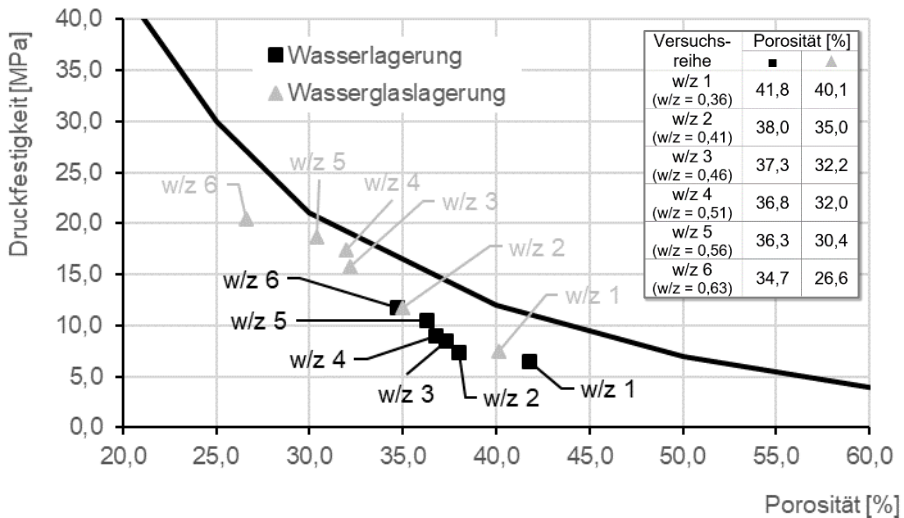


Abb. 3-88: Relation zwischen Porosität und Druckfestigkeit der Probekörper aus Versuchsserie w/z (Trendlinie vgl. [147])

Abschließend verdeutlichen die unterschiedlichen Oberflächenstrukturen im Vergleich der Abb. 3-89 und Abb. 3-90, inwiefern die Wasserglasnachbehandlung die Porenstruktur abdichtet. Die exemplarische REM-Aufnahme des in Wasser gelagerten Probekörpers weist im Gegensatz zur dichten Matrix des Probekörpers aus dem Wasserglasbad eine offenporigere Struktur auf. Bei genauerer Betrachtung deuten sich zudem unhydratisierte Bestandteile sowie große, hexagonale Portlandit-Kristalle an, die beide nicht zur Stärkung der Betonmatrix beitragen und somit bereits anhand der Illustrationen eine geringere Festigkeit sowie größere Porosität annehmen lassen.

Die exemplarische Aufnahme aus der CT-Analyse in Abb. 3-91 verdeutlicht die Dichteunterschiede eines in Wasserglas gelagerten Probekörpers nochmal im Detail. Die Aushärtung und abdichtende Wirkung konnte hauptsächlich im Randbereich bis ca. 5 mm erzielt werden. In diesem Bereich wiesen die Probekörper mit einer Wasserglasnachbehandlung eine niedrigere Porosität als im Kernbereich auf, da das hochviskose Fluid den Probekörper teilweise nicht komplett durchdringen konnte oder an der Oberfläche aufgrund der erwähnten physikalischen Abdichtung und chemischen Verfestigungsprozesse eine dichtere Struktur ausbildete. In der CT-Analyse werden die Dichteunterschiede durch Helligkeitsabstufungen dokumentiert. Je heller bzw. weißlicher der Bereich erscheint, desto höher ist die Dichte der Matrix. Demnach weist der 3D-gedruckte Betonkörper, wie beschrieben, an der Außenseite eine geringere Porosität auf als zum etwas grülicheren Teil im Inneren des Probekörpers.

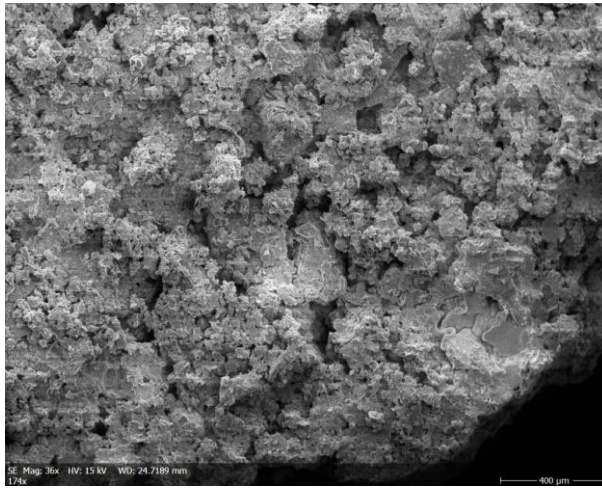


Abb. 3-89: Oberflächenstruktur eines in Wasser gelagerten Probekörpers



Abb. 3-90: Oberflächenstruktur eines in Wasserglas gelagerten Probekörpers

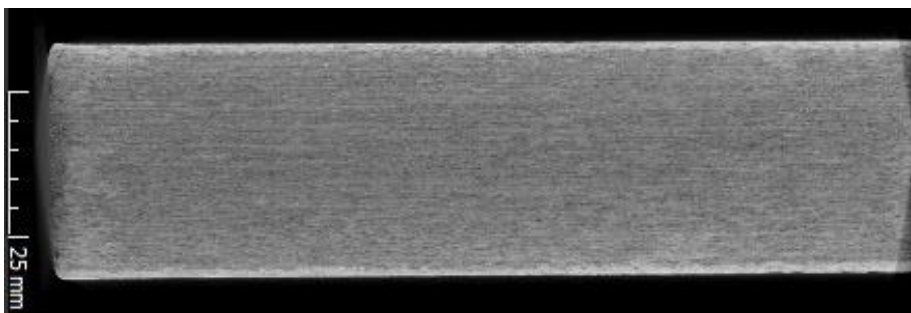


Abb. 3-91: Exemplarische CT-Aufnahme eines 3D-gedruckten Betonkörpers [42]

## **3.8 Analyse der Festigkeitsentwicklung**

### **3.8.1 Allgemeines**

Der im Sinne der Baustoffbildung definierte Verfestigungsprozess beschreibt den Übergang eines fluiden Mediums in ein festes bzw. ein weniger festes Medium in ein solches höherer Festigkeit [53]. Diese Festigkeitsentwicklung bzw. chemische Umsetzung, die beim Betonverfestigungsprozess hauptsächlich aus Hydrolyse- und Hydratationsvorgängen besteht, wird im folgenden Versuchsprogramm in Bezug auf die 3D-gedruckten Betonstrukturen im 3DP-Verfahren analysiert. Einen essentiellen Einfluss auf den Reaktionsablauf sowie die Festigkeitsentwicklung nehmen hierbei die topochemischen Prozesse resp. die Struktur und Morphologie der Ausgangsmaterialien, aus denen sich bestimmte Formen gelförmiger und/oder kristalliner Hydratphasen bilden.

### **3.8.2 Versuchsprogramm**

Das Versuchsprogramm zur Analyse der Festigkeitsentwicklung setzt sich aus sechs Versuchsreihen zusammen, um die Steigerung der Druckfestigkeit der 3D-gedruckten Betonelemente festzustellen sowie anhand der Ergebnisse Rückschlüsse auf den Hydratationsverlauf ziehen zu können.

Die Trockenmörtelzusammensetzung wurde, wie bereits in Abschnitt 3.7.2 erläutert, anhand der Resultate aus den Versuchsserien zu den Einflüssen eines jeweiligen Bestandteils definiert und ebenfalls als Grundlage für dieses Versuchsprogramm verwendet. Um die theoretischen Ergebnisse und Entwicklungsprozesse eines druckfähigen Compounds zu vervollständigen, wurde die Druckfestigkeit der Probekörper nach 1 d, 2 d, 7 d, 14 d, 28 d und 56 d untersucht. Die zeitlichen Abstände zwischen den einzelnen Lagerungszeiten wurde zu Beginn relativ kurz gehalten, da der Beton im Allgemeinen in den ersten Tagen eine wesentlich schnellere Festigkeitssteigerung erfährt als in den Tagen darauf. Die Zusammenstellung des Compounds sowie der verwendeten Bindemittelflüssigkeit ist neben dem vorhandenen w/z-Wert, der für alle Versuchsreihen dieser Serie konstant gehalten wurde, in der Übersicht zur Versuchsserie F in Abb. 3-92 dargestellt.

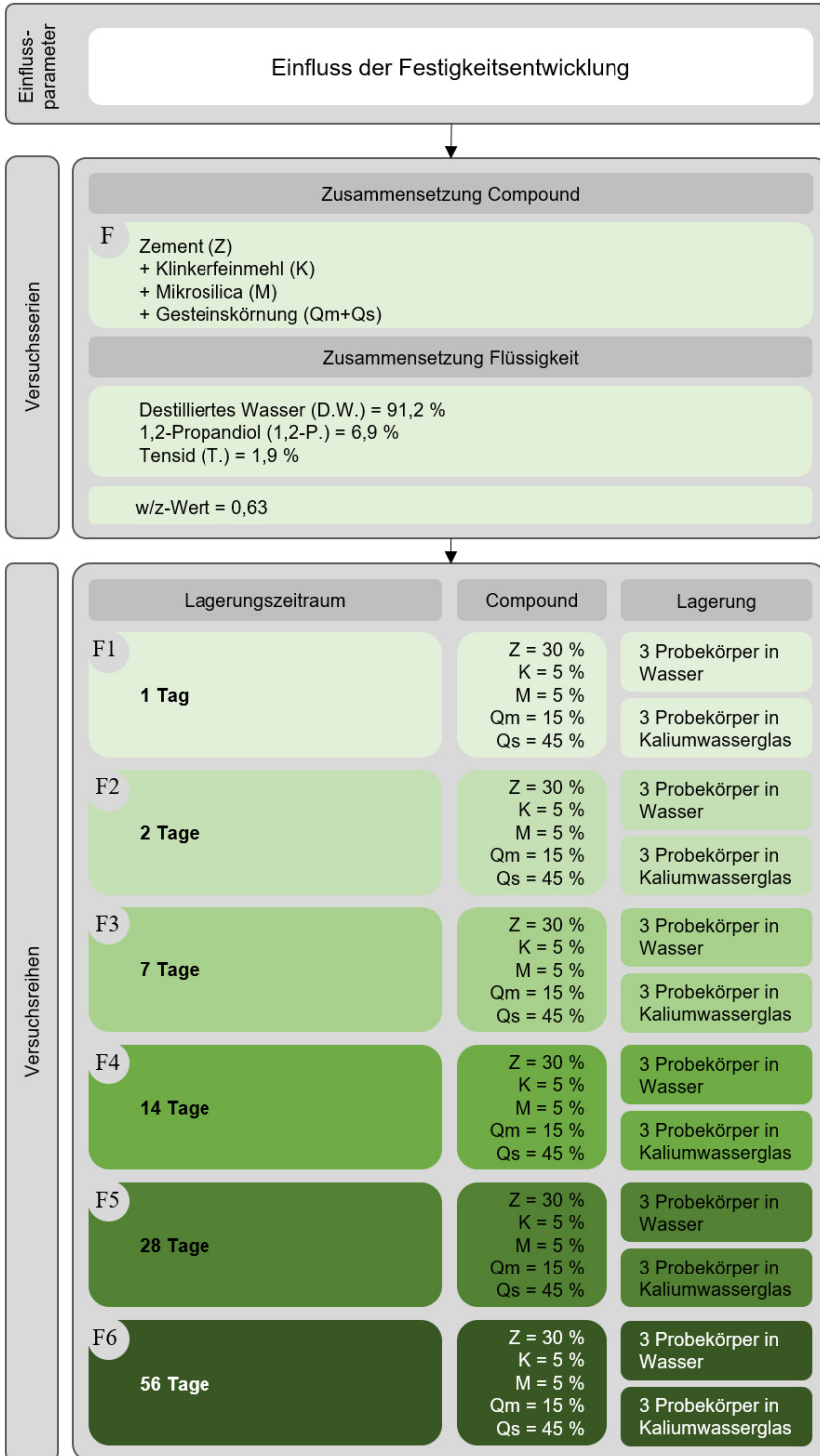


Abb. 3-92: Übersicht der Versuchsserie F

### 3.8.3 Versuchsergebnisse und Auswertung

Da der verwendete Compound sowie die Bindemittelflüssigkeit identisch zur Versuchsserie w/z gewählt wurde, wird an dieser Stelle auf die Auswertung der Pulveranalyse sowie Flüssigkeitsanalyse in Abschnitt 3.7.3.1 und 3.7.3.2 verwiesen.

#### 3.8.3.1 AF-Parameter

Die AF-Parameter der Versuchsserie F können aufgrund der identischen Produktion aller Versuchsreihen auf die Abstufung F1 reduziert werden. Die Auswertung dokumentiert erneut, dass die verwendete Trockenmörtelzusammensetzung in Bezug auf den Druck- und Schichtauftrag ausschließlich positiv zu bewerten ist. Des Weiteren ließen sich die Probekörper mit der eingebrachten Bindemittelflüssigkeitsmenge im Anschluss an den Druckprozess gut optimieren, sodass diverse Beeinträchtigungen der Druckfestigkeit infolge von Fehlstellen am Probekörper bei dieser Versuchsserie zu vernachlässigen sind.

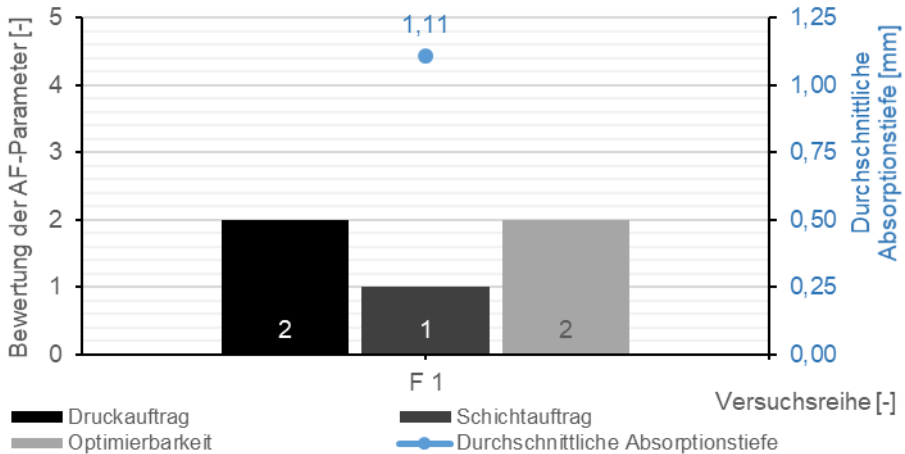


Abb. 3-93: Auswertung der AF-Parameter von Versuchsserie F

#### 3.8.3.2 Festbetonuntersuchungen

Hinlänglich bekannt ist, dass der Beton aufgrund von fortlaufenden, chemischen Prozessen mit der Zeit ein immer dichteres Gefüge und folglich höhere Festigkeiten aufweisen kann, sofern er nicht vollständig austrocknet. Im Allgemeinen nimmt die Festigkeitsentwicklung anfangs schneller zu und verlangsamt stetig mit höherem Alter. Dieses Verhalten ist ebenfalls bei Versuchsserie F zu beobachten. Hinsichtlich der Einteilung des verwendeten Compounds gemäß seiner Festigkeitsentwicklung wird diese in Anlehnung an DIN 1045-3 [148] trotz des hohen Reaktionsvermögens der Bindemittelbestandteile als langsam ( $r \geq 0,15$ ) bewertet. Auch die Festigkeitsentwicklung der in Wasserglas gelagerten Probekörper lässt sich nur in die mittlere



Kategorie ( $r \geq 0,30$ ) einstufen, obwohl mit dem CEM I 52,5 R und dem Klinkerfeinmehl eine wesentliche schnellere Festigkeitsentwicklung zu erwarten war. Dass sich diese Erwartung hingegen nicht bestätigte, liegt prinzipiell darin begründet, dass im Bewertungsschema der Norm das Verhältnis zwischen der Festigkeit nach zwei Tagen und 28 Tagen berücksichtigt wird und der additiv gefertigte Beton im 3DP-Verfahren eine relativ offenporige Matrix aufweist. Wie zum Abschluss des Abschnitts 2.4 grafisch veranschaulicht, entwickeln sich im Allgemeinen erst ab der Post-Accelerationsperiode langfaserige C-S-H-Morphologien, die den größeren Porenraum der 3D-gedruckten Betonelemente überbrücken und gleichzeitig bei ausreichender Verzahnung der Kristallstrukturen für eine hohe Festigkeit sorgen können. Diese Phase der Hydratation beginnt jedoch erst nach etwa 24 Stunden, sodass sich bis zur Druckfestigkeitsprüfung nach 48 Stunden potenziell noch keine enge Verflechtung der festigkeitsfördernden C-S-H-Phasen ausbilden konnte. Bei einem verdichteten Materialsystem wirkt sich das Reaktionsvermögen der beiden klinkerhaltigen Bindemittel eher auf die Frühfestigkeit des Betons aus, da bereits kleinste, auskristallisierte Hydratationsprodukte zur Bindung der einzelnen Bestandteile sowie zu einem festen Gefüge führen.

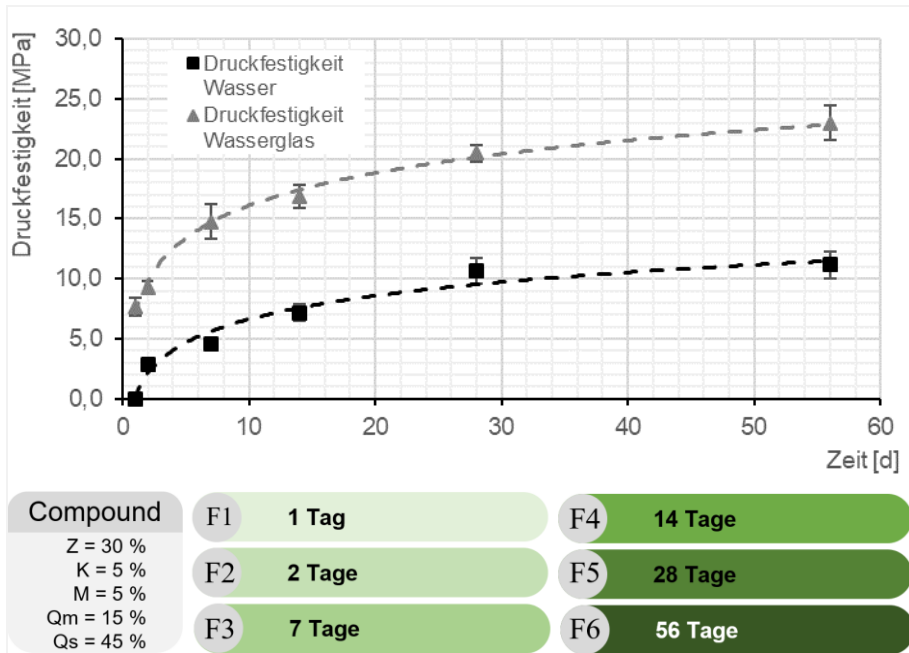


Abb. 3-94: Auswertung der Druckfestigkeit von Versuchsserie F

Sehr markant in der Auswertung der Festigkeitsentwicklung waren die Druckfestigkeitsergebnisse von Versuchsreihe F1 nach einem Tag, da die Probekörper aus der Wasserlagerung im Gegensatz zu den Probekörpern aus dem Wasserglas keine nennenswerte Druckfestigkeit aufweisen konnten (siehe Abb. 3-94 und Abb. 3-95). Hier verstärkte sich erneut die Annahme, dass sich zu Beginn primär dünntafelige C-A-H-Strukturen bilden konnten, die in Verbindung mit den

Ettringitkristallen für die 3DP-Standfestigkeit der 3D-gedruckten Betonkörper aus Versuchsserie F sorgten. Im Detail stellte sich bereits in der Analyse von Versuchsserie K und K+ heraus, dass durch einen Klinkerfeinmehlanteil von  $\geq 4\%$  eine frühzeitige geometrische Optimierung möglich ist. Mit der Versuchsserie F zeigte sich nun, dass diese Kristalle jedoch keine ausreichend messbare Druckfestigkeit erzeugen und nur mithilfe der chemischen sowie physikalischen Reaktion des Wasserglases eine dichtere und festere Matrix entstehen konnte.

Dieser Festigkeitsunterschied zwischen den beiden Lagerungsvarianten setzt sich auch bei späteren Druckfestigkeitsprüfungen fort und dokumentiert darüber hinaus den positiven Einfluss des Wasserglases wie zuvor in allen anderen Versuchsserien. Dass dieser Erhärtungsvorgang nach 56 Tagen noch nicht abgeschlossen ist und sich die Festigkeit im Vergleich zu konventionell gefertigtem Beton – bezogen auf die 28-Tage-Druckfestigkeit bei Normlagerung – in der Praxis größenordnungsmäßig annähernd verdoppelt und sogar nahezu verfünffachen kann, belegen die Untersuchungen von Walz [149]. Das Maß dieser Nacherhärtung ist je nach Zementsorte, Betonzusammensetzung und weiteren Einflussgrößen recht unterschiedlich. In Bezug auf die 28-Tage-Druckfestigkeit ist beim konventionellen Fertigungsverfahren mit einer umso größeren Nacherhärtung zu rechnen, je langsamer der Zement erhärtet, je höher der w/z-Wert sowie die Lagerungsfeuchte sind und je niedriger die Lagerungstemperatur ist [150]. Jedoch sind anhand der Auswertung in Abb. 3-94 und Abb. 3-95 beim 3DP-Verfahren keine größeren Sprünge in der Festigkeitsentwicklung nach 56 Tagen zu erwarten, da die prozentuale Festigkeitssteigerung stark abgenommen hat und der Verlauf einer Wurzelfunktion gleicht.

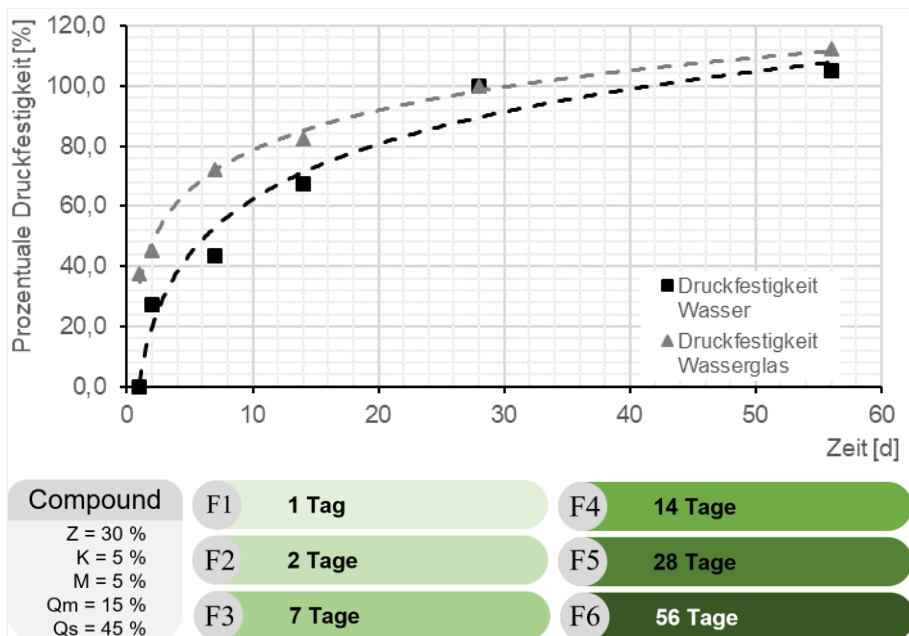


Abb. 3-95: Auswertung der prozentualen Druckfestigkeit von Versuchsserie F

## **4 Ergebnissynthese**

### **4.1 Allgemeines**

Nach Abschluss der diversen Versuchsserien werden im folgenden Kapitel die signifikanten Einflussfaktoren zusammengestellt sowie Empfehlungen in Bezug auf ein Herstellungskonzept für das 3DP-Verfahren gegeben. Hierbei werden sowohl die erbrachten Erkenntnisse für einen idealen Druckprozess aufgeführt als auch die potenziellen Möglichkeiten zur Optimierung der Festbetonparameter thematisiert.

### **4.2 Herstellungskonzept**

Hinsichtlich der Entwicklung und Komposition eines angepassten zementgebundenen Werkstoffes zum 3D-Drucken von Beton im Pulverdruckverfahren wurde zunächst dem Titel entsprechend eine Trockenmörtelzusammensetzung aus Zement und der charakteristischen Gesteinskörnung gewählt. Mit dieser Versuchsserie konnte trotz unterschiedlicher Anteilsmengen sowie einer bereits hohen Mahlfineinheit und Reaktivität des zementösen Bindemittels keine notwendige 3DP-Standfestigkeit nach 30 min erzielt werden. Die Gründe für die zu geringe Festigkeit liegen prinzipiell in der chemischen Zusammensetzung des verwendeten CEM I 52,5 R sowie in der davon abhängigen Hydratation. Sofern der Zement eine entsprechend hohe Menge an Calciumsulfat beinhaltet, erstarrt das Bindemittel im Vergleich zu Zementen mit geringem Sulfatanteil erst nach einigen Stunden, da durch die Beteiligung von gelöstem Sulfat anstelle von dünntafeligen, hexagonalen Calciumaluminathydraten kurze und nadelförmig ausgebildete Ettringitkristalle auf der Oberfläche der Calciumaluminat entstehen. Für die meisten baupraktischen Anwendungsfälle wäre ein Zement ohne den Sulfatbestandteil aufgrund des zu schnellen Ansteifverhaltens unbrauchbar. Für eine reibungslose Durchführung der geometrischen Optimierung 3D-gedruckter Betonelemente bedarf es hingegen entweder einen Zement mit geringeren Sulfatbestandteilen oder wie im vorliegenden Fall ein weiteres Bindemittel, das für die notwendige 3DP-Standfestigkeit sorgen kann.

Dieser Zusatzstoff wurde in Form von Klinkerfeinmehl ergänzt und besitzt neben seinen grundlegend feineren und folglich reaktiveren Eigenschaften einen geringeren Sulfatanteil. Demzufolge entwickeln sich im Allgemeinen schon nach wenigen Minuten Calciumaluminathydratphasen, die den Porenraum überbrücken und mit einem geringen Anteil von rund 5 M.-% für eine ausreichende 3DP-Standfestigkeit sorgen. Eine höhere Druckfestigkeit nach 28 Tagen kann hingegen mit einem gesteigerten Klinkerfeinmehlgehalt nicht zwingend erwartet werden. Da die C-A-H-Morphologien kein dichtes und stabiles Faserbündel wie beim Reißverschlussprinzip der C-S-H-Phasen bilden, sinken die Druckfestigkeitsergebnisse dementsprechend mit einem weiter ansteigenden Klinkerfeinmehlanteil. Daher können zur Gewährleistung einer ausreichenden 3DP-Standfestigkeit und einer gleichzeitig gewünschten, hohen Druckfestigkeit der additiv gefertigten Betonkörper ausschließlich Anteilsmengen vom Klinkerfeinmehl im einstelligen Prozentbereich angeraten werden.

Einen positiven Effekt hat das frühzeitige Erstarren des Compounds potenziell hinsichtlich der Produktion detailgetreuer Exponate. Da die hydratisierten Phasen

einen meist ausreichenden Widerstand bei der Nachbearbeitung mithilfe der Druckluft bieten, werden infolgedessen ausschließlich die unbedruckten Partikel vom gewünschten Exponat abgetragen. Relevant ist hierbei grundsätzlich, dass die durchschnittliche Absorptionstiefe minimal ist und eine hinreichende Menge an Wasser für die Entwicklung der festigkeitsfördernden Hydratphasen vorhanden ist. Die feinere Korngrößenverteilung des Klinkerfeinmehls hat in diesem gegenläufigen Spannungsverhältnis zwischen einer notwendigen Wassermenge und einem minimalen Ausblutungsbereich einen positiven Einfluss auf die Feuchtigkeitsbindung. Dies zeichnet sich gerade in der Gegenüberstellung zweier Versuchsreihen mit gleichem Verhältnis zwischen Bindemittelflüssigkeitsmenge bei Sättigung und eingebrachter Bindemittelflüssigkeitsmenge aus, sodass der Compound mit einem kleineren  $k_{\mu\text{m}}$ -Wert prinzipiell mehr Feuchtigkeit bindet bzw. eine geringere durchschnittliche Absorptionstiefe aufweist.

Dass die geringe durchschnittliche Absorptionstiefe im Wesentlichen nur ein untergeordneter Aspekt für eine einfache geometrische Optimierung detailgetreuer Bauteile ist, wird anhand der Versuchsergebnisse zum Einfluss des Silicastaubs deutlich. Für diese Serie stellte sich nachweislich trotz einer sehr geringen Abweichung zum bedruckten Querschnitt keine verbesserte Optimierbarkeit ein, da die Probekörper mit einem Silicastaubanteil von  $\geq 15 \text{ M.-%}$  keine ausreichende 3DP-Standfestigkeit besaßen. Für geringere Anteilsmengen ( $4 - 10 \text{ M.-%}$ ) konnte unterdessen eine Verbesserung der 3DP-Standfestigkeit festgestellt werden, jedoch kann dies nicht wie beim Klinkerfeinmehl auf eine chemische Reaktion zurückgeführt werden, sondern beruht eher auf den physikalischen Effekten bzw. interpartikulären Haftkräften. Des Weiteren weisen die mit Silicastaub angereicherten Betone im Allgemeinen eine erhärtungsbeschleunigende Wirkung auf, da die sehr feinen Partikel als Kristallisationskeime für die Hydratationsprodukte des Zements dienen. Demzufolge konnte im Gegensatz zu den Trockenmörtelzusammensetzungen ohne die beiden Zusatzstoffe zeitnaher eine ausreichende 3DP-Standfestigkeit erzielt werden, die eine optimale Nachbearbeitung gewährleistet. Die Ursache für die mangelnde Festigkeit beim Nachbearbeitungsprozess der Probekörper mit einem sehr hohen Silicastaubanteil liegt maßgeblich beim Schichtauftrag, der hinsichtlich einer unzureichenden Feuchtigkeitsaufnahme keinen „frisch in frisch“ Auftrag aufwies und letztendlich nach dem Bewertungsschema der AF-Parameter negativ (mit „4“) eingestuft wurde. Folglich ist im Hinblick auf eine konstant gleichbleibende Produktion ein „frisch in frisch“ Schichtauftrag ohne Striemen essentiell. Zudem sollte den Untersuchungsergebnissen nach im Vergleich zum ersten Zusatzstoff in Form vom Klinkerfeinmehl die Zugabemenge des Silicastaubs gleichermaßen reguliert werden. Dies bedeutet, dass für beide Zusatzstoffe eine Zugabemenge von  $5 \text{ M.-%}$  empfohlen werden kann.

Eine weitere Thematik, die in Verbindung mit dem Silicastaub sowie einem negativen Schichtauftrag steht, ist die Neigung zur Agglomeration sehr feiner Partikel. In der Versuchsserie zu einem gesteigerten Silicastaubgehalt konnte festgestellt werden, dass mit einem zu hohen Anteil Fehlstellen bis hin zu Rissen im Schichtauftrag forciert werden. Eine vergleichbare Problematik des aufgerissenen Layers ergibt sich mit einer zu groben Trockenmörtelzusammensetzung, da mitunter bei einem fließfähigen Compound die interpartikulären Haftkräfte geringer ausfallen und somit potenziell

Schäden bzw. Fehler im Schichtbild durch den Walzauftrag entstehen. Den fließfähigen Partikelzusammensetzungen mit einem Fließfunktionswert  $ff_c \geq 4$  stehen hinsichtlich der ermittelten Extrema die Mischungen mit einem Fließfunktionswert  $ff_c \leq 2$  gegenüber. Ein sehr kohäsives Fließverhalten lässt sich primär auf eine geringere Körnungsziffer resp. auf einen feineren Compound zurückführen. Dass sich der Fließfunktionswert nicht exakt proportional zur Körnungsziffer verhält und nur als Indiz gewertet werden kann, bestätigen die Analysen zu komparablen Versuchsreihen, wodurch die Vielfältigkeit der Einflussfaktoren für ein entsprechendes Fließverhalten verdeutlicht wird. Erwähnte Faktoren waren neben der Korngröße die Beschaffenheit bzw. der Habitus der differierenden Ausgangsstoffe, da infolge strukturierter Partikel wie beim Silicastaub oder Klinkerfeinmehl die interpartikulären Haftkräfte wesentlich stärker ausfallen als bei relativ kugelförmigen Quarzsandkörnern. Daher zeichneten sich die Versuchsreihen mit einem hohen Klinkerfeinmehlanteil aufgrund einer Kombination aus einem feinkörnigen Compound sowie einem unregelmäßigen Habitus der Klinkerfeinmehlpartikel durch ein sehr kohäsives Fließverhalten aus. Dieses Materialverhalten sorgte dafür, dass der Schichtauftrag teilweise nicht vollständig ausgeführt wurde, was mitunter zu Beschädigungen am gewünschten Exponat führen kann und demnach zu vermeiden ist. Die Gründe für das mangelhafte Druckbild stehen im Zusammenhang mit der Anzahl an Partikelkontakten pro Flächeneinheit. Diese ist umgekehrt proportional zum Quadrat der Partikelgröße, sodass die van-der-Waals-Kräfte bei feineren Trockenmörtelzusammensetzungen zunehmen. Zudem steigen die Haftkräfte der bedruckten Bereiche infolge Flüssigkeitsbrücken, sodass der negative Effekt eines unvollständigen Schichtauftrags verstärkt wird. Um diese negativen Einflussfaktoren für ein optimales Druckergebnis zu reduzieren oder gänzlich zu vermeiden, bedarf es daher einer detaillierten Pulveranalyse, bei der neben der Partikelgrößenverteilung und den unterschiedlichen Dichten des Compounds die Fließfähigkeit bestimmt wird, um die Gefahr eines aufgerissenen oder unvollständigen Layers zu minimieren. Anhand der Untersuchungsergebnisse sind demnach kohäsive Compounds mit einer Fließfähigkeit ( $2 < ff_c < 3$ ) zu empfehlen.

Ergänzende Analysemethoden zur Prognose der Fließfähigkeit eines Ausgangsstoffes und letztendlich eines fertigen Trockenmörtelgemischs ergeben sich aus der optischen Untersuchung mithilfe des Rasterelektronenmikroskops sowie aus der Bestimmung des Hausner-Faktors. Innerhalb der Versuchsserien konnte jeweils beobachtet werden, dass die Pulver mit einem Hausner-Faktor zwischen 1,41 und 1,65 in der Regel ein kohäsives Fließverhalten aufwiesen. Compounds mit einem geringeren Quotienten aus Stampfdichte und Schüttdichte (= Hausner-Faktor) sind tendenziell fließfähiger und haben demnach ein erhöhtes Risiko für einen negativen Schichtauftrag. Da sich in der Regel bei Versuchsreihen mit einem kohäsiven Fließverhalten sowie einem  $k_{\mu m}$ -Wert von  $(760 \pm 20)$  zzgl. eines gesättigten Druckauftrags nach dem Bewertungsschema der AF-Parameter mindestens ein guter Schichtauftrag ( $\leq$  „2“) einstellte, kann dies ebenfalls in Bezug auf ein Herstellungskonzept mit den verwendeten Materialien empfohlen werden.

Ein relevanter Parameter für den Hausner-Faktor stellt die erwähnte Schüttdichte dar und dient prinzipiell als Bindeglied zwischen den einwirkenden Komponenten und den daraus resultierenden Festbetoneigenschaften. Zu den einwirkenden Komponenten zählen u. a. der Feinheitsgrad des Compounds, der neben der thematisierten,

geringeren Fließfähigkeit resp. einem stärker ausgeprägten, kohäsiven Verhalten ein höheres Porenvolumen und infolgedessen eine geringere Schüttdichte erzeugt. Dass in Bezug auf die Entwicklung eines Compounds mit einem dichten Pulverbett beim 3DP-Verfahren die Schüttdichte relevanter als die Stampfdichte ist, erklärt sich einerseits aus dem Herstellungsprozess, da die einzelnen Partikel eines Layers in das Pulverbett der vorherigen Schicht fallen müssen und keine Verdichtungsenergie induziert werden kann. Andererseits bestätigen die Auswertungen der Versuchsserie zum Einfluss der Gesteinskörnung, dass mit einem feinkörnigeren Compound sowie einer geringeren Schüttdichte die Druckfestigkeiten sinken. Diese Erkenntnis bekräftigte wiederum die grundsätzliche Annahme, dass sich bei einer Trockenmörtelzusammensetzung mit einem größeren  $k_{\mu\text{m}}$ -Wert bzw. einem größeren Korngefüge eine verbesserte Lastübertragung einstellt, da sich die groben Körner innerhalb der Betonmatrix stützen und nur die Hohlräume durch feinere Partikel gefüllt werden. Zu beachten ist in diesem komplexen Kontext, dass zum einen die Entwicklung der Gefügedichtigkeit sowohl von der Kornverteilung als auch von der Art der beigefügten Feinstoffe (inert oder reaktiv) abhängig ist und zum anderen für die Festigkeitsbildung die physikalische Füllerwirkung im Vergleich zur chemisch-mineralogischen Wirkung reaktiver Feinstoffe nur gering ist. Demnach gilt es hinsichtlich der Konzeption eines druckfesten Compounds zunächst die Zusammensetzung der Bindemittelbestandteile zu beachten, um eine ausreichende 3DP-Standfestigkeit sowie eine hohe Auflösung der Betonkörper sicherzustellen. Im Anschluss daran sollte die Gesteinskörnung dahingehend adaptiert werden, dass eine hohe Schüttdichte und kohäsive Fließfähigkeit ( $2 < f_{f_c} < 3$ ) für einen optimalen Schichtauftrag realisiert wird.

Neben der Entwicklung eines kohäsiven Compounds für einen gleichmäßigen Schichtauftrag im 3DP-Verfahren sowie einer geeigneten Korngrößenverteilung angesichts einer möglichst idealen Kraftübertragung bedarf es einer Abstimmung der Trockenmörtelzusammensetzung in Bezug auf die einzubringende Bindemittelflüssigkeitsmenge. Hierzu ist zunächst die Bestimmung des Wasseranspruchs bis zur Sättigung erforderlich, um anschließend mithilfe der Parametereinstellungen am 3D-Drucker die entsprechende Feuchtigkeitsmenge für den Herstellungsprozess definieren zu können. Anhand der diversen Versuchsserien zeichnete sich ein antiproportionales Verhältnis zwischen der Feuchtigkeitsmenge bis zur Sättigung des Compounds sowie dessen Feinheitsgrad ab, der durch den  $k_{\mu\text{m}}$ -Wert quantifiziert wird. Demzufolge ist eine geringere Feuchtigkeitsmenge erforderlich, um grobkörnigere Zusammensetzungen vollkommen zu sättigen. Dieses Verhalten wirkte sich potenziell positiv auf die Benetzbarkeit der zementösen Bindemittel bei grobkörnigen Konglomeraten aus, da die Kontaktwinkelwerte im Allgemeinen mit größeren Partikeln abnehmen. Folglich begünstigte die optimierte Benetzung aller Bestandteile und insbesondere der Zementpartikel die Bildung langfaseriger C-S-H-Morphologien. Daher ist der Aspekt einer optimalen Benetzung bezüglich einer stabilen Betonmatrix unerlässlich und lässt sich nicht nur über die Oberflächenspannung und Viskosität der Bindemittelflüssigkeit steuern, sondern ist ein ebenso relevanter Bestandteil der Konzeption eines idealen Compounds für das 3DP-Verfahren.

In direkter Verbindung zu den erwähnten Parametern der Benetzbarkeit, Bindemittelflüssigkeitsmenge bis zur Sättigung des Compounds und eingebrachter Bindemittelflüssigkeitsmenge steht die durchschnittliche Absorptionstiefe. Wie bereits

dokumentiert, binden Korngefüge mit einem kleineren  $k_{\mu\text{m}}$ -Wert prinzipiell mehr Feuchtigkeit und reduzieren folglich die durchschnittliche Absorptionstiefe, jedoch wird dieser Einflussfaktor durch das Verhältnis zwischen Bindemittelflüssigkeitsmenge bei Sättigung und eingebrachter Bindemittelflüssigkeitsmenge ergänzt. Den differierenden Versuchsserien ist zu entnehmen, dass mit einem geringeren Verhältnis der beiden Feuchtigkeitsmengen die durchschnittliche Absorptionstiefe steigt und letztendlich die Auflösung bzw. Detailgenauigkeit der gewünschten Betonstruktur abnimmt. An diesem gegensätzlichen Spannungsverhältnis beteiligt sich zudem die Festigkeit der 3D-gedruckten Betonstrukturen sowie die Eigenschaft eines isotropen Materialverhaltens. Die Versuchsserien zum Einfluss der Gesteinskörnung sowie der Belastungsrichtung zeigten in diesem Kontext, dass ausschließlich mit einem optimalen Verbund zwischen den einzelnen Schichten die Differenz zu einem isotropen Materialverhalten minimal wird. Mit einem unzureichenden Schichtenverbund verstärkte sich das orthotrope Werkstoffverhalten, sodass sich die optische Erscheinung eines additiv gefertigten Exponates in Form einer sichtbaren Layerstruktur an den Seitenflächen auch im Bruchbild entlang der Schwachstelle bzw. parallel zur Schicht abzeichnete. Entscheidend für einen optimalen Verbund ist, dass ein gesättigter sowie vollständiger Druck- und Schichtauftrag realisiert werden kann, da andernfalls innerhalb der geschichteten Mikrostruktur Fehlstellen entstehen. Demnach gilt es in dem konträren Verhältnis zwischen der aufzubringenden Bindemittelflüssigkeitsmenge und der gewünschten Auflösung im Hinblick auf den optimalen Druckauftrag mit einem gesättigten Druckbild die Feuchtigkeitsmenge schwerer zu gewichten. Die besondere Relevanz der Feuchtigkeitsmenge in einer Betonzusammensetzung bzw. die Auswirkung des w/z-Wertes ist bereits aus dem konventionellen Fertigungsverfahren bekannt, jedoch konnte anhand der Versuchsserie zum w/z-Wert sowie weiterer komparablen Versuchsreihen festgestellt werden, dass mit einem höheren w/z-Wert resp. einem Feuchtigkeitseintrag, der an die Sättigungsmenge grenzt oder diese erreicht, gesteigerte Druckfestigkeiten erzielt werden.

Dieses völlig gegensätzliche Verhalten zu bekannten betontechnologischen Grundlagen beruht primär auf den Unterschieden in der Produktion konventionell hergestellter Probekörper und additiv gefertigter Exponate im 3DP-Verfahren. Signifikant ist in diesen differierenden Herstellungsprozessen, dass bei pulverbettbasierten Verfahren keine Mischenergie induziert werden kann und zudem eine vergleichbare maschinelle Verdichtung wie beim konventionellen Fertigungsverfahren ausbleibt. Infolge des Schichtauftrags mittels Walze wird lediglich eine Layerstruktur erzeugt, bei der zunächst durch die aneinanderstoßenden sowie ineinander fallenden Partikel ein möglichst dichtes Pulverbett entstehen soll. Die Stabilität dieser Matrix ist essentiell für die 3DP-Standfestigkeit und wird von der Anzahl der Kontaktpunkte sowie von den in der Prä-Induktionsperiode sich bildenden Kristallstrukturen bestimmt. Für eine anschließend hohe Endfestigkeit der 3D-gedruckten Betonelemente sind die weiteren chemischen Prozesse der Hydratation maßgebend, da explizit bei wassergelagerten Probekörpern ausschließlich durch ein dichtes Netz an Hydratphasen die Porosität des relativ offenporigen Gefüges abnehmen kann. Damit der Hydratationsprozess nicht aufgrund von physikalisch gebundenem Wasser behindert oder sogar gestoppt wird und eine vollständige Infiltration gewährleistet werden kann, bedarf es einer Sättigung des Compounds bzw. eines höheren

Feuchtigkeitseintrags. Dies verstärkt wiederum die Kohäsionskräfte zwischen den Schichten und begünstigt die Bildung langfaseriger C-S-H-Nadeln, die den Porenraums überbrücken, bevor anschließend weitere Kristallstrukturen den Zwischenraum langsam verdichten können.

Neben der Analyse des Wasseranspruchs und eines darauf abgestimmten Bindemittelflüssigkeitseintrags erfordert es eine angepasste Lagerung der Betonkörper, um die Festbetoneigenschaften weiter zu optimieren. In dieser Arbeit wurde neben der Normlagerung in Wasser eine zusätzliche Variante der Nachbehandlung in Wasserglas untersucht. Hierbei stellte sich heraus, dass sich neben einer konstant höheren Druckfestigkeit sowie einer geringeren Porosität die höhere Abriebfestigkeit der Betonoberfläche einstellte. Die dichtere Betonmatrix basiert einerseits auf einer physikalischen Verfestigung durch das Verdunsten des Wassers und einer prinzipiellen Ausgelierung des Wasserglases sowie andererseits auf der chemischen Erhärtung infolge einer Reaktion mit dem Kohlendioxid aus der Umgebungsluft. Des Weiteren reagiert der Silicatbestandteil des Wasserglases mit dem Portlandit zu weiteren festigkeitsfördernden C-S-H-Morphologien, sodass diese Lagerung abschließend als bevorzugte Nachbehandlungsvariante empfohlen wird.

Als Resultat der dokumentierten Untersuchungsergebnisse werden in Abb. 4-1 die diversen Zusammenhänge ergänzend in einer reduzierten Übersicht dargestellt. Die Auswirkung der einzelnen Einflussfaktoren hinsichtlich eines optimalen Herstellungsprozesses resp. idealer Festbetoneigenschaften wurden farblich hervorgehoben. Vorwiegend positive Einflussfaktoren, wie bspw. die Nachbehandlungsmaßnahme mit Wasserglas, sind in Grün betont und implizieren im Allgemeinen verbesserte betontechnologische Eigenschaften. Die rötlich gefärbten Aspekte, wie u. a. die Verwendung von Zement als einzigen Bindemittelbestandteil im Compound, zogen den Untersuchungen nach zumeist für das beschriebene Produktionsverfahren negative Konsequenzen nach sich. Neutrale bzw. graue Faktoren weisen in der Regel beide Optionen auf, sodass bis zu einem gewissen Anteil bzw. Wert die Qualität der 3D-gedruckten Betonkörper optimiert werden kann.

Hervorzuheben sind bei diesen vielfältigen Komponenten und deren Abhängigkeiten folgende Themen:

- Mit einem geringeren Verhältnis zwischen Bindemittelflüssigkeitsmenge bei Sättigung und eingebrachter Bindemittelflüssigkeitsmenge steigt das Potenzial einer vollständigen Hydratation und letztendlich einer höheren Druckfestigkeit der additiv gefertigten Betonelemente.
- Eine Wasserglasanachbehandlung erzeugt infolge chemischer sowie physikalischer Erhärtungsprozesse eine dichtere Betonmatrix und wiederum eine gesteigerte Festigkeit.
- Aus dem Grund einer notwendigen 3DP-Standfestigkeit zu einem sehr frühen Zeitpunkt bedarf es für das vorgestellte Herstellungsverfahren in einem gewissen Anteil schnell reaktive Bindemittel, die den Porenraum überbrücken und gleichermaßen für eine bessere Auflösung sorgen.
- Die Korngrößenverteilung sowie die Partikelform nehmen einen essentiellen Einfluss auf die Fließfähigkeit und bieten die Grundlage für ein positives Druckergebnis.



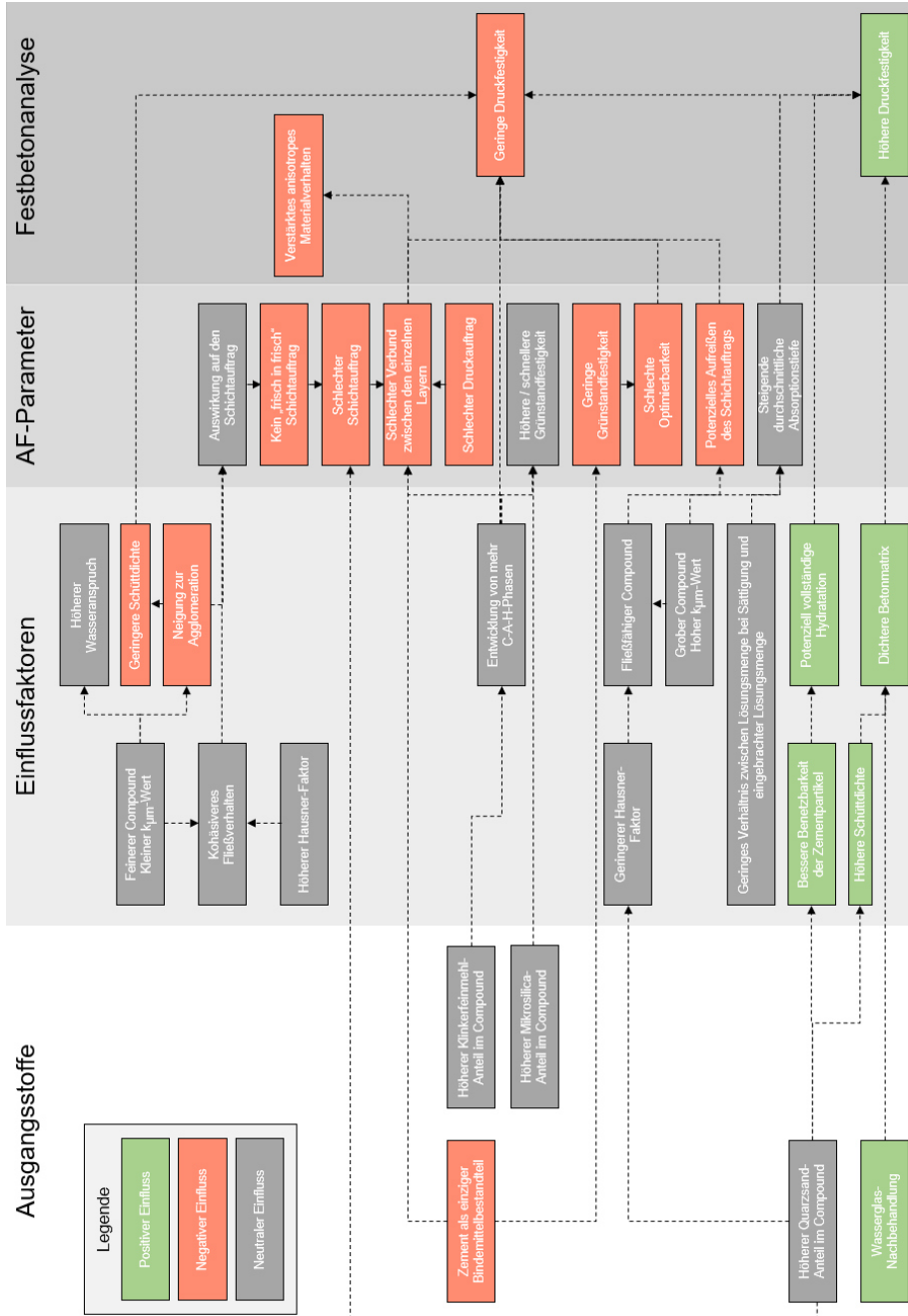


Abb. 4-1: Reduzierte Darstellung der komplexen Wechselbeziehungen

### 4.3 Eigenschaften des 3D-gedruckten Betons

In folgendem Abschnitt werden abschließend die Eigenschaften des 3D-gedruckten Betons im 3DP-Verfahren zusammengefasst, die im Allgemeinen mithilfe der Erkenntnisse aus dem Herstellungskonzept produziert wurden.

Der verwendete Compound kongruiert dabei mit der bewährten Zusammensetzung aus der Versuchsserie w/z, um neben einem positiven Druck- und Schichtauftrag eine ausreichende 3DP-Standfestigkeit zur einfachen geometrischen Optimierung gewährleisten zu können. Da die Auflösung in einem konträren Spannungsverhältnis zur Druckfestigkeit steht und ein gesättigter Druckauftrag sowie eine ideale Optimierbarkeit für diese Versuchsserie von zentraler Bedeutung waren, musste in dieser Hinsicht ein Kompromiss getroffen werden, sodass die eingebrachte Feuchtigkeitsmenge nicht dem Wasseranspruch des Compounds gleichgesetzt wurde. Der vorhandene w/z-Wert von 0,51 führte somit zu einer geringen, durchschnittlichen Absorptionstiefe von unter einem Millimeter. Die Lagerungsvariante im Wasserglas wurde aufgrund der durchweg positiven Ergebnisse in den dokumentierten Versuchsserien gewählt und die Nachbehandlungsdauer wurde in Anlehnung an DIN EN 196-1 [129] für 28 Tage vorgenommen.

Aus den Materialversuchen am 3D-gedruckten Beton konnte ein Mittelwert für die Rohdichte von rund  $1.700 \text{ kg/m}^3$  festgestellt werden, die mit der Rohdichte von Leichtbetonbauteilen ( $800 - 2.000 \text{ kg/m}^3$ ) [151] vergleichbar ist. Ein signifikanter Unterschied ergab sich in Bezug auf die Positionierung im Bauraum nicht. Bezüglich der Festbetoneigenschaften wiesen die im 3-Punkt-Biegezugversuch nach DIN EN 196-1 [129] geprüften 3D-gedruckten Betonprismen eine Biegezugfestigkeit im Mittel von  $3,6 \text{ MPa}$  auf und nahmen im Anschluss infolge der Druckfestigkeitsuntersuchung im Durchschnitt noch eine Spannung von  $17,5 \text{ MPa}$  auf. Die zentrische Zugfestigkeit wurde anhand des Zusammenhangs zwischen Druck-, Biegezug-, Spaltzug- und Zugfestigkeit wie folgt berechnet [152]:

$$f_{\text{ct,sp}} = \frac{f_{\text{c}}}{8} = \frac{17,5}{8} = 2,1 \text{ MPa} \quad (4-1)$$

$$f_{\text{ct,sp}} = \frac{f_{\text{ct,fl}}}{1,7} = \frac{3,6}{1,7} = 2,1 \text{ MPa} \quad (4-2)$$

$$f_{\text{ct}} = 0,9 \cdot f_{\text{ct,sp}} = 0,9 \cdot 2,1 = 1,9 \text{ MPa} \quad (4-3)$$

Dabei ist

$f_{\text{ct,sp}}$  die Spaltzugfestigkeit [MPa]

$f_{\text{c}}$  die Druckfestigkeit [MPa]

$f_{\text{ct,fl}}$  die Biegezugfestigkeit [MPa]

$f_{\text{ct}}$  die Zugfestigkeit [MPa]

In DIN EN 1992-1-1 [153] ist für Normalbetone der E-Modul in Abhängigkeit von der Druckfestigkeitsklasse tabelliert. Nach dieser beträgt der mittlere E-Modul eines Betons der Druckfestigkeitsklasse C12/15 etwa 27.000 MPa und ein Beton der Klasse C16/20 ca. 29.000 MPa. Demzufolge müsste der E-Modul bzw. das Druckmodul des 3D-gedruckten Betonkörpers bei einer Druckfestigkeit von 17,5 MPa in etwa bei 28.000 MPa liegen. Da das 3D-gedruckte Material allerdings eine Dichte im Bereich der Leichtbetone besitzt, wiesen die Probekörper erwartungsgemäß ein geringeres E-Modul von 11.800 MPa auf, was wiederum mit dem gängigen E-Modul von Leichtbetonen in der jeweiligen Druckfestigkeitsklasse [154, 155] korreliert.

Die Querkontraktionszahl ( $\nu$ ), die das Verhältnis von Querdehnung zu Längsstauchung im elastischen Dehnungsbereich angibt, wurde anhand von vergleichbaren Werten der Literatur bestimmt. Für Normalbeton zeigt sich in Abhängigkeit von unterschiedlichen Betone eine Schwankungsbreite von  $0,14 \leq \nu \leq 0,26$  [156]. Bei Leichtbetonen wurden Querdehnzahlen von  $\nu \approx 0,2$  unabhängig von der verwendeten Matrix bestimmt [157]. Für den additiv gefertigten Beton im 3DP-Verfahren ist somit die definierte Poissonzahl von  $\nu = 0,18$  in einer realistischen Größenordnung, da sie sowohl zur Schwankungsbreite der Normalbetone als auch zum Wert für Leichtbetone passt.

Das Kompressionsmodul für Festkörper entspricht dem Kehrwert der Kompressibilität und kann aus der Elastizitätskonstanten in Verbindung mit der Poissonzahl bzw. Querkontraktionszahl anhand von Gl. (4-4) berechnet werden [158]. Das Schubmodul bzw. die charakterisierte Gestaltelastizität des Körpers steht ebenfalls nach Gl. (4-5) in einer Beziehung zum E-Modul sowie der Querdehnungszahl und wird wie folgt ermittelt:

$$K = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)} = \frac{11.800}{3 \cdot (1 - 2 \cdot 0,18)} = 6.100 \text{ MPa} \quad (4-4)$$

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = \frac{11.800}{2 \cdot (1 + 0,18)} = 5.000 \text{ MPa} \quad (4-5)$$

Dabei ist

- K        das Kompressionsmodul [MPa]
- G        das Schubmodul [MPa]
- $\nu$         die Querkontraktionszahl

In Tab. 4-1 werden zur abschließenden Übersicht die ermittelten Materialeigenschaften des nach dem Herstellungskonzept produzierten 3D-gedruckten Betons im 3DP-Verfahren zusammengestellt.

Tab. 4-1: Materialeigenschaften des 3D-gedruckten Betons

Eigenschaften	Variable	Wert
Dichte	$\rho$	1.700 kg/m <sup>3</sup>
Elastizitätsmodul	E	11.800 MPa
Querkontraktionszahl	$\nu$	0,18
Kompressionsmodul	K	6.100 MPa
Schubmodul	G	5.000 MPa
Zugfestigkeit	$f_{ct}$	1,9 MPa
Druckfestigkeit (horizontal)	$f_{c,H}$	17,5 MPa
Die horizontale Druckfestigkeit entspricht einer orthogonalen Belastung zum horizontalen Schichtaufbau.		

## **5 Fazit und Ausblick**

### **5.1 Fazit**

Die Additive Fertigung ist im Zeitalter der Digitalisierung ein stark aufstrebendes Forschungsgebiet mit dem Potenzial, die zukünftige Produktion verschiedener Güter schneller, individueller und ressourcenschonender zu gestalten. Für die Bauindustrie ergeben sich im Zuge dessen mithilfe innovativer Methoden bzw. Verfahrensarten verschiedene Möglichkeiten, um an diesem progressiven Entwicklungsprozess der Digitalisierung zu partizipieren. Zu den bekannten, betontechnologischen Verfahrensarten zählen neben den extrudierenden Methoden die pulverbett-basierten Verfahrenstechniken, die mit dem 3DP-Verfahren die Grundlage für die vorliegende Arbeit darstellte. Neben der Erforschung neuer additiver Fertigungsverfahren sowie der kontinuierlichen Weiterentwicklung bestehender Technologien konzentrieren sich Forschungseinrichtungen und die Industrie vorwiegend auf drei Themen: Entwicklung von Möglichkeiten, um die Mindestschichtstärken zu reduzieren; die Fertigungs- und Rüstzeiten der Anlagen zu minimieren; sowie neue oder verbesserte Werkstoffe zu entwickeln und einzusetzen [159]. Letztere Thematik bezieht sich auf den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit mit dem Ziel, additiv gefertigte Exponate hinsichtlich einer hohen Druckfestigkeit, detaillierten Auflösung sowie einer funktionalen Produktion zielsicher herstellen zu können. Daher wurde der Fokus auf die Analyse verschiedener Einflussfaktoren für die Entwicklung eines angepassten zementgebundenen Werkstoffes zum 3D-Drucken von Beton im 3DP-Verfahren gerichtet. Zu den untersuchten Einflussfaktoren zählten u. a. neben einer druckfähigen Bindemittelflüssigkeit sowie dem wesentlichen Ausgangsstoff Zement die ergänzenden Zusatzstoffe in Form von Klinkerfeinmehl und Silicastaub. Darüber hinaus galt es zu analysieren, welche Partikelgrößenverteilung sich positiv auf die Festbetonmatrix auswirkt und in welchem Maß der additiv gefertigte Beton im 3DP-Verfahren isotrope bzw. anisotrope Materialeigenschaften aufweist.

Als ein entscheidender Faktor in Bezug auf die Optimierbarkeit und Stabilität der 3D-gedruckten Betonstrukturen konstatierte sich in der ersten Versuchsserie die 3DP-Standfestigkeit. Da mithilfe einer Trockenmörtelzusammensetzung bestehend aus Zement und Gesteinskörnung keine ausreichende Stabilität 30 min nach Druckvorgangsende sichergestellt werden konnte, wurde der Zusatzstoff Klinkerfeinmehl ergänzt. Maßgebend für die Zugabe des Klinkerfeinmehls waren die reaktiveren Eigenschaften im Gegensatz zum bereits schnell erhärtenden CEM I 52,5 R. In der abgestimmten Versuchsserie zum Klinkerfeinmehleinfluss konnte festgestellt werden, dass nur ein geringer Anteil notwendig ist, um eine ausreichende 3DP-Standfestigkeit zu gewährleisten. Größere Anteilsmengen schwächten wiederum die Endfestigkeit der Betonmatrix, da sich vermehrt kubische oder monokline C-A-H-Kristallstrukturen entwickeln konnten. Diese Strukturen überbrücken zwar den wassergefüllten Porenraum und erzeugen somit eine höhere 3DP-Standfestigkeit, jedoch reduzierte sich dadurch die Endfestigkeit, da sich kein dichtes Faserbündel wie beim Reißverschlussprinzip der C-S-H-Phasen einstellte.

Ein ähnliches Verhalten konnte bei der Analyse der Versuchsserie zum zweiten Zusatzstoff festgestellt werden. Mit einem geringen Silicastaubgehalt im Compound

konnte zum einen die Auflösung aufgrund einer geringeren durchschnittlichen Absorptionstiefe optimiert werden und zum anderen stellte sich ebenfalls eine höhere 3DP-Standfestigkeit ein. Sofern die Probekörper hingegen keine ausreichende Stabilität beim Nachbearbeitungsprozess aufweisen, nehmen alle weiteren Faktoren eine untergeordnete Rolle in Bezug auf die Festbetoneigenschaften ein. Des Weiteren bestätigte sich bei dieser Versuchsserie, dass infolge einer hohen 3DP-Standfestigkeit bzw. Frühfestigkeit nicht zwangsläufig eine hohe Druckfestigkeit nach 28 Tagen zu erwarten ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass innerhalb des 3D-gedruckten Betongefüges aufgrund eines schlechteren Verbunds zwischen den einzelnen Layern die Matrix gestört sein kann und sich somit keine optimale Kraftübertragung einstellt. Zu berücksichtigen ist folglich in diesem konträren Spannungsfeld, dass neben der aufzudruckenden Feuchtigkeitsmenge eine darauf abgestimmte Bindemittelmenge definiert wird, um einerseits den Wunsch nach einer schnellen 3DP-Standfestigkeit sowie einer optimalen Einhaltung des bedruckten Querschnittes gerecht zu werden und andererseits eine hohe Endfestigkeit des 3D-gedruckten Betons sicherstellen zu können.

Zur Sicherstellung einer hohen Endfestigkeit bedarf es neben der essentiellen Bindemittelzusammensetzung noch einer adaptierten Komposition des Zuschlags. Die Partikelgröße der differierenden Gesteinskörnungen beeinflusst dabei die Gestaltungsparameter sowohl des Druckprozesses als auch des Endproduktes. Zu den betroffenen Faktoren zählen die Porengröße, Oberfläche, Oberflächenrauheit und minimale Darstellungsgröße. Feine Pulver haben die potenziellen Vorteile einer detaillierteren Oberflächenstruktur und geringeren Oberflächenrauheit infolge dünnerer Schichten [160]. Größere Partikel lassen sich leichter verteilen und haben eine kleinere Oberfläche pro Volumen, jedoch entstehen größere Poren, die eine suboptimale Fluidmigration durch das Schichtgefüge ermöglicht. Zudem besteht bei groben bzw. fließfähigen Trockenmörtelzusammensetzungen ( $ff_c > 3$ ) die erhöhte Gefahr eines negativen Schichtauftrags und letztlich eines beschädigten Probekörpers. Daher ist besonders darauf zu achten, dass der Compound noch eine ausreichende Verzahnung impliziert bzw. ein kohäsives Fließverhalten ( $2 < ff_c < 3$ ) aufweist, um im Herstellungsprozess einen idealen Schichtauftrag zu erhalten.

Des Weiteren konnte anhand der Versuchsserie zum Einfluss der Gesteinskörnung festgestellt werden, welche Auswirkung die Korngrößenverteilung auf die Herstellung druckfester Bauteile im 3DP-Verfahren hat. Tendenziell kennzeichnen sich die Zusammensetzungen mit einem höheren Quarzsandgehalt durch eine gesteigerte Festigkeit aus, jedoch kann dies nicht einzig und allein auf den erhöhten Quarzsandgehalt abstrahiert werden. Relevant ist die optimale Abstufung der einzelnen Partikelgrößen. Multimodale Pulverformulierungen, die eine Vielzahl von Korndurchmessern enthalten, können die Vorteile sowohl kleiner als auch großer Partikelgrößen bieten. Die großen Partikel ermöglichen eine bessere Kraftübertragung und verringern die Gesamtoberfläche des Compounds, während die kleineren Partikel die Hohlräume zwischen den großen Partikeln ausfüllen, um gerade beim 3DP-Verfahren eine möglichst hohe Packungsdichte zu erreichen. Ein negativer Effekt der gesteigerten Packungsdichte des Compounds ist, dass sich die Permeabilität verringert und die zementösen Bestandteile trotz ausreichendem Feuchtigkeitseintrag potenziell zu wenig Wasser für eine vollständige Hydratation erhalten. Um dennoch

eine optimale Benetzung der Partikel zu ermöglichen, wurde die relativ hohe Oberflächenspannung vom Wasser ( $73,4 \frac{\text{mN}}{\text{m}}$ ) stark reduziert. Die verwendete Bindemittelflüssigkeit wies letztlich nur noch eine Oberflächenspannung von  $26,4 \frac{\text{mN}}{\text{m}}$  auf und führte somit zu verbesserten Ergebnissen im Druckauftrag.

Weshalb die Packungsdichte zudem während dem Druckvorgang einen signifikanten Einfluss u. a. auf die Festbetoneigenschaften nimmt, ergibt sich aus dem Vergleich zum konventionellen Produktionsablauf. Durch den fehlenden Mischprozess kann der Zementleim die Gesteinskörnung nicht umschließen und erzeugt somit keinen idealen Verbund zwischen den einzelnen Partikeln. Des Weiteren kann keine nachträgliche Verdichtung analog zur konventionellen Fertigung vorgenommen werden, da sich infolge des sequenziellen Schichtaufbaus die einzelnen Layer je nach Bauteilgröße in unterschiedlichen Phasen der Hydratation befinden und demzufolge eine potenzielle Verdichtungsenergie Fehlstellen in den erhärteten Schichten forcieren würde. Bspw. sind die zementösen Bestandteile der ersten Lagen des Probekörpers bereits in der Accelerationsperiode, sodass sich in diesem Bereich ein dichter werdendes Kristallgefüge ausbilden konnte, wohingegen sich die letzten Schichten je nach Verweildauer nach dem Druckvorgangsende noch in der Induktionsperiode befinden. Für die Nachbearbeitung ist es demnach essentiell, dass trotz der differierenden Hydratationsstadien eine ausreichende 3DP-Standfestigkeit in allen Bereichen des Exponates vorherrscht.

Eine weitere Thematik, die innerhalb des Versuchsprogramms analysiert wurde, war der w/z-Wert. Infolge umfangreicher Untersuchungen konnte ein gegensätzliches Verhalten zum charakteristischen Verlauf der konventionellen Betontechnologie zwischen Druckfestigkeit und w/z-Wert ermittelt werden. Bis zur Sättigung des Compounds führte ein erhöhter Feuchtigkeitseintrag zu einer geringeren Porosität sowie zu einer Steigerung der Druckfestigkeit. Anhand der Quecksilberporosimetrie ließ sich ebenfalls feststellen, dass mit einem Anstieg der Bindemittelflüssigkeitsmenge der prozentuale Anteil an Gelporen innerhalb der Betonmatrix größer wird, was folglich mit einer fortgeschrittenen Hydratation resp. einem dichteren Netz aus Hydratphasen in Verbindung steht. In diesem Zusammenhang einer höheren Feuchtigkeitsabgabe pro Layer konnten weitere Wechselbeziehungen zu signifikanten Parametern des Druckprozesses dokumentiert werden. U. a. beeinflusst die aufgedruckte Bindemittelflüssigkeitsmenge den Druck- und Schichtauftrag. Da diese Aspekte jedoch zuvor nicht einheitlich quantifiziert werden konnten, wurde für die AF-Parameter ein Bewertungsschema definiert. Mithilfe dieses Schemas zeigte sich ein anti-proportionales Verhältnis zwischen Druck- und Schichtauftrag, da ein höherer Feuchtigkeitseintrag eine größere Absorptionstiefe impliziert und somit der Druckauftrag in Bezug auf das Bewertungsschema schlechter zu bewerten ist. Konträr dazu erfährt der Schichtauftrag mit einer gesteigerten Bindemittelflüssigkeitsmenge pro Layer potenziell eine positivere Bewertung, da eher ein s. g. „frisch in frisch“ Auftrag bzw. ein besserer Verbund zwischen den einzelnen Layern gewährleistet werden kann. Zudem führte ein optimierter Schichtenverbund eher zu einem isotropen Materialverhalten. Anhand der unterschiedlichen Versuchsreihen zeigte sich weiterhin, dass neben der Bindemittelflüssigkeitsmenge die Formulierung des Compounds einen maßgebenden Anteil auf die AF-Parameter

nimmt. Im Allgemeinen bedeutet dies, dass der Compound vor dem Flüssigkeitsauftrag stabil, packungsdicht und leicht zu benetzen sein sollte. Nach dem Druck- und Schichtvorgang kehren sich die Anforderungen teilweise um. Der bedruckte Bereich des Betons soll möglichst wenig Feuchtigkeit an die angrenzenden Partikel abgeben bzw. die Ausblutungstiefe so gering wie möglich halten, damit die Formgebung erhalten bleibt und detaillierte Strukturen realisierbar sind. Da nicht alle Parameter aufgrund der dargelegten Wechselbeziehungen gleichzeitig optimiert werden können, führt dies in Anbetracht der Anforderungen an das 3D-gedruckte Betonelement dazu, dass eine Abwägung erfolgen muss, welche Faktoren bei der Produktion des Exponates essentiell sind.

Ohne eine negative Wechselwirkung zeichnete sich hingegen die Nachbehandlung mit Wasserglas aus. Da aufgrund des additiven Herstellungsprozesses eine größere Porosität zu erwarten war, wurde diese spezielle Lagerungsvariante zusätzlich neben der normierten Wasserlagerung vorgenommen. Mithilfe der physikalischen Abdichtung und chemischen Verfestigungsprozesse des Wasserglases konnte folglich eine abriebfestere, dichtere sowie stabilere Betonmatrix produziert werden. Anhand der Analysierung diverser Versuchsreihen mit einer Wasserglasnachbehandlung bestätigte sich ebenfalls der kausale Zusammenhang zwischen einer verringerten Porosität sowie einer gesteigerten Druckfestigkeit, wobei in Bezug auf den Untersuchungsprozess der Quecksilberporositätmessung darauf zu achten war, in welchem Bereich des Probekörpers das zu prüfende Material entnommen wurde. Im Randbereich konnte im Gegensatz zum Kernbereich eine wesentlich dichtere Betonmatrix festgestellt werden.

Als Limitation des Versuchsprogramms ist die geringe Anzahl an Probekörpern in jeder Versuchsreihe zu nennen, da selbst ein Ausreißer einen maßgeblichen Einfluss auf die Auswertung nimmt. Des Weiteren kann trotz des Einsatzes eines Intensivmischers im Vorfeld des Druckvorgangs eine Auflösung aller Agglomerate der sehr feinen Bindemittelbestandteile im Compound nicht gänzlich gewährleistet werden. Demzufolge kann man nicht von einem ideal homogenen Trockenmörtelgemisch ausgehen und muss letztendlich mit entsprechenden Unregelmäßigkeiten im Schichtauftrag sowie Schwankungen der Betoneigenschaften rechnen. Ein konstanter w/z-Wert für alle Versuchsserien konnte aufgrund limitierter Maschineneigenschaften und Druckkopfmengen nicht realisiert werden. Zum einen ist der maximal einstellbare Feuchtigkeitsauftrag durch die Software begrenzt und zum anderen beschleunigt eine höhere Durchflussrate den Verschleiß des thermisch gesteuerten Druckkopfes, sodass dieser Parameter bei der hohen Anzahl an Versuchsreihen für diese Arbeit berücksichtigt werden musste. Die Grundeinstellungen des 3D-Pulverdruckers blieben hingegen bei allen Versuchsserien identisch und die Herstellung erfolgte dabei stets nach dem gleichen Schema. Trotz der vorhandenen Limitationen ließ sich anhand der generierten Forschungsdaten abschließend ein grundlegendes Herstellungs-konzept 3D-gedruckter Betonstrukturen im 3DP-Verfahren generieren. Zudem konnte mithilfe der Auswertungen die Komplexität des Herstellungsprozesses in Bezug auf die diversen Abhängigkeiten und Einflussfaktoren verdeutlicht werden. Eine computergestützte Simulation der Produktion sowie des Verfestigungsprozesses konnte dazugl. nicht entwickelt werden. U. a. ist die Hydratation des Zements im Allgemeinen bereits ein komplexer Vorgang, da das Bindemittel neben den



physikalischen und chemischen Eigenschaften wesentlich von der Temperatur sowie vom Wassergehalt im Gefüge beeinflusst wird. Diesen Prozess sowie ergänzend den Druckvorgang zu modellieren, stellt sich aufgrund der Vielzahl gegenseitig beeinflussender Parameter als zu diffizil dar. Insbesondere ändern sich ständig während der automatisierten Produktion bspw. die Packungsdichte, der Anteil an Bindemittelbestandteilen in jeder Schicht sowie die Randbedingungen für den Wassergehalt und -transport im Gefüge durch die voranschreitende Hydratation, was eine Quantifizierung dieser Einflussgrößen sehr erschwert.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] SADALLA, E. K.; SHEETS, V. L.: *Symbolism in Building Materials*. In: *Environment and Behavior* 25 (2016), Nr. 2, S. 155–180
- [2] ZEYN, H.: *Industrialisierung der Additiven Fertigung: Digitalisierte Prozesskette von der Entwicklung bis zum einsetzbaren Artikel Industrie 4.0*. 1. Aufl.: Beuth Verlag, 2017
- [3] SHAKOR, P.; NEJADI, S.; PAUL, G.; SANJAYAN, J.: *A novel methodology of powder-based cementitious materials in 3D inkjet printing for construction applications*. 6th International Conference on Durability of Concrete Structures. University of Leeds, Leeds, West Yorkshire, (18.-20.07.2018), S. 685–695
- [4] FENG, P.; MENG, X.; CHEN, J.-F.; YE, L.: *Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders*. In: *Construction and Building Materials* 93 (2015), S. 486–497
- [5] FELDMANN, C.; GORJ, A.: *3D-Druck und Lean Production*. 1. Aufl.: Springer, 2017
- [6] LIPSON, H.; KURMAN, M.: *Fabricated: The new world of 3D printing*. 1. Aufl.: John Wiley & Sons, 2013
- [7] ENGELN, W.; BAUM, A.: *Additive Fertigung und Produktentwicklung*. In: *Sprache und Literatur* 46 (2015), 1-2, S. 21–38
- [8] LACHMAYER, R.: *Additive Manufacturing Quantifiziert: Visionäre Anwendungen und Stand der Technik*. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017
- [9] THOMAS, O.; KAMMLER, F.; ZOBEL, B.; SOSSNA, D.; ZARVIC, N.: *Supply chain 4.0: Revolution in der Logistik durch 3D-Druck*. In: *IM+ io Fachzeitschrift für Innovation, Organisation und Management* 1 (2016), S. 58–63
- [10] ASTM F2792–12a:2013. *Standard terminology for additive manufacturing technologies*
- [11] VDI 3405:2014-12. *Additive Fertigungsverfahren Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen*
- [12] RIFKIN, J.: *The third industrial revolution: How the internet, green electricity, and 3-d printing are ushering in a sustainable era of distributed capitalism*. In: *World Financial Review* 1 (2012), Nr. 1, S. 4052–4057
- [13] *Special Report, A Third Industrial Revolution*. In: *the economist* 4 (2012), S. 3–12
- [14] NYMAN, D.; BREIT, W.: *Entwicklung eines zementgebundenen Werkstoffs zum 3D-Drucken von Beton im Pulverdruckverfahren*. In: *4. Grazer Betonkolloquium* (2018), S. 177–184
- [15] WIRTH, M. A. A.: *Additive Fertigung*. Würzburg. Dissertation:2017

- [16] BUSWELL, R. A.; THORPE, A.; SOAR, R. C.; GIBB, A.G.F.: *Design, data and process issues for mega-scale rapid manufacturing machines used for construction*. In: *Automation in Construction* 17 (2008), Nr. 8, S. 923–929
- [17] BERMAN, B.: *3-D printing: The new industrial revolution*. In: *Business Horizons* 55 (2012), Nr. 2, S. 155–162
- [18] VAEZI, M.; CHUA, C. K.: *Effects of layer thickness and binder saturation level parameters on 3D printing process*. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 53 (2011), 1-4, S. 275–284
- [19] FASTERMANN, P.: *3D-Druck/Rapid Prototyping: Eine Zukunftstechnologie-kompakt erklärt*: Springer-Verlag, 2012
- [20] MIRONOV, V.; BOLAND, T.; TRUSK, T.; FORGACS, G.; MARKWALD, R. R.: *Organ printing: computer-aided jet-based 3D tissue engineering*. In: *TRENDS in Biotechnology* 21 (2003), Nr. 4, S. 157–161
- [21] SHAKOR, P.; SANJAYAN, J.; NAZARI, A.; NEJADI, S.: *Modified 3D printed powder to cement-based material and mechanical properties of cement scaffold used in 3D printing*. In: *Construction and Building Materials* 138 (2017), S. 398–409
- [22] WEGRZYN, T. F.; GOLDING, M.; ARCHER, R. H.: *Food Layered Manufacture: A new process for constructing solid foods*. In: *Trends in Food Science & Technology* 27 (2012), Nr. 2, S. 66–72
- [23] NYMAN, D.; BREIT, W.: *3D-PowderPrinting - Next Level*. In: *CPT Worldwide - Construction Printing Technology* (2020), Nr. 03, S. 14–22
- [24] LLORET, E.; SHAHAB, A. R.; LINUS, M.; FLATT, R. J.; GRAMAZIO, F.; KOHLER, M.; LANGENBERG, S.: *Complex concrete structures*. In: *Computer-Aided Design* 60 (2015), S. 40–49
- [25] JOHNSTON, D. W.: *Design and construction of concrete formwork*. In: *Concrete construction engineering handbook* (2008), S. 7.1–7.48
- [26] THOMAS, O.; KAMMLER, F.; SOSSNA, D.: *Smart Services: Geschäftsmodell-innovationen durch 3D-Druck*. In: *Wirtschaftsinformatik & Management* 7 (2015), Nr. 6, S. 18–29
- [27] KHOSHNEVIS, B.: *Additive fabrication apparatus and method*. University of Southern California. United States: U.S. Patent and Trademark Office. Veröffentlichungsnr. 5,529,471
- [28] KHOSHNEVIS, B.: *Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies*. In: *Automation in Construction* 13 (2004), Nr. 1, S. 5–19
- [29] NÄTHER, M.; NERELLA, V. N.; KRAUSE, M.; KÜNZE, G.; MECHTCHERINE, V.; SCHACH, R.: *Beton-3D-Druck-Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton. Abschlussbericht* (2017)

- [30] BOSSCHER, P.; WILLIAMS, R. L.; BRYSON, L. S.; CASTRO-LACOUTURE, D.: *Cable-suspended robotic contour crafting system*. In: *Automation in Construction* 17 (2007), Nr. 1, S. 45–55
- [31] LIM, S.; BUSWELL, R. A.; LE, T. T.; AUSTIN, S. A.; GIBB, A.G.F.; THORPE, T.: *Developments in construction-scale additive manufacturing processes*. In: *Automation in Construction* 21 (2012), S. 262–268
- [32] ZHANG, J.; KHOSHNEVIS, B.: *Optimal machine operation planning for construction by Contour Crafting*. In: *Automation in Construction* 29 (2013), S. 50–67
- [33] MECHTCHERINE, V.; NERELLA, V. N.: *Beton-3D-Druck durch selektive Ablage: Anforderungen an Frischbeton und Materialprüfung*. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 114 (2019), Nr. 1, S. 24–32
- [34] NOLTE, N.; VARADY, P.; KRAUSS, H. W.; LOWKE, D.: *Schichtenverbund bei der additiven Fertigung–Einflussgrößen und Verfahrensvergleich*. In: *Proceedings of the 20th Internationale Baustofftagung: ibausil, Weimar, Germany* (2018), S. 12–14
- [35] KLOFT, H.; HACK, N.; MAINKA, J.; BROHMANN, L.; HERRMANN, E.; LEDDEROSE, L.; LOWKE, D.: *Additive Fertigung im Bauwesen: erste 3-D-gedruckte und bewehrte Betonbauteile im Shotcrete-3-D-Printing-Verfahren (SC3DP)*. In: *Bautechnik* 96 (2019), Nr. 12, S. 929–938
- [36] TEICHERT, P.: *Die Geschichte des Spritzbetons*. 1979
- [37] LINDEMANN, H.; GERBERS, R.; IBRAHIM, S.; DIETRICH, F.; HERRMANN, E.; DRÖDER, K.; RAATZ, A.; KLOFT, H.: *Development of a shotcrete 3D-printing (SC3DP) technology for additive manufacturing of reinforced freeform concrete structures*. In: *RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*: Springer, S. 287–298
- [38] KLOFT, U.-P. D.-I. H.; EMPELMANN, U.-P. D.-I. M.; LEDDEROSE, D.-I. (A.) L.; OETTEL, D.-I. V.: *Herstellung erster Beton- und Stahlbetonstützen mittels 3D-Betondruck*. In: *B.F.T. International* (2019), Nr. 06
- [39] HOLLAND, S.; FOSTER, T.; TUCK, C.: *Creation of Food Structures Through Binder Jetting*. In: *Fundamentals of 3D Food Printing and Applications*: Elsevier, 2019, S. 257–288
- [40] NYMAN, D.; BREIT, W.: *Architektonische Freiheit im Detail: Betondrucken*. In: *BFT INTERNATIONAL* (2019), Vol. 2, S. 57
- [41] NYMAN, D.; BREIT, W.: *Beton-Pulverdruckverfahren: Next Level*. In: *BFT INTERNATIONAL* (2020), Vol. 2, S. 81
- [42] NYMAN, D.; BREIT, W.: *Entwicklung eines Verfahrens zur Bewehrung 3D-gedruckter Betonkörper*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2021
- [43] BUSWELL, R. A.; SOAR, R. C.; GIBB, A.G.F.; THORPE, A.: *Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction*. In: *Automation in Construction* 16 (2007), Nr. 2, S. 224–231

- [44] MECHTCHERINE, V.; NERELLA, V. N.; WILL, F.; NÄTHER, M.; OTTO, J.; KRAUSE, M.: *CONPRINT3D: On-site, large-scale, monolithic 3D concrete printing*. In: *CPT Worldwide - Construction Printing Technology* (2020), Nr. 2, S. 14–22
- [45] LEAL DA SILVA, WILSON R.; GARZÓN, S. F.; ANDERSEN, T. J.; AHRENKILDE, I.: *Towards Sustainable 3D Concrete Printing: Next Generation 3D-printed Concrete Structures (N3XTCON)*. In: *CPT Worldwide - Construction Printing Technology* (2020), Nr. 2, S. 23–31
- [46] FASTERMANN, P.: *3D-Drucken: Wie die generative Fertigungstechnik funktioniert*. 2., aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016 (Technik im Fokus)
- [47] INFORMATIONSZENTRUM BETON GMBH (Hrsg.): *Beton - Die beste Wahl: Ein Faktencheck*. Erkrath, 18.07.2019
- [48] DIN EN 197-1:2011-11. *Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement*
- [49] BOGUE, R. H.; LERCH, W.: *Hydration of Portland Cement Compounds*. In: *Industrial and Engineering Chemistry* (1934), Nr. 26, S. 837–867
- [50] TAYLOR, H. F. W.: *Cement chemistry*. 2. Aufl. London: Thomas Telford Publishing, 1997
- [51] BENEDIX, R.: *Bauchemie: Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten*. 6., vollst. überarb. und aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015
- [52] ADAM, T.: *Ein Modell zur Beschreibung der Hydratation von Beton in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt*. Darmstadt, Technischen Universität Darmstadt, Bauingenieurwesen. Dissertation:2006
- [53] STARK, J.; WICHT, B.: *Dauerhaftigkeit von Beton*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013
- [54] RICKERT, J.: *Zum Einfluss von Langzeitverzögerern auf der Basis von Phosphonsäure auf die Hydratation einzelner Klinkerphasen, Portlandzementklinker und Portlandzemente*. Weimar, Bauhaus-Universität Weimar. Dissertation:2004
- [55] STARK, J.; WICHT, B.: *Zement und Kalk: der Baustoff als Werkstoff*. 1. Aufl.: Springer-Verlag, 2013
- [56] STEPHAN, D.: *Nanomaterialien im Bauwesen: Stand der Technik, Herstellung, Anwendung und Zukunftsperspektiven*. Kassel, Universität Kassel. Habilitation:2011
- [57] TAYLOR, H. F. W.: *Hydrated calcium silicates. Part I. Compound formation at ordinary temperatures*. In: *Journal of the Chemical Society* (1950), S. 3682–3690
- [58] LOCHER, F. W.: *Zement: Grundlagen der Herstellung und Verwendung*. 1. Aufl.: Verlag Bau+Technik, 2015

- [59] SOROKA, I.: *Portland cement paste and concrete*. 1. Aufl.: Macmillan International Higher Education, 1979
- [60] VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE E.V. (Hrsg.): *Zement-Taschenbuch*. 50. Aufl. Düsseldorf: Bau+Technik, 2002
- [61] JANOTKA, I.: *Hydration of the cement paste with Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> addition*. In: *Ceramics-Silikaty* 45 (2001), Nr. 1, S. 16–23
- [62] STEIN, H. N.: *Some characteristics of the hydration of 3CaOxAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in the presence of CaSO<sub>4</sub>x2H<sub>2</sub>O*. In: *Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas* 81 (1962), Nr. 10, S. 881–889
- [63] BROWN, P.; BARRET, P.; DOUBLE, D. D.; FROHNSDORFF, G.; JOHANSEN, V.; PARROT, L. J.; POMMERSHEIM, J. M.; REGOURD, M.; SCRIVENER, K.; TAYLOR, H. F. W.; YOUNG, J. F.: *The hydration of tricalcium aluminate and tetracalcium aluminoferrite in the presence of calcium sulfate*. In: *Materials and Structures* (1986), Nr. 19, S. 137–147
- [64] SCHWIETE, H. E.; LUDWIG, U.; JÄGER, P.: *Investigation in the system 3CaOxAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaSO<sub>4</sub>x2H<sub>2</sub>O-Ca(OH)<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O*. In: *Zement-Kalk-Gips* 17 (1964), S. 229–236
- [65] JAWED, I.; GOTO, S.; KONDO, R.: *Hydration of tetracalcium aluminoferrite in presence of lime and sulfates*. In: *Cement and concrete research* 6 (1976), Nr. 4, S. 441–453
- [66] BASF CONSTRUCTION SOLUTIONS GMBH: *Elkem Microsilica Grade 940 U-S: Silicastaub für Beton nach DIN EN 13263-1*. 2014
- [67] MELAND, I.: *Influence of condensed silica fume and fly ash on the heat evolution in cement pastes*. In: *Special Publication* 79 (1983), S. 665–676
- [68] REGOURD, M.; MORTUREUX, B.; GAUTIER, E.: *Hydraulic reactivity of various pozzolans*. In: *Proc. 5th International Symp. on Concrete Technology*: University of Nuevo Leon Mexico, 1981, S. 1–14
- [69] ROSTÁSY, F. S.; HERSCHELMANN, F.; RANISCH, E.-H.: *Untersuchung der Eigenschaften von Einpreßmörteln mit Zusatz von Silikastaub*. 1. Aufl. Braunschweig, 1987
- [70] MULLER, A.C.A.; SCRIVENER, K. L.; SKIBSTED, J.; GAJEWICZ, A. M.; McDONALD, P. J.: *Influence of silica fume on the microstructure of cement pastes: New insights from 1H NMR relaxometry*. In: *Cement and concrete research* 74 (2015), S. 116–125
- [71] J ZELIĆ; D RUŠIĆ; D VEŽA; R KRSTULOVIĆ: *The role of silica fume in the kinetics and mechanisms during the early stage of cement hydration*. In: *Cement and concrete research* 30 (2000), Nr. 10, S. 1655–1662. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884600003744>
- [72] HJORTH, L.: *Microsilica in Concrete*. In: *Nordic Concrete Research* (1982), Nr. 1

- [73] DIAMOND, S.: *Effects of Microsilica (Silica Fume) on Pore-Solution Chemistry of Cement Pastes*. In: *Journal of the American Ceramic Society* 66 (1983), Nr. 5, C-82-C-84
- [74] KÖNIG, G.; TUE, N. V.; ZINK, M.: *Hochleistungsbeton: Bemessung, Herstellung und Anwendung*: John Wiley & Sons, 2001
- [75] LOWKE, D.; DINI, E.; PERROT, A.; WEGER, D.; GEHLEN, C.; DILLENBURGER, B.: *Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges*. In: *Cement and concrete research* 112 (2018), S. 50–65
- [76] SELLEVOLD, E. J.; BAGER, D. H.; JENSEN, E. K.; KNUDSEN, T.: *Silica fume-cement pastes: hydration and pore structure*. In: *Report BML* 82 (1982), S. 19–50
- [77] GODMAN, A.; BENTUR, A.: *Bond effects in high-strength silica fume concretes*. In: *Materials Journal* 86 (1989), Nr. 5, S. 440–449
- [78] HERMANN, K.: *Zusatzstoffe. Teil 4, Silicastaub*. In: *Cementbulletin* (1995), Nr. 7, S. 3-7
- [79] GRÜBL, P.; WEIGLER, H.; KARL, S.: *Beton: Arten, Herstellung und Eigenschaften*. 2. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 2001
- [80] DIN EN 12620:2008-07. *Gesteinskörnungen für Beton*
- [81] DIN EN 196-6:2019-03. *Prüfverfahren für Zement – Teil 6: Bestimmung der Mahlfineinheit*
- [82] WEBER, R.: *Guter Beton: Ratschläge für die richtige Betonherstellung*. 25. Aufl. Erkrath: Verlag Bau+Technik, 2019 (edition beton)
- [83] KIRCHBERG, S.; ABDIN, Y.; ZIEGMANN, G.: *Influence of particle shape and size on the wetting behavior of soft magnetic micropowders*. In: *Powder Technology* 207 (2011), 1-3, S. 311–317
- [84] TANAKA, I.; KOISHI, M.; SHINOHARA, K.: *Evaluation of the wettability of spherical cement particle surfaces using penetration rate method*. In: *Cement and concrete research* 32 (2002), Nr. 7, S. 1161–1168
- [85] ORIAKHI, C.; LAMBRIGHT, T. M.: *Calcium aluminate cement compositions for solid freeform fabrication*. Hewlett-Packard Development Company. United States: U.S. Patent and Trademark Office. Veröffentlichungsnr. 7,258,736 B2
- [86] BREDT, J. F.; ANDERSON, T. C.; RUSSELL, D. B.: *Three dimensional printing material system and method*. Z Corporation. United States: U.S. Patent and Trademark Office. Veröffentlichungsnr. 6,610,429 B2
- [87] KIESVAARA, J.; YLIRUUSI, J.: *The use of the Washburn method in determining the contact angles of lactose powder*. In: *International Journal of Pharmaceutics* 92 (1993), Nr. 1-3, S. 81–88
- [88] BRUIL, H. G.; VAN AARTSEN, J. J.: *The determination of contact angles of aqueous surfactant solutions on powders*. In: *Colloid and Polymer Science* 252 (1974), Nr. 1, S. 32–38

- [89] DERBY, B.; REIS, N.: *Inkjet Printing of Highly Loaded Particulate Suspensions*. In: *MRS Bulletin* 28 (2003), Nr. 11, S. 815–818
- [90] UTELA, B.; STORTI, D.; ANDERSON, R.; GANTER, M.: *A review of process development steps for new material systems in three dimensional printing (3DP)*. In: *Journal of Manufacturing Processes* 10 (2008), Nr. 2, S. 96–104
- [91] WITHELL, A.; DIEGEL, O.; GRUPP, I.; REAY, S.; BEER, D. de; POTGIETER, J.: *Porous ceramic filters through 3D printing*. In: *Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping* (2011), S. 313–318
- [92] BÜRGE, C.; MÄDER, G.; WOMBACHER, F.: *Accelerator*. Veröffentlichungsnr. WO 2017/162699 A1
- [93] SACHS, E. M.; HAGGERTY, J. S.; CIMA, M. J.; WILLIAMS, P. A.: *Three-dimensional printing techniques*. Massachusetts Institute of Technology. United States: U.S. Patent and Trademark Office. Veröffentlichungsnr. 5,204,055
- [94] WESCH, A.; DAHMEN, N.; EBERT, K.; SCHÖN, J.: *Grenzflächenspannungen, Tropfengrößen und Kontaktwinkel im Zweiphasensystem H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub> bei Temperaturen von 298 bis 333 K und Drücken bis 30 MPa*. In: *Chemie Ingenieur Technik* 69 (1997), Nr. 7, S. 942–946
- [95] HESSE, C.: *Der Reaktionsverlauf der frühen Hydratation von Portlandzement in Relation zur Temperatur*. Nürnberg, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Naturwissenschaftlichen Fakultät. Dissertation:2009
- [96] BEAUDOIN, J.; ODLER, I.: *Hydration, Setting and Hardening of Portland Cement*. In HEWLETT, Peter; LISKA, Martin (Hrsg.): *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. 5. Aufl.: Butterworth-Heinemann, 2017, S. 157–250
- [97] LOCHER, F. W.; RICHARTZ, W.; SPRUNG, S.; RECHENBERG, W.: *Erstarren von Zement - Teil 1: Reaktion und Gefügeentwicklung*. In: *Zement-Kalk-Gips* 29 (1976), Nr. 10, S. 435–442
- [98] HEWLETT, P. C. (Hrsg.); LEA, F. (Hrsg.): *Lea's chemistry of cement and concrete*. 4. ed., repr. London: Arnold, 2001
- [99] MINDESS, S.; YOUNG, J. F.; DARWIN, D.: *Concrete Prentice-Hall*. In: *Englewood Cliffs, NJ* 481 (1981)
- [100] KELZENBERG, A. L.; TRACY, S. L.; CHRISTIANSEN, B. J.; THOMAS, J. J.; CLARAGE, M. E.; HODSON, S.; JENNINGS, H. M.: *Chemistry of the aqueous phase of ordinary Portland cement pastes at early reaction times*. In: *Journal of the American Ceramic Society* 81 (1998), Nr. 9, S. 2349–2359
- [101] GUNKEL, P.: *Die Zusammensetzung der flüssigen Phase erstarrender und erhärtender Zemente*. In: *Beton-Informationen* 23 (1983), Nr. 1, S. 3–8
- [102] STARK, J.; MÖSER, B.; ECKART, A.: *Neue Ansätze zur Zementhydratation: Teil 1 + 2*. In: *Zement-Kalk-Gips* 54 (2001), Nr. 1, S. 52-60, Nr. 2, S. 114-119



- [103] SARMIENTO, D.: *Entwicklung von selbstverdichtenden Betonen mit hoher Grünstandfestigkeit für den Einsatz in Gleitschalungsfertigern im Betonstraßenbau*. Bochum, Ruhr-Universität Bochum. Dissertation:2011
- [104] FYLAK, M. J.: *Untersuchungen zum frühen Hydratationsverhalten von Portland- und Portlandkompositzementen*. Halle-Wittenberg, Martin-Luther-Universität, Naturwissenschaftlichen Fakultät III. Dissertation:2011
- [105] KIRBY, D. M.; BIERNACKI, J. J.: *The effect of water-to-cement ratio on the hydration kinetics of tricalcium silicate cements: Testing the two-step hydration hypothesis*. In: *Cement and concrete research* 42 (2012), Nr. 8, S. 1147–1156
- [106] RICHARTZ, W.; LOCHER, F. W.: *Ein Beitrag zur Morphologie und Wasserbindung von Calciumsilicathydraten und zum Gefüge des Zementsteins*. In: *Zement-Kalk-Gips* 18 (1965), Nr. 9, S. 449–459
- [107] HENNING, O.; KÜHL, A.; ÖLSCHLÄGER, A.; PHILIPP, O.: *Technologie der Bindebaustoffe*. 1. Aufl. Berlin: Verlag für Bauwesen, 1989 (Bd. 1- Eigenschaften, Rohstoffe, Anwendung)
- [108] BOGUE, R. H.: *The Chemistry of Portland Cement*. 2. Aufl. New York: Reinhold Publishing Corp., 1947
- [109] STARK, J.; MÖSER, B.; BELLMANN, F.: *Ein neues Modell zur Zementhydratation*, 15. In: *Internationale Baustofftagung* 1 (2003), S. 10
- [110] SCHNATZ, R.: *Verarbeitungseigenschaften von Zement bei der Fertigmahlung in Mahlanlagen mit Gutbett-Walzenmühle*. Zugl.: Clausthal, Techn. Univ., Diss., 1996. Düsseldorf: Verl. Bau und Technik, 1998 (Schriftenreihe der Zementindustrie H. 58)
- [111] CZERNIN, W.: *Zementchemie für Bauingenieure*. 3. Aufl. Wiesbaden: Bauverlag, 1977
- [112] SETZER, M. J.: *Einfluss des Wassergehalts auf die Eigenschaften des erhärteten Betons*. In: *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb)* (1977), Nr. 280, S. 43–117
- [113] POWERS, T. C.; BROWNYARD, T. L.: *Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste: Part 2: Studies of water fixation*. In: *American Concrete Institute Journal* 18 (1946), Nr. 3, S. 249–336
- [114] LOCHER, F. W.: *Die Festigkeit des Zements*. In: *Tagung des Vereins Deutscher Zementwerke* (24.09.1975), S. 107–122
- [115] LARRARD, F. de: *Concrete mixture proportioning: A scientific approach*. 1. Aufl. London: CRC Press, 1999
- [116] LOWKE, D.: *Sedimentationsverhalten und Robustheit Selbstverdichtender Betone*. München, Technischen Universität München, Baustoffkunde und Werkstoffprüfung. Dissertation:2013

- [117] BORNEMANN, R.: *Untersuchungen zur Modellierung des Frisch- und Festbetonverhaltens erdfuchter Betone*. Kassel, Universität Kassel, Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens. Dissertation:2005
- [118] GEISENHANSLÜKE, C.: *Einfluss der Granulometrie von Feinstoffen auf die Rheologie von Feinstoffleimen: Influence of the granulometry of fine particles on the rheology of pastes*. Kassel, Universität Kassel. Dissertation:2008
- [119] SCHULZE, D.: *Pulver und Schüttgüter: Fließeigenschaften und Handhabung*. 4th ed. 2019, 2019 (Chemische Technik / Verfahrenstechnik)
- [120] WUDY, K.; DREXLER, M.; DRUMMER, D.: *Selektives strahlschmelzen von polymer-blends: prozess- und werkstoffanforderungen*. In: *RTEJournal-Fachforum für Rapid Technologie* (2015), Nr. 1
- [121] KADAU, D.: *Porosität in kohäsiven granularen Pulvern und Nano-Pulvern*. Duisburg, Universität Duisburg-Essen:2004
- [122] SCHULZE, D.: *Zur Fließfähigkeit von Schüttgütern–Definition und Meßverfahren*. In: *Chemie Ingenieur Technik* 67 (1995), Nr. 1, S. 60–68
- [123] CIMA, L. G.; CIMA, M. J.: *Preparation of medical devices by solid free-form fabrication methods*. Massachusetts Institute of Technology. United States: U.S. Patent and Trademark Office. Veröffentlichungsnr. 5,490,962
- [124] CIMA, M.; SACHS, E.; FAN, T.; BREDT, J. F.; MICHAELS, S. P.; KHANUJA, S.; LAUDER, A.; LEE, S.-J. J.; BRANCAZIO, D.; CURODEAU, A.: *Three-dimensional printing techniques*. Massachusetts Institute of Technology. United States: U.S. Patent and Trademark Office. Veröffentlichungsnr. 5,387,380
- [125] SCHEFFLER, B.; SCHMIDT, M.: *Ultra-Hochfester Beton für multifunktionale Fahrbahnen im Straßenbau*. In: *DAfStb-Forschungskolloquium* (2012), Nr. 53., S. 81
- [126] SCHMIDT, M.: *Stoffliche und konstruktive Eigenschaften hydraulisch gebundener Tragschichten*. In: *Schriftenreihe der Zementindustrie* (1991), Nr. 51
- [127] WESCHE, K.; SCHUBERT, P.: *Beton, Mauerwerk (Nichtmetallisch-anorganische Stoffe): Herstellung, Eigenschaften, Verwendung, Dauerhaftigkeit*. 3., völlig neubearb. u. erw. Aufl. Wiesbaden: Bauverlag, 1993 (Baustoffe für tragende Bauteile Bd. 2)
- [128] GREGORY, P.: *High-technology applications of organic colorants*. 1. Aufl. Boston, MA: Springer Science & Business Media, 1991
- [129] DIN EN 196-1:2016-11. *Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit*
- [130] DIN ISO 9276-1:2004-09. *Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen – Teil 1: Grafische Darstellung*
- [131] DIN EN 459-2:2010-12. *Baukalk – Teil 2: Prüfverfahren*

- [132] DIN EN ISO 787-11:1995-10. *Allgemeine Prüfverfahren für Pigmente und Füllstoffe – Teil 11: Bestimmung des Stampfvolumens und der Stampfdichte*
- [133] HESSE, R.; KRULL, F.; ANTONYUK, S.: *Experimentally calibrated CFD-DEM study of air impairment during powder discharge for varying hopper configurations*. In: *Powder Technology* 372 (2020), S. 404–419
- [134] ZIEREP, J.; BÜHLER, K.: *Eigenschaften von Fluiden*. In ZIEREP, Jürgen; BÜHLER, Karl (Hrsg.): *Grundzüge der Strömungslehre*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 5–29
- [135] PUNTKE, W.: *Wasseranspruch von feinen Kornhaufwerken*. In: *Beton - Düsseldorf* 52 (2002), Nr. 5, S. 242–249
- [136] DIN EN 12390-13:2019-10. *Prüfung von Festbeton – Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul)*
- [137] ROBERTS, L. R.: *Microsilica in concrete: I*. In: *Materials science of concrete I*. American Ceramic Society (1989), S. 197-222
- [138] MANSFELD, T.: *Das Quellverhalten von Alkalisilikatgelen unter Beachtung ihrer Zusammensetzung*. Weimar, Bauhaus-Universität Weimar. Dissertation:2008
- [139] HASPARYK, N. P.; MONTEIRO, P. J. M.; CARASEK, H.: *Effect of silica fume and rice husk ash on alkali-silica reaction*. In: *Materials Journal* 97 (2000), Nr. 4, S. 486–492
- [140] DIN EN 206-1:2001-07. *Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*
- [141] DIN 1045-2:2008-08. *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1*
- [142] POLZIN, H.: *Anorganische Binder. Zur Form- und Kernherstellung in der Gießerei*. 1. Aufl. s.l.: Fachverlag Schiele Schön, 2013
- [143] RESCHKE, T.: *Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton*. Zugl.: Weimar, Univ., Diss, 2000. Düsseldorf: Verl. Bau + Technik, 2001 (Schriftenreihe der Zementindustrie 62)
- [144] DIN ISO 15901-1:2019-03. *Bewertung der Porengrößenverteilung und Porosität von Feststoffen mittels Quecksilberporosimetrie und Gasadsorption – Teil 1: Quecksilberporosimetrie*
- [145] LOWKE, D.; WEGER, D.; HENKE, K.; TALKE, D.; WINTER, S.; GEHLEN, C.: *3D-Drucken von Betonbauteilen durch selektives Binden mit calciumsilikatbasierten Zementen: Erste Ergebnisse zu beton-technologischen und verfahrenstechnischen Einflüssen*. In: *19. Internationalen Baustofftagung ibausil 2015* (2015), 1-1113 – 1-1120

- [146] MAIER, A.-K.; DEZMIREAN, L.; WILL, J.; GREIL, P.: *Three-dimensional printing of flash-setting calcium aluminate cement*. In: *Journal of Materials Science* 46 (2011), Nr. 9, S. 2947–2954
- [147] HUMMEL, A.: *Das Beton-ABC: Ein Lehrbuch der Technologie des Schwerbetons und des Leichtbetons*. 12., überarb. und erw. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 1959
- [148] DIN 1045-3:2012-03. *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 3: Bauausführung – Anwendungsregeln zu DIN EN 13670*
- [149] WALZ, K.: *Festigkeitsentwicklung von Beton bis zum Alter von 30 und 50 Jahren*. In: *beton* 26 (1976), Nr. 3, S. 95-98
- [150] BONZEL, J.; DAHMS, J.: *Der Einfluss des Zements, des Wasserzementwerts und der Lagerung auf die Festigkeitsentwicklung des Betons*. In: *beton* 16 (1966), Nr. 7, S. 299-305
- [151] BOSOLD, D.; BECK, M.: *Zement-Merkblatt Betontechnik B13 - Leichtbeton*. Erkrath, 2014
- [152] KÜCHLIN, D.; HERSEL, O.; BACHMANN, R. (Mitarb.); RIFFEL, S. (Mitarb.); BOOS, P. (Mitarb.); DIETERMANN, M. (Mitarb.); LÖSCHNIG, P. (Mitarb.) : *Betontechnische Daten*. Leimen: HeidelbergCement AG, 2017
- [153] DIN EN 1992-1-1:2011-01. *Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*
- [154] LIAPOR GMBH & CO. KG (Hrsg.): *Liapor-Leichtbeton: Für Hoch-, Ingenieur- und Brückenbau*. 2009
- [155] THIENEL, C.: *Materialtechnologische Eigenschaften der Leichtbetone aus Blähton*. 1996
- [156] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (DAfStb) (Hrsg.); ZILCH, K. (Mitarb.); ROOS, F. (Mitarb.) : *Betonkennwerte für die Bemessung und das Verbundverhalten von Beton mit rezykliertem Zuschlag*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2000 (Heft 507)
- [157] FAUST, T.: *Leichtbeton im Konstruktiven Ingenieurbau*. Berlin: Ernst & Sohn, 2003 (Bauingenieur-Praxis)
- [158] HOFMANN, P.; KRIEGER-HAUWEDE, M.: *Einführung in die Festkörperphysik*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013 (Lehrbuch Physik)
- [159] BREUNINGER, J.; BECKER, R.; WOLF, A.; ROMMEL, S.; VERL, A.: *Technologie*. In: *Generative Fertigung mit Kunststoffen*: Springer, 2013, S. 23–112
- [160] SACHS, E. M.; CIMA, M. J.; CARADONNA, M. A.; GRAU, J.; SERDY, J. G.; SAXTON, P. C.; UHLAND, S. A.; MOON, J.: *Jetting layers of powder and the formation of fine powder beds thereby*. Massachusetts Institute of Technology. United States: U.S. Patent and Trademark Office. Veröffentlichungsnr. 6,596,224 B1

- [161] FROMM, A.: *3-D-Printing zementgebundener Formteile: Grundlagen, Entwicklung und Verwendung*. Kassel, Universität Kassel, Architektur, Stadtplanung und Landschaftsplanung. Dissertation:2014
- [162] KLAHN, C.; MEBOLDT, M.; FONTANA, F.; LEUTENECKER-TWELSIEK, B.; JANSEN, J.: *Entwicklung und Konstruktion für die Additive Fertigung*. In: *Grundlagen und Methoden für den Einsatz in industriellen Endkundenprodukten 1* (2018)
- [163] MECHTCHERINE, V.; NERELLA, V. N.: *3-D-Druck mit Beton: Sachstand, Entwicklungstendenzen, Herausforderungen*. In: *Bautechnik 95* (2018), Nr. 4, S. 275–287

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Schematische Struktur der Arbeit _____	5
Abb. 2-1: Die dritte industrielle Revolution [13] _____	9
Abb. 2-2: Übersicht des Herstellungsprozesses in der additiven Fertigung (vgl. [14]) _____	10
Abb. 2-3: Konvertierung eines CAD-Modells in eine STL-Datei [15] _____	10
Abb. 2-4: Exemplarische Darstellung eines monochromen Bitmaps [23] _____	12
Abb. 2-5: Auswahl des optimalen Betondruckverfahrens je nach Anforderungen [23] _____	14
Abb. 2-6: Verschiedene Ansätze des Contour Crafting Verfahrens _____	16
Abb. 2-7: Differierende Methoden der Streifenaufgabe beim CC-Verfahren _____	16
Abb. 2-8: Produktion einer Stütze mit dem SC3DP-Verfahren [38], Second Layer 3D Printing nach Einfädeln der Längsbewehrung [35] _____	17
Abb. 2-9: 3D-gedruckte Exponate mit 3DP-Verfahren [23] _____	20
Abb. 2-10: Ablaufschema des 3D-Pulverdruckverfahrens [40] _____	20
Abb. 2-11: Beziehung zwischen Produktionsprozessen in Bezug auf Bauauflösung und Beschichtungsgeschwindigkeit (vgl. [43]) _____	23
Abb. 2-12: Veranschaulichung der realisierbaren Auflösung mit dem 3DP-Verfahren (Größe: ca. 13 x 9 x 8 cm) (vgl. [14]) _____	24
Abb. 2-13: Auflösungsunterschiede beim Meshing der konvertierten STL-Datei [46] _____	24
Abb. 2-14: Druckfestigkeitsverlauf der Klinkermineralien nach [49] _____	26
Abb. 2-15: Hydratationsgrad in Abhängigkeit von der Erhärtungszeit nach [50] _____	26
Abb. 2-16: Schematische Veranschaulichung eines Betongefüges [82] _____	34
Abb. 2-17: Tendenzen der anteilmäßigen Phasenentwicklung in Kombination mit dem schematischen Hydratationsablauf von Portlandzementklinker (vgl. [79, 106, 109]) _____	42
Abb. 2-18: Zusammensetzung des Zementsteinvolumens in Abhängigkeit vom w/z-Wert bei $\alpha = 1$ (vgl. [60, 111]) _____	46
Abb. 2-19: Differierende Porenarten sowie deren Durchmesser nach [112] _____	47
Abb. 2-20: Sorptionsisotherme von Zementmörtel nach [113] _____	47
Abb. 2-21: Wasseranteile in der Zementsteinmatrix nach [50–52] _____	48
Abb. 2-22: Einfluss des Wasser-Zement-Wertes sowie des Hydratationsgrades auf die Druckfestigkeit nach [114] _____	50

Abb. 2-23: Zusammenhang zwischen Packungsdichte, Wasser-Feinstoffwert sowie Gründruckfestigkeit [117] _____	51
Abb. 2-24: Volumenänderung eines sukzessiv feiner gemahlene Schüttgutes. An den Schüttguten sind jeweils die mittleren Partikelgrößen in $\mu\text{m}$ angegeben. [121] _____	53
Abb. 2-25: Bereiche unterschiedlicher Fließfähigkeiten [122] _____	53
Abb. 2-26: Betonmatrix mit steigendem Feinkornanteil (vgl. [126]) _____	55
Abb. 2-27: Grünstandfestigkeit von konventionell hergestelltem Beton in Abhängigkeit von der Rüttelzeit und dem Wassergehalt [79] _____	56
Abb. 3-1: Übersicht der Herstellungssystematik und Analyse – Teil 1 _____	57
Abb. 3-2: Übersicht der Herstellungssystematik und Analyse – Teil 2 _____	58
Abb. 3-3: Untersuchungsmethoden innerhalb der Versuchsreihen _____	59
Abb. 3-4: Erzeugen eines gleichmäßigen, homogenen Untergrunds im „Build“-Behälter _____	60
Abb. 3-5: Exemplarische Positionierung und Nummerierung der Probekörper im virtuellen Bauraum _____	61
Abb. 3-6: Schematische Darstellung des Druckprozesses [23] _____	63
Abb. 3-7: Exemplarische Nachbearbeitung (links) und geometrische Überprüfung der gedruckten Betonstrukturen (rechts) [23] _____	64
Abb. 3-8: Exemplarische Untersuchung eines Prismas inkl. Differenzabgleichung zur generierten STL-Datei _____	65
Abb. 3-9: Exemplarische Untersuchung eines Würfels inkl. Differenzabgleichung zur generierten STL-Datei _____	66
Abb. 3-10: Partikelgrößenverteilung der verwendeten Bestandteile _____	67
Abb. 3-11: REM- und EDX-Aufnahmen des verwendeten Portlandzementes CEM I 52,5 R _____	69
Abb. 3-12: REM- und EDX-Aufnahmen des verwendeten Klinkerfeinmehls _____	70
Abb. 3-13: REM- und EDX-Aufnahmen des verwendeten Silicastaubs _____	71
Abb. 3-14: REM- und EDX-Aufnahmen des verwendeten Quarzmehls (0 – 0,4 mm) _____	72
Abb. 3-15: REM- und EDX-Aufnahmen des verwendeten Quarzsands (0 – 0,25 mm) _____	73
Abb. 3-16: Auswertung der Schütt- und Stampfdichte sowie des Hausner-Faktors der einzelnen Bestandteile _____	74
Abb. 3-17: Fließfähigkeitsanalyse der einzelnen Bestandteile _____	75

---

Abb. 3-18: Bestimmung der Oberflächenspannung mittels Pendant-Drop-Methode _____	76
Abb. 3-19: Exemplarische Darstellung des Kornhaufwerks bei Sättigung (links) sowie bei einem Überschuss an Feuchtigkeit (rechts) _____	78
Abb. 3-20: Bindemittelflüssigkeitsanspruch der einzelnen Bestandteile des Compounds _____	79
Abb. 3-21: Exemplarischer Druckauftrag am Anfang des Herstellungsprozesses (links) sowie die Analyse des Absorptionseffektes am Ende (rechts) _____	81
Abb. 3-22: Schematische Darstellung der Druckfestigkeitsprüfung inkl. exemplarischen Bruchversagens _____	88
Abb. 3-23: Reale Umsetzung der Druckfestigkeitsprüfung _____	88
Abb. 3-24: Schematische Darstellung des 3-Punkt-Biegezugversuchaufbaus _____	89
Abb. 3-25: Reale Umsetzung der Biegezugfestigkeitsprüfung _____	90
Abb. 3-26: Übersicht der Versuchsserien Z und Z+ _____	93
Abb. 3-27: Partikelgrößenverteilung der Versuchsserie Z _____	94
Abb. 3-28: Partikelgrößenverteilung der Versuchsserie Z+ _____	95
Abb. 3-29: Analyse der Fließfähigkeit der Versuchsserien Z und Z+ _____	96
Abb. 3-30: Auswertung der Schütt- und Stampfdichte sowie des Hausner-Faktors von Versuchsserie Z _____	97
Abb. 3-31: Auswertung der Schütt- und Stampfdichte sowie des Hausner-Faktors von Versuchsserie Z+ _____	97
Abb. 3-32: Auswertung der Flüssigkeitsanalyse von Versuchsserie Z _____	98
Abb. 3-33: Auswertung der Flüssigkeitsanalyse von Versuchsserie Z+ _____	99
Abb. 3-34: Auswertung der AF-Parameter von Versuchsserie Z _____	101
Abb. 3-35: Auswertung der AF-Parameter von Versuchsserie Z+ _____	101
Abb. 3-36: Zerstörung der Betonstruktur aufgrund von aufsteigenden Luftblasen _____	102
Abb. 3-37: Vergleich der Versuchsserien Z und Z+ hinsichtlich der Absorptionstiefe _____	103
Abb. 3-38: Auswertung der Druckfestigkeit von Versuchsserie Z _____	104
Abb. 3-39: Auswertung der Druckfestigkeit von Versuchsserie Z+ _____	105
Abb. 3-40: Übersicht der Versuchsserien K und K+ _____	109
Abb. 3-41: Partikelgrößenverteilung der Versuchsserie K _____	110
Abb. 3-42: Partikelgrößenverteilung der Versuchsserie K+ _____	111



Abb. 3-43: Analyse der Fließfähigkeit der Versuchsserien K und K+ _____	112
Abb. 3-44: Auswertung der Schütt- und Stampfdichte sowie des Hausner-Faktors von Versuchsserie K _____	113
Abb. 3-45: Auswertung der Schütt- und Stampfdichte sowie des Hausner-Faktors von Versuchsserie K+ _____	114
Abb. 3-46: Auswertung der Flüssigkeitsanalyse von Versuchsserie K _____	115
Abb. 3-47: Auswertung der Flüssigkeitsanalyse von Versuchsserie K+ _____	116
Abb. 3-48: Exemplarische Darstellung eines unvollständigen Schichtauftrags __	117
Abb. 3-49: Auswertung der AF-Parameter von Versuchsserie K _____	119
Abb. 3-50: Auswertung der AF-Parameter von Versuchsserie K+ _____	119
Abb. 3-51: Auswertung der Druckfestigkeit von Versuchsserie K _____	121
Abb. 3-52: Auswertung der Druckfestigkeit von Versuchsserie K+ _____	121
Abb. 3-53: Übersicht der Versuchsserien M und M+ _____	124
Abb. 3-54: Partikelgrößenverteilung der Versuchsserie M _____	125
Abb. 3-55: Partikelgrößenverteilung der Versuchsserie M+ _____	126
Abb. 3-56: Analyse der Fließfähigkeit der Versuchsserien M und M+ _____	127
Abb. 3-57: Auswertung der Schütt- und Stampfdichte sowie des Hausner-Faktors von Versuchsserie M _____	128
Abb. 3-58: Auswertung der Schütt- und Stampfdichte sowie des Hausner-Faktors von Versuchsserie M+ _____	128
Abb. 3-59: Auswertung der Flüssigkeitsanalyse von Versuchsserie M _____	130
Abb. 3-60: Auswertung der Flüssigkeitsanalyse von Versuchsserie M+ _____	131
Abb. 3-61: Vergleich differierender Versuchsserien hinsichtlich der Absorptionstiefe _____	132
Abb. 3-62: Auswertung der AF-Parameter von Versuchsserie M _____	132
Abb. 3-63: Auswertung der AF-Parameter von Versuchsserie M+ _____	133
Abb. 3-64: Auswertung der Druckfestigkeit von Versuchsserie M _____	135
Abb. 3-65: Auswertung der Druckfestigkeit von Versuchsserie M+ _____	136
Abb. 3-66: REM-Analyse [14]: _____	137
Abb. 3-67: Übersicht der Versuchsserien GK und GK° _____	139
Abb. 3-68: Partikelgrößenverteilung der Versuchsserie GK _____	140
Abb. 3-69: Analyse der Fließfähigkeit der Versuchsserien GK _____	141

---

Abb. 3-70: Auswertung der Schütt- und Stampfdichte sowie des Hausner-Faktors von Versuchsserie GK _____	142
Abb. 3-71: Auswertung der Flüssigkeitsanalyse von Versuchsserie GK _____	144
Abb. 3-72: Vergleich der Versuchsserie GK zur empirisch, ermittelten Trendlinie hinsichtlich der Absorptionstiefe _____	144
Abb. 3-73: Auswertung der AF-Parameter von Versuchsserie GK _____	145
Abb. 3-74: Schematische Darstellung eines aufgebrochenen Layers _____	146
Abb. 3-75: Auswertung der Druckfestigkeit von Versuchsserie GK _____	147
Abb. 3-76: Auswertung der Druckfestigkeit von Versuchsserie GK° _____	148
Abb. 3-77: Auswertung der prozentualen Druckfestigkeit von Versuchsserie GK° _____	149
Abb. 3-78: Exemplarische Bruchbilder der Versuchsserie GK° _____	150
Abb. 3-79: Schematische Darstellung der diversen Belastungsrichtungen _____	150
Abb. 3-80: Exemplarische Veranschaulichung der Betonstrukturen _____	151
Abb. 3-81: Übersicht der Versuchsserie w/z _____	153
Abb. 3-82: Übersicht der Pulveranalyse von Versuchsserie w/z _____	154
Abb. 3-83: Auswertung der Flüssigkeitsanalyse von Versuchsserie w/z _____	155
Abb. 3-84: Vergleich der Versuchsserie w/z zur empirisch, ermittelten Trendlinie hinsichtlich der Absorptionstiefe _____	156
Abb. 3-85: Auswertung der AF-Parameter von Versuchsserie w/z _____	156
Abb. 3-86: Auswertung der Druckfestigkeit von Versuchsserie w/z _____	157
Abb. 3-87: Übersicht der Porenverteilung von Versuchsserie w/z _____	160
Abb. 3-88: Relation zwischen Porosität und Druckfestigkeit der Probekörper aus Versuchsserie w/z (Trendlinie vgl. [147]) _____	161
Abb. 3-89: Oberflächenstruktur eines in Wasser gelagerten Probekörpers _____	162
Abb. 3-90: Oberflächenstruktur eines in Wasserglas gelagerten Probekörpers _____	162
Abb. 3-91: Exemplarische CT-Aufnahme eines 3D-gedruckten Betonkörpers [42] _____	162
Abb. 3-92: Übersicht der Versuchsserie F _____	164
Abb. 3-93: Auswertung der AF-Parameter von Versuchsserie F _____	165
Abb. 3-94: Auswertung der Druckfestigkeit von Versuchsserie F _____	166
Abb. 3-95: Auswertung der prozentualen Druckfestigkeit von Versuchsserie F _____	167
Abb. 4-1: Reduzierte Darstellung der komplexen Wechselbeziehungen _____	174



## **Tabellenverzeichnis**

Tab. 2-1:	Kommerziell etablierte additive Fertigungsverfahren (vgl. [11]) _____	8
Tab. 2-2:	Potenzielle Eigenschaften des CC-Betons _____	15
Tab. 2-3:	Potenzielle Eigenschaften des SC3DP Betons _____	18
Tab. 2-4:	Potenzielle Eigenschaften des 3DP Betons _____	21
Tab. 2-5:	Chemische und physikalische Eigenschaften vom Silicastaub _____	30
Tab. 2-6:	Chemische und physikalische Eigenschaften vom Quarzsand und - mehl _____	33
Tab. 2-7:	Eigenschaften der Bindemittelflüssigkeit _____	36
Tab. 2-8:	Stadien der Zementhydratation (vgl. [52–54, 95, 96, 103]) _____	43
Tab. 2-9:	Exemplarische Einteilung differierender Schüttgüter nach [122] _____	54
Tab. 3-1:	3D-Pulverdrucker Einstellungen _____	61
Tab. 3-2:	Kennzahlen der Verteilungsfunktion der verwendeten Bestandteile im dispergierten und nicht dispergierten Zustand _____	68
Tab. 3-3:	Eigenschaften der Bindemittelflüssigkeit _____	76
Tab. 3-4:	Bewertungsschema des Feuchtigkeitsauftrags _____	82
Tab. 3-5:	Bewertungsschema des Schichtauftrags _____	84
Tab. 3-6:	Bewertungsschema der Optimierbarkeit _____	86
Tab. 3-7:	Auswertung der Porositätsanalyse von Versuchsserie w/z _____	160
Tab. 4-1:	Materialeigenschaften des 3D-gedruckten Betons _____	177

**Anhang**

Tab. A-1: Messwerte Pulveranalyse

Versuchsreihe	Feinheitsgrad $k_{\mu\text{m}}$ -Wert	Schüttdichte	Stampfdichte	Hausner-Faktor
	[-]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[-]
Z1	813,6	1,34	1,88	1,40
Z2	800,2	1,34	1,89	1,41
Z3	786,8	1,33	1,91	1,44
Z4	773,4	1,32	1,92	1,45
Z5	760,0	1,31	1,92	1,47
Z+1	783,9	1,07	1,61	1,50
Z+2	775,4	1,10	1,67	1,51
Z+3	767,0	1,13	1,71	1,52
Z+4	758,6	1,15	1,76	1,53
Z+5	750,1	1,18	1,82	1,54
K1	758,0	1,30	1,92	1,47
K2	756,0	1,30	1,91	1,47
K3	754,0	1,30	1,91	1,47
K4	752,0	1,29	1,90	1,48
K5	750,0	1,27	1,88	1,48
K6	740,0	1,23	1,84	1,50
K7	729,9	1,19	1,79	1,51
K8	719,9	1,15	1,75	1,52
K+1	776,8	1,13	1,72	1,52
K+2	767,0	1,13	1,71	1,52
K+3	757,2	1,12	1,71	1,53
K+4	747,4	1,12	1,71	1,53
K+5	737,6	1,10	1,71	1,54
M1	759,8	1,24	1,84	1,49
M2	759,7	1,20	1,78	1,48
M3	759,5	1,18	1,73	1,47
M4	759,3	1,14	1,67	1,46
M5	763,9	1,04	1,52	1,45
M6	767,7	0,91	1,31	1,43
M7	771,5	0,82	1,14	1,40

Versuchsreihe	Feinheitegrad k <sub>μm</sub> -Wert	Schüttdichte	Stampfdichte	Hausner-Faktor
	[-]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[-]
M8	775,4	0,67	0,91	1,35
M+1	765,3	1,18	1,83	1,54
M+2	771,7	1,13	1,71	1,52
M+3	778,0	1,09	1,58	1,45
M+4	784,4	1,06	1,45	1,37
M+5	790,7	1,01	1,34	1,32
GK1	781,0	1,18	1,66	1,41
GK2	774,0	1,15	1,68	1,46
GK3	767,0	1,13	1,71	1,52
GK4	760,0	1,09	1,72	1,58
GK5	753,0	1,06	1,74	1,64
GK90° 1	781,0	1,18	1,66	1,41
GK0° 1	781,0	1,18	1,66	1,41
GK45° 1	781,0	1,18	1,66	1,41
GK90° 2	774,0	1,15	1,68	1,46
GK0° 2	774,0	1,15	1,68	1,46
GK45° 2	774,0	1,15	1,68	1,46
GK90° 3	767,0	1,13	1,71	1,52
GK0° 3	767,0	1,13	1,71	1,52
GK45° 3	767,0	1,13	1,71	1,52
GK90° 4	760,0	1,09	1,72	1,58
GK0° 4	760,0	1,09	1,72	1,58
GK45° 4	760,0	1,09	1,72	1,58
GK90° 5	753,0	1,06	1,74	1,64
GK0° 5	753,0	1,06	1,74	1,64
GK45° 5	753,0	1,06	1,74	1,64
w/z1	767,0	1,13	1,71	1,52
w/z2	767,0	1,13	1,71	1,52
w/z3	767,0	1,13	1,71	1,52
w/z4	767,0	1,13	1,71	1,52
w/z5	767,0	1,13	1,71	1,52
w/z6	767,0	1,13	1,71	1,52
F1	767,0	1,13	1,71	1,52

Versuchsreihe	Feinheitsgrad	Schüttdichte	Stampfdichte	Hausner-Faktor
	$\mu\text{m}$ -Wert			
	[-]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[-]
F2	767,0	1,13	1,71	1,52
F3	767,0	1,13	1,71	1,52
F4	767,0	1,13	1,71	1,52
F5	767,0	1,13	1,71	1,52
F6	767,0	1,13	1,71	1,52

Tab. A-2: Messwerte Flüssigkeitsanalyse

Versuchsreihe	w/z-Wert bis Sättigung pro Probekörper	w/z-Wert vorhanden pro Probekörper	Lösungsanspruch bis Sättigung pro Probekörper	Lösungsmenge vorhanden pro Probekörper
	[-]	[-]	[ml]	[ml]
Z1	0,83	0,49	15,62	9,25
Z2	0,70	0,49	16,36	11,51
Z3	0,61	0,49	16,99	13,68
Z4	0,55	0,49	17,67	15,86
Z5	0,50	0,49	18,33	18,00
Z+1	0,81	0,51	16,77	10,58
Z+2	0,71	0,51	17,24	12,42
Z+3	0,63	0,51	17,53	14,22
Z+4	0,57	0,51	17,83	16,09
Z+5	0,52	0,51	18,14	18,05
K1	0,50	0,45	18,59	16,79
K2	0,50	0,45	18,83	17,00
K3	0,50	0,45	19,13	17,26
K4	0,50	0,45	19,37	17,45
K5	0,50	0,45	19,37	17,44
K6	0,50	0,45	20,21	18,13
K7	0,51	0,45	21,06	18,82
K8	0,51	0,45	21,89	19,51
K+1	0,66	0,49	16,49	12,12
K+2	0,63	0,49	17,53	13,54
K+3	0,61	0,49	18,50	14,88

Versuchsreihe	w/z-Wert bis Sättigung pro Probekörper	w/z-Wert vorhanden pro Probekörper	Lösungsanspruch bis Sättigung pro Probekörper	Lösungsmenge vorhanden pro Probekörper
	[-]	[-]	[ml]	[ml]
K+4	0,59	0,49	19,48	16,24
K+5	0,57	0,49	20,37	17,50
M1	0,51	0,56	17,65	19,37
M2	0,52	0,56	17,39	18,65
M3	0,54	0,56	17,29	18,11
M4	0,55	0,56	16,94	17,34
M5	0,56	0,56	15,77	15,77
M6	0,63	0,56	14,77	13,20
M7	0,70	0,56	14,12	11,29
M8	0,78	0,56	12,30	8,81
M+1	0,56	0,62	17,48	19,38
M+2	0,63	0,62	17,53	17,25
M+3	0,71	0,62	17,78	15,48
M+4	0,81	0,62	18,03	13,84
M+5	0,92	0,62	18,07	12,17
GK1	0,61	0,63	17,68	18,26
GK2	0,62	0,63	17,59	17,87
GK3	0,63	0,63	17,53	17,53
GK4	0,64	0,63	17,27	17,00
GK5	0,65	0,63	17,03	16,50
GK90° 1	0,61	0,63	17,68	18,26
GK0° 1	0,61	0,63	17,68	18,26
GK45° 1	0,61	0,63	17,68	18,26
GK90° 2	0,62	0,63	17,59	17,87
GK0° 2	0,62	0,63	17,59	17,87
GK45° 2	0,62	0,63	17,59	17,87
GK90° 3	0,63	0,63	17,53	17,53
GK0° 3	0,63	0,63	17,53	17,53
GK45° 3	0,63	0,63	17,53	17,53
GK90° 4	0,64	0,63	17,27	17,00
GK0° 4	0,64	0,63	17,27	17,00
GK45° 4	0,64	0,63	17,27	17,00



Versuchsreihe	w/z-Wert bis Sättigung pro Probekörper	w/z-Wert vorhanden pro Probekörper	Lösungsanspruch bis Sättigung pro Probekörper	Lösungsmenge vorhanden pro Probekörper
	[-]	[-]	[ml]	[ml]
GK90° 5	0,65	0,63	17,03	16,50
GK0° 5	0,65	0,63	17,03	16,50
GK45° 5	0,65	0,63	17,03	16,50
w/z1	0,63	0,36	17,53	9,96
w/z2	0,63	0,41	17,53	11,36
w/z3	0,63	0,45	17,53	12,42
w/z4	0,63	0,51	17,53	14,15
w/z5	0,63	0,56	17,53	15,54
w/z6	0,63	0,63	17,53	17,53
F1	0,63	0,63	17,53	17,53
F2	0,63	0,63	17,53	17,53
F3	0,63	0,63	17,53	17,53
F4	0,63	0,63	17,53	17,53
F5	0,63	0,63	17,53	17,53
F6	0,63	0,63	17,53	17,53

Tab. A-3: Messwerte AF-Parameter

Versuchsreihe	Durchschnittliche Absorptionstiefe	Druckauftrag	Schichtauftrag	Optimierbarkeit
	[mm]	[-]	[-]	[-]
Z1	0,75	1	4	5
Z2	0,94	1	3	5
Z3	1,13	2	2	5
Z4	1,32	2	2	5
Z5	1,48	2	2	5
Z+1	0,32	1	2	1
Z+2	0,54	1	2	1
Z+3	0,82	1	2	1
Z+4	1,04	2	1	3
Z+5	1,19	2	1	4
K1	2,00	2	59	4

Versuchsreihe	Durchschnittliche Absorptionstiefe	Druckauftrag	Schichtauftrag	Optimierbarkeit
	[mm]	[-]	[-]	[-]
K2	2,00	2	55	4
K3	2,00	2	61	3
K4	2,00	2	61	2
K5	2,00	2	55	2
K6	2,00	2	61	2
K7	2,00	2	60	3
K8	2,00	2	54	3
K+1	1,00	1	60	1
K+2	1,00	2	53	1
K+3	1,00	2	60	1
K+4	1,00	2	53	3
K+5	1,00	2	60	3
M1	1,54	2	2	5
M2	1,47	2	2	5
M3	1,40	2	2	4
M4	1,19	2	2	2
M5	0,98	1	2	1
M6	0,74	1	2	1
M7	0,44	1	4	5
M8	0,26	1	4	5
M+1	1,17	2	1	2
M+2	1,03	2	1	2
M+3	0,83	1	2	1
M+4	0,57	1	2	1
M+5	0,41	1	3	1
GK1	1,19	2	5	2
GK2	1,14	2	1	2
GK3	1,11	2	1	2
GK4	1,08	2	1	2
GK5	1,05	2	1	2
GK90° 1	1,19	2	5	2
GK0° 1	1,19	2	5	2
GK45° 1	1,19	2	5	2

Versuchsreihe	Durchschnittliche Absorptionstiefe	Druckauftrag	Schichtauftrag	Optimierbarkeit
	[mm]	[-]	[-]	[-]
GK90° 2	1,14	2	1	2
GK0° 2	1,14	2	1	2
GK45° 2	1,14	2	1	2
GK90° 3	1,11	2	1	2
GK0° 3	1,11	2	1	2
GK45° 3	1,11	2	1	2
GK90° 4	1,08	2	1	2
GK0° 4	1,08	2	1	2
GK45° 4	1,08	2	1	2
GK90° 5	1,05	2	1	2
GK0° 5	1,05	2	1	2
GK45° 5	1,05	2	1	2
w/z1	0,22	1	2	1
w/z2	0,42	1	2	1
w/z3	0,58	1	2	1
w/z4	0,82	1	2	1
w/z5	0,99	2	1	2
w/z6	1,11	2	1	2
F1	1,11	2	1	2
F2	1,11	2	1	2
F3	1,11	2	1	2
F4	1,11	2	1	2
F5	1,11	2	1	2
F6	1,11	2	1	2

Tab. A-4: Messwerte Druckfestigkeitsanalyse

Versuchsreihe	Druckfestigkeit Wasser-Lagerung	Druckfestigkeit Wasserglas-Lagerung
	[MPa]	[MPa]
Z1	3,19	4,23
Z2	3,69	4,41
Z3	2,76	3,17

Versuchsreihe	Druckfestigkeit Wasser-Lagerung	Druckfestigkeit Wasserglas-Lagerung
	[MPa]	[MPa]
Z4	2,38	3,56
Z5	3,13	3,30
Z+1	7,68	13,13
Z+2	7,84	16,38
Z+3	8,88	17,39
Z+4	7,12	15,38
Z+5	6,43	7,64
K1	5,76	6,93
K2	6,52	7,76
K3	6,49	9,45
K4	7,31	11,20
K5	7,43	13,20
K6	6,50	9,44
K7	3,98	7,77
K8	3,93	3,66
K+1	7,25	9,34
K+2	8,76	16,56
K+3	5,62	9,42
K+4	4,79	6,66
K+5	4,50	6,59
M1	3,69	4,43
M2	6,98	6,70
M3	8,18	9,18
M4	8,06	11,20
M5	9,44	12,27
M6	9,18	11,65
M7	5,42	7,37
M8	3,33	5,85
M+1	5,87	10,96
M+2	10,96	17,92
M+3	9,26	12,93
M+4	7,34	10,00
M+5	4,88	7,37

Anhang

Versuchsreihe	Druckfestigkeit Wasser-Lagerung	Druckfestigkeit Wasserglas-Lagerung
	[MPa]	[MPa]
GK1	19,58	24,90
GK2	18,76	19,73
GK3	12,77	19,11
GK4	11,18	15,06
GK5	7,20	9,19
GK90° 1	19,58	-
GK0° 1	18,85	-
GK45° 1	19,52	-
GK90° 2	18,76	-
GK0° 2	17,04	-
GK45° 2	15,55	-
GK90° 3	12,77	-
GK0° 3	12,11	-
GK45° 3	12,34	-
GK90° 4	11,18	-
GK0° 4	10,57	-
GK45° 4	9,81	-
GK90° 5	7,20	-
GK0° 5	6,11	-
GK45° 5	5,92	-
w/z1	6,40	7,44
w/z2	7,37	11,69
w/z3	8,43	15,77
w/z4	8,91	17,43
w/z5	10,47	18,68
w/z6	11,75	20,47
F1	0,00	7,70
F2	2,91	9,25
F3	4,62	14,76
F4	7,17	16,86
F5	10,65	20,48
F6	11,19	23,00

## Lebenslauf



### Persönliche Daten

Name: Daniel Nyman

Geburtstag:

Geburtsort:

Staatsangehörigkeit:

Familienstand:



### Berufliche Tätigkeit

Landratsamt Rhein-Neckar-Kreis 2021 – heute

Leitung Referat III Betrieb



### Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Technische Universität Kaiserslautern 2016 – 2021  
 Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen

Schwerpunkte: Durchführung von Forschungsprojekten im  
 Bereich 3D-Druck von Beton und  
 konstruktiver Ingenieurbau, Betreuung von  
 Studierenden



### Lehrbeauftragter / Dozent

Technische Universität Kaiserslautern 2019 – 2020  
 im Bereich Angewandtes Betondesign

Hochschule Kaiserslautern (Internationales Studienkolleg) 2019 – 2020  
 im Bereich Mathematik

Frankfurt University of Applied Sciences 2014 – 2016  
 im Bereich Ingenieursmathematik I+II 2018 – 2019



### Werkstudententätigkeit

---

Hochtief Solutions AG / Hochtief Engineering GmbH 2012 – 2016

Ed. Züblin AG, Poseidonhaus Frankfurt am Main 2012



### Studentische Hilfskraft

---

Frankfurt University of Applied Sciences 2012 – 2014  
im Bereich Ingenieurmathematik I + II, Stahlbau, Online-  
Projekt im Bereich Holzbau



### Praktikum

---

Hochtief Solutions AG 2013

Franconofurt AG, Frankfurt am Main (Architekt) 2008



### Studium

---

Master-Studium, Bauingenieurwesen: 2014 – 2016  
Griffith University (Australien) /  
Frankfurt University of Applied Sciences /  
Hochschule RheinMain  
Abschluss: Master of Engineering

Bachelor-Studium, Bauingenieurwesen: 2010 – 2014  
Frankfurt University of Applied Sciences  
Abschluss: Bachelor of Engineering



### Schulausbildung

---

Karl-Rehbein-Schule, Hanau 2000 – 2010  
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

Kaiserslautern, den 07.03.2022

