

Juni 2020  
92. Jahrgang  
CITAH 92 (6)  
669-792 (2020)  
ISSN 0009-286 X

[www.CIT-journal.com](http://www.CIT-journal.com)

# Chemie Ingenieur Technik

Verfahrenstechnik • Technische Chemie • Apparatewesen • Biotechnologie

6 | 2020

**Schwerpunkte:**

Rohrreaktor  
Partikelabtrennung  
Scale-up

**Herausgeber:**

DECHEMA  
GDCh  
VDI-GVC

WILEY-VCH

S3 und S3 Plus  
**Bettersizer**

Partikelgrößen-  
& Partikelform-  
analyse



**3P**  
INSTRUMENTS

D 2048

# Untersuchung der partikulären Eigenschaften von Sanden hinsichtlich der Eignung zur Betonproduktion

DOI: 10.1002/cite.202070605

## Einleitung

Zur Herstellung von qualitativ hochwertigem Beton für die Bauindustrie ist Sand einer der wesentlichen Rohstoffe. Derzeit werden laut einer Studie der UNEP (United Nations Environment Programme) [1] ca. 30 Milliarden Tonnen Bausand zur Herstellung von Beton eingesetzt. Verwendet wird dabei fast ausschließlich Meeressand. Allerdings führt dessen Abbau zu teilweise erheblichen Problemen für Umwelt und Tierwelt (Landverlust, Zerstörung des Lebensraums von Meerestieren etc.). Darüber hinaus resultiert der immer stärker werdende Bedarf in einer Sandknappheit und der Überteurung dieses Rohstoffes. Aus diesem Grund wird schon längst nach Alternativen gesucht, z. B. Wüstensand. Allerdings ist Sand nicht gleich Sand und die Wüstenvariante ist ohne Weiteres nicht für die Verarbeitung in Beton geeignet, denn deren Partikelgrößenverteilung und Kornform weicht von Standardbausanden ab [2]. Um qualitätstechnisch nachzuweisen, ob ein Sand für die Verarbeitung in Beton geeignet ist, muss ein entsprechendes Messgerät über den relevanten Partikelgrößenbereich exakt die Partikelgrößenverteilung bestimmen und darüber hinaus die Rundheit des Korns statistisch darstellen können. Beides leistet, wie im Folgenden gezeigt wird, der Bettersizer S3 Plus [3].

## Messtechnik

Der technische Aufbau des Bettersizer S3 Plus ist in Abb. 1 gezeigt. Während einer Messung werden die in einem flüssigen Medium dispergierten Partikel durch ein Doppelküvetten-system gepumpt. Dabei trifft in der ersten Küvette Laserlicht (532 nm) auf die Teilchen und wird in Abhängigkeit von der Größenverteilung charakteristisch gestreut. Das Streulicht wird über einen Winkelbereich von 0,02 – 165° zuverlässig detektiert. Dieser extrem breite Winkelbereich wird durch das DLOIOS-System, einer patentierten Einlasertechnik mit

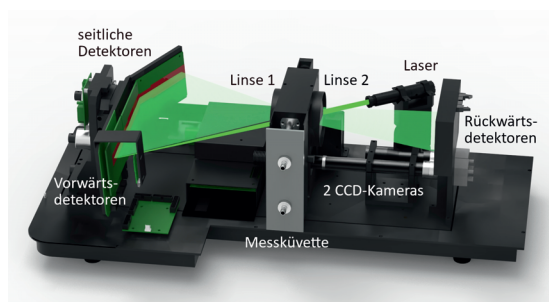


Abbildung 1. Darstellung des optischen Systems des Bettersizer S3 Plus (Doppelküvetten-system mit DLOIOS-Technologie und CCD-Kameraeinheit).

Doppellinsensystem und schrägem Lichteinfall, ermöglicht.

In der zweiten Küvette werden die Teilchen von zwei Hochgeschwindigkeits-CCD-Kameras kontinuierlich mit einer Rate von bis zu 10 000 Partikel/Minute in Echtzeit fotografiert, ausgewertet und statistisch klassifiziert. Die Kameras ermöglichen dabei eine 15- (0,5×-Objektiv) und 300-fache (10×-Objektiv) Vergrößerung. Der abgedeckte Größenbereich ist 2–3500 µm. Zusammengefasst ermöglicht der Bettersizer S3 Plus durch diesen einzigartigen Aufbau

- die exakte Partikelgrößenmessung sehr kleiner Teilchen ab 10 nm (DLOIOS-Technologie);
- echte Anzahl- und Volumenverteilungen mit passenden Äquivalentgrößen-durchmessern (CCD-Kameratechnik);
- höhere Genauigkeit im Grobbereich als herkömmliche statische Licht-

streugeräte (Kombinationsverfahren

- DLOIOS- und CCD-Kameratechnik);
- Detektion einzelner Überkörner, Agglomerate, Luftblasen (CCD-Kameratechnik);
- Formanalyse mit mehr als 20 spezifischen Formparametern.

## Experimente und Ergebnisse

Für die Tests wurden exemplarisch drei Sande verwendet: Als Referenz für ein betongeeignetes Material wurde ein handelsüblicher Normsand (CEN-Normsand DIN EN 196-1) charakterisiert. Für die Vergleichsmessung mit dieser Referenz wurden zum einen ein unbehandelter Wüstensand und zum zweiten ein Ziegelbrechsand verwendet. Die Sande wurden jeweils über mehrere Stufen bis zur erforderlichen repräsentativen Testmenge (ca. 2 g) geteilt.

Abb. 2 zeigt die Partikelgrößenverteilung aller drei Sande, gemessen mit

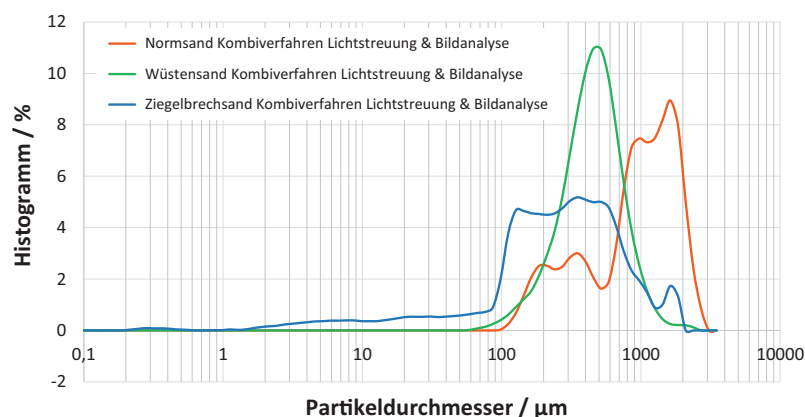


Abbildung 2. Partikelgrößenverteilung der drei Sande, gemessen mit dem Bettersizer S3 Plus und Verwendung der Kombinationsmethode „statische Lichtstreuung und dynamische Bildanalyse“.

dem für diese Applikation optimal geeigneten Kombiverfahren aus statischer Lichtstreuung und dynamischer Bildanalyse [3]. Tab. 1 gibt wichtige, zu diesen Verteilungen gehörende Durchmesserwerte im Überblick an.

Alle drei Verteilungen zeigen wesentliche Unterschiede: Der Normsand besitzt die (volumenmäßige) Hauptfraktion zwischen 500 und 2000  $\mu\text{m}$ , der Wüstensand zwischen 200 und 1000  $\mu\text{m}$ . Bei dem Ziegelbrechsand verschiebt sich die Hauptfraktion noch weiter in den Feinbereich, sie liegt ca. zwischen 100 und 900  $\mu\text{m}$ . Ziegelbrechsand und Normsand sind eher breit und polymodal verteilt, der Wüstensand dagegen zeigt eine nahezu monomodale Verteilung. Auffällig ist auch der wesentlich höhere Anteil < 100  $\mu\text{m}$  bei Ziegelbrechsand.

Zur Beurteilung der Kornrundheit bzw. -ausdehnung der drei Sande wurde je-

weils mithilfe der CCD-Kameratechnik des Bettersizer S3 Plus der  $L/D$ -Wert (Verhältnis aus Länge  $L$  zu minimalem Feret-Durchmesser  $D$ ) [4] der Partikel bestimmt. Dabei wurden aufgrund der Vergleichbarkeit nur Partikel ab 300  $\mu\text{m}$  berücksichtigt.

Tab. 2 zeigt exemplarisch aus der Einzelteilchenliste der Sande für einige Teilchen jeweils das Teilchenbild, den Äquivalentdurchmesser [4] sowie den  $L/D$ -Wert.

Auffällig ist, dass die  $L/D$ -Werte der Wüstensandteilchen im Schnitt über denen der beiden anderen Sande liegen, d. h. sie sind länglicher bzw. ausgedehnter.

In Abb. 3 sind die statistischen  $L/D$ -Wert-Verteilungen der Sande zu sehen, Tab. 3 gibt die jeweils zugehörigen charakteristischen Prozentwerte an.

Es ist deutlich zu erkennen, dass Wüstensand und insbesondere Ziegelbrech-

sand deutlich breiter verteilt sind, also wesentlich mehr langgezogene Partikel aufweisen. Darüber hinaus hat der Wüstensand sein Maximum bei einem  $L/D$ -Wert von etwa 1,4; bei Norm- und Ziegelbrechsand ist der größte Anteil der Einzelteilchen eher rund, d. h. mit einem  $L/D$ -Wert zwischen 1 und 1,3.

### Zusammenfassung

Mithilfe des Bettersizer S3 Plus konnte festgestellt werden, dass sich Wüsten- und Ziegelbrechsand hinsichtlich Partikelgrößenverteilung und Kornform von der gesetzten Referenz (CEN Normsand) unterscheiden: Wüstensand zeigt eine eher monomodale Partikelgrößenverteilung, es fehlen insbesondere Größenfraktionen im Mittel- und Grobbereich. Der Ziegelbrechsand ist zwar sehr breit und polymodal verteilt, allerdings fehlen auch hier signifikante Anteile im Grobbereich und er weist einen sehr

Tabelle 1. Durchmesserwerte der drei Sande aus Abb. 2.

Probe	D3	D6	D10	D16	D25	D50	D75	D84	D90	D99
Normsand Kombiverfahren Lichtstreuung & Bildanalyse	150,3	177,8	217,4	295,0	457,5	943,9	1434	1631	1781	2341
Wüstensand Kombiverfahren Lichtstreuung & Bildanalyse	134,9	172,2	209,1	252,4	303,5	424,8	573,7	661,5	755,9	1450
Ziegelbrechsand Kombiverfahren Lichtstreuung & Bildanalyse	5,252	14,43	39,01	97,52	128,0	257,3	484,0	614,5	782,0	1700

Tabelle 2. Auszug aus der Einzelteilchenliste von Norm-, Wüsten- und Ziegelbrechsand (zwischen etwa 1000 und 2500  $\mu\text{m}$ ) mit Kamerabild, Äquivalentflächendurchmesser und  $L/D$ -Wert.



















	Normsand		Wüstensand		Ziegelbrechsand	
						
Durchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	2576	2320	1986	1872	1867	1913
$L/D$ -Wert [-]	1,537	1,255	2,554	1,662	1,003	1,434
						
Durchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	1555	1543	1464	1312	1644	1372
$L/D$ -Wert [-]	1,197	1,470	2,130	1,518	2,025	1,338
						
Durchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	1032	1028	994,3	988,2	1027	965,5
$L/D$ -Wert [-]	1,014	1,034	1,463	1,849	1,164	1,007

Tabelle 3. Charakteristische Prozentwerte zu den  $L/D$ -Wert-Verteilungskurven in Abb. 3.

	$L/D$ 3	$L/D$ 10	$L/D$ 25	$L/D$ 50	$L/D$ 75	$L/D$ 90	$L/D$ 97	Durchschnitt $L/D$	Partikelzahl > 300 $\mu\text{m}$	Partikelzahl gesamt
CEN Normsand > 300 $\mu\text{m}$	1,014	1,049	1,126	1,270	1,463	1,667	1,918	1,322	25 601	400 000
Wüstensand > 300 $\mu\text{m}$	1,025	1,085	1,202	1,401	1,650	1,933	2,294	1,470	81 791	400 000
Ziegelbrechsand > 300 $\mu\text{m}$	1,020	1,066	1,167	1,372	1,638	1,929	2,306	1,440	3004	900 000

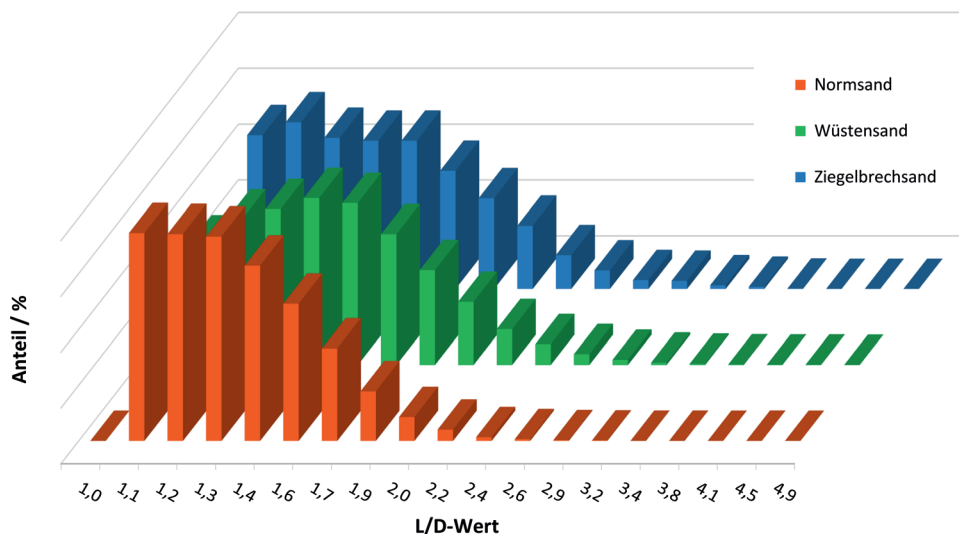


Abbildung 3. L/D-Wertverteilung von Norm-, Wüsten- und Ziegelbrechsand (jeweils dynamische Bildanalyse).

hohen Anteil an feinen Partikeln  $< 100 \mu\text{m}$  auf.

Die Wüstensandpartikel sind im Vergleich zum Referenzsand deutlich langgezogener. Der Ziegelbrechsand ist im Vergleich zu den beiden anderen Sanden bzgl. Ausdehnung der Teilchen breiter verteilt, ist also deutlich inhomogener und besitzt sowohl rundlich-kantige Körner als auch eher ovale Partikel in hohem Maße.

Wüstensand und Ziegelbrechsand werden sich daher beim Einsatz als Betonsand sicher anders verhalten als der Normsand, sowohl bei der Verarbeitung des flüssigen Betons als auch später bei den mechanischen Eigenschaften des festen Materials.

#### Literatur

- [1] 2019 *Sand and Sustainability: Finding New Solutions for Environmental Governance of Global Sand Resources*, United Nations Environment Programme (UNEP), Geneva 2019. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/28163/SandSust.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [2] *Zu fein – Wüstensand kein hochwertiger Baurohstoff*, Pressemitteilung, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover 2019. [www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Nachrichten/Aktuelles/2019/2019-08-06\\_wuestensand.html](http://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Nachrichten/Aktuelles/2019/2019-08-06_wuestensand.html)
- [3] C. Oetzel, *Partikelwelt* 2018, 19, 4–7. [www.3p-instruments.com/wp-content/uploads/PDF/partikelwelt/PW-19/Partikelwelt-19.pdf](http://www.3p-instruments.com/wp-content/uploads/PDF/partikelwelt/PW-19/Partikelwelt-19.pdf)
- [4] ISO 9276-6, *Representation of Results of Particle Size Analysis – Part 6: Descriptive and Quantitative Representation of Particle Shape and Morphology*, Beuth, Berlin 2008.

#### 3P INSTRUMENTS GmbH & Co. KG

Dr. Christian Oetzel,  
Dr. Frederik Schleife  
Rudolf-Diesel-Straße 12  
85235 Odelzhausen  
[frederik.schleife@3p-instruments.com](mailto:frederik.schleife@3p-instruments.com)  
[www.3p-instruments.com](http://www.3p-instruments.com)