

Bewegungsform der Füllung in einer Schwingmühle bei großen Amplituden

Bock, U.

Zur Hydrochlorierung von metallisch verunreinigtem Silicium wurde eine Schwingmühle entwickelt, in deren Mahlraum neben der Zerkleinerung simultan die chemische Reaktion stattfindet. Die Hydrochlorierung wird bisher im industriellen Maßstab im Wirbelschichtverfahren durchgeführt; dazu sind Prozeßtemperaturen von 400 °C erforderlich.

Die bei Schwingmühlen bekannten Effekte der mechanischen Aktivierung führen dazu, daß die während der Mahlung durchgeführte Reaktion schon bei einer Temperatur von 150 °C abläuft, wodurch eine erhebliche Energieeinsparung erzielt werden kann.

Bereits in den letzten Institutsmittteilungen /1/ wurden Ergebnisse zur Leistungsaufnahme der Füllung vorgestellt. Zusätzlich zu diesen Untersuchungen sollen im folgenden Versuchsaufnahmen zum Bewegungsverhalten der Füllung bei besonders großen Schwingamplituden dargestellt werden.

1. Versuchsaufbau

Der Versuchsstand wurde mit Satelliten-Mahlkammern mit Durchmessern von 100 bzw. 250 mm ausgerüstet. Diese wurden außen am Schwingrahmen angebracht und waren stirnseitig mit einer Glasscheibe verschlossen. In dem kleineren Gefäß wurden Stahlkugeln mit einem Durchmesser von 3 mm eingesetzt, in dem größeren Behälter Keramik- kugeln mit 12 mm Durchmesser. Die Beobachtung der Füllung erfolgte mit dem Hochgeschwindigkeits-Videosystem Ektapro 1000 (Fa. Kodak) mit 1000 Bildern pro Sekunde (siehe **Bild 1**).

Bei den Aufnahmen wurden folgende Parameter variiert:

- Mahlraumdurchmesser : 100 und 250 mm
- Mahlkörper : Stahlkugeln \varnothing 3 mm und
Keramik- kugeln \varnothing 12 mm
- Kugelfüllgrad φ_K : 50, 60, 70, 80 und 90%
- Drehzahl n : 1364 bis 3371 min^{-1}
- Amplitude r : 1 bis 6 mm
- Schwingform : kreisförmig

2. Bewegungsform in Abhängigkeit von Amplitude und Drehzahl

Bild 2 zeigt Ausschnitte von Filmen bei unterschiedlichen Amplituden; die Drehzahlen und Kugelfüllgrade sind mit $n = 1660 \text{ min}^{-1}$ bzw. $\varphi_K = 70 \%$ gleich. Der Mahlraum hat einen Durchmesser von 100 mm, die Kugeln sind 3 mm groß.

Bei den kleinen Amplituden von 1,1 und 3 mm (relative Amplitude 2,2 bzw. 6 %) bewegt sich die Füllung im untersuchten Drehzahlbereich in der Weise, wie sie u. a. von Kurrer /2/ beschrieben wird. Danach kann der Mahlraum in eine stationäre und eine Kaskadenzone eingeteilt werden. Die Füllung hebt etwas von der Wand ab und dehnt sich nur geringfügig

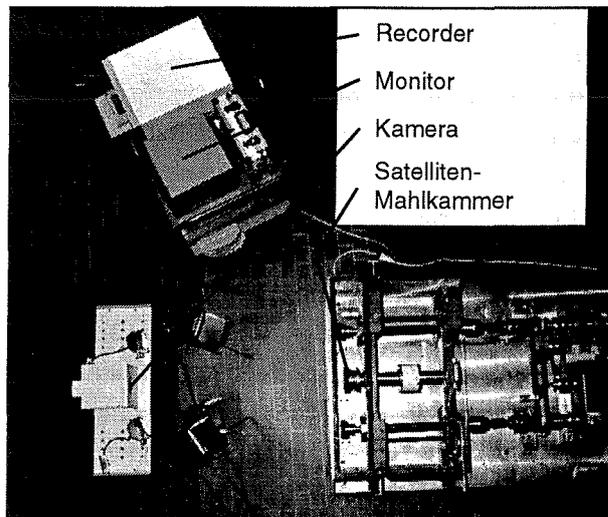


Bild 1 Prüfstands-aufbau zur Durchführung der Videoaufnahmen

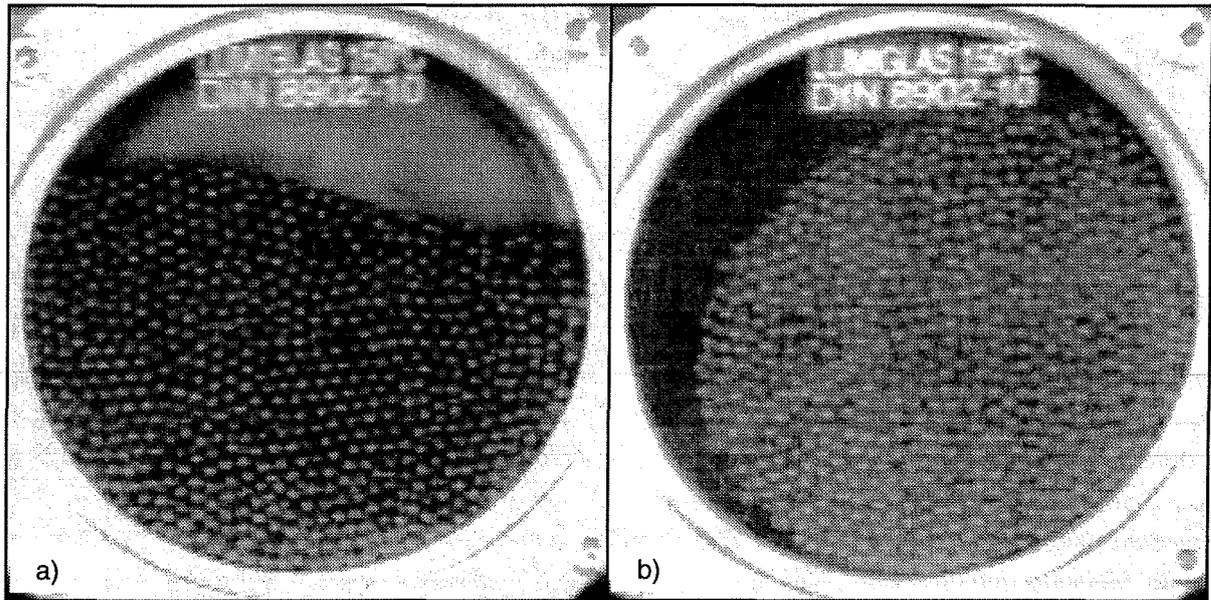


Bild 2 Bewegungsformen der Füllung bei unterschiedlichen Amplituden. Drehzahl $n = 1660 \text{ min}^{-1}$, $\phi_K = 70$ %, a) $r = 1,1 \text{ mm}$, b) $r = 5,3 \text{ mm}$

aus. Die Flughöhe ist etwa so groß wie die Amplitude der Schwingung. Der Raum oberhalb der Füllung bleibt frei. Die Stoßrate ist bei den untersuchten Drehzahlen nahezu identisch mit der Schwingfrequenz, d. h., daß die Füllung pro Umdrehung einmal abhebt.

Wird die Amplitude bei gleichbleibender Drehzahl und dem Füllgrad von 70 % weiter gesteigert, wächst auch die Flughöhe der Füllung. Diese wird bei einer Amplitude von 5 mm so groß, daß die oberen Kugeln der Füllung an die obere Mahlräumgrenzung anprallen. Bei noch größeren Amplituden kann die Füllung als zusammenhängende, plastische Masse betrachtet werden, die sich durch den gesamten Mahlräum bewegt. Die Füllung hat dabei eine Querschnittsfläche ähnlich der Füllung einer Kugelmühle, überstreicht aber die gesamte Innenwand des Mahlräums. Die Bewegung ist durch ein ausschließliches Abrollen jedoch nicht ausreichend charakterisiert. Vielmehr wird die Abrollbewegung häufig durch Flüge der Füllung oder Teilen davon quer durch den Mahlräum unterbrochen. Dieser Zustand tritt dann besonders deutlich auf, wenn die Grenzamplitude von ca. 5 mm (relative Amplitude 10 %) deutlich überschritten wird. Bei diesen Amplitudenwerten kann die Stoßfrequenz aus den Filmaufnahmen ermittelt werden. Es zeigt sich, daß die Füllung pro Umdrehung mehr als einen Impuls erhält, so daß sich die Stoßrate gegenüber der übli-

chen Bewegung teilweise verdoppelt.

Dieser Effekt wurde bei allen untersuchten Drehzahlen gefunden, woraus folgt, daß in diesem Bereich der Bewegungszustand der Füllung hauptsächlich durch die Amplitude bestimmt wird und weniger durch die Drehzahl bzw. Beschleunigung.

Bei sinkendem Füllgrad steigt der Wert der Grenzamplitude, da der dann größer werdende Raum oberhalb der Füllung durchflogen werden muß; die Füllung benötigt also eine größere Flughöhe. Am deutlichsten zeigt sich dieser Umstand bei einem Füllgrad von 50 %, bei der der Übergang zur Abrollbewegung auch bei der maximal erreichbaren Amplitude nicht beobachtet werden konnte.

Bei einem Füllgrad von 80 % konnte beobachtet werden, daß sich bei steigender Drehzahl der Wert der Grenzamplitude zu niedrigeren Werten hin verschiebt, so daß bei der größten untersuchten Drehzahl von 3529 min^{-1} der Zustand mit größerer Stoßfrequenz schon bei einer Amplitude von 4 mm zu finden ist.

Als Beispiel für die verschiedenen Bewegungsformen sind in **Bild 3** die Bahnlinien für jeweils zwei ausgewählte Kugeln aufgezeichnet. Die Drehzahlen betragen 1364 , 1660 und 2500 min^{-1} , der Kugelfüllgrad ist 70%. In den Bildern sind die Bahnkurven für 16 Umdrehungen dargestellt; eine Ausnahme bildet nur das Bild mit der Drehzahl 2500 min^{-1} und kleiner Amplitude (unten links). Hier ist der Kugel-

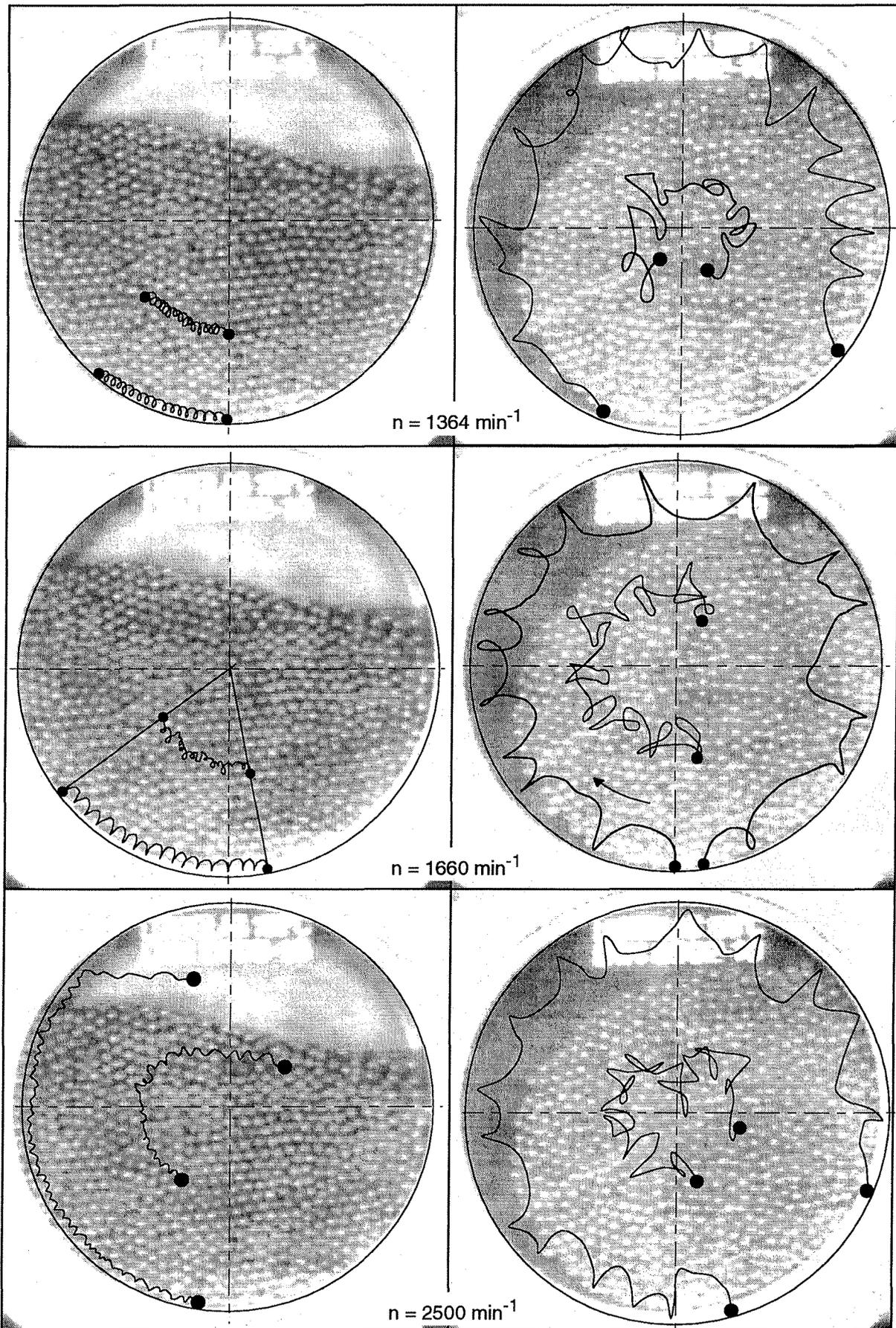


Bild 3 Bewegung ausgewählter Kugeln bei verschiedenen Drehzahlen und Amplituden.
 $\varphi_K = 70\%$, $\varphi_G = 0\%$, links: $r = 1,0$ bis $1,1$ mm, rechts: $r = 5,9$ bis $6,3$ mm

weg für 45 Umdrehungen eingezeichnet. Anhand des im Hintergrund dieses Bildes eingeblendeten Bewegungszustandes für die Drehzahl von 1660 min^{-1} soll verdeutlicht werden, daß sich bei der höheren Drehzahl von 2500 min^{-1} die Füllung mehr auflockert, also insgesamt eine größere Querschnittsfläche beansprucht.

Bei den kleinen Amplituden von etwa 1,1 mm (links) ist zu erkennen, daß die am äußeren Rand des Behälters befindliche Kugel während der 16 Umdrehungen im dargestellten Bereich genau 16 annähernd parabelförmige Flüge durchführt. Die innere hervorgehobene Kugel überstreicht ungefähr denselben Winkelausschnitt. Eine parabelförmige Flugbahn ist hier jedoch nicht zu erkennen.

Bei den größeren Amplituden von etwa 6 mm (rechts) und sonst gleichen Randbedingungen ist

bei allen Drehzahlen zu sehen, daß die randnahe Kugel ebenfalls 16 Flüge durchführt. Anhand dieser Bewegung wird deutlich, daß die Füllung an der Wand „abrollt“. Die Unregelmäßigkeiten der Flüge deuten jedoch auf die immer wieder durch Stöße unterbrochene Bewegung hin.

Die Bilder auf der rechten Seite zeigen, daß die als Beispiel herausgegriffenen Kugeln im Vergleich unterschiedlich weite Wege innerhalb des Mahlraums zurücklegen. Eine eindeutige Zuordnung zur Drehzahl ist jedoch nicht möglich, da die Kugel bei der Drehzahl von 1660 min^{-1} einen weiteren Weg zurücklegt als die bei der Drehzahl von 2500 min^{-1} . Vergleicht man jeweils die äußeren mit den inneren herausgegriffenen Kugeln, erkennt man, daß sich letztere noch unregelmäßiger bewegen. Die bei der Bewegung überstrichenen Winkelgrade stimmen

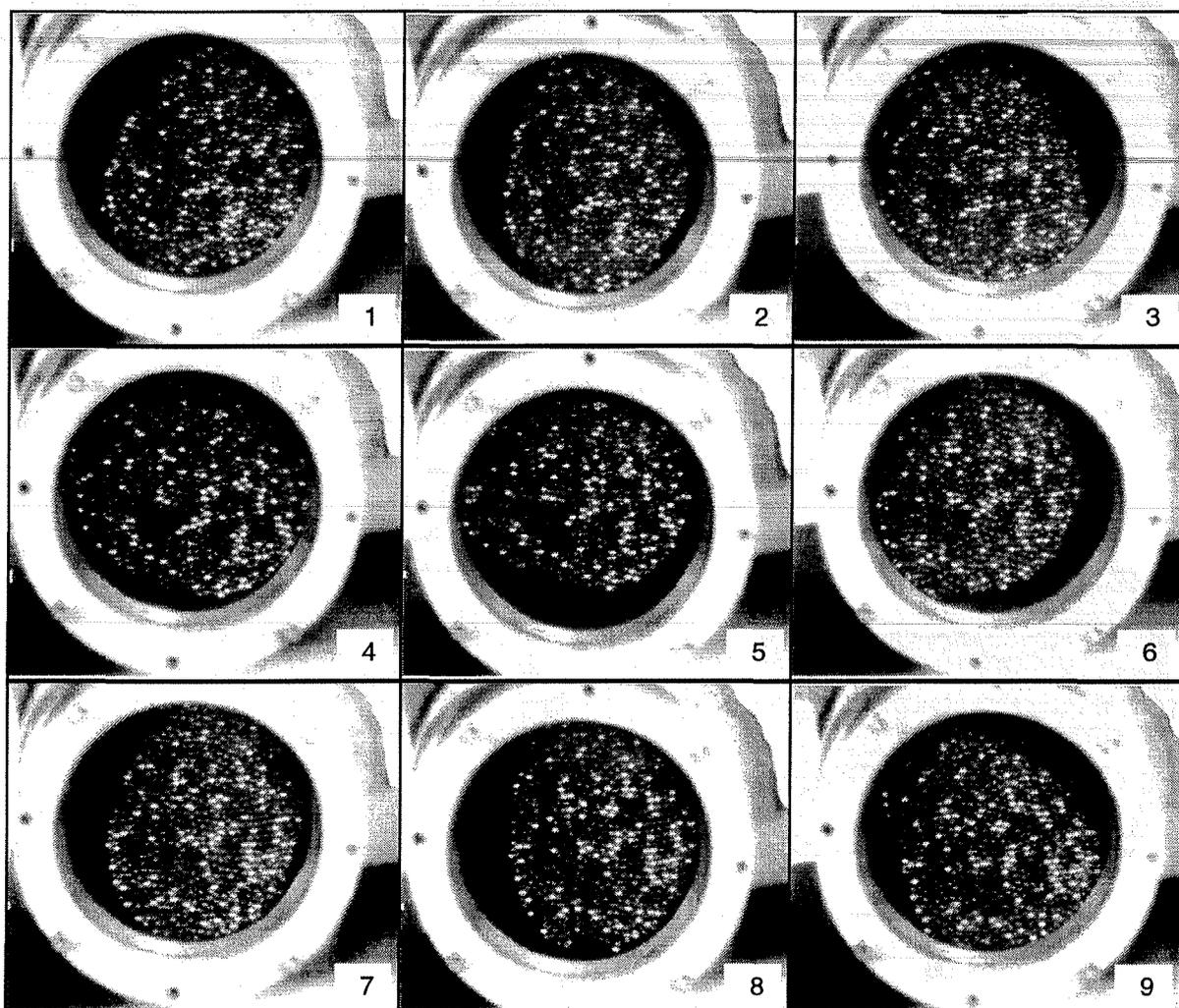


Bild 4 Bewegung der Füllung bei großer relativer Amplitude während drei Kreisschwingungen des Mahlraums. Zeitabstand zwischen den Aufnahmen 0,01 s.
 $n = 2000 \text{ min}^{-1}$, $\varphi_K = 70 \%$, $\varphi_G = 0 \%$, $r = 5,9 \text{ mm}$

bei der Drehzahl 1660 min^{-1} nicht überein.

Zur Verdeutlichung der Bewegung der Füllung bei großen relativen Amplituden soll **Bild 4** dienen. Hier ist der Bewegungsablauf für eine Füllung von 70 % bei einer Drehzahl von 2000 min^{-1} und einer Amplitude von 5,9 mm dargestellt. Der Mahlbehälter schwingt gegen den Uhrzeigersinn. Der dargestellte Zeitraum umfaßt drei Kreisschwingungen des Mahlbehälters; der Zeitabstand zwischen den einzelnen Aufnahmen beträgt 0,01 Sekunden.

Durch die verschiedenfarbigen Kugeln ist zu erkennen, daß die Bewegung wie schon beschrieben nicht allein durch ein Abrollen an der Wand gekennzeichnet ist. Vielmehr treten wiederholt Stoßvorgänge auf, wie sie z. B. in den Bildern 3 und 9 zu sehen sind.

Es wird allerdings auch deutlich, daß die Durchmischung der Füllung nicht wesentlich besser ist als beim üblichen Bewegungszustand. Trotzdem wird die Zerkleinerung des im Inneren der Füllung befind-

lichen Mahlguts wirkungsvoller sein, da sich die über die Behälterwand eingeleiteten Impulse besser bis in das Zentrum vordringen und nicht schon in den äußeren Kugelschichten abgebaut werden.

3. Ermittlung der Stoßfrequenz

Die Filmaufnahmen wurden nach der Stoßhäufigkeit ausgewertet. Ein Beispiel gibt **Tab. 1** wieder. Es zeigt sich im unteren Amplitudenbereich sowohl bei 70 als auch bei 80% Kugelfüllgrad die bereits erwähnte lineare Abhängigkeit von der Schwingfrequenz. Im Bereich der Amplituden mit unterbrochener Abrollbewegung steigt die Stoßfrequenz teilweise auf den doppelten Wert an. Daß jedoch nicht nur die Amplitude, sondern auch die Drehzahl diesen Vorgang beeinflußt, erkennt man, wenn man bei der 70%-Füllung Werte mit etwa gleicher (hoher) Amplitude und unterschiedlichen Drehzahlen vergleicht.

Kugelfüllgrad ϕ_K [%]	Beschl.-ziffer z [g]	Amplitude r [mm]	Drehzahl n [min^{-1}]	Schwingfrequenz n [s^{-1}]	Stoßfrequenz z_F [s^{-1}]	Verhältnis Stoß- / Schwingfrequenz
70	6,8	1,0	2500	41,7	39,0	0,9
70	3,4	1,1	1660	27,7	28,0	1,0
70	19,9	2,9	2478	41,3	41,2	1,0
70	9,2	3,0	1660	27,7	29,0	1,0
70	27,3	4,0	2470	41,2	41,6	1,0
70	13,2	4,3	1660	27,7	27,0	1,0
70	34,0	5,0	2465	41,1	79,4	1,9
70	16,6	5,4	1660	27,7	41,6	1,5
70	38,6	5,9	2419	40,3	72,5	1,8
70	18,8	6,1	1660	27,7	44,2	1,6
80	6,2	1,1	2273	37,9	36,4	1,0
80	5,4	2,5	1395	23,3	23,7	1,0
80	13,7	2,5	2222	37,0	36,7	1,0
80	31,4	2,5	3371	56,2	58,8	1,0
80	33,1	3,8	2804	46,7	71,4	1,5
80	13,8	4,8	1596	26,6	51,3	1,9
80	37,3	5,2	2542	42,4	85,1	2,0
80	35,0	5,7	2344	39,1	78,1	2,0
80	55,1	5,7	2941	49,0	96,6	2,0
80	18,3	6,2	1622	27,0	53,8	2,0

Tabelle 1 Stoßfrequenz z_F in Abhängigkeit von Amplitude und Drehzahl

Durchweg erreichen die Füllungen mit höherer Drehzahl größere Verhältnisse der Stoß- zur Schwingfrequenz. Im mittleren Amplitudenbereich ist das auch bei der 80%-Füllung der Fall. Bei den größten Amplituden zwischen 5,2 und 6,2mm hat die Drehzahl dann keinen Einfluß mehr auf das Frequenzenverhältnis.

Bei einem Füllgrad von 50 und 60% ist bei den 3mm-Kugeln im Behälter mit 100 mm Durchmesser kein Aufprallen an die obere Mahlbehälterwand festzustellen, da die Flughöhe der Kugeln nicht ausreicht, den größeren Freiraum über der Füllung zu überbrücken. Dies gilt ebenso für alle Füllgrade bei den 12mm-Kugeln im Behälter mit 250 mm Durchmesser, da hier die auf den Mahlraumdurchmesser bezogene relative Amplitude der Schwingung geringer ist.

4. Zusammenfassung

Die Untersuchungen zum Bewegungsverhalten, zum Leistungseintrag und zur Zerkleinerung (diese wurden bereits in /1/ vorgestellt) in der Versuchsmühle zeigen, daß sich bei großer relativer Amplitude eine Bewegungsform einstellt, die sich von der bekannten Umlaufbewegung unterscheidet. Der Einfluß der Drehzahl auf das Auftreten dieser Bewegung, bei der die Flughöhe der Füllung so groß wird, daß diese an die obere Mahlraumbegrenzung prallt, ist gering.

Durch diese Bewegung wird der Leistungseintrag sprunghaft erhöht. In hier nicht dargestellten Versuchen konnte gezeigt werden, daß beim Überschreiten der Grenzamplitude ein höherer Wirkungsgrad der Mühle erreichbar ist als bei der bisher bekannten Bewegung bei kleinen relativen Amplituden. Bei noch weiter steigender Amplitude fällt der Wirkungsgrad dann wieder ab, so daß es für jede Drehzahl einen optimalen Betriebspunkt gibt.

Auch das Zerkleinerungsverhalten ist bei großen Amplituden deutlich besser. Es wird ein höherer Feingutanteil bei derselben spezifischen Energie erzeugt; zum Teil wird bei bestimmten Parametern wie einem ungünstigen Verhältnis von Aufgabegutgröße zu Mahlkugelgröße eine Zerkleinerung erst möglich.

Literatur

/1/ Dietz, P.; Bock, U.: Institutsmitteilung Nr. 17, IMW Clausthal 1992
 /2/ Kurrer, K.-E.: Zur inneren Kinematik und Kinetik von Rohrschwingmühlen. Dissertation TU Berlin, 1986