

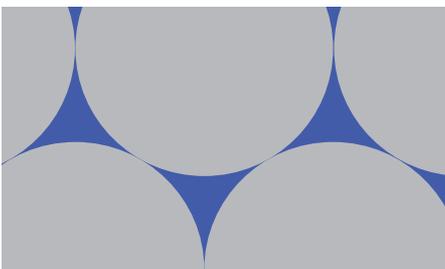
Kornzusammensetzung des Mehlkorns

Notwendigkeit der Ermittlung und Einfluss der Bestimmungsmethode auf das Ergebnis

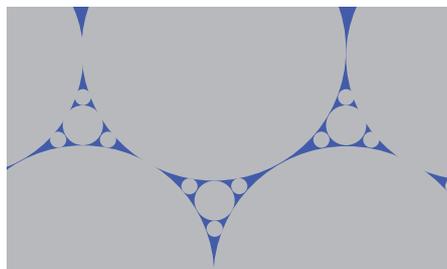
Text | Eva K. Fischböck, Peter Nischer

Bilder und Grafiken | © VÖZ, Archiv ISTU, Abbildungen 10 b und c: Malvern Instruments

Wegen der Wichtigkeit der Kornzusammensetzung für die Verarbeitbarkeit und die Beton-eigenschaften enthalten die meisten nationalen Betonnormen [z.B 1] Angaben über den „günstigen“ und „brauchbaren“ Sieblinienbereich.



a)
Abb. 1: Hohlraum ohne (a) und mit (b) Schlupfkorn



b)

1. Problemstellung

Die Kornzusammensetzung beeinflusst die Packungsdichte und damit den Hohlraumgehalt. Zur Verringerung des Hohlraumgehaltes muss das Schlupfkorn (das kleinere Korn, das zwischen dem jeweils größeren Platz findet) in entsprechender Menge, Kornform und Kornverteilung vorhanden sein (Abb. 1).

Den Einfluss einer hohen Packungsdichte auf die Eigenschaften von Beton erkannten schon Fuller und Thomson im Jahre 1907 [2]. Aus deren experimentellen Untersuchungen stammt die so genannte „Fuller-Kurve“, eine quadratische Parabel, die für einen stetigen Verlauf der Korngrößenverteilung bei runden Körnern (Kugeln), einem begrenzten Mehlkornanteil und den in der Betontechnologie eingesetzten Methoden der Verdichtung die optimale Packungsdichte ergibt.

Gleichung 1:

$$D_i = \left(\frac{d_i}{d_{\max}} \right)^n$$

Mit
 D_i = kumulativer Anteil der Korndicke d_i
 d_{\max} = maximale Korndicke
 n = Verteilungsmodul; 0,50 für Kugeln [2]

Die experimentell ermittelte Fuller-Kurve stellt einen Spezialfall der auf Simulationen basierenden Dinger-Funk-Gleichung dar, die z.B. im Bereich der Keramik für die Bestimmung der optimalen Packungsdichte eingesetzt wird [3].

Gleichung 2:

$$D = \frac{d^n - d_{\min}^n}{d_{\max}^n - d_{\min}^n} \cdot 100 \%$$

Berechnungen haben gezeigt, dass diese Gleichung eine optimale Packungsdichte bei einem Verteilungsmodul von $n = 0,37$ ergibt [3]. Bei Korngemischen, die aus unregelmäßig geformten Körnern bestehen, ist ein niedrigerer Wert für den Verteilungsmodul zu verwenden, um eine ideale Packungsdichte zu erreichen [4].

Diese Erkenntnisse decken sich mit Untersuchungen aus der Betontechnologie, wonach für die Berechnung der idealen Packungsdichte für Körner mit einem Längen-Breitenverhältnis (Kornindex) von größer gleich 1,5 in der Formel nach Fuller $n = 0,35$ gewählt werden

muss. Für Mehlkorn mit einem Kornindex von etwa 1,3 wird ein Verteilungsmodul von 0,40 benötigt [5].

In Abbildung 2 ist die Soll-Sieblinie gerechnet mit $n = 0,35$ für Körnungen GK 22 und die Ist-Sieblinie von einem Korngemisch B22 mit 300 kg Mehlkorn und günstiger Kornzusammensetzung gezeigt.

Die Bestimmung der tatsächlichen Kornzusammensetzung des Mehlkorns (Anteil $< 0,125$ mm) ist schwierig, weshalb meist Angaben über eine zweckmäßige Kornzusammensetzung des Betons im Mehlkornbereich fehlen. Aus der Praxis ist jedoch bekannt, dass gerade diese Bestandteile den Wasseranspruch, die Verarbeitbarkeit und die Festbetoneigenschaften entscheidend beeinflussen [5].

Durch eine gezielte Auswahl des Mehlkorns kann die Packungsdichte erhöht und damit der verbleibende Hohlraum verringert werden.

Durch eine gezielte Auswahl des Mehlkorns kann die Packungsdichte erhöht und damit der verbleibende Hohlraum verringert werden. Obwohl die Oberfläche des Korngemisches meist zunimmt, nimmt der Wasseranspruch bei einem optimierten Mehlkorn im Allgemeinen ab. Wenn mehr Feinteile zugegeben werden als zum optimalen Füllen der Hohlräume erforderlich ist, oder wenn besonders feines Korn mit einer sehr großen Oberfläche (z. B. Mikrosilica) zugegeben wird, kann der Wasseran-

spruch wieder steigen. Beton, der für die erforderliche Verarbeitbarkeit mehr Wasser und/ oder Fließmittel benötigt als einer mit für die Praxis optimierten Korngrößenverteilung des Mehlkorns, weist eine schlechtere Verarbeitbarkeit und Stabilität des Frischbetons auf. Ansätze zur Optimierung des Mehlkorns sind in Abbildung 3 dargestellt, wobei nicht nur die mit $n = 0,40$ errechnete optimale Kornverteilung für Mehlkorn nach Fuller, sondern auch die auf Grund praktischer Erfahrungen im Bereich $\leq 0,02$ mm verringerten Kornanteile ermittelt mit FPIA gezeigt werden.

In der Abbildung ist ebenso die mithilfe der Dinger-Funk-Gleichung berechnete Kornverteilung dargestellt. Diese stimmt mit der experimentell bestimmten Soll-Sieblinie vor allem in Bereich sehr kleiner Korngrößen sehr gut überein.

Abbildung 4 zeigt die durchschnittliche Kornzusammensetzung von Zementen der Festigkeitsklasse CEM 42,5 R und CEM 42,5N. Bei Verwendung von ersteren, die mit der Sollkurve gut übereinstimmen, ist die Verarbeitbarkeit von weichen Betonen erfahrungsgemäß besser.

Um Optimierungen der Kornverteilung durchzuführen, ist es notwendig, die Kornverteilung des Mehlkornes genau zu bestimmen, weshalb vergleichende Untersuchungen mit verschiedenen Verfahren zur Ermittlung der Korngrößenverteilung des Mehlkornes durchgeführt wurden.

2. Mit verschiedenen Bestimmungsmethoden ermittelte Kornzusammensetzung von Mehlkorn

Im Rahmen eines von der FFG geförderten Forschungsprojektes [6], wurde die Kornverteilung von 19 verschiedenen Mehlkornen mit 3 verschiedenen Bestimmungsmethoden ermittelt. Das Ergebnis ist in Abbildung 5 dargestellt.

Wie aus der Abbildung ersichtlich ist, liefern die drei Bestimmungsmethoden unterschiedliche Ergebnisse. Der Einfluss der Bestimmungsmethode ist umso größer je kleiner das ermittelte Korn ist. (Abb. 6).

Gemäß Abbildung 3 stimmt die mit FPIA ermittelte Kornzusammensetzung (Soll) von in der Praxis als günstig beurteiltem Mehlkorn mit der lt. Theorie (Dinger-Funk) optimalen Kornzusammensetzung gut überein. Wenn die Ermittlung nicht mit FPIA erfolgt, ist eine Berechnung der

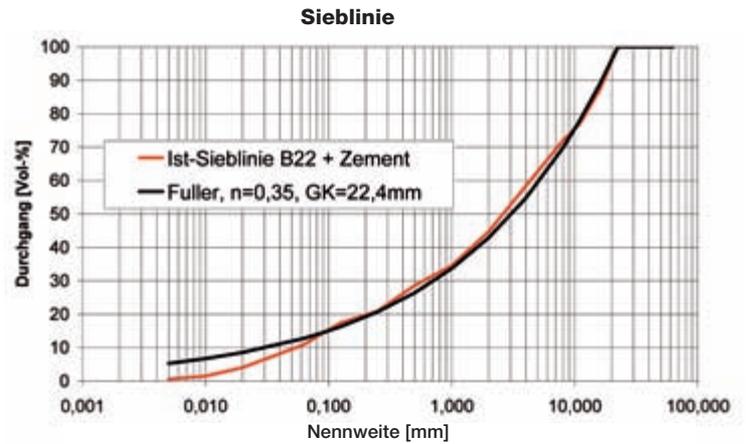


Abb. 2: Soll-Sieblinie gerechnet mit $n = 0,35$ für Körnungen GK 22 und Ist-Sieblinie von einem Korngemisch B22 mit 300 kg Mehlkorn mit günstiger Kornzusammensetzung

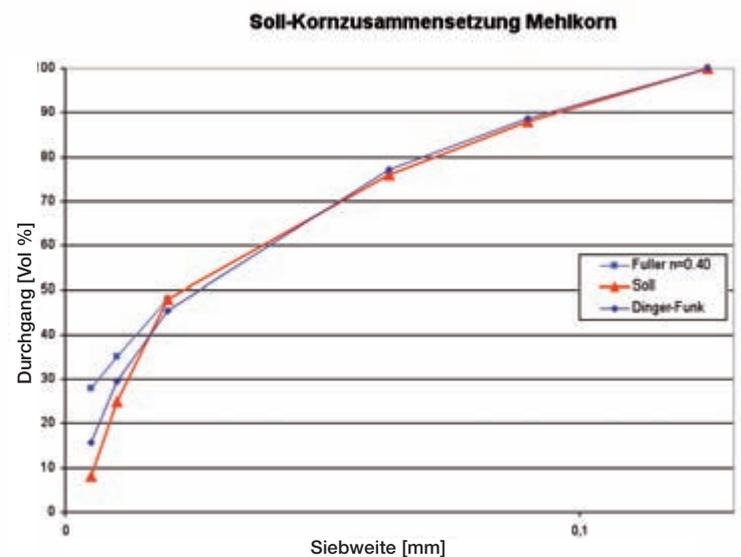


Abb. 3: Optimale Kornverteilung von Mehlkorn (gemäß Fuller berechnete Werte, laut Praxiserfahrung zweckmäßige Werte bei Ermittlung mit FPIA und Werte berechnet gemäß Dinger-Funk)

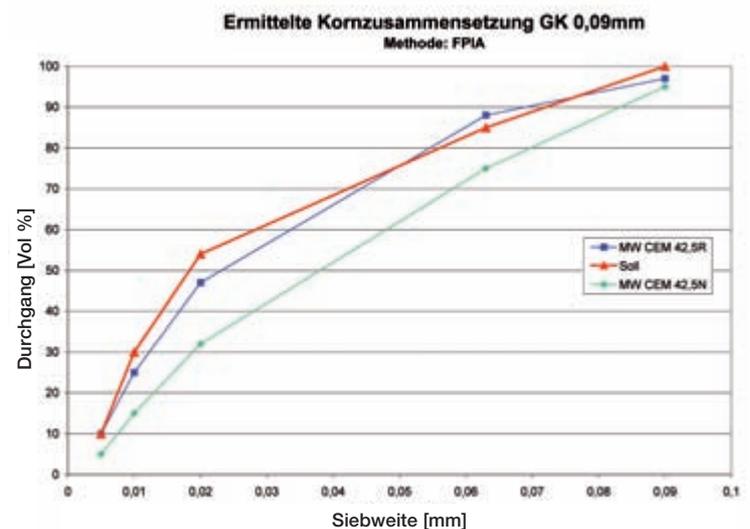


Abb. 4: Durchschnittliche Kornzusammensetzung ermittelt mit FPIA von CEM 42,5 R und CEM 42,5 N

optimalen Kornzusammensetzung des Mehlkorns mit einem Verteilungsmodul von $n = 0,40$, wie er sich aus theoretischen und praktischen Erkenntnissen ergibt, nicht möglich. Aushilfweise wäre in diesem Fall auf Grund vorliegender Ergebnisse gemäß Abbildung 5 mit $n = 0,1$ zu rechnen.

3. Theoretische Basis der verschiedenen Bestimmungsmethoden und qualitative Erklärungsansätze für die abweichenden Ergebnisse

3.1 Problemstellung

Mit feiner werdender Korngröße kann die üblicherweise eingesetzte Siebanalyse zur Bestimmung der Korngrößenverteilung nur eingeschränkt angewandt werden. Grund dafür sind Verstaubungs-

verluste und die aufgrund der hohen spezifischen Oberfläche wirksamen Oberflächenkräfte, die zu Agglomerationen führen. Daher existieren andere Verfahren zur Bestimmung der Korngröße, die im Wesentlichen in zwei Gruppen eingeteilt werden können:

- i. Methoden zur indirekten Bestimmung der Korngröße .
- ii. Methoden zur direkten Bestimmung der Kornabmessungen

Bei den Verfahren zur indirekten Bestimmung der Korngröße macht man sich messbare physikalische Größen zu Nutze, die in einem funktionellen Zusammenhang zur Korngröße stehen. Dazu zählen etwa die Beugung von Laserlicht bei der Lasergranulometrie, die Sinkgeschwindigkeit von Körnern bei der Schlämmanalyse oder die Dämpfung eines Ultraschallsignales bei akustischen Spektrometern. Die Korngröße wird bei diesen Verfahren aus den Messgrößen berechnet, wobei diesen Berechnungen vereinfachte Annahmen zugrunde liegen (z. B. Annahme von runden, glatten Körnern bzw. Korngemischen mit einheitlichem Brechungsindex oder Dichte).

Bei den Verfahren in der zweiten Gruppe werden die Abmessungen der Körner ähnlich wie bei der Siebanalyse direkt bestimmt. Zu ihnen zählen etwa der im Rahmen dieser Untersuchungen verwendete FPIA oder auf der Auswertung von Schattenbildern beruhende Geräte.

Im Folgenden sollen die Grundlagen ausgewählter Messverfahren dargestellt und qualitative Erklärungsansätze für auftretende Unterschiede gegeben werden.

3.2 Methoden zur indirekten Bestimmung der Korngröße

3.2.1 Schlämmanalyse

Die Grundlage der Schlämmanalyse ist die Abhängigkeit der Endfallgeschwindigkeit eines Partikels in einem Fluid von der Korngröße. Nur bei laminaren Verhältnissen kann diese mit der Stoke'schen Kraft berechnet werden:

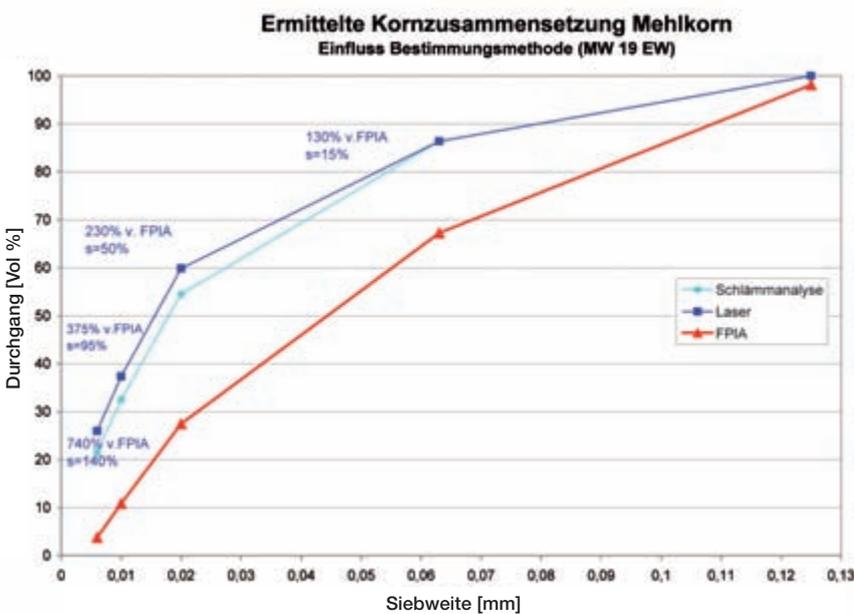


Abb. 5: Kornzusammensetzung von Mehlkorn ermittelt mit FPIA, Laser und Sedimentationsanalyse

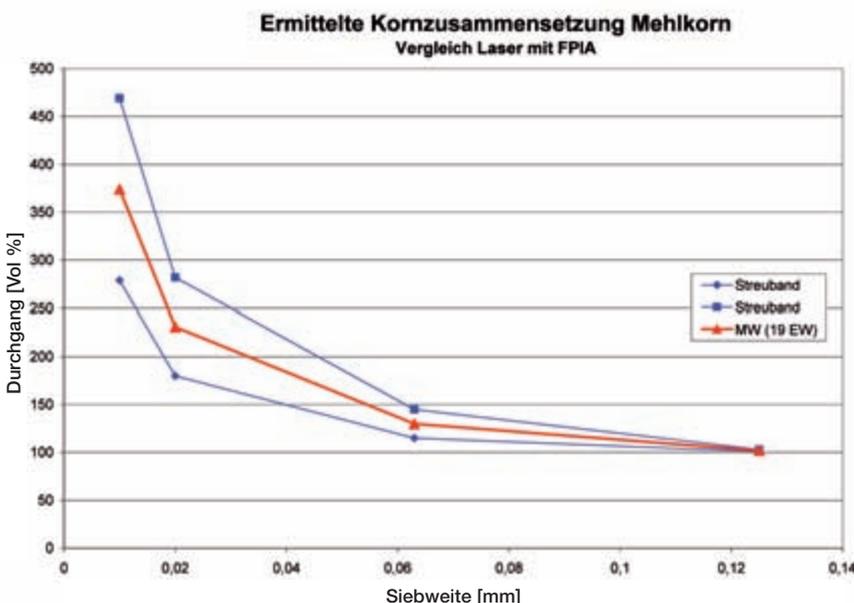


Abb. 6: Kornzusammensetzung des Mehlkorns. Verhältnis der Kornanteile bei den verschiedenen „Siebweiten“ von Laser zu FPIA (FPIA = 100%)

Gleichung 3:
$$v = \frac{1}{18} \cdot \frac{\Delta\rho}{\eta_F} \cdot d^2$$

Mit
 v = Endfallgeschwindigkeit
 $\Delta\rho$ = Dichtedifferenz zwischen Probe und Messfluid
 η_F = Viskosität des Fluids
 d = Partikeldurchmesser

Aus der gemessenen Endfallgeschwindigkeit kann ein Partikeldurchmesser bestimmt werden. Die Berechnung setzt glatte, runde Kugeln voraus. Der so bestimmte Durchmesser stellt einen Äquivalenzdurchmesser von Körnern gleicher Endfallgeschwindigkeit dar.

Bei der indirekten Bestimmung der Korngröße werden messbare physikalische Parameter verwendet die in einem funktionalen Zusammenhang zur Korngröße stehen.

Man unterscheidet zwischen dem laminaren, dem Übergangsbereich und dem turbulenten Strömungsbereich. Welcher dieser Bereiche vorherrschend ist, wird durch die Reynoldszahl festgelegt, die direkt proportional zum Korn-durchmesser d, zur Korndichte ρ sowie der Geschwindigkeit v und indirekt proportional zur Viskosität der Messflüssigkeit η ist (Gleichung 4). Der laminare Bereich wird durch eine Reynoldszahl von ca. 2300 begrenzt.

Gleichung 4:
$$R_e = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\eta}$$

Bei der Korngrößenanalyse im Feinstkornbereich herrschen üblicherweise laminare Verhältnisse – vorausgesetzt es liegen hinreichend glatte Partikel vor. Rauigkeit fördert die Ablösung der Strömung von der Kugel und Wirbelbildung, sodass man mit zunehmender Kornrauigkeit immer weiter in den turbulenten Bereich vorrückt (siehe Abb. 7c).

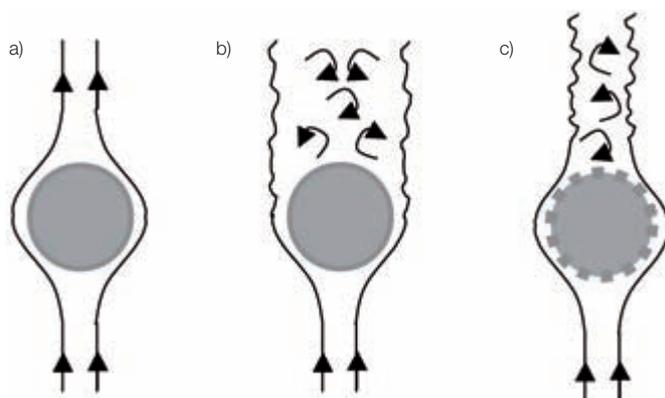


Abb. 7: a) Laminare Umströmung eines Kornes; b) Umströmungsverhältnisse im Übergangsbereich; c) Turbulente Umströmung eines rauen Kornes

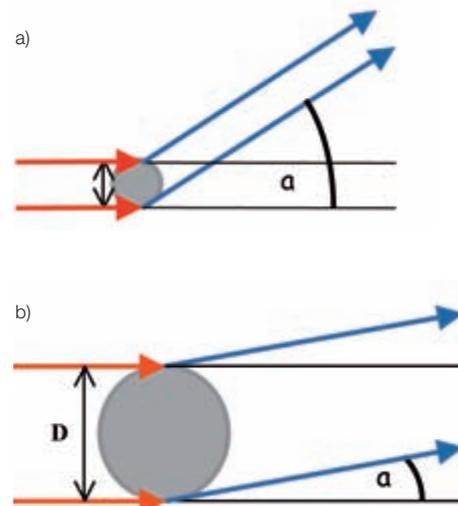


Abb. 8: Abhängigkeit des Beugungswinkels von der Korngröße

Der Strömungswiderstand ist im laminaren Bereich sehr gering, da es zu keiner Vermischung der einzelnen Flüssigkeitsschichten kommt. Im Übergangsbereich kommt es zu einer Ausbildung einer sehr hohen Widerstandskraft, da sich die Grenzschicht nahe der größten Abmessung der Körner ablöst und ein großes Totvolumen hinter dem Korn vorherrschend ist. In dem Totvolumen herrscht ein Unterdruck, wodurch eine Sogwirkung entsteht, die die Geschwindigkeit der Körner vermindert. Das Totvolumen und damit die Widerstandskraft nehmen im turbulenten Bereich wieder ab. Im turbulenten Strömungsbereich wird die Ablösung der Grenzschicht verzögert. Bei Berechnung der Korngröße mit Gleichung 3 ergibt sich dadurch eine zu geringe Korngröße abhängig vom Strömungsbereich.

Dieser Effekt wird in verschiedenen Bereichen ausgenutzt. So führt die genarbte Fläche eines Golfballes dazu, dass es zu einer Verschiebung der Strömungsverhältnisse vom Übergangs- in den turbulenten Bereich kommt. Durch den dadurch auftretenden geringeren Strömungswiderstand zeigen Golfbälle eine deutlich größere Reichweite als sonst gleiche Bälle mit glatter Oberfläche.

Gelangt man in Größenbereich von sehr kleinen Körnern, so stößt man auf weitere Einflussparameter. Wenn die Korngröße der Partikel in den Größenbereich der mittleren freien Weglänge der Moleküle des Messfluids kommt, wird die Fallbewegung durch die Fluidmoleküle gestört. Dies ist in Luft ab etwa 1 μm der Fall. Als Messergebnis erhält man so zu geringe Korngrößen.

Auch die Konzentration der Suspension spielt eine große Rolle bei der Messung. Ist die Konzentration zu hoch, kommt es zu einer Beeinflussung der Teilchen gegenseitig, was in einer Abhängigkeit der Korngröße von der Konzentration resultiert.



Abb. 9: Messung eines unregelmäßigen Kornes; Erfassungen von verschiedenen Teilrundungen abhängig von der Lage des Kornes zum Laserstrahl (a.) und Streueffekte (b.)

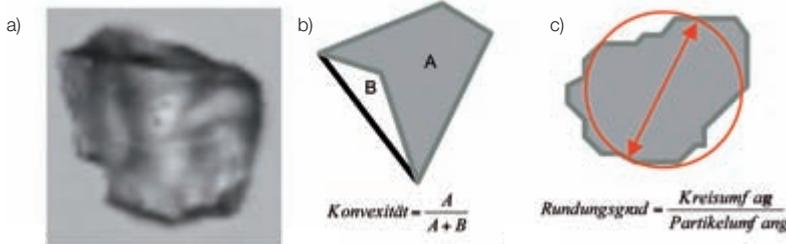


Abb. 10: a.) Bild eines fotografierten Kornes; b.) Bestimmung der Konvexität; c.) Bestimmung des Rundungsgrades

3.2.2 Lasergranulometrie

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung mit dem Laser-Particle-Sizer (LPS) beruht auf der Beugung von Laserlicht. Der Beugungswinkel des durch die Körner abgelenkten Laserstrahles ist indirekt proportional zur Korngröße (Abb. 8).

Bei Messungen von Kornhaufwerken entstehen durch Interferenzerscheinungen Beugungsmuster, aus denen mithilfe mathematischer Theorien die Korngrößenverteilung rückgerechnet werden kann. Die im Baustoffbereich am häufigsten eingesetzte Theorie nach Fraunhofer basiert auf der Annahme glatter, runder und opaker (d.h. lichtundurchlässiger) Körner.

Treten in der Praxis Abweichungen von diesen Annahmen ein, so kommt es zu Diskrepanzen der Messergebnisse im Vergleich zu anderen Methoden. Dies soll am Beispiel unregelmäßig geformten Körnern qualitativ anhand folgender Skizze erläutert werden (Abb. 9).

Je nach Lage der Körner relativ zum Laserstrahl ist es möglich, dass nur Teilrundungen gemäß Abbildung 9a für die Messung erfasst werden und so zu geringe Korngrößen ermittelt werden. Darüber hinaus führen Rauigkeiten und Kanten der Körner gemäß Abbildung 9b

zu Streulicht, welches die Intensität und die Lage des Beugungsmusters verändern und somit die berechnete Korngrößenverteilung beeinflussen. Bei der Auswertemethode nach Fraunhofer werden Streu- und Absorptionseffekte nicht berücksichtigt. Dies spielt vor allem bei sehr feinen Körnern eine Rolle, die in die Größenordnung der Wellenlänge des verwendeten Laserlichtes gelangen – im Falle eines roten Lasers also in Bereichen um etwa 0,6 µm.

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung mit fotooptischen Verfahren ermöglichen eine problemlose Messung von unregelmäßigen bzw. rauen Körnern und liefern neben der Korngrößenverteilung auch Aussagen zur Kornform der Partikel.

Neben Abweichungen von der idealen Kugelform der zu messenden Partikel kann auch die Forderung nach opaken Körnern im Bereich der hydraulischen Bindemittel oft nicht erfüllt werden. Als Beispiel wäre hier die Verwendung von Hüttensand als Bestandteil des Zementes zu nennen. Hüttensand zählt aufgrund seines glasigen Charakters,

der zum Erreichen von latent hydraulischen Eigenschaften notwendig ist, nicht zu den opaken Mineralphasen.

Durch die Beispiele soll verdeutlicht werden, dass häufig jene Annahmen, auf denen die Rückrechnung der Korngrößenverteilung aus den Beugungsmustern basiert, in der Praxis nicht erfüllt sind. Daher ist die Methode des LPS eher zu qualitativen Vergleichen als zu absoluten Aussagen für die Berechnung von Korngrößenverteilung zur Erzielung idealer Packungsdichten geeignet. Werden die Ergebnisse von indirekten Messverfahren für die Berechnung der Kornverteilung verwendet, so muss beachtet werden, dass sich in der Praxis im Allgemeinen andere Gesetzmäßigkeiten im Vergleich zu Siebanalysen im Grobkornbereich ergeben können.

3.3 Methoden zur direkten Bestimmung der Kornabmessungen

3.3.1 Fotooptische Verfahren

Bei fotooptischen Verfahren wie dem Flow-Particle-Image-Analyzer (FPIA) werden mit einer hochauflösenden CCD-Kamera Fotos von der suspendierten Probe aufgenommen (Abbildung 10). Dabei wird das Korn an der Optik des Gerätes so vorbeigeführt, dass stets die größtmögliche Abbildungsfläche erfasst wird.

Anhand der Fotos werden die Körner vermessen und daraus Parameter der Korngröße und Kornform bestimmt (Durchmesser, massespezifische Oberfläche, Verhältnis Länge/Breite, Rundungsgrad, Konvexität). Für ein repräsentatives Ergebnis ist es notwendig, die gesamte aufgeschlämmte Probe von ca. einem Gramm zu vermessen, was etwa zwei Millionen Körnern entspricht.

Im Gegensatz zu den bereits genannten Methoden werden die tatsächlichen Abmessungen der Körner ermittelt. Wird für die Bestimmung der Korngrößenverteilung der kleinste Durchmesser zur Auswertung herangezogen, entsprechen diese Ergebnisse jenen aus Siebanalysen. Die Ergebnisse sind daher für eine Berechnung der optimalen Korngrößen-

verteilung [3] geeignet. Mit dem FPIA können Messungen in Korngrößenbereichen zwischen ca. 0,5 und 200 μm durchgeführt werden.

4. Qualitativer Nachweis für die Unterschiede in den Messergebnissen

Aufgrund theoretischer Überlegungen sind die in Abschnitt 2 gezeigten Unterschiede zwischen dem fotooptischen Verfahren mit direkter Vermessung der Einzelkörner und den auf physikalischen Gesetzen beruhenden Messverfahren (Schlammanalyse, Lasergranulometrie) in den Messergebnissen bei der Bestimmung der Korngröße im Feinstkornbereich ($< 125 \mu\text{m}$) plausibel erklärbar.

Einerseits sind die Abweichungen in der Kornzusammensetzungen auf die Tatsache zurückzuführen, dass Äquivalenzdurchmesser aus völlig unterschiedlichen

physikalischen Messgrößen berechnet werden. Diese führen nur im Idealfall runder Kugeln zum gleichen Ergebnis. Andererseits resultieren die zunehmenden Abweichungen mit kleiner werdender Korngröße aus Phänomenen, die besonders bei rauen Körnern auftreten, mit größerer Feinheit stärker zu tragen kommen und kleinere Durchmesser vortäuschen. Bei der Bewertung von Messergebnissen sind diese Faktoren zu berücksichtigen.

Als vorteilhaft zeigt sich die Bestimmung der Korngrößenverteilung mit fotooptischen Verfahren. Sie ermöglichen eine problemlose Messung von unregelmäßigen bzw. rauen Körnern und liefern neben der Korngrößenverteilung auch Aussagen zur Kornform der Partikel. Außerdem sind die Formeln zur Berechnung der optimalen Kornverteilung auch im Mehlkornbereich ohne Einschränkungen anwendbar.

5. Literatur

[1] ÖNORM B 4710-1: Beton Teil1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis (Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206-1 für Normal- und Schwerbeton. 2007 ON Österreichisches Normungsinstitut

[2] Fuller, W.B; Thomson, S.: The laws of proportioning concrete. American Society of Civil Engineers 33 (1907) S. 223-298

[3] Dinger, D.R.: Particle Packing and Pore Size Distributions. Ceramic Processing E-zine. 1/9 (2003)

[4] Walker, W.J.: Persistence of Granular Structure during Compaction Processes. Kona 21 (2003) S. 133-142

[5] Macht, J; Nischer, P.: Mehlkornoptimierung – Notwendigkeit und Möglichkeiten zur Ermittlung der Korneigenschaften. BFT Heft 4 2006

[6] Weiche Betone für schwierige Einbaubedingungen, FFG Projekt 812871

Autoren:

DI Dr. Eva K. Fischböck
Univ.-Doz. DI Dr. Peter Nischer
Forschungsinstitut der VÖZ

www.zement.at

DIE HABEN DIE HÄRTE



EINFACH UNSCHLAGBAR –
DIE QUALITÄTSEMENTE
VON LAFARGE.

www.lafarge.at



LAFARGE
ZEMENT