

Korngröße und Kornform von Recyclingbaustoffen – schnelle und effektive Methode zur Beurteilung

1.0 Einleitung

Es ist bekannt, dass für bestimmte Einsatzgebiete, z.B. eine Verwertung als Trag- schichtmaterial im Straßenbau oder als Zuschlag für Beton oder ganz einfach als Sau- berkeitsschicht, bestimmte Korngrößenzusammensetzungen und auch bestimmte Korn- formen Bedingung sind.

Weiterhin ist bekannt, dass unterschiedliche Zerkleinerungsmaschinen unterschiedliche Kornformen der Zerkleinerungsprodukte liefern.

Deshalb ist es wichtig, die Korngrößen und ihre Verteilungen sowie die Kornformen zu messen und mit diskreten Zahlenwerten zu charakterisieren. Der Vortrag soll einen kur- zen Einblick geben über

- grundlegende Definitionen von Korngröße und Kornform,
- bisher übliche und standardisierte Messmethoden von Korngröße und Kornform,
- neue und effektive Messmethoden insbesondere für grobdisperse Schüttgüter.

Abschließend wird versucht, anhand von Versuchsergebnissen einen Ausblick zu ge- ben.

2.0 Korngröße und Kornform – Definitionen

Korngröße

Unter einer Korngröße versteht man **eine** geometrische Abmessung eines beliebig ge- formten Teilchens, die

- für kolloiddisperse Teilchen im Größenbereich von 1nm bis etwa 1 μm und
- für feindisperse Teilchen zwischen 1 μm und etwa 100 μm liegen,
- für grobdisperse Teilchen bzw. grobkörnige Schüttgüter von 100 μm bis in den cm – Bereich reichen.

Um welche Teilchenabmessung es sich dabei handelt, hängt von der Messmethode ab, d.h. welches physikalische Teilchen- oder Partikelmerkmal zur Korngrößenmessung genutzt wird.

Der Zusammenhang zwischen dem Partikelmerkmal, beispielsweise der Lichtstreuung am Teilchen oder der Sinkgeschwindigkeit der Teilchen im zähen Medium, und der Par- tikelgröße selbst, kann in der Regel nur am kugelförmigen Teilchen theoretisch gelöst werden. Das bedeutet, der vom realen Teilchen gewonnene Messeffekt wird immer mit dem einer Kugel verglichen, die den gleichen Messeffekt erzeugt hätte. Die Korngröße des Teilchens wird dann als äquivalenter Durchmesser entsprechend dieser Ver- gleichskugel festgelegt. Diese Festlegung erklärt den Sachverhalt, dass unterschiedli- che Messmethoden für unregelmäßig geformte Teilchen unterschiedliche Messergeb- nisse liefern. Je weiter die Kornform von der Kugel bzw. einer kubischen Form ab- weicht, desto größer können diese Unterschiede sein. Nur bei kugelförmigen Teilchen

mit dem Durchmesser d sollte das Messergebnis unabhängig von der eingesetzten Messmethode sein. In Tabelle 1 sind die Korngrößendefinitionen für übliche Korngrößenmessverfahren zusammengefasst.

Tabelle1: Übliche Korngrößenmessmethoden mit Korngrößendefinitionen und Mengenarten

| Messmethode und üblicher Messbereich | Partikelmerkmal | Definition der Korngröße | Messsignal und Mengenart |
|--|--------------------------------------|---|--|
| Siebanalyse 0,1 ... 125 mm | Geometrie, Größenvergleich | lichte Maschenweite eines Prüfsiebes, durch die das Korn gerade noch durchgeht | Wägung, Masse |
| Sedimentationsanalyse 0,1 ... 300 μm | Sinkgeschwindigkeit | Durchmesser einer hydraulisch glatten Kugel mit gleicher Sinkgeschwindigkeit in einem zähen Medium wie das Korn | Extinktionsmessung von Licht- oder Röntgenstrahlen, Berechnung der Masse |
| Laserbeugungsanalyse 0,4 ... 3000 μm | Beugungswinkel am Teilchen | Durchmesser einer Kugel mit gleichem Beugungswinkel wie das Teilchen | Lichtintensität auf den Beugungsringen - Volumenanteile |
| Fotooptische Partikelanalyse 0,02 ... 150 μm | Fotooptische Abbildung des Teilchens | Bildauswertung: Durchmesser des flächengleichen Kreises wie das Schattenbild | Anzahl der Teilchen in den Größenklassen, Volumenberechnung über den Äquivalentdurchmesser |

Korngrößenverteilung

Reale Schüttgüter bestehen aus Teilchen unterschiedlicher Größe, die jeweils in unterschiedlicher Menge vorhanden sind. Solche Verteilungen können sehr eng sein, beispielsweise bei Fällungsprodukten wie REA-Gips oder Mikrosilica, aber auch über mehrere Zehnerpotenzen der Größe gehen wie bei Zerkleinerungs- oder Mischprodukten beispielsweise Trockenmörtel.

Zur Ermittlung der Korngrößenverteilung ist demzufolge die Bestimmung der Menge der Teilchen einer bestimmten Größe bzw. Größenklasse erforderlich. Als Mengenarten werden in der Korngrößenmesstechnik Anzahl, Volumen und Masse genutzt, so dass auch hierbei wieder messmethodenspezifische Unterschiede durch die mitunter erforderliche Umrechnung von Mengenarten auftreten können. Eine Umrechnung von Anzahl- auf Volumenverteilung erfolgt dabei auf der Basis des äquivalenten Kugelvolumens, die von Volumen- in Masseanteile über die Dichte der Teilchen. Das ist grundsätzlich nur dann möglich, wenn alle Teilchen die gleiche Dichte haben. Tabelle 1 enthält die für die jeweiligen Korngrößenmessverfahren zur Mengenbestimmung genutzten Messsignale und die daraus berechnete Mengenart.

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass ein unregelmäßig geformtes Teilchen durch viele verschiedene Abmessungen charakterisiert werden müsste, als Korngröße aber nur eine einzige dieser Abmessungen angegeben werden kann. Deshalb bestimmt die eingesetzte Messmethode und das damit verbundene Partikelmerkmal die sich ergebende Korngröße und ihre Menge.

Kornform und Kornformverteilung

Für die Beurteilung der Kornform gibt es nach Stieß [] eine Vielzahl von Versuchen, um eine Maßzahl für die Kornform festzulegen. Die meisten existierenden Definitionen lassen sich dabei auf ein Verhältnis zweier Teilchenabmessungen, die unabhängig voneinander an einem Teilchen ermittelt werden, zurückführen.

Für feindisperse Schüttgüter sind die Formfaktoren wie der Heywoodfaktor und die Sphärizität nach Wadell eingeführt. Die Sphärizität nach Wadell stellt dabei das Verhältnis von Oberfläche einer volumengleichen Kugel zur tatsächlichen Oberfläche (≤ 1) dar und der Heywoodfaktor das Verhältnis aus der gemessenen spezifischen Oberfläche und der spezifischen Oberfläche einer Kugel mit einem Äquivalentdurchmesser. Ist dieser Äquivalentdurchmesser gleich dem der volumengleichen Kugel, dann ergibt sich für den Heywoodfaktor der Kehrwert der Sphärizität. DIN 66141 definiert unter diesem Gesichtspunkt den Kornformfaktor ϕ als reziproken Wert der Sphärizität nach Wadell, der für die Kugel 1 und für alle unregelmäßig geformten Teilchen > 1 ist. Diese Kornformkennzahlen ergeben für ein bestimmtes Schüttgut grundsätzlich eine integrale Größe.

Im grobdispersen Größenbereich wird die Kornformbeurteilung auf die Grunddefinition - Verhältnis von Länge zu Breite der Teilchen - und der dazugehörigen Mengenanteile zurückgeführt. Tabelle 2 gibt die üblichen Bezeichnungen für die verschiedenen Kornformen in Abhängigkeit vom Länge / Breite – Verhältnis an.

Tabelle 2: Kornformbezeichnungen

| Bezeichnung | Kornform |
|---|--|
| Korn | Festkörper mit einem Schlankheitsgrad Länge/Breite < 3 |
| Span, stängeliges Korn oder unförmiges Korn | Schlankheitsgrad $L/B > 3$ und stabil unter Eigenlast |
| Faden | $L/B > 3$, unter Eigenlast nicht stabil |

Diese Beurteilung setzt voraus, dass die einzelnen Teilchen so groß sind, dass man sie einzeln vermessen kann, sie also als räumliche Körper beurteilt oder dass eine Abbildung des Teilchens, d.h. eine Schattenprojektion, vermessen wird. Bei der Vermessung der realen Teilchen wird das Verhältnis von größter zu kleinster Abmessung bestimmt. Zur Charakterisierung der Kornform hat sich ein sinnvolles L/B –Verhältnis von 3 eingeführt. Die Mengenanteile der Körner $L/B > 3$ werden als Anzahl oder Masse bestimmt. Als Kornformkennzahl wird das Verhältnis der Masse der nicht – kubischen Körner $L/B > 3$ zur Gesamtmasse aller Körner definiert. Wegen des sehr großen Messaufwandes ist eine Einteilung in weitere Kornformklassen nicht vertretbar. Außerdem ist eine numerische Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit, d.h. ob das Korn beispielsweise sehr kantig, kantig, kanten-gerundet, fast gerundet, gerundet oder gut gerundet ist, nicht möglich.

Analoge Aussagen erhält man über die Definition der Plattigkeitskennzahl, die mit Stabsieben ermittelt wird und ebenfalls das Verhältnis Länge/Breite des Teilchens widerspiegelt.

Mit der fotografischen Erstellung von Schattenprojektionen der Teilchen mittels hochauflösender und schneller digitaler Fotografie, die in den letzten Jahren in der Korngrö-

ßen- und Kornformmesstechnik ein breites Anwendungsgebiet gefunden hat und deren elektronische Auswertung sind wesentlich mehr Informationen verfügbar. Die Teilchen werden dabei zweidimensional betrachtet. Eine ausreichende Anzahl der Teilchen und die Erstellung der Schattenprojektionen aus verschiedenen Richtungen (durch Rotation der Teilchen) ermöglichen statistisch sichere Aussagen und liefern auf der Basis der Bildauswertung numerische Beurteilungskriterien für die Kornform und die Oberflächenbeschaffenheit der Teilchen. Weiterhin sind i.d.R. eine Einteilung in Kornformklassen und eine Auszählung der Teilchen in der jeweiligen Formklasse sowie eine Zuordnung der Kornformparameter zur Korngrößenklasse möglich. Derzeit sind Kornformverteilungen für Korngrößen von 0,02 bis maximal etwa 150 mm messbar.

Bild 1 erklärt die Korngrößen- und Kornformdefinitionen, die für die Auswertung der Schattenprojektionen auf elektronischem Wege üblich sind.

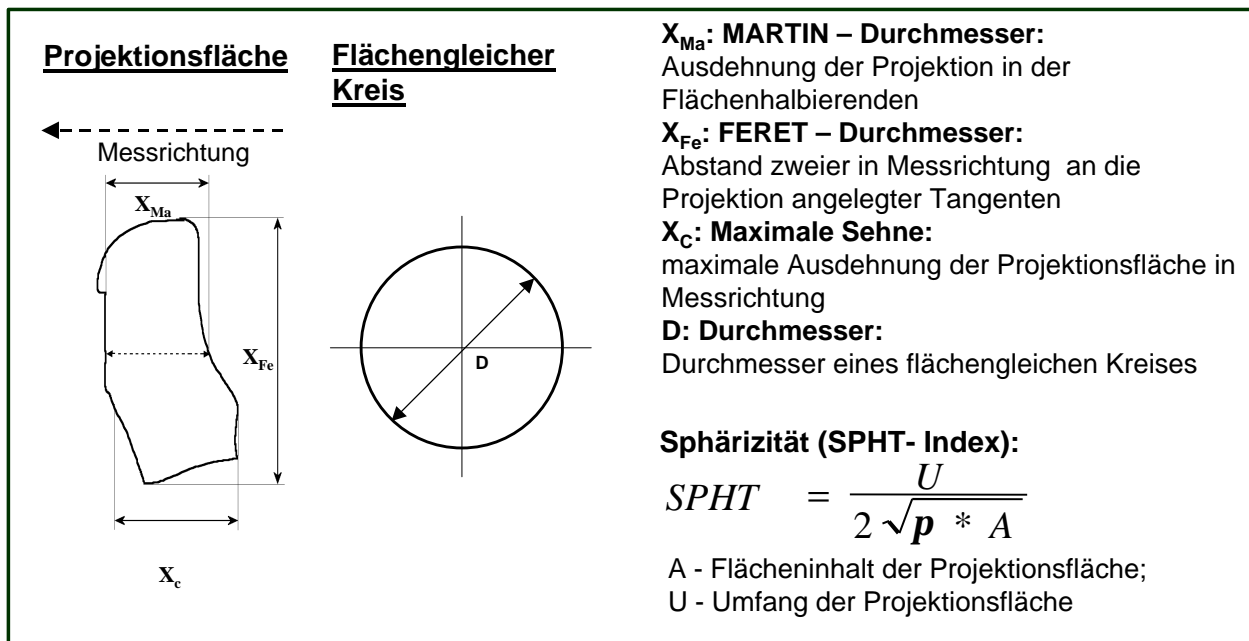


Bild 1: Sehnenlängen am Teilchen und Kornformparameter SPHT

Die Definition der Sphärizität SPHT stellt die Übertragung des Kornformfaktors ϕ auf die Projektionsfläche dar und berechnet sich aus dem Verhältnis von gemessenem Umfang des Teilchens und dem Umfang des flächengleichen Kreises. Der Wert ist ebenfalls ≥ 1 . Einige Messgerätehersteller arbeiten mit dem Kehrwert dieser Sphärizität SPHT.

3.0 Standardisierte Messmethoden von Korngröße und Kornform grobdisperser Schüttgüter

Korngrößenanalyse für grobdisperse Schüttgüter

Eine der ältesten und heute immer noch aktuellen Korngrößenmessmethode ist die Siebanalyse. Das Grundprinzip der Siebung bildet der ständige Größenvergleich der Teilchen mit den Sieböffnungen. Die Korngröße wird deshalb definiert als die lichte Maschenweite eines Siebes durch die das Teilchen gerade noch durchpasst (Tabelle 1). Die Klasseneinteilung erfolgt durch die Wahl der Siebe entsprechender Öffnungs- bzw. Maschenweiten in Abhängigkeit von der Verteilungsbreite des Materials. Die Sieböffnungsweiten sind nach dezimalgeometrischen Reihen (R40, R20, R10 oder R5) genormt. Die Menge der Teilchen, die sich zwischen zwei Sieben unterschiedlicher Ma-

schenweiten befindet, d.h. die durch das größere durchgefallen und auf dem feineren liegen geblieben ist, wird durch Wägung gemessen. Der wiederholte Größenvergleich und damit der Kontakt der Teilchen mit den Sieböffnungen wird durch eine geeignete Bewegung des Siebes erzeugt. Siebmaschinen führen in der Regel eine dreidimensionale Bewegung aus. Die Siebung erfolgt von grob nach fein im Siebturm so lange, bis die Mengen auf den jeweiligen Sieben konstant bleiben. Die Siebdauer hängt u.a. von der Korngröße, der Verteilung und der Feuchtigkeit des Siebgutes ab und ist für die unterschiedlichen Anwendungen in den entsprechenden Normen festgelegt. Die Auswertung erfolgt entweder manuell oder kann durch den Einsatz geeigneter Software in Kombination mit dem direkten Einlesen der Messdaten von der Waage zum Computer rationalisiert werden. Die Siebanalyse konnte trotz der rasanten Entwicklung der optischen Methoden zur Korngrößenanalyse bis heute ihren wichtigen Platz als Korngrößenmessmethode grobdispenser Schüttgüter behaupten [2]. In Tabelle 3 sind die wichtigsten Vor- und Nachteile der Siebmethode zusammengestellt.

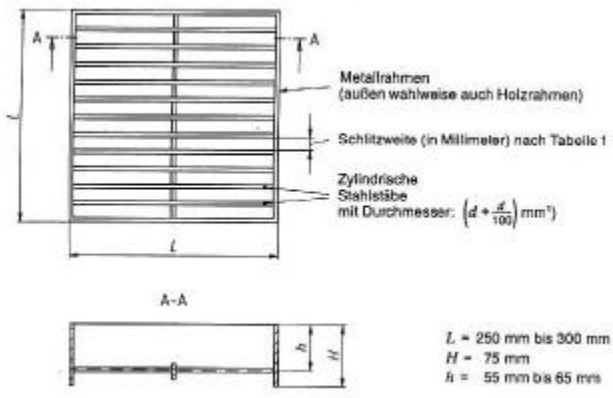
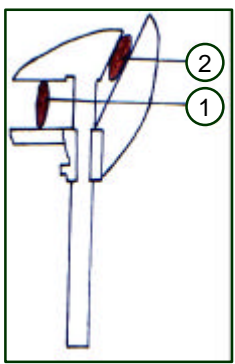
Tabelle 3: Vor- und Nachteile der Siebanalyse

| Vorteile | Nachteile |
|---|---|
| Kostengünstige apparative Ausstattung, geringe Investitions- und Wartungskosten | |
| Robuster Aufbau | |
| Eindeutige Zuordnung der Partikelgröße zur Maschenweite der verwendeten Siebe | Subjektive Fehler bei unvollständiger Siebung, dann Siebmaschenweite ? Trennkorngröße und damit Partikelgröße |
| Einfache Ermittlung der Masseanteile | |
| Einfache Bedienung | Hoher Zeit- und Arbeitsaufwand |
| Etabliertes, für die meisten Anwendungen standardisiertes Messverfahren | Niedriges Auflösungsvermögen (geringe Anzahl von Kornklassen) |
| Trocken- und Nasssiebung | |
| Fraktionierung des Siebgutes | Begrenzte Probenmenge |
| Referenzen vorhanden, Eigenschaftsfunktionen bekannt | Keine Aussage zur Kornform – manuelle Kornformanalyse nötig |

Manuelle Kornformanalyse

Als Methoden zur Kornformbestimmung sind die Ermittlung der Plattigkeitskennzahl nach DIN EN 933-3 und die Ermittlung der Kornformkennzahl nach DIN EN 933-4 genormt. Beide Methoden sind sehr zeitintensiv insbesondere die Ermittlung der Kornformkennzahl mittels Kornformmessschieber. Beide Kennzahlen stellen ein Verhältnis der Massen der nicht – kubischen Körner ($D/d > 2$ für die Plattigkeitskennzahl und $L/B > 3$ für die Kornformkennzahl) zu der Gesamtmasse dar (Tabelle 4).

Tabelle 4: Manuelle Kornformanalysemethoden

| | Stabsieb nach DIN EN 933-3 | | Messschieber nach DIN EN 933-4 | |
|---------------------------------------|--|-----------------------------------|---|--|
| Schematischer Aufbau |  | |  <p>Minimum: 100 Körner / Klasse</p> | |
| Schlitzweite des Stabsiebes | Kornklasse d_i/D_i mm | Schlitzweite des Stabsiebes mm | Überkorngröße D mm | |
| Masse der Messproben für Messschieber | 63/80 | 40 ± 0,3 | 63 | |
| | 50/63 | 31,5 ± 0,3 | 32 | |
| | 40/50 | 25 ± 0,2 | 16 | |
| | 31,5/40 | 20 ± 0,2 | 8 | |
| | 25/31,5 | 16 ± 0,2 | ANMERKUNG 1: für andere Überkorngrößen D kann die entsprechende Messprobenmasse aus den in der Tabelle angegebenen Werten interpoliert werde. ANMERKUNG 2: bei Dichten < 2 Mg/m ³ oder > 3 Mg/m ³ muss die Messprobenmasse mit Hilfe der Dichteverhältnisse korrigiert werden. | |
| | 20/25 | 12,5 ± 0,2 | | |
| | 16/20 | 10 ± 0,1 | | |
| | 12,5/16 | 8 ± 0,1 | | |
| | 10/12,5 | 6,3 ± 0,1 | | |
| | 8/10 | 5 ± 0,1 | | |
| | 6,3/8 | 4 ± 0,1 | | |
| | 5/6,3 | 3,15 ± 0,1 | | |
| | 4/5 | 2,5 ± 0,1 | | |
| Überkorngröße D mm | | | Masse der Messproben (Minimum) kg | |
| | | | 45 | |
| | | | 6 | |
| | | | 1 | |
| | | | 0,1 | |
| Kennzahlen | Plattigkeitskennzahl FI | | Kornformkennzahl SI | |
| Definitionen | $FI = (M_2/M_1) \cdot 100$ M_1 = Summe der Massen der Kornklassen d_i/D_i in Gramm M_2 = Summe der Massen der Kornklassen, die durch die entsprechenden Stabsiebe mit den Schlitzweiten $D_i/2$ hindurchgehen in Gramm | | $SI = (M_2/M_1) \cdot 100$ M_1 = die Masse der Messprobe in Gramm M_2 = die Massen der nicht-kubischen Körner ($L/B > 3$) in Gramm | |

4.0 Neue und effektive Messmethoden von Korngröße und Kornform grobdispenser Schüttgüter

Der Zwang möglichst wirtschaftlich mit hohen Anforderungen an die Qualitätssicherung (DIN ISO 9000) zu produzieren, gab der Weiterentwicklung bestehender und der Entwicklung neuer Messverfahren die entscheidenden Impulse und führte letztendlich auch zur Einführung der fotooptischen computerunterstützten Analysemethoden [2]. Eine Marktübersicht über fotooptische Partikelgrößenmessgeräte gibt Tabelle 5.

Tabelle 5: Marktübersicht fotooptische Partikelgrößenmessgeräte [3] - Auswahl

| Gerät | Anbieter | Kameratyp | Messbereich |
|----------------|---|-----------------|--|
| HAYER CPA 4 | HAYER & BOECKER Drahtweberei und Maschinenfabrik, Oelde, BRD | Zeilenkamera | 2 Messbereiche: 0,063...15 mm 0,25...100 mm |
| CAMSIZER | Retsch GmbH & Co.KG, Haan, BRD | Matrixkamera | 0,03 bis 30 mm |
| Optisizer PSDA | Micromeritics GmbH, Mönchengladbach, BRD | Matrixkamera | > 0,045 mm |
| PartAn | Hydro Production Partner, Norwegen | Matrixkamera | < 115 mm |
| RapidVue | Beckman Coulter GmbH, Krefeld, BRD | Matrixkamera | 0,02 bis 2,5 mm |
| Sysmex FPIA | Malvern Instruments Ltd. | Matrixkamera | 0.7µm bis 160µm |
| VDG 40 | Laboratoire Central de Ponts et Chaussées (LCPC), Paris, Frankreich | | 0,5 mm bis 50 mm |
| WipShape | WipWare Inc. CANADA | | Bestimmung des Längen-Breiten - Verhältnisses an Zuschlägen für Asphaltbeton |
| UI-AIA | University of Illinois, Labor-Prototyp | 3 Matrixkameras | Körngrößenverteilungen; Kornformparameter Kornvolumina, Kornoberflächen und -verteilungen, |
| Solid Sizer™ | Canty Process Technologie Chaussées Dublin, Ireland | | |

Die kommerziell vertriebenen Geräte verfügen über jeweils eine CCD - Kamera und besitzen im Wesentlichen den in Bild 2 dargestellten Aufbau. Dabei kann sowohl eine Matrixkamera als auch eine Zeilenkamera zum Einsatz kommen. Als Ergebnis bieten alle Messgeräte Korngrößenverteilungen sowie Kornformparameter bzw. -verteilungen an.

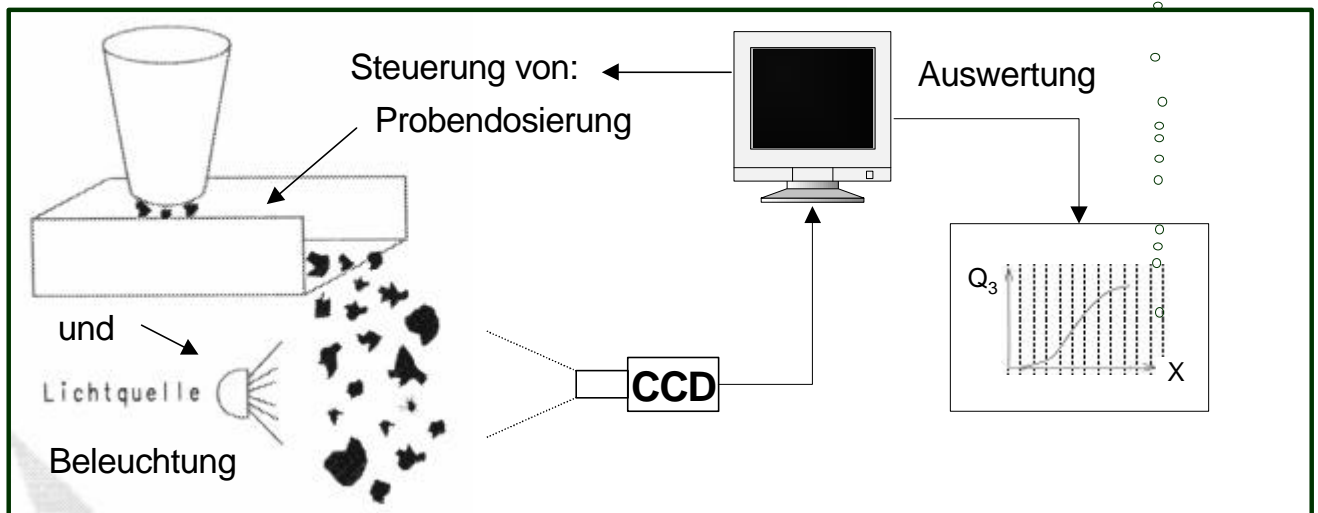


Bild 2: Schematischer Aufbau eines bildverarbeitenden Korngrößenanalysengerätes [3]

Das **Messgerät HAVER CPA 4** ist modular aufgebaut und verfügt über 2 Messbereiche (Tabelle 5) mit je einer Dosiereinrichtung in unterschiedlichem Abstand von der Kamera, d.h. 2 Fokusebenen der Kamera und damit 2 Abbildungsverhältnissen:

- Messbereich 1 – 0,063 bis 15 mm und
- Messbereich 2 – 0,25 bis 100 mm.

Die Probe wird über eine computergesteuerte Vibrationsrinne in die Fallebene gefördert, von wo sich die Teilchen im freien Fall durch die Messebene der CCD - Zeilenkamera bewegen. Im Gegenlicht (halogengespeiste Leuchtzeile) werden sie zeilenweise abgescannt und die Messdaten in 250 internen Größenklassen ausgewertet. Pro Sekunde finden 10.000 Messungen statt. Der Messgutdurchsatz wird automatisch vom System gesteuert und beträgt in Abhängigkeit von der Korngröße ca. 20 bis 10.000 g / min [4]. Je nach dem Ziel der Messung kann zwischen 2 Messmodi gewählt werden:

- Korngrößenmodus – kontinuierliche Erfassung von Anzahl und Längen der Sehnen und anschließende Transformation ohne Bildrekonstruktion in eine Korngrößenverteilung – keine Aussage über die Kornform möglich;
- Kornformmodus – zusätzliche Registrierung der Sehnenadressen, daraus Rekonstruktion der Bilder und deren Auswertung nach geometrischen Merkmalen, woraus sowohl die Korngrößen- als auch die Kornformverteilung ermittelt werden kann. Als Menge wird die Anzahl der Teilchen in den Kornklassen bestimmt und über den Äquivalentdurchmesser die Volumenverteilung berechnet.

Da die Korngrößenverteilungen in Abhängigkeit von der Kornform von denen einer Siebanalyse abweichen können, bietet die Auswertesoftware die Möglichkeit einer Anpassung der Messergebnisse der CPA – Analyse an die Siebanalyse an (MTX-Automatik).

5.0 Anwendungsbeispiele

Unterschiedliche Zerkleinerungsprinzipien

Unterschiedliche Zerkleinerungsprinzipien basieren auf unterschiedlichen Beanspruchungen des Materials beim Zerkleinern. Im Backenbrecher wird das Material beispielsweise vorwiegend durch Druck und im Prallbrecher durch Schlag und Prall beansprucht. Diese Beanspruchungen führen nicht nur zu unterschiedlichen Korngrößenverteilungen der Zerkleinerungsprodukte, sondern bewirken auch unterschiedliche Kornformen.

Als ausgewähltes Beispiel wurde Mauerwerkbruch mit einem Backenbrecher und einem Prallbrecher zerkleinert. Die Maschineneinstellungen wurden so gewählt, dass die Zerkleinerungsprodukte etwa gleiche maximale Korngröße besitzen.

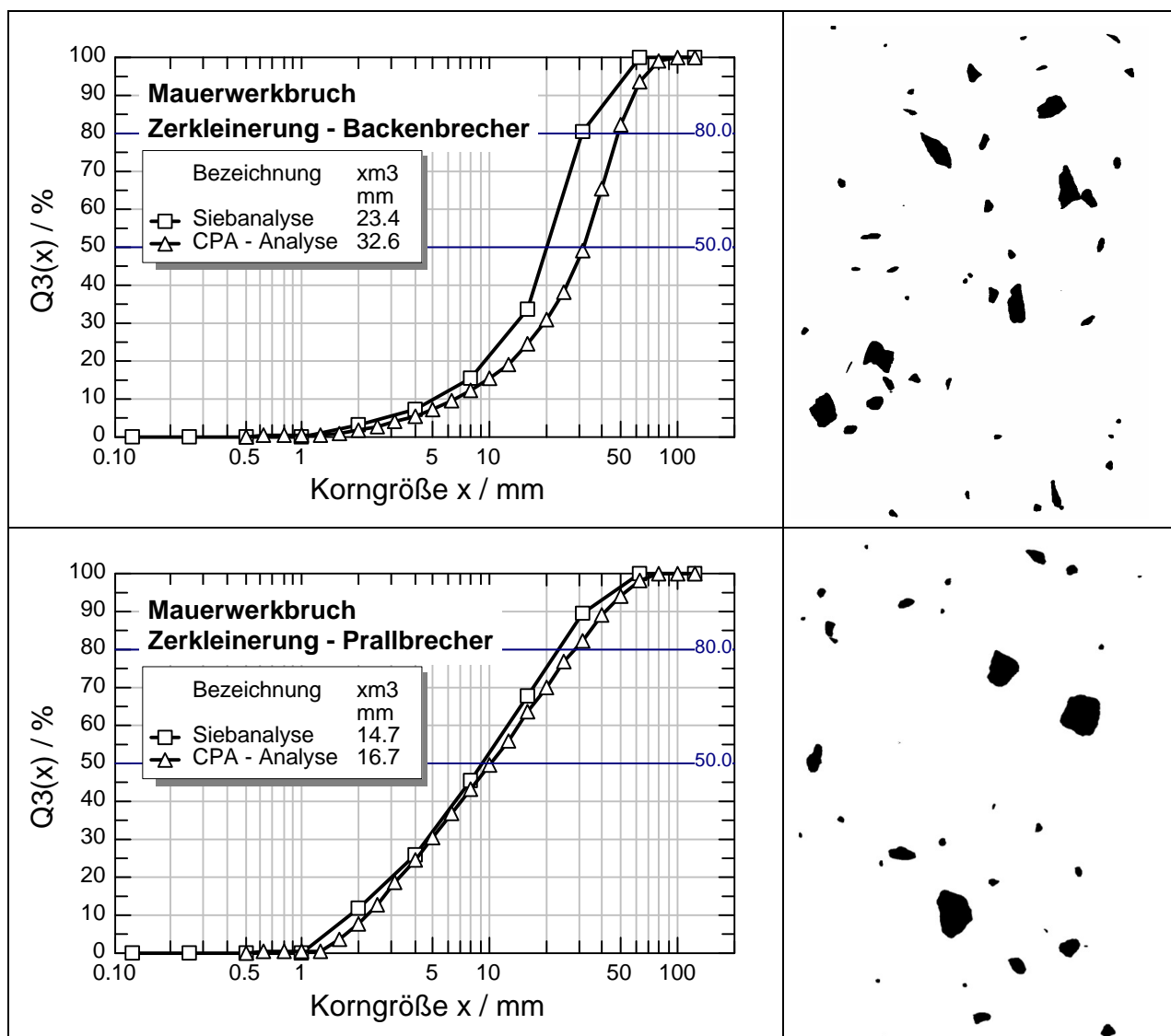


Bild 3: Ergebnisse der Sieb- und CPA-Analyse und Kornformen der Zerkleinerungsprodukte aus Backen- und Prallbrecher

Die Korngrößenverteilungen wurden vergleichsweise mittels Siebanalyse und fotooptischer Partikelanalyse mit HAVER CPA 4 für das Material > 1 mm ermittelt. Die Anteile < 1mm liegen bei etwa 5 % wurden vernachlässigt. Mit dem CPA – Gerät wurde der Kornform-Modus genutzt, wodurch sowohl die Korngrößenverteilung als auch die Kornformverteilung analysiert werden konnte. Bild 3 zeigt die Ergebnisse von Sieb- und CPA-Analyse und die für die jeweilige Zerkleinerungsart charakteristische Kornform der Teilchen.

Der Ergebnisvergleich von Sieb- und CPA- Analyse zeigt, dass die Differenzen bei Körnern mit mehr kubischer Kornform, wie sie beim Prallbrecher entstehen, deutlich geringer sind als bei splittriger bis plattiger Kornform aus dem Backenbrecher.

Die unterschiedlichen Korngrößenverteilungen als Resultat der Beanspruchungsart sind in Bild 4 gegenübergestellt. Bei etwa gleicher Kornbandbreite entsteht im Backenbrecher eine Korngrößenverteilung mit hohem Grob- und geringem Feinanteil. Beim Prallbrecher sind die Korngrößen gleichmäßig über das gesamte Kornband verteilt.

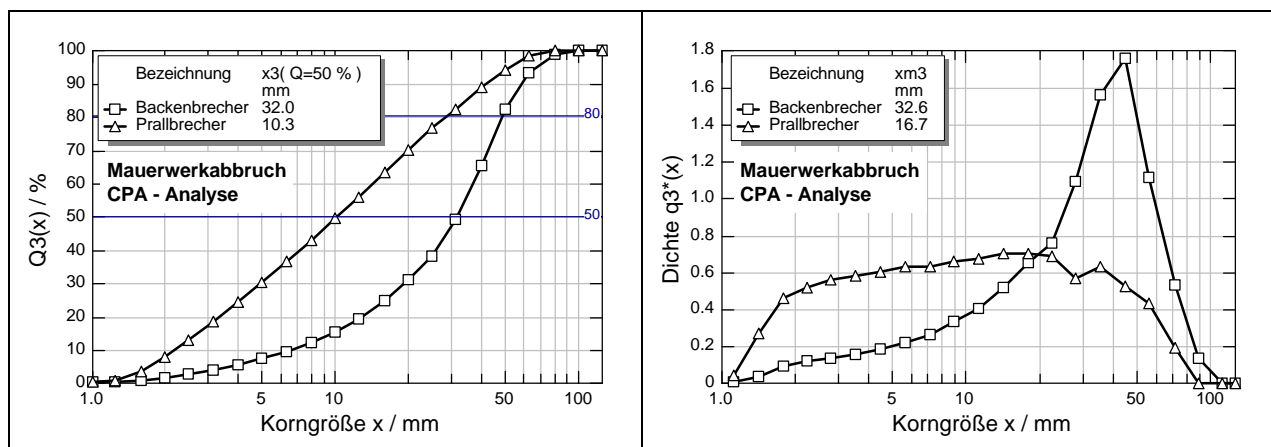


Bild 4: Korngrößenverteilungen der Zerkleinerungsprodukte von Backen- und Prallbrecher

Die Quantifizierung der Kornform zeigt die Auswertung der CPA – Kornformanalyse in Bild 5 als Kornformverteilung und den jeweiligen mittleren Kornformparametern.

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Prallbrecher mehr kubisch geformte Körner erzeugt. Das äußert sich sowohl in der mittleren Sphärizität mit einem Wert von 1,353 gegenüber dem Backenbrecher mit 1,512 als auch in dem Länge/Breite –Verhältnis von 1,086 gegenüber 1,113. Die Klammerwerte in den Grafiken bedeuten die Kehrwerte der Sphärizität. Um eine Interpretation der Zahlenwerte der Sphärizität und des Länge/Breite – Verhältnisses zu erleichtern, sind in Tabelle 6 die Werte für bekannte regelmäßige Flächen zusammengestellt. Aus dieser Zusammenstellung ist auch abzulesen, dass die Sphärizität als Kornformkennzahl sowohl ein Maß für die grundsätzliche Körperform sowie die Oberflächenbeschaffenheit der Partikel ist. Kreis und 20-Eck unterscheiden sich augenscheinlich in ihrer Form nicht, die Werte für die Sphärizität sind jedoch nicht gleich. Das bedeutet, geringe Änderungen in der Oberflächenbeschaffenheit sind mit der Sphärizität SPHT quantifizierbar (vgl. Porenbetongranulate).

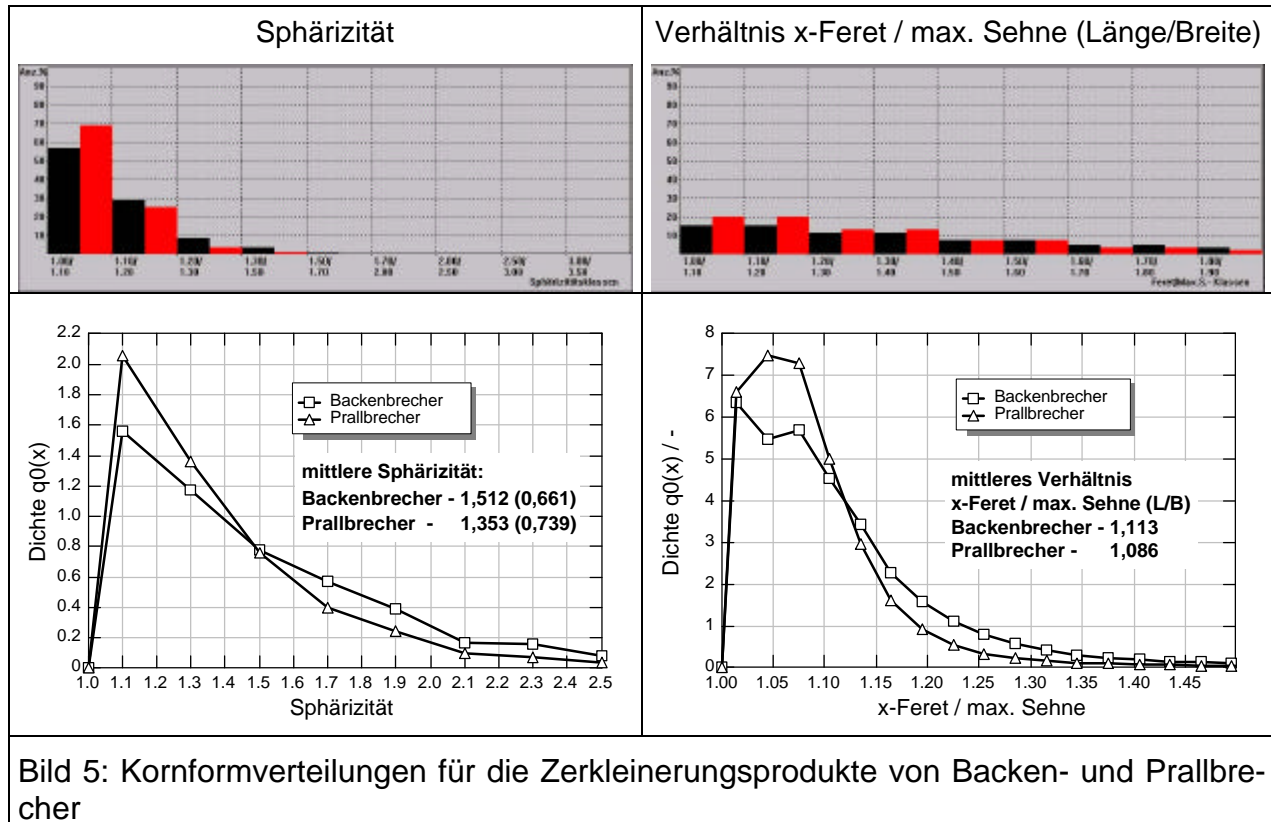













Bild 5: Kornformverteilungen für die Zerkleinerungsprodukte von Backen- und Prallbrecher

Tabelle 6: Sphärizitätswerte und Verhältnisse der größten zur kleinsten Abmessung für regelmäßige Flächen

| Fläche | | Sphärizität $SPHT = U/2 \cdot \sqrt{p \cdot A}$ | Länge/Breite |
|------------------------|---|--|--------------|
| Kreis |  | 1,000 | 1,0 |
| 20 – Eck, gleichseitig |  | 1,004 | 1,0 |
| Sechseck, gleichseitig |  | 1,050 | 1,155 |
| Ellipse 2:1 |  | 1,091 | 2,0 |
| Quadrat |  | 1,128 | 1,414 |
| Ellipse 2,5:1 |  | 1,175 | 2,5 |
| Rechteck a:b = 2:1 |  | 1,197 | 2,236 |
| Ellipse 3:1 |  | 1,260 | 3,0 |
| Dreieck, gleichseitig |  | 1,286 | 2,472 |
| Rechteck a:b = 3:1 |  | 1,303 | 3,162 |
| Ellipse 4:1 |  | 1,391 | 4,0 |
| Rechteck a:b = 4:1 | | 1,410 | 4,123 |

Neben der Kornformverteilung können aber auch Aussagen über die Form der Körner in den Korngrößenklassen gemacht werden. Bild 6 zeigt den Zusammenhang zwischen Kornform und Korngröße für das ausgewählte Beispiel.

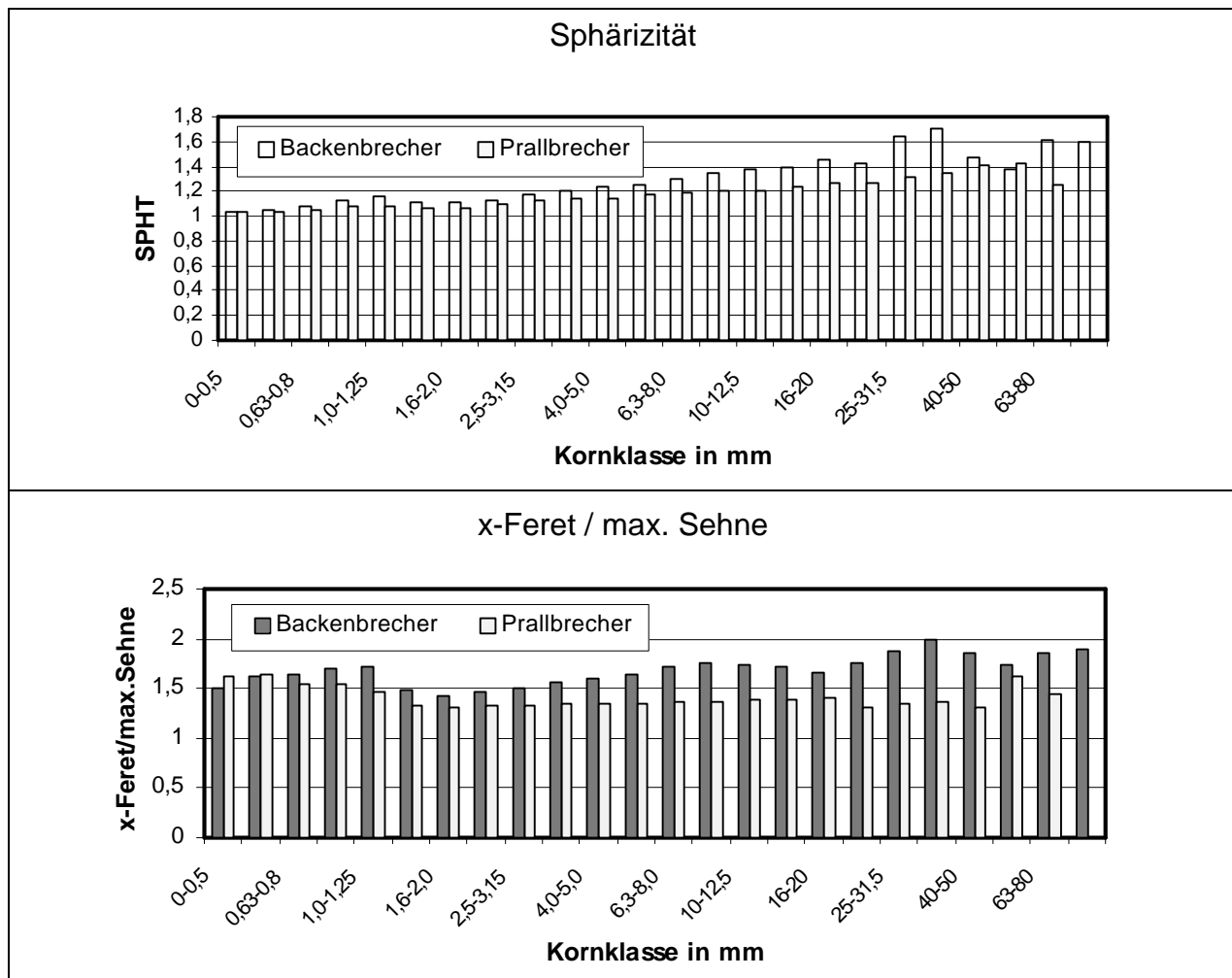


Bild 6: Zusammenhang zwischen Kornform und Korngröße

Die Sphärizitätswerte nehmen für beide Zerkleinerungsprinzipien in Richtung größerer Körner zu. Das Länge/Breite – Verhältnis hingegen steigt nur beim Backenbrecher bei größeren Korngrößen. Die Körner sind deutlich scharfkantiger und plattiger. Beim Prallbrecher nimmt das Länge/Breite - Verhältnis zu größeren Korngrößen zuerst ab und bleibt dann etwa gleich.

Herstellung von Zierkies aus den Grobfractionen von aufbereitetem Mauerwerkbruch

Auf der Suche nach Verwertungsmöglichkeiten für die Grobfractionen (Fractionen > 8 mm) von zerkleinertem Mauerwerkbruch entstand die Idee der Herstellung von Zierkies für eine Nutzung als Dränageschüttung, Sauberkeitsschicht und als Zierkies für die Gartengestaltung. Die Anforderungen bestehen hier in der Frostbeständigkeit und in dem ästhetisch schönen Aussehen.

Die Umsetzung dieser Idee wird erzielt durch eine Behandlung des zerkleinerten Abbruchmaterials in rotierenden Trommeln ohne Mahlkörper [5]. Der Rundungsvorgang geht zwangsläufig mit der Entstehung von Abrieb einher. Für eine technologische Lö-

sung muss deshalb nach einer Variante gesucht werden, bei der mit möglichst geringem Energieverbrauch und einem sinnvollen Kompromiss zwischen Abriebmenge und einer gerundeten Kornform ein Zierkies hergestellt werden kann. Bei den durchgeführten Untersuchungen mit unterschiedlichen technologischen Konzepten konnte der Rundungsvorgang mit Hilfe der Kornformanalyse mit dem CPA-Gerät kontrolliert und quantifiziert werden.

Der Mauerwerkbruch wurde mittels Prallbrecher vorzerkleinert, um bereits eine bessere Kornform für den Rundungsvorgang zu bekommen. Es wurden 2 Versuchsserien mit unterschiedlichen Technologien und unterschiedlichen Materialchargen durchgeführt. Bei Technologie 1 wurde das gesamte Kornband des zerkleinerten Mauerwerkbruchs in der Technikums - Mühle gerundet und anschließend klassiert. Bei Technologie 2 wurde das Material nach der Grobzerkleinerung erst klassiert und anschließend fraktionsweise in der Mühle beansprucht.

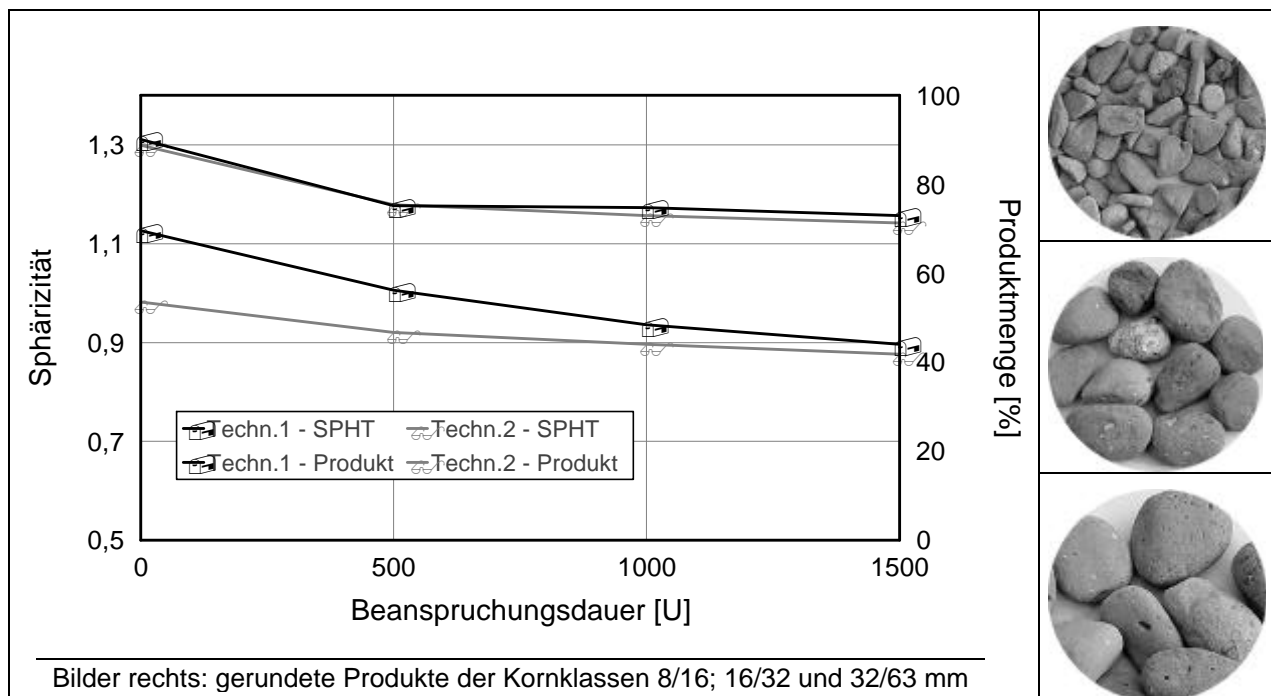


Bild 7: Einfluss der Beanspruchungsdauer auf die Kornformänderung der Kornklasse 16/32 mm und der Gesamtproduktmenge (> 8 mm), [5,6]

Die Ergebnisse der Technikumsuntersuchungen sind in Bild 7 zusammenfassend dargestellt. Unter Produktmenge ist hier die Gesamtmasse > 8 mm zu verstehen. Die Unterschiede in den Anfangswerten sind auf die unterschiedlichen Materialeigenschaften der verarbeiteten Chargen des Mauerwerkbruchs zurückzuführen. Die Sphärizität ist in Bild 7 für die Kornklasse 16/32 mm dargestellt. Das Bild zeigt deutlich, dass mit der Abrundung der Körner erwartungsgemäß der Abrieb zu- und die Produktmenge abnimmt. Nach 1000 U verändern sich bei weiterer Beanspruchung sowohl die Sphärizität sowie der Abrieb nur noch geringfügig, so dass nach 1500 U nicht mehr mit einer deutlichen Verbesserung der Kornform zu rechnen ist. Trotz der unterschiedlichen Technologien und Materialchargen sind nach dieser Beanspruchungsdauer von ca. 45 min (1500 U) gleiche Produktmengen und gleiche Kornformen erreicht worden. Für die Kornklassen 8/16 und 32/63 mm ergaben sich gleiche Tendenzen. Vergleicht man die erreichten Sphärizitätswerte mit denen definierter Flächen (Tabelle 6), so wurden durch den Rundungsvorgang Werte von Ellipsen mit $D:d = 2,5:1$ erzeugt, was in den rechts in Bild 7

dargestellten Abbildungen gut zu erkennen ist. Die Gesamtmenge an gerundetem Zierkies, d.h. die Menge > 8 mm, bewegt sich nach dieser Zeit in der Größenordnung von 40 % des gesamten Mauerwerkbruchs.

Granulate aus recyceltem Porenbeton und Mauerwerkbruch

Eine Möglichkeit der Verwertung des Feinanteils von zerkleinertem Mauerwerkbruch stellt die Herstellung von Granulaten dar [7].

In Variante 1 wurden aus einer Mischung aus Ziegelmehl, Porenbetonmehl, SiC als Blähmittel und Wasser durch Aufbaugranulierung mittels Granulierteller Granulate hergestellt, die dann in einem Ofen gebrannt wurden. Zur Beurteilung des Bläherfolges beim Brennen bietet sich die CPA - Analyse als ideale Methode für die Messung von Korngröße und Kornform sowohl der Grün- als auch der Blähgranulate an. Bei einer Siebanalyse werden die Grüngranulate wegen ihrer geringen Stabilität durch die abrasive Beanspruchung zerstört. Bild 8 zeigt die Kornvergrößerung der Granulate vor und nach dem Brennen. Die mittlere Korngröße steigt von 4,87 mm der Grüngranulate auf 7,28 mm der gebrannten Blähgranulate an [7].

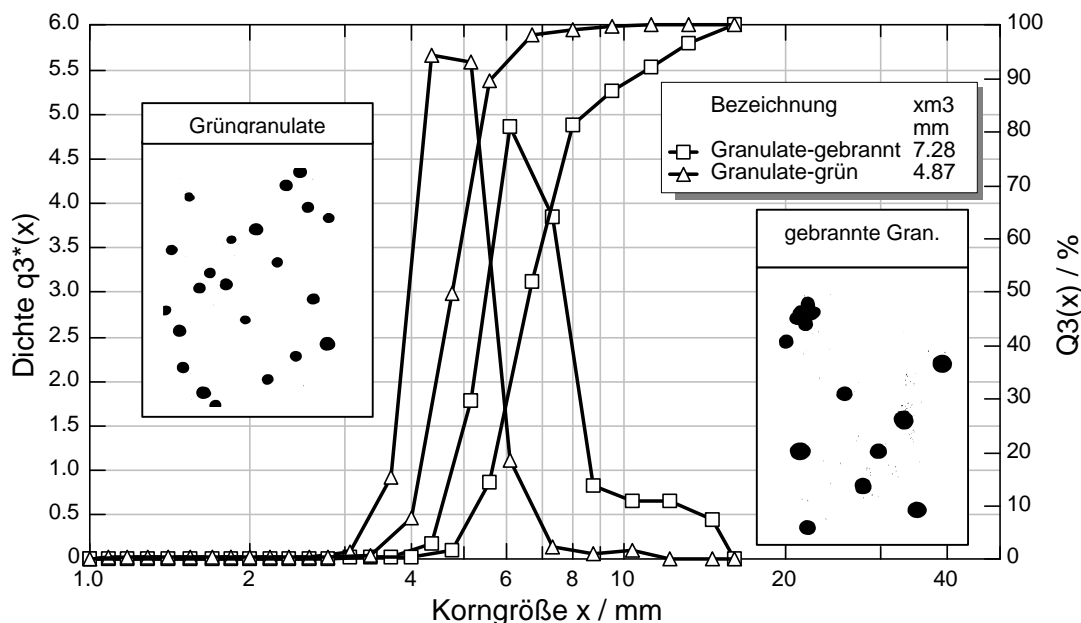


Bild 8: Veränderung der Korngröße durch das Brennen der Grüngranulate

In Variante 2 wurde zur Erreichung einer geringen Rohdichte der herzustellenden Granulate zerkleinerter Porenbeton mit Ziegelmehl umhüllt und anschließend gebrannt. Durch das Coaten des Porenbetonsplitts mit dem Ziegelmehl verändert sich die Oberflächenbeschaffenheit. Mit Hilfe der CPA-Analyse und der Auswertung der Sphärizität und des Verhältnisses x-Feret zur maximalen Sehne lassen sich solche Veränderungen (vgl. Tabelle 6) messen und quantifizieren (Bild 9).

Die Grafiken in Bild 9 bestätigen, dass durch das Coaten die Kornform mit gleichbleibenden Länge/Breite – Werten von 1,345 und 1,344 erhalten bleibt, die Oberflächenbeschaffenheit sich aber deutlich verbessert. Die mittlere Sphärizität verändert sich von 1,355 auf 1,107, was auch in den Kornabbildungen zu erkennen ist [7].

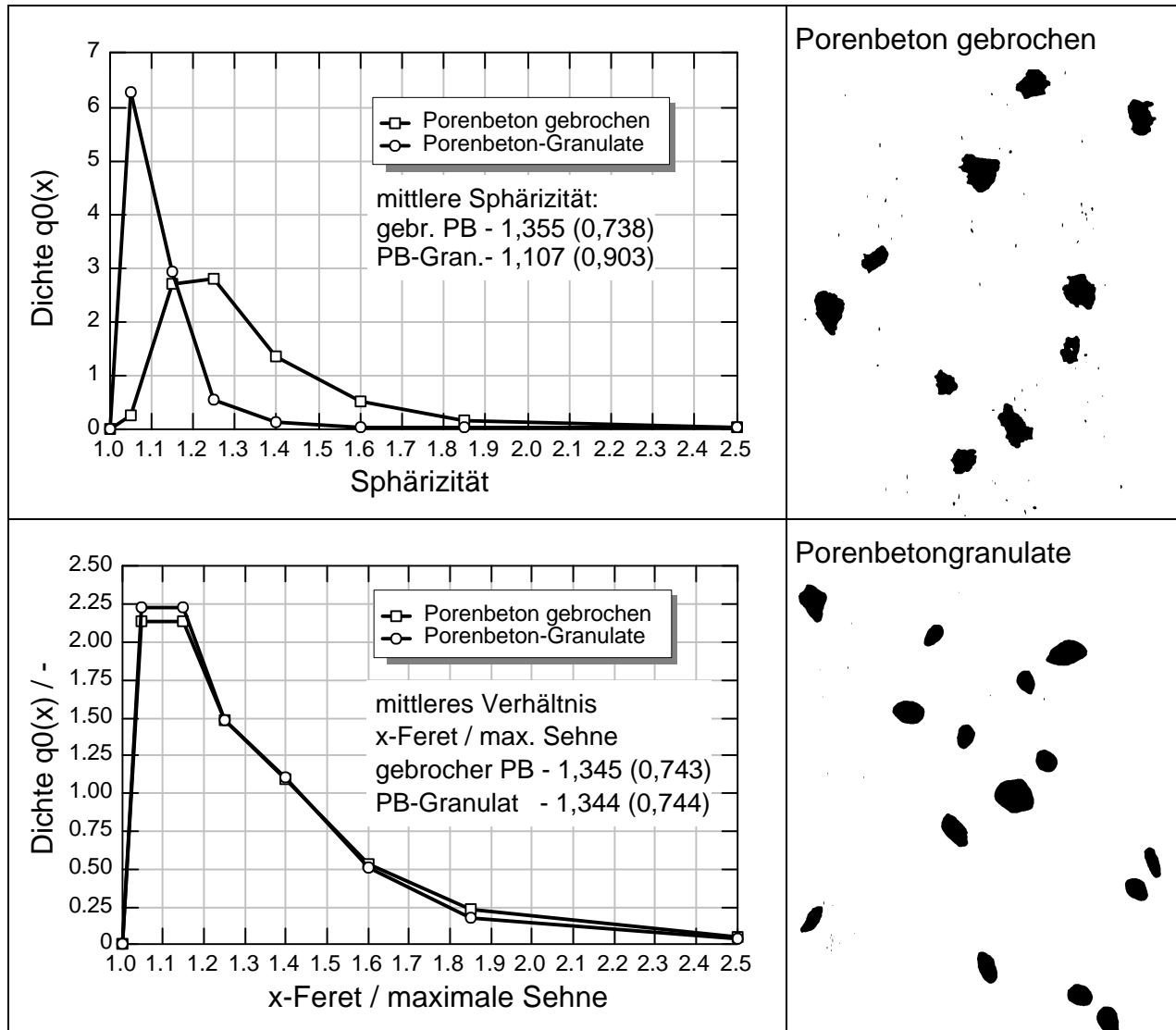


Bild 9: Charakterisierung der Oberflächenbeschaffenheit von Porenbetonsplitt und -granulaten

In Tabelle 7 sind abschließend die Vor- und Nachteile der fotooptischen Partikelanalyse aus der derzeitigen Sicht zusammengestellt.

Tabelle 7: Vor- und Nachteile der fotooptischen Partikelanalyse am Beispiel CPA 4

| Vorteile | Nachteile |
|---|---|
| Kurze Messdauer, hohe Auswertegeschwindigkeit | |
| Hohe Auflösung (große Anzahl von Kornklassen) | |
| Wenig manuelle Arbeit | |
| Unempfindlich und störungssicher | |
| Parallele Korngrößen- und Kornformanalyse | |
| Angabe verschiedener Parameter, Beurteilung von Korngröße, Kornform und Oberflächenbeschaffenheit möglich | Analyse nur für frei fließende, nicht agglomerierende Schüttgüter |

Als besondere Vorteile sind neben der kurzen Analysedauer, der hohen Auswertegeschwindigkeit und dem hohen Informationsgewinn über Korngrößen und Kornform gegenüber der klassischen Siebanalyse die nach oben unbegrenzt messbare Probemenge, die mögliche Automatisierung und damit die Onlinefähigkeit dieser Messmethode hervorzuheben.

6.0 Zusammenfassung

Die Zusammenhänge zwischen Korngrößen- und Kornformmessergebnissen und den eingesetzten Messmethoden wurde anhand grundlegender Definitionen erläutert. Für grobdisperse Schüttgüter, wie sie heute im Recycling noch hauptsächlich eingesetzt werden, wurden standardisierte und neue Messmethoden vorgestellt. Die Möglichkeiten der neuen fotooptischen Methoden wurden an 3 Beispielen aus dem Recycling aufgezeigt. So können mit Hilfe dieser Analysenmethode Unterschiede in Korngröße und Kornform von Zerkleinerungsprodukten, die beispielsweise mit Backenbrecher und Prallbrecher erhalten wurden, sehr gut charakterisiert werden. Am Beispiel von Granulaten, die im Grünzustand eine geringe Kornstabilität besitzen, konnte gezeigt werden, dass die Korngrößenanalyse mit dem CPA- Gerät möglich ist. Die Quantifizierung der Oberflächenbeschaffenheit wurde an Porenbetonsplitt, der mit Ziegelmehl umhüllt wird, deutlich gemacht.

Die Grafiken zur Korngrößen- und Kornformbewertung wurden mit der Software PMP-compact der Firma GRAINsoft GmbH in Freiberg erstellt.

7.0 Literatur

- [1] Stieß, M.: Mechanische Verfahrenstechnik 1, Springer-Verlag 1992
- [2] Fischer, M.: Analysensiebung, RHEWUM Siebfibel eine Übersicht über das Sieben, Ausgabe 1995 RHEWUM GmbH Remscheid
- [3] Reinhold, M.: Messung von Korngröße und Kornform grob- und feindisperser Schüttgüter; Vortrag, Erster Weimarer Granulometrikursus mit Vorträgen und Praktika; Korngröße und Kornform, 15. und 16. Oktober 2002
- [4] HAVER-CPA-4 Photooptisches ONLINE - Partikelanalysegerät Firmenprospekt HAVER & BOECKER Drahtweberei und Maschinenfabrik Oelde
- [5] Stark, U.; Müller, A.: Korngrößenspezifische Verwertung von Mauerwerksabbruch; Schüttgut 8 (2002) 1, S. 19-23
- [6] Harrland, Th.: Selektive Zerkleinerung von Mauerwerksabbruch mit Kornformbeeinflussung – Herstellung von Zierkies, Studienarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Professur ABW, 2002
- [7] Reinhold, M.; Müller, A.: The measurement of important granulometric characteristics on the basis of photo-optical image analysis systems; Vortrag; International Congress Challenges of concrete construction, Dundee, Scotland, 5-11. September 2002