

3D-druckbarer Normalbeton mit grober Gesteinskörnung

Dipl.-Ing. Markus Taubert, Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine
Institut für Baustoffe der TU Dresden, 01062 Dresden
E-Mail: markus.taubert@tu-dresden.de, Telefon: +49 351 463 35633

Zusammenfassung

Angetrieben von vielversprechenden Effizienzsteigerungen wird der Beton-3D-Druck stetig weiterentwickelt. Um die gewonnenen Erkenntnisse niederschwellig in die Baupraxis zu überführen, empfehlen sich druckbare Betone im Rahmen des geltenden Regelwerks. Dabei stellt die Limitierung des Mehlkorngelhalts eine Herausforderung dar. Um diese zu meistern, wird eine verallgemeinerbare, numerisch unterstützte Anwendung der Korngrößenverteilung nach Andreasen und Andersen als Basis für den Betonentwurf vorgeschlagen. Experimentelle Untersuchungen haben eine gute Verbaubarkeit und hinreichende Extrudierbarkeit eines Betons mit einem 16 mm Größtkorn und einem Mehlkorngelhalt von 500 kg/m³ demonstriert.

1 Einführung

Die additive Fertigung von Betonstrukturen bietet ein hohes Potenzial für Effizienzsteigerungen hinsichtlich der Arbeits- und Produktionszeiten, des Materialeinsatzes und der Kosten [1]. Die Mehrzahl der digitalen Fertigungstechnologien nutzt die Extrusion von Frischbeton als Basistechnologie [2], wobei die überwältigende Mehrheit veröffentlichter Mischungen Korngrößen kleiner 4 mm oder sogar kleiner 2 mm und große Anteile an Mehlkorn ($\leq 0,125$ mm) enthalten. Ein hoher Zementleimgehalt ermöglicht eine reibungsarme innere Neuordnung des Korngefüges bereits bei niedrigen Scherkräften [3]. Um die Dauerhaftigkeit zu gewährleisten und Schwinden bzw. Kriechen gering zu halten, ist der Feinkornanteil für Normalbetone durch Normen begrenzt [4]. Zudem gehen feinkörnige Zusammensetzungen mit einem hohen Bindemittelgehalt einher, was zu einer schlechten Umweltverträglichkeit führt.

Ziel ist daher ein verallgemeinerbarer Betonentwurf, der die grundlegenden Anforderungen des 3D-Drucks (Pumpbarkeit, Extrudierbarkeit, Verbaubarkeit) berücksichtigt und die Vorgaben europäischer und deutscher Normen erfüllt. Solche Betonmischungen würden den Technologietransfer in die Baupraxis erheblich erleichtern. Nach der Zusammenstellung der Normenvorgaben wird das Mischungsdesign vorgestellt. Abschließend werden erste Versuchsergebnisse präsentiert, die die Gültigkeit des Konzepts im Rahmen des CONPrint3D-Ansatzes [1] belegen.

2 Normung

Als Grundlage werden die in Europa und Deutschland gültigen Normen herangezogen. Dies sind insbesondere die europäische Norm EN 206 [5] sowie die nationale Norm DIN 1045-2 [4], die Anwendungsregeln zur EN 206 ergänzt. Die EN 206 definiert unter anderem Expositionsklassen und legt Klassifizierungen von Frisch- und Festbetoneigenschaften fest. Für Zemente wird auf die EN 197-1 [6] verwiesen, die 27 Normalzementarten beschreibt und diese in fünf Hauptarten unterteilt. Diese unterscheiden sich in der Höhe der Klinkersubstitution und den eingesetzten Ersatzstoffen. Mit EN 197-5 [7] wird eine sechste Hauptart für Kompositzemente mit einem Klinkerersatz von bis zu 65 % hinzugefügt. Darüber hinaus werden Portlandkompositzemente durch die Normalzementart CEM II/C-M ergänzt, die eine Klinkersubstitution von bis zu 50 % mit einer beliebigen Kombination von Zusatzstoffen erlaubt.

Für die Gesteinskörnung sieht die EN 206 „natürliche normale Gesteinskörnungen, schwere Gesteinskörnungen sowie Hochofenstückschlacke nach EN 12620, leichte Gesteinskörnungen nach EN 13055 [sowie] wiedergewonnene Gesteinskörnungen“ vor.

Kritisch ist für 3D-druckbare Betone die Begrenzung des Mehlkorngehalts. Mehlkorn ist definiert als die Summe der festen Mischungsbestandteile mit einer Korngröße $\leq 0,125$ mm. Dazu zählen Zement, Gesteinsmehle und Zusatzstoffe wie Flugasche. Die Norm begrenzt den Feinstoffgehalt in Abhängigkeit vom Zementgehalt, dem Größtkorn, der zu erreichenden Druckfestigkeit und der Expositionsklasse [4]. Die Spezifikationen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1 Maximal zulässiger Mehlkorngehalt nach DIN 1045-2 [4]

Druckfestigkeit nach EN 206	bis C50/60			ab C55/67			
Expositionsklasse	XF, XM		andere	alle			
Zementgehalt [kg/m ³]	≤ 300	\leftrightarrow	≥ 400	alle	≤ 400	\leftrightarrow	≥ 500
maximal zulässiger Mehlkorngehalt [kg/m ³]	400	linear interpolieren	500	550	500	linear interpolieren	600
wenn Größtkorn = 8 mm	+ 50 kg/m ³				+ 50 kg/m ³		

3 Betonentwurf

Der zukunftsorientierte Charakter des Beton-3D-Drucks sollte sich auch im Material widerspiegeln. Um die Umweltbelastung zu reduzieren, wird ein Zement der neuen Normalzementart CEM II/C-M gewählt. In dem von der Holcim (Deutschland) GmbH bereitgestellten Bindemittel ist die Hälfte des Klinkers zu gleichen Teilen durch Hüttensand und Kalksteinmehl ersetzt; der Zement ist für die Verwendung in allen Expositionsklassen zugelassen [8]. Die Zugabe von Flugasche wäre generell nicht zielführend, da die ohnehin begrenzte Verfügbarkeit in Deutschland durch den Ausstieg aus der Kohleverstromung weiter abnehmen wird. Der Bindemittelphase der Grundmischung werden keine weiteren Stoffe zugesetzt.

Um die Extrudierbarkeit durch einen möglichst hohen Feinkornanteil sicherzustellen und die Kombinationen aus Tabelle 1 weitestgehend abzudecken, wird für den Mehlkorngehalt ein Zielwert von 500 kg/m³ gewählt. Begrenzt durch die Höhe der vorhandenen CONPrint3D-Düsenöffnung von 50 mm ist das Größtkorn auf 16 mm festgelegt. Die Haufwerksporen zwischen den groben Körnern sollen mit kleineren Fraktionen bis in den Mikrometerbereich gefüllt werden. Werden möglichst große Körner zum Füllen der Poren verwendet, verringern sich der erforderliche Feinkornanteil und der Wasserbedarf. Um eine kontinuierliche Sieblinie mit hoher Packungsdichte zu erreichen, wird eine Potenzfunktion verwendet, die von Andreasen und Andersen 1929 hergeleitet wurde [9]:

$$A(d) = 100 \cdot V\% \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^q \quad (1)$$

Dabei ist D die Sieböffnung der größten Kornfraktion, $A(d)$ der kumulative Siebdurchgang einer beliebigen Korngröße d und q ist der einheitenlose Verteilungsmodul. Je kleiner q ist, desto feiner ist die Mischung. Eine Zuordnung eines Verteilungsmoduls zu einem gewählten Feinkornanteil erfordert eine Funktion des Größtkorns. Bild 1 stellt den Zusammenhang als Nomogramm dar. Da die Norm die Mehlkornmasse reglementiert, das Andreasen-Modell jedoch volumenbezogen ist, ist die Darstellung informativ. Ein direktes Ablesen ist wegen Dichtedifferenzen zwischen Bindemittel und Gesteinskörnung nicht möglich.

Gleichung (1) wird häufig Fuller und Thompson zugeschrieben [10], die bereits 1907 ideale Sieblinien anhand von Versuchsdaten geometrisch beschrieben. Demnach folge eine Partikelgrößenverteilung mit hoher Packungsdichte einer Ellipse, die die Ordinate bei 7 % tangential berührt und bei $D/10$ in eine Tangente bis zum Punkt $(D; 100 \%)$ übergeht. Sie tragen die Sieblinie in Massenanteilen auf einer linearen Abszisse ab [11]. Anders als das Andreasen-Modell ist diese Beschreibung jedoch nicht deterministisch und für eine numerische Anwendung ungeeignet.

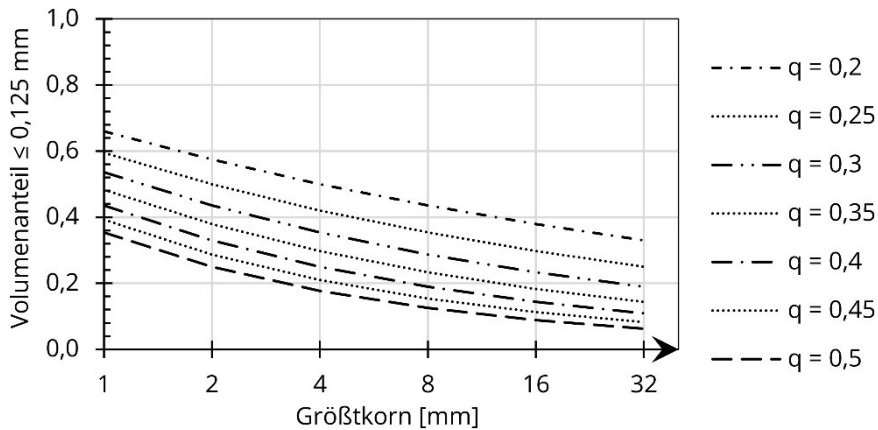


Bild 1 Volumenanteil des Mehlkorns als Funktion des Größtkorns und des Verteilungsmoduls. Darstellung: Markus Taubert

Daher wird Gleichung (1) herangezogen, um eine Sieblinie aus lokalem Kies und Flusssand der Fraktionen 0/2, 2/4, 4/8 und 8/16 sowie dem Quarzmehl BCS 413 und dem oben erwähnten Zement CEM II/C-M (S-LL) zusammenzustellen. Die Korngrößenverteilungen wurden in Potenzstufen von 2^{-11} mm bis 2^{+4} mm durch Siebung und Laserbeugungsanalyse gemessen; Bild 2 zeigt die Ergebnisse. Da sich die Sieblinien teilweise überschneiden, ist eine triviale Berechnung der optimalen Zusammensetzung nicht möglich. Daher wird mit Gleichung (1) für jede Korngröße ein optimaler Volumenanteil berechnet. Anschließend wird nach Gleichung (2) jeweils die Abweichung der Gesamtsieblinie von der Andreasen-Kurve berechnet und der Mittelwert über alle Abweichungen als Anpassungsqualitätsindikator gebildet.

$$Abweichung = \frac{1}{n} \cdot \sum \frac{|Sieblinie_d - Andreasen_d|}{Andreasen_d} \quad (2)$$

Eine numerische Optimierung wird eingesetzt, um die Abweichung durch Variation der Komponentenanteile und des Verteilungsmoduls auf ein Minimum zu reduzieren. Diese Vorgaben können durch weitere Nebenbedingungen ergänzt werden. So muss beispielsweise die Summe aller Komponentenanteile 100 % und der Feinkornanteil 500 kg/m^3 betragen.

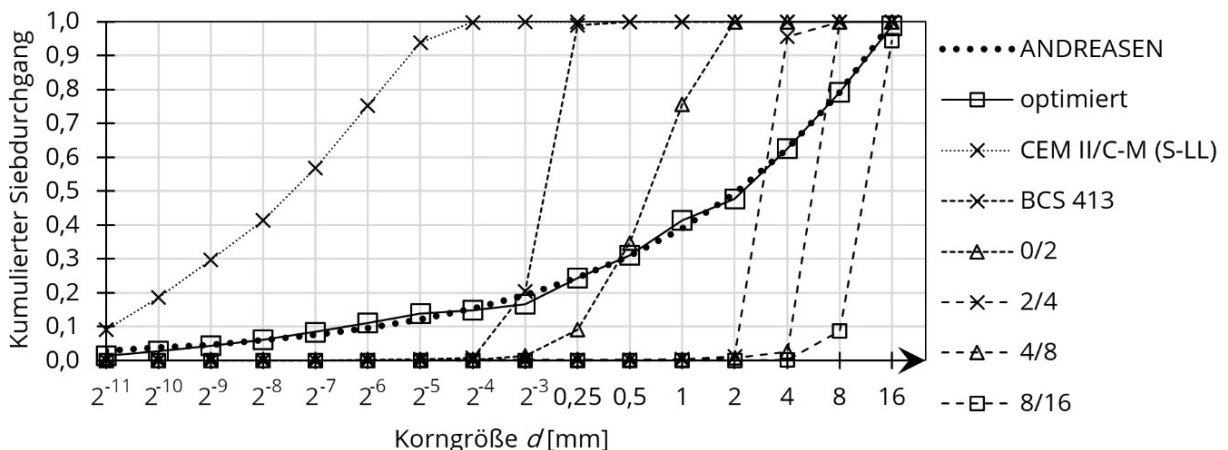


Bild 2 Sieblinien der Mischungsbestandteile und der optimierten Mischung. Darstellung: Markus Taubert

Es ist zu beachten, dass die Auswahl der in die Optimierung einbezogenen Korngrößen einen Einfluss auf das Ergebnis hat. In dem hier vorgestellten Fall werden neun Korngrößen $\leq 0,125$ mm und sieben Korngrößen $> 0,125$ mm berücksichtigt. Folglich hat die Feinkornverteilung ein größeres Gewicht bei der Optimierung als die übrigen Bestandteile. Zudem wird die Andreasen-Korngrößenverteilung volumetrisch beschrieben und muss zur Angabe einer Betonrezeptur mit den Reindichten der Materialien umgerechnet werden.

Um die Mischung zu vervollständigen, wurde der Wasser-Zement-Wert zu 0,4 gewählt. Damit werden die Anforderungen aller Expositionsklassen erfüllt, während die Konsistenz des Frischbetons mit einem PCE-Fließmittel gut eingestellt werden kann.

4 Erprobung

Zur Untersuchung der Konsistenzabhängigkeit vom Feinkorngehalt wurden sechs Sieblinien mit Verteilungsmoduln zwischen 0,30 und 0,36 ermittelt. Die feinste Rezeptur diente als Ausgangsmischung und wurde mit einem w/z -Wert von 0,4 und einem Fließmittelgehalt von 1 % der Zementmasse hergestellt. Die anderen Mischungen wurden so skaliert, dass sie die gleiche Menge Zement enthielten. Von jeder der skalierten Sieblinien wurde die nächst feinere subtrahiert. Die so berechneten Ergänzungssieblinien wurden nacheinander zur Ausgangsmischung hinzugemischt, wobei nach jeder Zugabe ein Ausbreitmaß gemäß EN 12350-5 [12] aufgenommen wurde. So blieben der w/z -Wert und die Fließmitteldosierung über alle Versuche konstant. Einflüsse der Scherhistorie und des Frischbetonalters konnten hingegen nicht erfasst werden.

Die Ergebnisse sind in Bild 3 dargestellt. Das Ausbreitmaß nimmt mit steigendem Verteilungsmodul ab; der Beton wird steifer. Die Kurve deutet auf einen bilinearen Zusammenhang hin. Demnach gibt es einen kritischen Bereich für den Verteilungsmodul, unterhalb dem eine Feinkornübersättigung einsetzt. Die Kornkontakte der groben Gesteinskörnung werden reduziert, wodurch der Beton fließfähiger wird. Es ist anzunehmen, dass dieser kritische Bereich von der Kornform und der Oberflächenrauheit abhängt. Dies muss jedoch durch zusätzliche Versuche bestätigt werden.

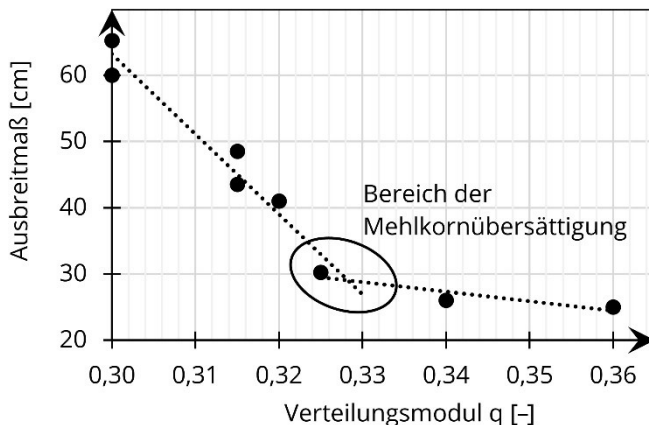


Bild 3 Bilinearer Zusammenhang zwischen dem Verteilungsmodul q und dem Ausbreitmaß von Beton mit einem 16 mm Größtkorn, w/z -Wert von 0,4 und 1 % PCE-Fließmittel bezogen auf die Zementmasse. Darstellung: Markus Taubert

Die nach Abschnitt 3 optimierte Mischung hat einen Verteilungsmodul $q = 0,339$ und setzt sich gemäß Tabelle 2 zusammen.

Tabelle 2 Zusammensetzung des optimierten Betons

Komponente	Masse [kg/m ³]
CEM II/C-M (S-LL)	400,0
BCS 413	139,8
Sand 0/2	554,8
Kies 2/4	309,8
Kies 4/8	286,3
Kies 8/16	458,5
Wasser	145,7
PCE-Fließmittel	nach Bedarf

Die Mischung weist eine Dichte von $2,33 \text{ t/m}^3$ und einen massebezogenen Leimanteil von $27,7 \%$ auf. Laborversuche auf einem Portaldrucker mit einer Schneckenförderung und rechteckiger Düsenöffnung (Höhe 50 mm , Breite 150 mm) zeigten eine akzeptable Extrudierbarkeit und gute Verbaubarkeit, siehe Bild 4. Betone mit einem Setzmaß zwischen 8 cm und 12 cm sind für den gegebenen Extruder geeignet, wobei die Konsistenz mittels Fließmitteldosierung einstellbar ist. Laufende Tests weisen auf einen guten Schichtverbund hin.



Bild 4 Der entwickelte Beton zeigt eine gute Verbaubarkeit und hinreichende Extrudierbarkeit. Foto: Markus Taubert

5 Schlussfolgerungen

Die Einhaltung von Normen erleichtert den Transfer des Beton-3D-Drucks in die Baupraxis. Daher muss die Bindemittelzusammensetzung auf die genormten Zementarten beschränkt werden. Darüber hinaus ist der Gehalt an Feinstoffen zu begrenzen. Dazu wurde ein verallgemeinerungsfähiges Sieblinienmodell vorgestellt, das bis in den Mikrometerbereich ausgedehnt wird. Es wurde eine Potenzgleichung nach Andreasen und Andersen verwendet. Durch Minimierung der Abweichung der berechneten Sieblinie von der Andreasen-Kurve unter Variation der Mischungszusammensetzung und des Verteilungsmoduls q kann numerisch eine optimierte Sieblinie gefunden werden. Nach Einführung von Randbedingungen, z. B. einem maximalen Feinkornanteil, kann die Sieblinie spezifiziert werden. Druckversuche mit einer so ermittelten Mischung zeigten die Extrudierbarkeit und Verbaubarkeit eines Betons mit einem Größtkorn von 16 mm und einem Feinkorngehalt von 500 kg/m^3 .

Es wurde gezeigt, dass additives Bauen mit Normalbeton möglich ist. Der vorgestellte Betonentwurf lässt sich unproblematisch auf lokal verfügbare Materialien anwenden. Zukünftig wird die Methode um Modelle der Frischbetoneigenschaften, der Umweltauswirkungen sowie der Materialkosten erweitert, sodass der Verteilungsmodul deterministisch bestimmt werden kann.

Danksagung

Die Autoren danken der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) für die Förderung des Projekts 21574 BR „Digitales Bauen – Großformatiger 3D-Druck mit Transportbeton“.

Literatur

- [1] Mechtcherine, V.; Nerella, V. N.; Will, F.; Näther, M.; Otto, J.; Krause, M. (2019) *Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing*. Automation in Construction 107, Art. 102933. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102933>
- [2] Buswell, R. A.; Leal da Silva, W. R.; Bos, F. P.; Schipper, H. R.; Lowke, D.; Hack, N.; Kloft, H.; Mechtcherine, V.; Wangler, T.; Roussel, N. (2020) *A process classification framework for defining and describing Digital Fabrication with Concrete*. Cement and Concrete Research 134, Art. 106068. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106068>
- [3] Ivanova I.; Mechtcherine, V. (2020) *Effects of Volume Fraction and Surface Area of Aggregates on the Static Yield Stress and Structural Build-Up of Fresh Concrete*. Materials 13, H. 7, Art. 1551. <https://doi.org/10.3390/ma13071551>
- [4] DIN 1045-2:2008-8 (2008) *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton: Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1*. Berlin: Beuth.
- [5] DIN EN 206:2021-6 (2021) *Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*. Berlin: Beuth.
- [6] DIN EN 197-1:2011-11 (2011) *Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement*. Berlin: Beuth.
- [7] DIN EN 197-5:2021-7 (2021) *Zement – Teil 5: Portlandkompositzement CEM II/C-M und Kompositzement CEM VI*. Berlin: Beuth.
- [8] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) (2021) *Portlandkompositzement CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N "Beckum"* [allgemeine bauaufsichtliche Zulassung]. Berlin. online: https://www.dibt.de/pdf_storage/2021/Z-3.16-2186%281.3.16-64%2121%29.pdf
- [9] Andreasen, A. H. M.; Andersen, J. (1930) *Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten)*. Kolloid-Zeitschrift 50, S. 217–228. <https://doi.org/10.1007/BF01422986>
- [10] Weng, Y.; Li, M.; Tan, M. J.; Qian, S. (2018) *Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model*. Construction and Building Materials 163, S. 600–610. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.112>
- [11] Fuller, W. B.; Thompson, S. E. (1907) *The Laws of Proportioning Concrete*. Transactions of the American Society of Civil Engineers 59, S. 67–143. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0001979>
- [12] DIN EN 12350-5:2019-09 (2019) *Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß*. Berlin: Beuth.