

# Rührwerkskugelmühlen zum Dispergieren und Zerkleinern – Anwendungen für den keramischen Aufbereitungsprozess

Klaus Ott  
NETZSCH-Feinmahltechnik GmbH  
klaus.ott@nft.netzsch.com

## Einleitung

Rührwerkskugelmühlen können in der Nassaufbereitung für unterschiedlichste Aufgabenstellungen eingesetzt werden. Mischen und Homogenisieren von Feststoffen in Flüssigkeiten gehören dabei ebenso zu den Standardaufgaben wie das Deagglomerieren, Dispergieren und Benetzen von Feststoffpartikeln in Flüssigkeiten (Bild 1).

Die Echtzerkleinerung (Mahlung) von harten Materialien wie Quarz bis hin zu SiC oder Borcarbid gehören zu den anspruchvollsten Anforderungen. Feststoffkonzentrationen bis 80 Gew.-% und puddingartiges Fließverhalten stellen für die Verarbeitung kein Problem dar. Unterschiedlichste Flüssigkeiten wie deionisiertes Wasser, Alkohole sowie Öle und organische Lösemittel können zum Einsatz kommen. Der Partikelgrößenbereich wird bei etwa 500 µm im Aufgabegut begrenzt und reicht bis <100 nm als Endfeinheit. Um die unterschiedlichen Aufgaben optimal erfüllen zu können, muss die Mühle richtig ausgelegt sein und mit optimalen Betriebsparametern eingestellt werden. Zum Verständnis der Faktoren, die das Mahlergebnis beeinflussen, soll der Nassaufbereitungsprozess hier zunächst energetisch betrachtet werden.

## Energiebetrachtungen

In Rührwerkskugelmühlen wird die Zerkleinerungsenergie durch Mahlkörper übertragen, welche die eigentlichen Zerkleinerungswerkzeuge darstellen. Hierbei gilt die bekannte Abhängigkeit  $E \sim m \cdot v^2$  (Energie proportional Masse x Geschwindigkeit<sup>2</sup>). Jede Zerkleinerungsstufe kann dabei durch den spezifischen Energieeintrag (kJ/kg Feststoff oder kWh/kg Feststoff) beschrieben werden.

Dieser ist für jedes Produkt aufgrund unterschiedlicher Zerkleinerungseigenschaften verschieden. Für

Rührwerkskugelmühlen wurde dies Anfang der 80er-Jahre an der TU Braunschweig untersucht (Bild 2). Mit unterschiedlichen Betriebsparametern sowie verschiedenen Mühlengrößen konnte eine generelle Abhängigkeit des Mahlergebnisses vom Energieeintrag ermittelt werden.

Im Weiteren wurde jedoch zusätzlich ein Einfluss der Mahlkörper sowie der Rührerdrehzahl auf den energetischen Wirkungsgrad beobachtet. Bei Einsatz kleinerer Mahlkugeln ergab sich zunächst eine immer bessere Energieausnutzung, bis ab einer bestimmten Kugelgröße der Energieaufwand zur Erzielung einer Sollpartikelgröße wieder deutlich anstieg (Bild 3).

Dies ist durch die Zunahme der Anzahl an Mahlkugeln in einem verfügbaren Mühlenvolumen erklärbar. Durch Halbierung des Kugeldurchmessers verachtacht sich die Anzahl; bei 1/4 des ursprünglichen Durchmessers erhält man die 64-fache Zahl an Kugeln (Bild 4). Dadurch steigt auch die Zahl der Zerkleinerungsereignisse im Mahlraum stark an. Der energetische Wirkungsgrad erreicht ein Maximum, solange die übertragene Energie durch die einzelnen Mahlkugeln die Mindest-Bruchenergie der Partikel übersteigt.

Reicht die Energie für den Bruch nicht mehr aus, ist Mehrfachkontakt erforderlich, wodurch die Zerkleinerungsleistung spürbar abnimmt. Umgekehrt tritt Energieverlust in Form von Wärme und Verschleiß auf, wenn die Mahlkörper ein Vielfaches der benötigten Bruchenergie aufweisen. Es gilt deshalb, die optimale Beanspruchungsenergie BE einzusetzen, um einen energieeffizienten Zerkleinerungsprozess zu führen.

$$BE = BE_{MK} \sim d_{MK}^3 \times \rho_{MK} \times v_t^2$$

$d_{MK}$  Durchmesser Mahlkörper

$\rho_{MK}$  Dichte Mahlkörper

$v_t$  Umfangsgeschwindigkeit Rührer

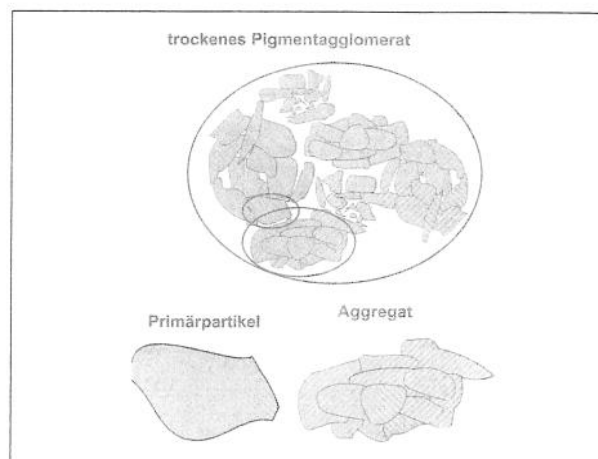


Bild 1 Primärpartikel, Aggregate, Agglomerate

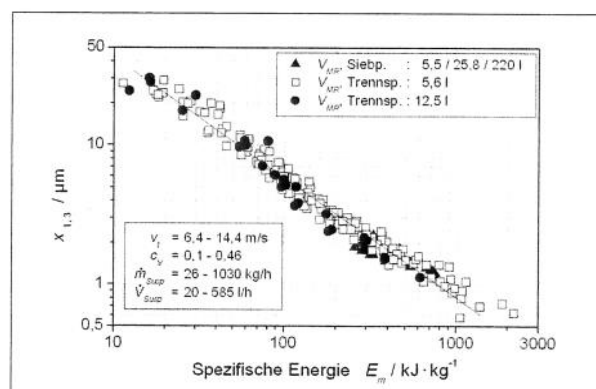


Bild 2 Zerkleinerungsfortschritt in Abhängigkeit von der spezifischen Energie [2]

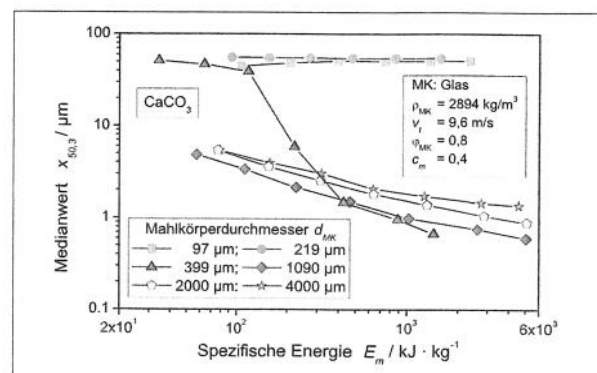
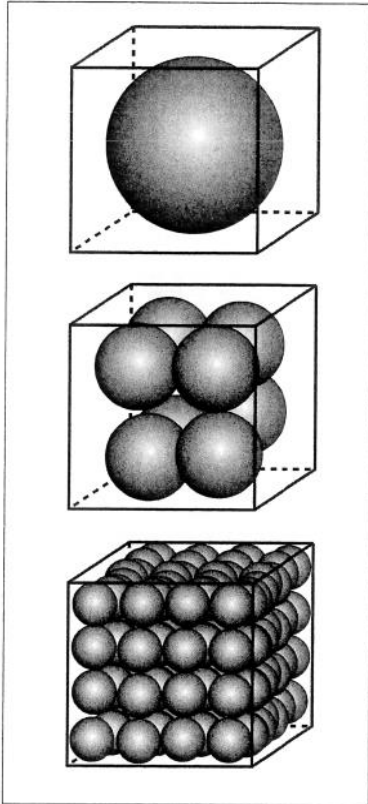
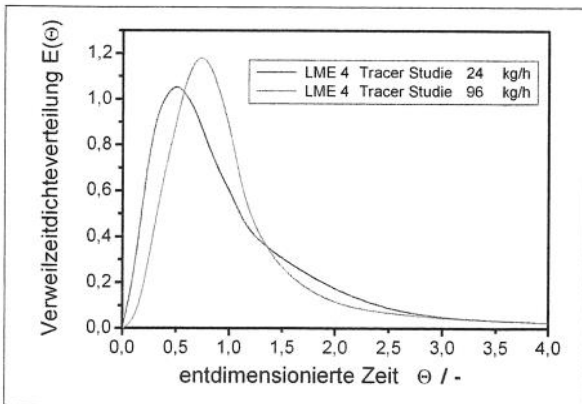
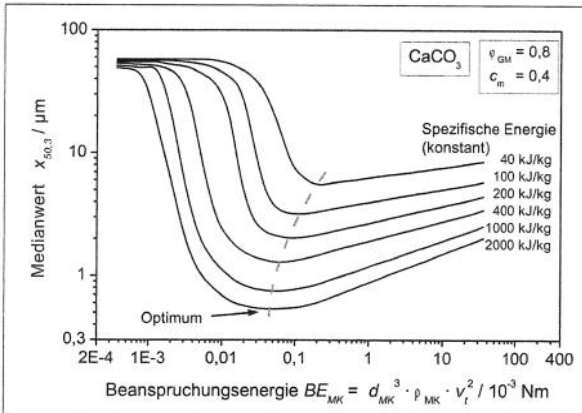


Bild 3 Einfluss der Mahlkörpergröße auf das Zerkleinerungsergebnis [1]

**Bild 4 (rechts)**  
Anzahl von Kugeln in einem bestimmten Volumen in Abhängigkeit vom Kugeldurchmesser

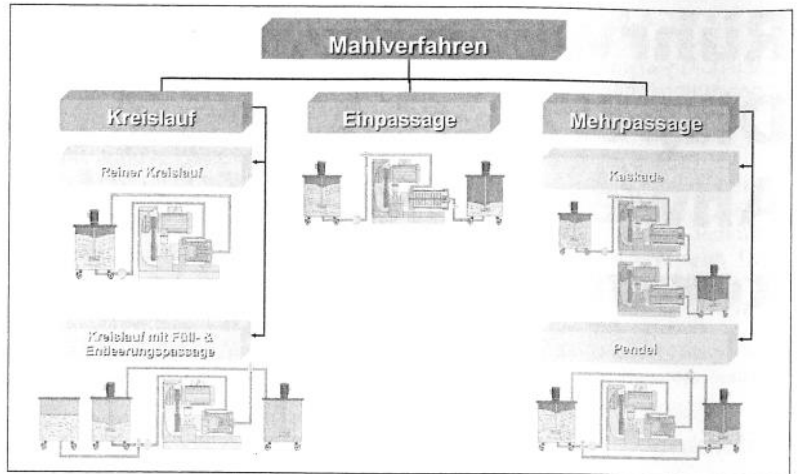


**Bild 5 (unten)**  
Zerkleinerungskurven für konstante spezifische Energie in Abhängigkeit von der Beanspruchungsenergie [1]



**Bild 6** Verweilzeitverteilung in Rührwerkskugelmühlen

Dabei ist ein möglichst kleiner Mahlkörperdurchmesser anzustreben, wodurch sich die Forderung nach Mahlkörperwerkstoffen mit hoher



**Bild 7** Betriebsweisen von Rührwerkskugelmühlen

Dichte (z.B.  $ZrO_2$ ) bzw. hohe Umfangsgeschwindigkeiten des Rührers ergibt.

## Einfluss der Betriebsweise von Rührwerkskugelmühlen auf das Zerkleinerungsergebnis

Üblicherweise werden Rührwerkskugelmühlen kontinuierlich durchströmt, wodurch sich ein Verweilzeitpektrum aufgrund des Mischeinflusses ergibt (turbulente Strömung). Die Beanspruchungszeit im Mahlraum kann deshalb von wenigen Sekunden bis zum 3-fachen bzw. 4-fachen der theoretischen Füllzeit reichen (Bild 6). Die Füllzeit der Mühle ist definiert aus dem Verhältnis von Produktvolumen in der Mühle zum Volumenstrom. Für eine 20 l-Mühle beträgt sie bei 100 l/h Volumenstrom 6 min (Nettovolumen beträgt ca. 50 % des Nennvolumens). Die Beanspruchung einzelner Partikel beim Durchlauf durch die Mühle kann deshalb wenige Sekunden bis etwa 24 min betragen. Durch die unterschiedliche Aufenthaltszeit resultiert im einfachen Durchlauf ein breites Kornspektrum. Um dem entgegen zu wirken und eine gleichmäßige Mahlung zu erzielen, werden Rührwerkskugelmühlen heute vielfach im Mehrpassagenverfahren betrieben. Je öfter eine Mühle durchströmt wird, desto gleichmäßiger ist die Beanspruchung aller Teilchen (statistischer Einfluss durch den Prozess). Dabei kann bereits eine deutliche Reduzierung des Grobanteiles erreicht werden, wenn anstelle eines Durchlaufes mit 100 l/h zwei Passagen mit je 200 l/h durchgeführt werden. Die beiden gängigsten Betriebsweisen für Mehrpassagenverfahren sind der Pendelbetrieb bzw. der Kreislaufprozess (Bild 7,8,9).

Während der Pendelbetrieb grundsätzlich das beste Ergebnis mit der höchsten Mahlleistung ermöglicht, ist der Kreislaufprozess das einfachste Verfahren mit dem geringsten Aufwand. Unter bestimmten Voraussetzungen fällt die erreichbare Produktqualität beim Kreislauf aber keineswegs gegenüber dem Pendelbetrieb ab und ist somit oftmals das Verfahren erster Wahl.

## Baureihen von NETZSCH-Rührwerkskugelmühlen

Neben den universell einsetzbaren Mühlen mit Scheibenrührwerk in horizontaler Behälterachse (Typen LME/LMK) und vertikaler Bauform (Typ KE) ist die Baureihe Typ LMZ (Stiftührwerk, horizontale Bauform) verfügbar (Bild 10,11). Grundsätzlich entsteht bei der Zerkleinerung Abrieb der Mühlenbauteile und der Mahlkörper, welcher zur Kontamination des Mahlgutes führt. Um dem Anspruch nach eisenfreier Mahlung nachzukommen, stehen unterschiedliche Werkstoffe der Mühlenfunktionsteile zur Auswahl.

Für wässrige Suspensionen wird in der Regel Polyurethan als Verschleißschutz eingesetzt. Neben hoher Abriebfestigkeit ist der günstige Preis sowie die meist unbedenkliche (organische) Kontamination des Produktes von Vorteil. Bei Einsatz von Lösemitteln und höherer Temperaturbelastung ( $> 65^\circ C$ ) ist PU nicht einsetzbar und die Mühle muss mit keramischen Werkstoffen ( $ZrO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Si_3N_4$ , SiC) ausgekleidet werden (Bild 15). Dies macht zum Teil aufwendige und teure Konstruktionen erforderlich. Die hohe Biege- und Schlagbelastung in der Mühle birgt außerdem die Gefahr von Bruch. Auch hier muss die Auswahl

der Werkstoffe nach zulässiger Produktkontamination erfolgen.

Da in der Scheibmühle ein großes Mahlräumvolumen zur Verfügung steht (große Anzahl an Mahlkugeln bzw. Zerkleinerungsereignisse) und die durchschnittliche Beanspruchungsenergie durch ein breites Geschwindigkeitsspektrum eher mittelgroß ist, wird dieser Typ bevorzugt zur Deagglomeration und Dispergierung eingesetzt. Die geringen Bindungskräfte von Aggregaten und Agglomeraten werden überwunden, so dass eine effiziente Zerkleinerung erfolgt.

Wegen dem günstigeren Verschleißverhalten der Scheibmühle im Vergleich zur Stiftmühle wird diese Baureihe aber auch zur Echtmahlung abrasiver Produkte wie SiC und Quarz eingesetzt. Insbesondere die Vorzerkleinerung grober Partikel bis 100 µm und mehr gehört zu den bevorzugten Anwendungen.

Bei Feinheitsanforderungen  $d_{99} < 5 \mu\text{m}$  bzw. bei Einsatz kleinster Mahlkugeln ( $d < 0,4 \text{ mm}$ ) ist die Stiftmühle LMZ besser geeignet. Die intensive Mahlkugelaktivierung führt zu einem engen und hohen Geschwindigkeitsspektrum der Mahlkugeln, so dass auch bei kleinster Mahlkörpermasse eine hohe Beanspruchungsenergie erzielt wird. Die hohe Energiedichte von bis zu 2 kW/l Mahlräumvolumen ermöglicht dabei hohe Mahlleistung bei kleinem Mühlenvolumen.

Für beide Mahlsysteme stehen unterschiedlichste Baugrößen von der Laborausführung bis zur Großanlage zur Verfügung. Beide Baureihen sind auf der Basis von Laborversuchen scale-up-fähig (Bild 12,13).

## Anwendungsbeispiele für die keramische Aufbereitung

In der keramischen Prozesskette bildet die Aufbereitung von Rohstoffen und Schlickern das erste Glied. Es gilt, die optimalen Voraussetzungen für ein qualitativ hochwertiges Endprodukt zu schaffen. Traditionell wird hierfür die Trommelmühle als bevorzugtes Aggregat eingesetzt. Der einfachen Technologie auf der einen Seite stehen jedoch Grenzen der Leistungsfähigkeit (qualitativ wie quantitativ) gegenüber. Für die traditionellen Keramiken (Porzellan, Sanitär, Fliesen) werden die üblichen Feinheitsanforderungen bis etwa 45 µm (16 900 Maschen/cm<sup>2</sup>) bzw. etwa 25 µm bei Glasuren gerade noch mit akzeptablem Aufwand erreicht. Die

Micronisierung von Pigmenten und Farbkörpern erfolgt jedoch vielfach mit den leistungsfähigeren Rührwerkskugelmühlen. Im Bereich Hochleistungskeramik kann die Trommelmühle die hohen Anforderungen meist nicht mehr erfüllen.

Die Forderung nach feinsten und homogenen Gefügen setzt enge Kornspektren im Bereich weniger Micron mit geringstem Grobanteil voraus. Hierfür haben sich Rührwerkskugelmühlen vielfach bewährt und durchgesetzt. Das Feld der technischen Keramik bietet deshalb eine Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten. Beispiele: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; ZrO<sub>2</sub> (Oxidkeramik) bzw. SiC, B<sub>4</sub>C; Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> und AlN (Nichtoxidkeramik). Für elektronische Anwendung spielen Piezokeramik sowie MLCC eine bedeutende Rolle. Vertreter hierfür sind: PZT, Bariumtitanat sowie ZnO. Weiterhin gehören die Bereiche Glas- und Silikatkeramik (technische Gläser, Dentalkeramik; LTCC) ebenfalls zu den bevorzugten Einsatzgebieten. Nicht zu vergessen sind auch Anwendungen in der Rohstoffaufbereitung. Dort, wo aufgrund spezifischer Anforderungen an das Produkt ein Nassaufbereitungsprozess der Trockenmahlung vorgezogen werden muss, sind die Einsatzmöglichkeiten für Rührwerkskugelmühlen ebenfalls breit gefächert.

Die Forderung nach großen Mahlaggregaten und hohen Produktionskapazitäten stellt dabei kein Hindernis dar, da bei den Mühlen mit Scheiberrührwerk Baugrößen bis 3 000 l Mahlräum-Nutzinhalt zur Verfügung stehen. Im Bereich der Erzaufbereitung wurden sogar schon Mahlräumvolumen von 10 000 l mit installierten Motorleistungen von 2,5 Megawatt geliefert.

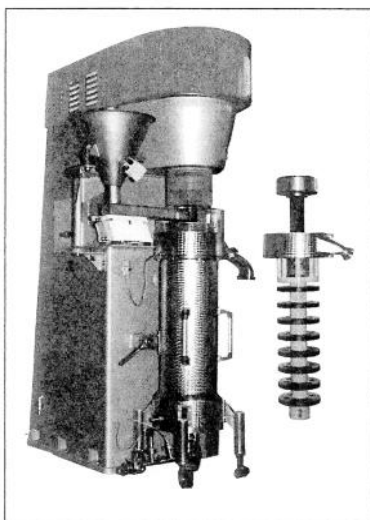


Bild 10 Vertikale Rührwerkskugelmühle mit Scheiberrührwerk PU/Gummi Typ KE

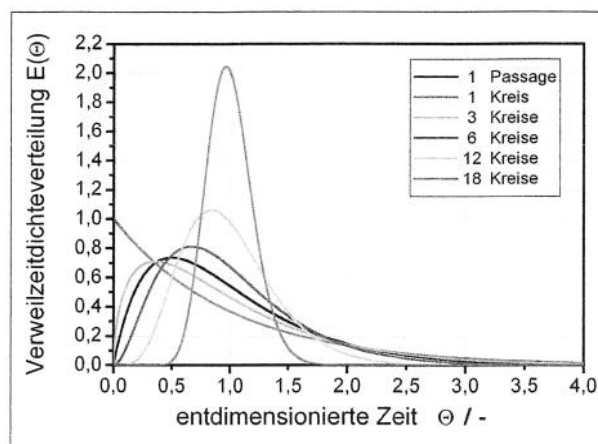


Bild 8 Verweilzeitvergleich 1 Passage zu Kreislauf-Betrieb

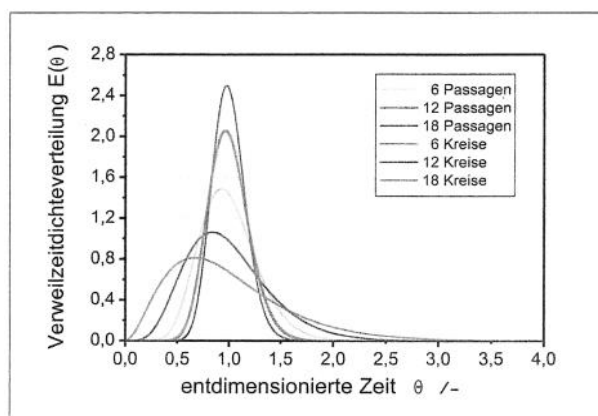


Bild 9 Verweilzeitvergleich Pendelbetrieb zu Kreislauf-Betrieb

## Aufbereitung von Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Suspensionen

Standardpulver besitzen üblicherweise Primärpartikelgrößen zwischen 0,5 und 2 µm. Diese liegen in Agglomeraten bis ca. 200 µm vor. Ziel ist die Dispergierung der Primärpartikel. Für diese Anforderung ist die

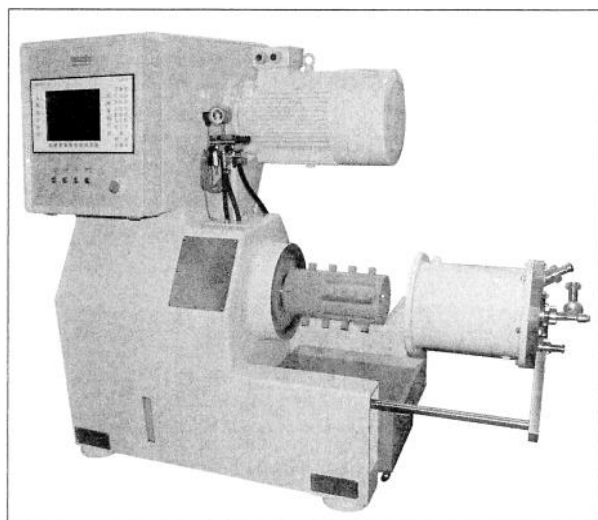


Bild 11 Horizontale Rührwerkskugelmühle mit Stiftrührwerk PU Typ LMZ

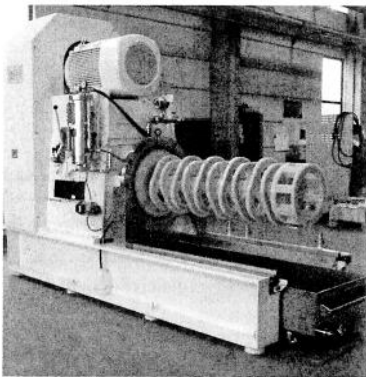
Typ	Produktion										
	Labor	LME 4	LME 12	LME 20/30	LME 50/60	LME 100	LME 200	LME 300	LME 500	LME 1000	LME 3000
Kapazitätsfaktor [-]	0,07	0,25	0,6	1-1,2	1,8-2,1	3,5	6	8	12	20	50
Mahlbehältervolumen [dm <sup>3</sup> ]	0,75	3,6	12	22	59	122	227	300	560	1000	3000
typische Ansatzgröße [dm <sup>3</sup> ]	1,5 - 5	10 - 100	50 - 250	100 - 500	200 - 1000	500 - 2500	1000 - 10000	> 2000	-	-	-
Rührwerksdrehzahl [1/min]	1000 - 3000	1200 - 2500	600 - 1800	700 - 1600	800	650	500	370 oder 560	350	340	320
typische Durchsatzleistung [kg/h]	5 - 50	18 - 180	42 - 420	70 - 750	140 - 1500	250 - 2500	420 - 4200	560 - 5600	840 - 8400	1400 - 14000	3500 - 35000
Antriebsleistung [kW]	2,2 - 3	4 - 5,5	13,5 - 15	18,5 - 24	37	55 - 75	75 - 90	90 - 110	160 - 200	315 - 355	1100

Bild 12 Tabelle Baugrößen Rührwerkskugelmühle mit Scheibenrührwerk Typ LME

Typ	Labor und Technikum				Produktion					
	M INI ZETA	M I C R O S E R I E / M I N I S E R I E	L A B S T A R	L M Z 2	L M Z 4	L M Z 10	L M Z 25	L M Z 60	L M Z 150	
Scale-up Faktor [-]	-	-	0,08	0,2	0,5	1	2	4	8	
Volumen [l]	0,3	0,08-0,16	0,6	1,6	4	10	25	62	151	
Typische Ansatzgröße [l]	0,25-0,5	0,14-0,5	1-5	10-50	20-200	100-1000	500-2000	> 2000	> 4000	
Durchsatz (Zirkulation) [kg/h]	10-50	10-50	10-50	40-200	100-500	250-1000	500-2500	1000-6000	2000-15000	
Leistung [kW]	0,75	0,94	3	4	13,5 - 15	17,5 - 22	37 - 45	70 - 90	160 - 200	

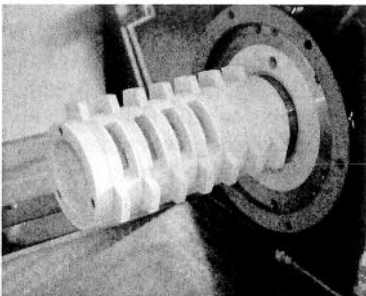
Bild 13 Tabelle Baugrößen mit Stiftrührwerk Typ LMZ

Bild 14 Rührwerkskugelmühle mit Scheibenrührwerk Typ LME 300



Rührwerkskugelmühle mit Scheibenrührwerk in PU-Ausführung (Typ LME) bestens geeignet (Bild 14). Bei Feststoffanteilen bis 70 Gewichtsprozent können auf einer Mühle mit 20 l Nutzinhalt bis zu 100 kg Pulver/h dispergiert werden. Bei Einsatz von Mahlkugeln mit einem Durchmesser von 1-2 mm ist ein spezifischer Energieeintrag von 0,1 kWh/kg Pulver erforderlich.

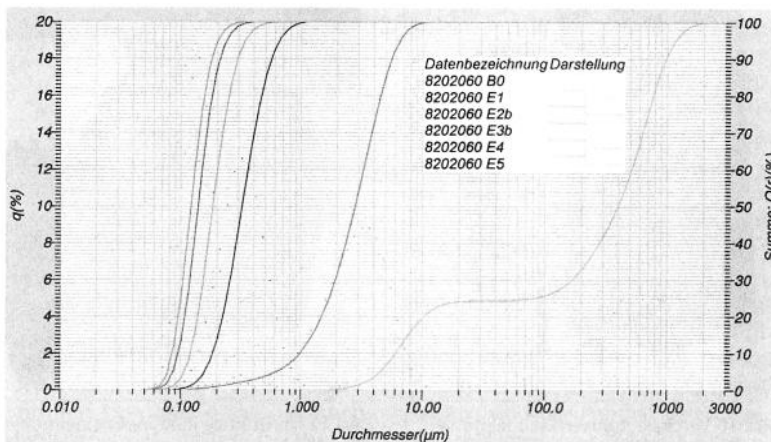
Bild 15 Rührwerkskugelmühle Typ LMZ mit Nocken Rührwelle aus ZrO<sub>2</sub>



### Dispergierung von Bariumtitanat auf $d_{99} < 1 \mu\text{m}$

Es wurde eine zweistufige Mahlung durchgeführt, da im Aufgabegut Kalzinatgranulate bis 1 mm vorlagen (Vormahlung 2 mm YTZ-Kugeln; Feinmahlung 0,4 mm YTZ-Kugeln). Die Zerkleinerungsstufe betrug hierbei mehr als 1 : 1 000. Zum Einsatz kam das Stiftmahlssystem LMZ mit PU-Auskleidung. Nach 30 Minuten

Bild 16 Feinstmahlung von Bariumtitanat



Kreislaufmahlung auf einer LMZ 10 (10 l Mahlraum Nutzinhalt) wurde ein  $d_{50}$  von 300 nm erreicht. Bei einem spezifischen Energieeintrag von 0,6 kWh/kg Feststoff konnten 20 kg Pulver/h aufbereitet werden.

### Mahlung von Glasfritten für digitale Druckeranwendung

Für den Einsatzfall wurde eine Feinheit  $d_{50}$  ca.  $1 \mu\text{m}$ ,  $d_{99} < 3 \mu\text{m}$  gefordert. Die Aufgabegröße lag bei  $d_{99}$  10  $\mu\text{m}$ . Da das Glaspulver in einem organischen Medium aufbereitet werden muss, wurde eine ZrO<sub>2</sub>-Keramikausführung der LMZ eingesetzt. Für die geforderte Zerkleinerungsstufe sind Zirkonoxid-Mahlkugeln im Größenbereich um 0,5 mm im Einsatz.

### Zusammenfassung

Rührwerkskugelmühlen sind leistungsfähige Aufbereitungsaggregate mit vielfältigen Einsatzmöglichkeiten. Über den spezifischen Energieeintrag kann die Mahlstufe beschrieben werden. Dadurch sind die gewünschten Ergebnisse auch einfach reproduzierbar. Durch die Auswahl geeigneter Mahlkugeln und die richtige Einstellung der Betriebsparameter (z.B. Rührerdrehzahl) können unterschiedliche Anforderungen bestmöglich erfüllt werden.

Mehrpassagenverfahren wie Pendelmahlung und Kreislauf führen zu engen Kornverteilungen. Insbesondere der Kreislaufbetrieb ist einfach und mit geringstem Aufwand durchführbar. Da hierbei der Energieeintrag bzw. die Mahldauer im Wesentlichen das Ergebnis bestimmen, kann ein Vergleich zum einfachen Batchbetrieb bei der Trommelmühle gezogen werden. Bevorzugte Einsatzbereiche sind in der technischen Keramik zu finden, da dort das Anforderungsspektrum am besten dem Leistungsvermögen von Rührwerkskugelmühlen entspricht. Unterschiedliche Mühltypen, hohe Flexibilität der Aggregate sowie die Angebotsvielfalt an Werkstoffen und Baugrößen bieten für jede Anforderung die richtige Lösung.

### Literatur

- [1] A. Kwade: Autogenzerkleinerung von Kalkstein in Rührwerkskugelmühlen, Dissertation, TU Braunschweig, 1996
- [2] H. Weit: Betriebsverhalten und Maßstabsvergrößerung von Rührwerkskugelmühlen, Dissertation, TU Braunschweig, 1987