

April 2018
90. Jahrgang
CITAH 90 (4)
405-572 (2018)
ISSN 0009-286 X

www.CIT-journal.com

Chemie Ingenieur Technik

CIT
90
Jahre

Verfahrenstechnik • Technische Chemie • Apparatewesen • Biotechnologie

4 | 2018

Themenheft:
Partikeltechnologie

Gastherausgeber:
Ulrich Teipel
Michael Türk

Herausgeber:
DECHEMA
GDCh
VDI-GVC

WILEY-VCH

S3 und S3 Plus
Bettersizer



Partikelgrößen-
& Partikelform-
analyse

Quantachrome
Your partner in
particle characterization

D 2048

Exakte Partikelgrößen- und Formanalyse in einem Messgerät: Kombination statischer Lichtstreuung und dynamischer Bildanalyse

Frederik Schleife*, Dietmar Klank und Christian Oetzel

DOI: 10.1002/cite.201870413

Bei der Bestimmung der Partikelgrößenverteilung wird häufig Laserbeugung eingesetzt. Neben den vielen Vorteilen dieser Methode, wie kurze Messdauer und breiter Messbereich, gibt es jedoch auch Schwächen. So zeigen sich besonders bei sehr breiten Verteilungen signifikante, statistische Ungenauigkeiten. Mit dem Bettersizer S3 Plus konnte erstmals gleichzeitig die Partikelgrößenverteilung von Nanometer-, Mikrometer- und Millimeterpartikeln exakt bestimmt und Einzelteilcheninformationen über das Überkorn und Agglomerationsphänomene gewonnen werden. Die Vorteile der Kombination von statischer Lichtstreuung mit dynamischer Bildanalyse werden anhand eines Beispiels demonstriert.

Schlagwörter: Dynamische Bildanalyse, Partikelform, Partikelgrößenverteilung, Statische Lichtstreuung

Exact Particle Size and Shape Analysis in One Instrument: Combination of Static Light Scattering and Dynamic Image Analysis

Laser diffraction is often used for determination of the particle size distribution. However, besides many advantages of this method, such as short measurement time and wide measurement range, there are also shortcomings. Significant statistical inaccuracies are particularly evident in very broad distributions. For the first time, the particle size distribution of nanometer, micrometer and millimeter particles could be exactly determined with the Bettersizer S3 Plus and individual particle information on the oversize grain and agglomeration phenomena could be obtained. The advantages of combining static light scattering with dynamic image analysis are demonstrated.

Keywords: Dynamic image analysis, Particle size distribution, Particle shape, Static light scattering

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Die Laserbeugung bzw. statische Lichtstreuung ist eine sehr wichtige und in vielen Branchen verbreitete Methode zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung. Die Anwendungen reichen von der Charakterisierung pharmazeutischer Wirkstoffe über kosmetische Produkte, Farben, Tinten bis zu Polymeren, Metallen, Baustoffen und keramischen Materialien. Die Gründe für diesen Erfolg sind vielfältig: kurze Messdauer, hohe Reproduzierbarkeit, breiter Messbereich und gute Automatisierbarkeit sind einige wesentliche Vorzüge dieses Verfahrens. Darüber hinaus besteht, bedingt durch die Messmethode selbst, eine hohe Flexibilität bezüglich der Aufgabeverfahren der Probe. Stoffe, die in Flüssigkeiten nur schwer zu verteilen sind, da sie sich zum Beispiel auflösen oder sich schlecht verteilen lassen, können mithilfe von Druckluft in Trockendispergiereinheiten gefördert und gemessen werden. Auch für Aerosole oder Probenkleinstmengen (wenige Milligramm) gibt es je nach Messgerät spezifische Lösungen.

Die breite Akzeptanz der Laserbeugung darf jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass die Methode, genau wie alle anderen auf dem Markt erhältlichen Partikelgrößenmessverfahren, auch Schwächen besitzt. Zunächst darf nicht vergessen werden, dass die statische Lichtstreuung ein optisches Fitverfahren ist. Das durch die Wechselwirkung des Laserlichtes mit den zu charakterisierenden Teilchen detektierte Streuspektrum wird auf Basis einer Theorie (Mie oder Fraunhofer) angepasst und daraus die Partikelgrößenverteilung berechnet. Hierbei wird von kugelförmigen, isolierten Partikeln ausgegangen. Weichen die Partikel in ihrer Form von der idealen Kugel ab oder liegen als Agglomerate vor, so wird dies in der Auswertung nicht berücksichtigt bzw. liefert die Methode keinerlei Aussage darüber.

Frederik Schleife, Dietmar Klank, Christian Oetzel
frederik.schleife@quantachrome.de
Quantachrome GmbH & Co. KG, Rudolf-Diesel-Straße 12, 85235
Odelzhausen, Deutschland.

Ferner zeigen sich insbesondere bei sehr breiten Verteilungen signifikante, statistische Ungenauigkeiten. Oft werden zum Beispiel im Grobbereich Anteile gar nicht oder sehr ungenau gefunden, da die anzahlmäßig wesentlich häufiger vorkommenden mittelgroßen und kleinen Partikel statistisch dominieren. Auch stellt die Tatsache, dass grobe Partikel (insbesondere größer $100\ \mu\text{m}$) ausschließlich in Vorwärtsrichtung streuen, gerätetechnisch eine große Herausforderung dar, insbesondere dann, wenn gleichzeitig sehr kleine Teilchen exakt gemessen werden sollen.

Um diese Problematik im oberen Partikelgrößenmessbereich zu lösen, bietet sich die Kombination der statischen Lichtstreuung mit dynamischer Bildanalyse an. Die Bildanalyse liefert eine exakte Größenbestimmung mittlerer und grober Teilchen und erfasst darüber hinaus detaillierte Informationen über die Einzelteilchen des Partikelkollektives. So können Überkörner und Agglomerate direkt mit der dynamischen Bildanalyse erfasst, visualisiert und ausgewertet werden. Durch die aufgenommenen Bilder lassen sich also nebenbei auch wesentliche Informationen über die Teilchenform gewinnen. Eine messtechnische Umsetzung dieser Methodenkombination ist jedoch eine Herausforderung, denn es bedarf einer präzisen optischen Bank, eines ultraschnellen und hochauflösenden Kamerasystems sowie einer sehr leistungsfähigen Software, um alle Informationen direkt online zu verarbeiten.

Der Bettersizer S3 Plus (Abb.1) bietet genau die oben beschriebenen Möglichkeiten. Erstmals ist es mit diesem Messgerät gelungen, exakt die Partikelgrößenverteilung von Nanometer-, Mikrometer- und Millimeterpartikeln zu bestimmen, Einzelteilcheninformationen über das sogenannte Überkorn und Agglomerationsphänomene zu gewinnen und zusätzlich wertvolle Informationen über die Partikelform zu erhalten.



Abbildung 1. Bettersizer S3 Plus.

2 Innovative Gerätetechnik: Der Bettersizer S3 Plus im Portrait

In Abb.2 ist die optische Einheit des Bettersizer S3 Plus gezeigt. Auf der Basisplattform befindet sich mittig die Nassmesszelle, direkt rechts und links der Zelle ist jeweils eine Fourierlinse platziert. Die Anordnung von zwei Fourierlinsen wird hierbei als Doppellinsentechnik bezeichnet. Rechts der Messzelle befindet sich, in einem Winkel angeordnet, die Laserlichtquelle (grüne Laserdiode, Wellen-

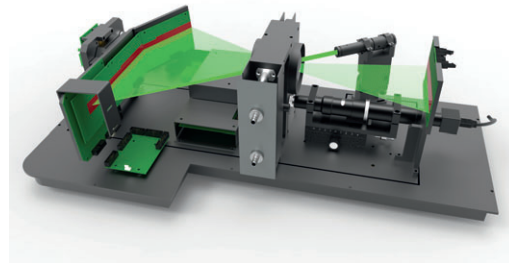


Abbildung 2. Aufbau des Bettersizer S3 Plus.

länge = $532\ \text{nm}$), senkrecht auf die Messzelle gerichtet das CCD-Kamerasystem (zwei Kameras, 0,5X und 10X) sowie die Rückstreudetektoren.

Links der Messzelle ist das Detektorsystem zur Erfassung von Vorwärts- und Seitwärts-Streuung installiert. Dieses besondere Setup ermöglicht

- 1) die exakte Messung sehr kleiner Teilchen (ab $10\ \text{nm}$) durch die Doppellinsentechnik (statische Lichtstreuung, s. Abschn. 2.1),
- 2) gleichzeitig höchste Messpräzision bei sehr groben Teilchen (bis $3,5\ \text{mm}$) mithilfe der 0,5X-CCD-Kamera (statische Lichtstreuung kombiniert mit dynamischer Bildanalyse, Details s. Abschn. 2.2) und
- 3) Partikelformbestimmung, Überkornanalyse und Agglomerat-Check mit der 0,5X- und 10X-CCD-Kamera (dynamische Bildanalyse, s. Abschn. 2.3).

2.1 Statische Lichtstreuung mit der innovativen Doppellinsentechnik

Abb.3 zeigt das Funktionsschema des Bettersizer S3 Plus. Das Besondere an dieser lasertechnischen Anordnung ist die DLOIS-Technik (*dual lenses & oblique incidence optical system*).

Der Laser mit einer Wellenlänge von $532\ \text{nm}$ ist dabei schräg zur Messküvette angeordnet, um einen sehr breiten Streuwinkelbereich der seitlichen Frontdetektoren zu realisieren. Die Fourierlinse 2 erzeugt einen exakten Parallel-Laserstrahl, der auf die Probe trifft. Linse 1 fokussiert gemäß dem bekannten Fourieraufbau [1] das gestreute Licht in die Detektorebene, dadurch müssen die streuenden Teilchen in der Küvette nicht zwangsweise in einer Ebene liegen. Damit wird ein entscheidender Nachteil des herkömmlichen inversen Fourier-Aufbaus durch eine innovative Messanordnung kompensiert [1]. Linse 2 sorgt ihrerseits für eine Fokussierung und damit Erfassung der Rückstreuung ebenfalls über einen im Vergleich mit anderen auf dem Markt befindlichen Systemen sehr großen Winkelbereich ($0,02 - 165^\circ$) mit hervorragender Detektorauflösung. Insbesondere für die exakte Detektion sehr kleiner Teilchen (ca. kleiner $500\ \text{nm}$) ist eine gute Streulichtauflösung im Rückstreubereich ($> 90^\circ$) entscheidend (s. Abb. 4).

Durch die extrem breite Winkelabdeckung ergibt sich darüber hinaus der Vorteil, dass auf einen zweiten, kurz-

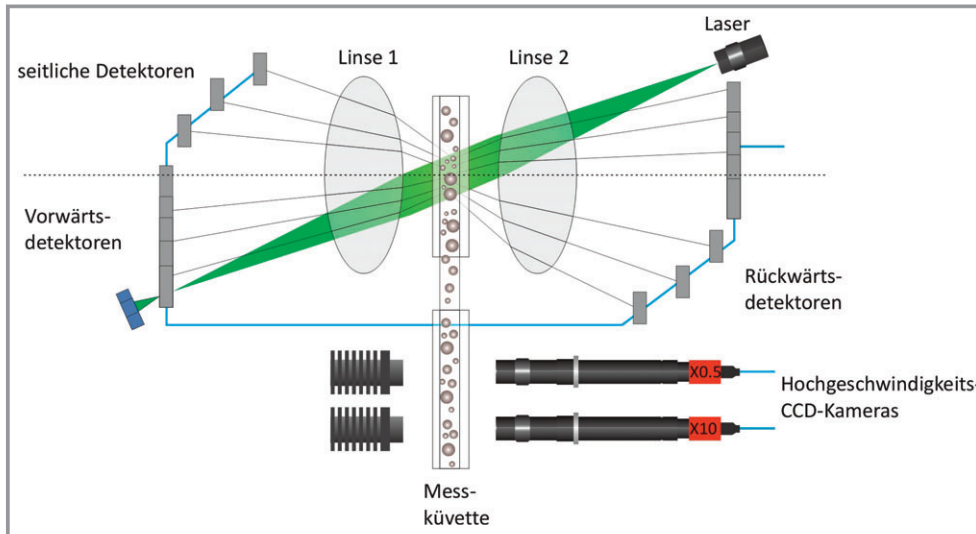


Abbildung 3. Schematische Darstellung der DLOIS-Technik im Bettersizer S3 Plus kombiniert mit der CCD-Kameratechnik (0.5X und 10X).

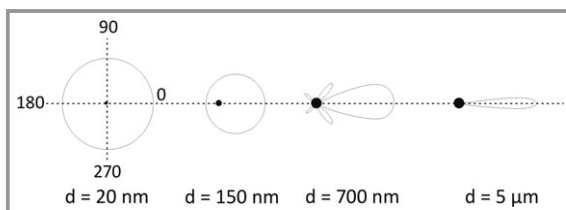


Abbildung 4. Streuung von Laserlicht ($\lambda = 633 \text{ nm}$) an unterschiedlich großen Teilchen (Polardiagramme).

welligeren Laser verzichtet werden kann und dementsprechend keine Streuspektren gemischter Wellenlängen gemessen werden, deren Auswertung mit den üblich verwendeten Modellen (Fraunhofer und Mie) streng genommen nicht zulässig ist.

2.2 Statische Lichtstreuung kombiniert mit dynamischer Bildanalyse

In der Einleitung wurde bereits die Problematik der genauen Detektion grober Partikel mit reiner statischer Lichtstreuung insbesondere in breit verteilten Partikelkollektiven beschrieben. Durch eine kombinierte Anwendung mit der geeigneten Kameratechnik lässt sich diese Schwäche beheben – es werden die jeweiligen Vorzüge beider Techniken miteinander kombiniert und die Schwächen kompensiert.

Beim Bettersizer S3 Plus wird für die kombinierte Messung die integrierte CCD-Kamera mit 0.5X-Vergrößerung verwendet (s. Abb. 3). Teilchen können hiermit ab etwa $30 \mu\text{m}$ in Echtzeit fotografiert und statistisch ausgewertet werden. Während einer Messung bewegen sich die zu messenden Partikel zunächst durch die Messzelle zur Aufnahme des Lichtstreuungsspektrums (DLOIS) und anschließend durch die Kameraküvette – die Datenerfassung der statischen Lichtstreuung und der dynamischen Bildanalyse erfolgt also

synchron (s. Abb. 3). Das Live-CCD-Kamerabild beziehungsweise die Kamerabilder beider CCD-Kameras, 0.5X und 10X, können darüber hinaus während der Messung online zugeschaltet werden, so dass der Anwender die Dispergierung und die Teilchenformen direkt beurteilen kann. Auf diese Weise lässt sich bewerten, ob es sich um kugelförmige oder andersförmige Partikel handelt, ob Agglomerate vorliegen oder ob gegebenenfalls Luftblasen in der Dispersion vorhanden sind (s. Abb. 5).

Die Zusammenführung der Ergebnisse aus statischer Lichtstreuung und dynamischer Bildanalyse zu einer Verteilungsfunktion erfolgt über eine intelligente, softwareintegrierte Routine durch Gewichtung auf Basis der Konzentrationsbestimmung beider Methoden.

Zusammengefasst ermöglicht diese kombinierte Verwendung von DLOIS-Technik und dynamischer Bildanalyse eine präzise Messung von breit verteilten Partikelsystemen von $0,01 - 3500 \mu\text{m}$ sowie eine visuelle Beurteilung der durchgeführten Analyse. In Abschn. 3 wird dieser entscheidende Vorteil in der Messgenauigkeit anhand eines Anwendungsbeispiels verdeutlicht.

2.3 Dynamische Bildanalyse zur Partikelformanalyse

Die beiden Hochgeschwindigkeits-CCD-Kameras des Bettersizer S3 Plus können entweder einzeln oder in Kombination für eine umfassende Partikelgrößen- und Partikelformanalyse (letztere auf der dynamischen Bildanalyse basierend) genutzt werden. Der geeignete Größenbereich ist:

- $30 - 3500 \mu\text{m}$ für die 0.5X-Kamera und
- $4 - 100 \mu\text{m}$ für die 10X-Kamera.

Beide Kameras besitzen eine Aufnahmegeschwindigkeit von ca. 10 000 Teilchen/Minute. Bei sehr breiten Partikelgrößenverteilungen bietet sich die kombinierte Verwendung beider Kameras an.

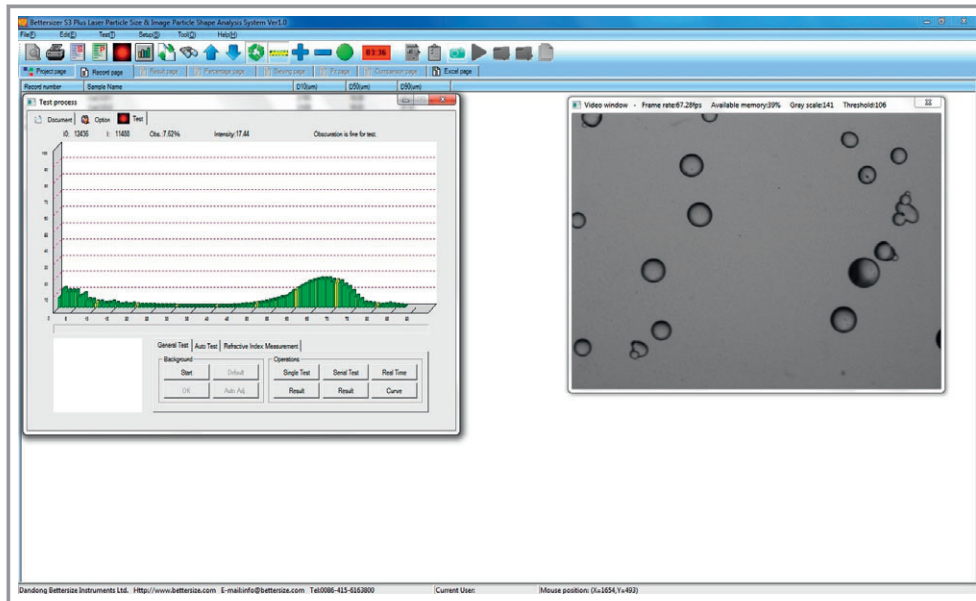


Abbildung 5. Bettersizer-Software mit Live-CCD-Kamerabild während einer Messung.

Bei der Analyse wird in Echtzeit jedes Einzelteilchen erfasst, als Bild gespeichert, nummeriert und statistisch ausgewertet. Neben verschiedenen Äquivalentdurchmessern (z. B. Fläche, Umfang, maximaler (L) und minimaler (D) Feret-Durchmesser etc.) werden spezielle Größenparameter wie Aspektverhältnis (Länge L /Breite D), Zirkularität (Rundheit) und der Umfang (Perimeter) berechnet.

Außer der optimierten Bestimmung der Partikelgrößenverteilung ermöglicht der Bettersizer S3 Plus darüber hinaus die Nutzung der Option, wesentliche Formparameter zur zusätzlichen Charakterisierung beziehungsweise Klassifizierung von Teilchen zu verwenden. Insbesondere bei stark formanisotropen Partikeln wie Fasern oder Plättchen ist dies ein klarer Vorteil gegenüber der klassischen, reinen Laserbeugung, die bei der Auswertung von kugelförmigen Teilchen ausgeht. Darüber hinaus lassen sich der Agglomerationsgrad der Partikelsysteme beurteilen und Sonderaufgaben wie Überkornanalyse realisieren. Die Bestimmung verschiedener Äquivalentdurchmesser eröffnet zudem die Möglichkeit, mit anderen Verfahren zur Korngrößenbestimmung wie Siebung gut vergleichen zu können und gegebenenfalls deren Messergebnisse zu verifizieren.

3 Anwendungsbeispiel: Vorzüge der kombinierten Messung mittels statischer Lichtstreuung und Bildanalyse

Um die Vorzüge der kombinierten Methoden von statischer Lichtstreuung mit der dynamischen Bildanalyse gegenüber der reinen statischen Lichtstreuung bei bestimmten Proben auf-

zuzeigen, wurden für diesen Versuch zwei unterschiedlich grobe Quarzsande in definierten Mischungen hergestellt und gemessen. Der gröbere Quarzsand wurde mithilfe eines 63- μm -Sieves gesiebt und nur der Grobanteil für das Experiment verwendet (Quarz grob). Mikroskopische Aufnahmen beider Pulver zeigt Abb. 6. Die Partikelgrößenverteilung der beiden Basiskomponenten (Quarz fein und Quarz grob) ist in Abb. 7 zu sehen. Die Verwendung der reinen statischen Lichtstreuung bzw. der kombinierten Messung ergaben bei diesen Messungen identische Verteilungen.

Ein paralleles Screening der Probe „Quarz grob“ mit dem CCD-Kamerasystem bestätigte die in Abb. 7 dargestellte Partikelgrößenverteilung. Tab. 1 führt die Basisdaten und Abbildungen der 20 größten Partikel in der Probe auf.

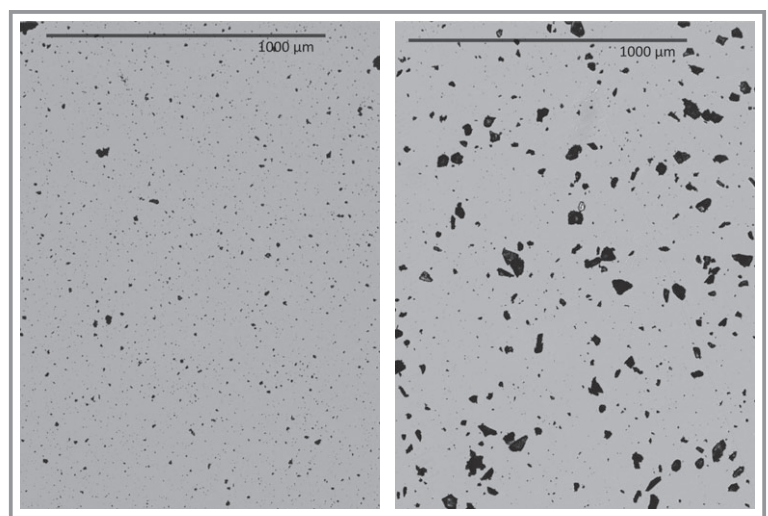






















Abbildung 6. Mikroskopische Aufnahmen der Pulver „Quarz fein“ und „Quarz grob“.

Tabelle 1. Basisdaten der größten 20 Einzelteilchen von „Quarz grob“, gemessen mit dem Bettersizer S3 Plus.

Nr.	Fläche [μm^2]	CE-Äquivalent- durchmesser [μm]	Feret max L [μm]	Feret min D [μm]	Zirkularität	Umfang [μm]	Bild
1	117 675	387	398,6	379,2	0,923	1362	
2	109 800	373,9	456,5	318,4	0,925	1314	
3	106 200	367,7	450	315	0,886	1348	
4	98 325	353,8	374,8	353,2	0,924	1244	
5	97 875	353	409,5	338,3	0,88	1303	
6	96 525	350,5	412,4	315,6	0,924	1232	
7	93 600	345,2	413,6	328,5	0,885	1267	
8	91 800	341,8	375	345	0,883	1258	
9	91 800	341,8	420	300	0,878	1265	
10	91 800	341,8	375	345	0,883	1258	
11	90 675	339,7	353,7	339,2	0,915	1206	
12	84 825	328,6	350	328,8	0,953	1121	
13	83 925	326,8	360	285	0,938	1132	
14	83 700	326,4	350	328,8	0,916	1157	
15	82 350	323,8	496,1	250,1	0,778	1351	
16	82 125	323,3	499,4	299,1	0,687	1529	
17	81 225	321,5	338,7	325,3	0,933	1120	
18	80 775	320,6	356	314,4	0,868	1200	
19	80 100	319,3	345	315	0,899	1154	
20	78 750	316,6	525	225	0,74	1391	

Dabei stimmt der Durchmesser-Wert (CE-Flächenäquivalentdurchmesser) relativ gut mit der in Abb. 7 zu sehenden Partikelgrößenobergrenze überein, insbesondere dann, wenn man berücksichtigt, dass auch die Quarzpartikel deutlich von der idealen Kugelform abweichen (ideal runde Kugel = Zirkularität 1).

Tab. 2 zeigt die Übersicht zu den im Rahmen des Experimentes untersuchten Proben sowie die wichtigsten Partikelgrößenangaben. Einen direkten Vergleich der Ergebnisse von reiner statischer Lichtstreuung mit der kombinierten Messung von statischer Lichtstreuung und dynamischer Bildanalyse zeigt Abb. 9 exemplarisch für die Mischung mit

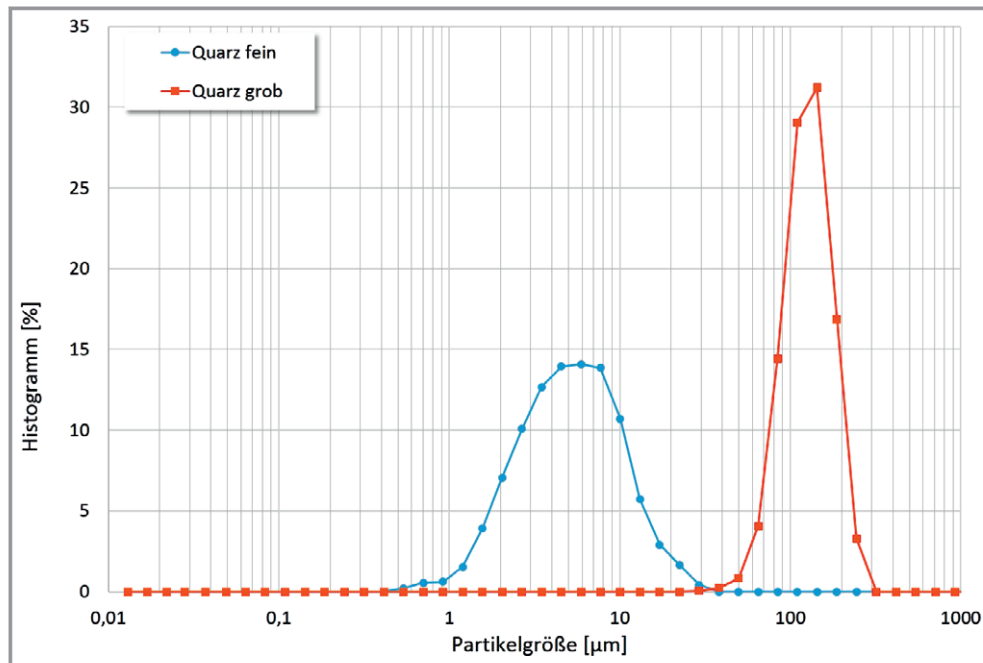


Abbildung 7. Partikelgrößenverteilung der Pulver „Quarz fein“ und „Quarz grob“, gemessen mit dem Bettersizer S3 Plus.

8 Gew.-% grobem Quarz. Bis zu diesem Grobanteil kann die statische Lichtstreuung in diesem Experiment keinerlei Partikel oberhalb von 60–70 µm nachweisen. Mithilfe der Kameratechnik wird der Peak des groben Quarzanteils dagegen problemlos detektiert (Kurve Kombi-Experiment in Abb. 9).

Die tatsächliche Leistungsfähigkeit der kameraunterstützten Lichtstreuung wird bei Betrachtung von Abb. 10 deutlich. Dargestellt ist hier im Durchmesserbereich 50–500 µm der Grobanteil der Mischungen mit 2, 6, 8, 15 und 20 Gew.-% Quarz grob. Bemerkenswert ist vor allem, dass bereits 2 Gew.-% Anteil grober Quarz überhaupt detektiert werden kann, da nicht nur der Gewichtsanteil der groben Quarzkörner deutlich geringer gegenüber dem kleinen Quarzanteil ist, sondern vor allem die Anzahl feiner Partikel die Anzahl der groben Partikel um ein Vielfaches übersteigt (Abb. 8). Obwohl im Beispiel bei

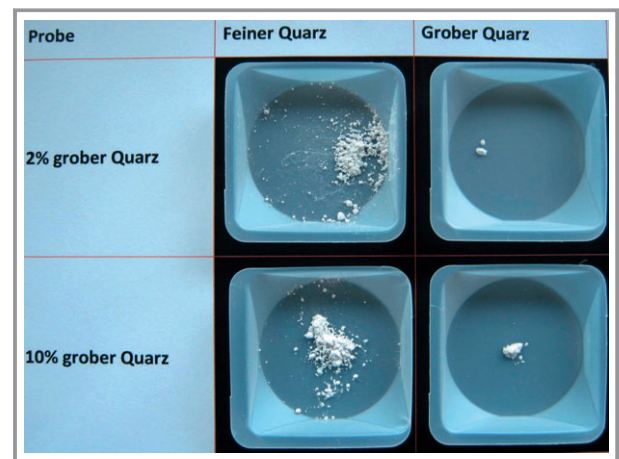


Abbildung 8. Mengenverhältnis der Proben „2 % grober Quarz“ und „10 % grober Quarz“.

Tabelle 2. Übersicht der wichtigsten Partikelgrößenangaben der untersuchten Proben.

Probe	D10 [µm]	D50 [µm]	D90 [µm]	D99 [µm]
Quarz fein	1,787	4,485	10,38	20,04
2 % grober Quarz	1,787	4,486	10,66	22,96
4 % grober Quarz	1,771	4,485	10,72	23,82
6 % grober Quarz	1,761	4,494	10,82	25,73
8 % grober Quarz	1,761	4,524	10,97	102,2
10 % grober Quarz	1,759	4,567	11,27	117,1
15 % grober Quarz	1,758	4,658	12,5	135,5
20 % grober Quarz	1,763	4,775	14,88	158,9
Quarz grob	73,03	111,2	163,3	209,9

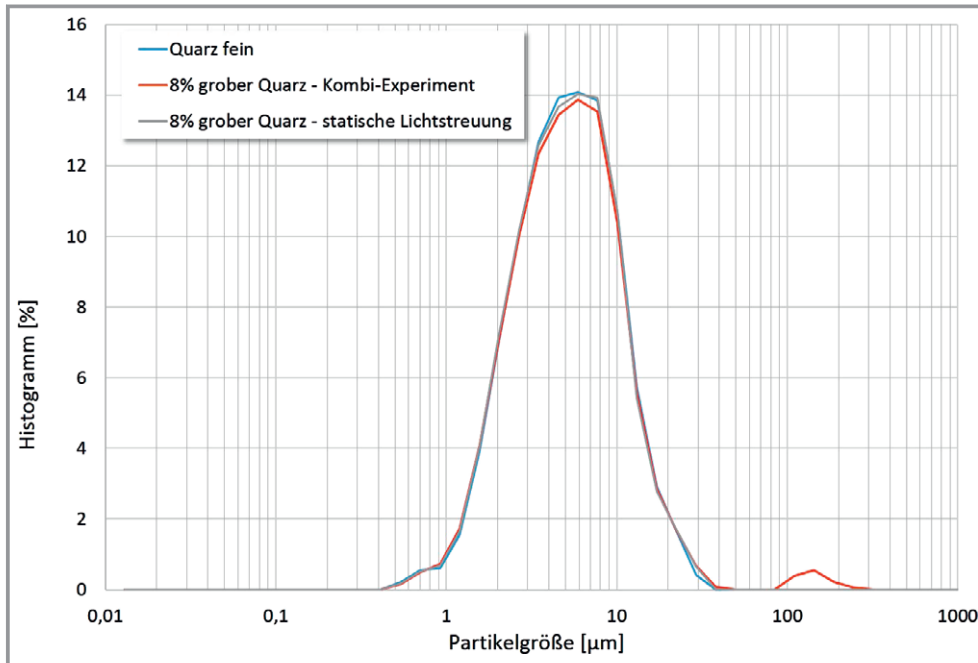


Abbildung 9. Partikelgrößenverteilung der Pulver „Quarz fein“ und „8 % grober Quarz“, gemessen einmal rein mit statischer Lichtstreuung, zum anderen unterstützt durch die CCD-Kamera (Kombi-Experiment).

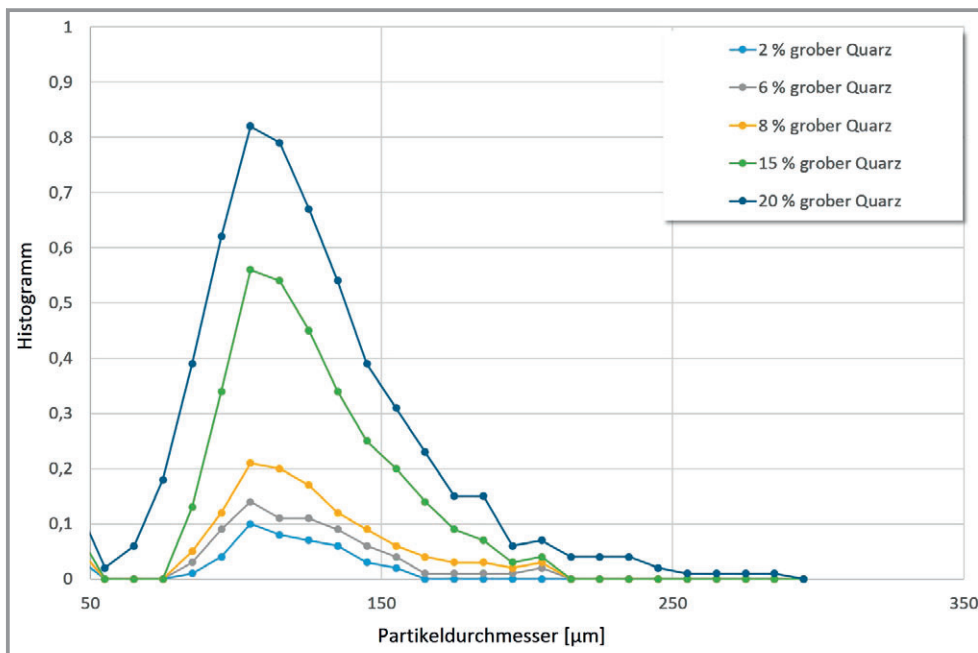


Abbildung 10. Grobanteil (im Größenspektrum dargestellt zwischen 50 und 500 μm) der jeweiligen Mischungen mit 2, 6, 8, 15 und 20 % Quarz grob.

2 Gew% ungefähr 300 000 mal mehr feine als grobe Partikel vorliegen, kann sogar die Relation der Grobanteile zum Feinanteil sehr gut abgebildet werden.

4 Zusammenfassung und Fazit

Der Bettersizer S3 Plus ist durch seine besondere messtechnische Ausstattung mit einer innovativen Kombination von statischer Lichtstreuung (DLOIS) und dynamischer Bild-

analyse (0,5X- und 10X-CCD-Kameras) in der Lage, gleichzeitig die exakte Partikelgrößenverteilung einer Probe im Bereich 0,01 – 3500 μm und eine Partikelformanalyse der Teilchen ab etwa 3 – 4 μm durchzuführen. Durch die kombinierte Anwendung beider Analysemethoden ist gegenüber der reinen statischen Lichtstreuung eine deutlich genauere Erfassung der Partikelgrößenverteilung bei breit verteilten Partikelgrößen möglich. Insbesondere im Grobbereich einer Verteilung macht sich dies bei der Detektion der entsprechenden Partikel bemerkbar.

Im gezeigten Anwendungsbeispiel konnte dies mithilfe verschiedener Mischungen zweier auf der Größenskala recht weit auseinanderliegender Quarzpulver ($D_{50}(\text{feiner Quarz}) = 4,49 \mu\text{m}$, $D_{50}(\text{grober Quarz}) = 111,2 \mu\text{m}$) nachgewiesen werden. Mithilfe reiner statischer Lichtstreuung war eine Detektion der groben Teilchen bis zu einem Masseanteil von etwa 8 % nicht möglich, wohingegen durch die Unterstützung der CCD-Kamera bereits Anteile von 2 % gefunden wurden. Diese Blindheit der statischen Lichtstreuung bei derartigen Proben ist dabei kein geräte-, sondern methodenspezifisches Problem. Mit statischen Lichtstreugeräten anderer Hersteller (z. B. CILAS 1090-L) konnten ebenfalls Anteile bis ca. 10 Gew.-% nicht gefunden und damit die Schwäche des Messverfahrens bestätigt werden. Eine absolut perfekte Übereinstimmung der Massenanteile – real eingewogen und mit der Kombimethode gemessen – ist natürlich in der Praxis aufgrund verschiedener Einflussfaktoren kaum möglich. Aus den durchgeführten Untersuchungen kann jedoch belegt werden, dass auch kleinste Anzahlverteilungen an Überkorn detektiert werden können und sich zusätzlich die Mengenverhältnisse solchen Überkorns in den verschiedenen Proben gut abschätzen lassen (s. Abb. 10).

Abschließend sei erwähnt, dass neben der exakten Bestimmung der Größenverteilung und der Ermittlung verschiedener Formparameter eine permanente Visualisierung der Probe durch zwei Kameras mit unterschiedlicher Ver-

größerung weitere, für die Praxis relevante Vorzüge besitzt. Dazu gehören:

- 1) Visuelle Kontrolle, ob die berechnete Partikelgrößenverteilung durch das makroskopische Fitverfahren der statischen Lichtstreuungsmethode realistisch ist. Es sei noch einmal angemerkt, dass es sich bei Verwendung der Laserbeugung zur Bestimmung der Größenverteilung um ein indirektes Fitverfahren handelt: Der eigentliche Messparameter wird aus einem gemessenen Streuspektrum über Anpassung dieser Kurve berechnet. Solche Rechenverfahren besitzen oftmals mehrere Lösungen und eine visuelle Überprüfung des dargestellten Ergebnisses stellt einen großen Vorteil für die Bewertung der Ergebnisse dar.
- 2) Eine Überprüfung des Dispergierzustandes der gemessenen Teilchen ab einer Größe von ca. $3 - 4 \mu\text{m}$.
- 3) Eine Prüfung, ob zum Beispiel durch Verwendung der hauseigenen Wasserversorgung oder bei Anwendung eines Additivs zur besseren Dispergierung der zu untersuchenden Teilchen unter Umständen Luftblasen das Messergebnis negativ beeinflussen.

Literatur

- [1] ISO 13320:2009, *Particle size analysis – Laser diffraction method*, International Organization for Standardization, Genf 2009.