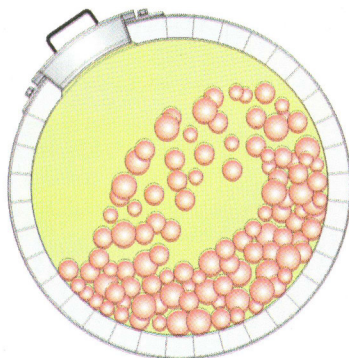
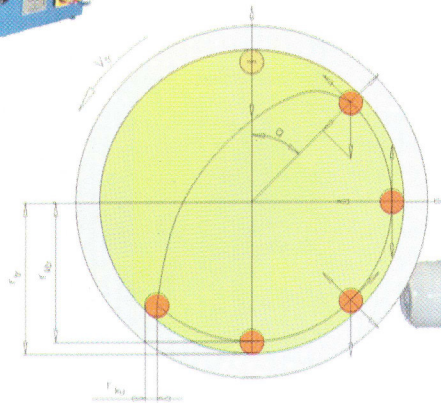


Anwendung und Auslegung von Trommelmühlen

H. Zoz, R. Reichardt, J.S. Kim

Zoz GmbH, D-57482 Wenden, Germany



Trommelmühlen:
Funktionsprinzip
Anwendungsbereiche
Aufbau einer Trommelmühle
Theoretische Berechnung
Geometrie
Auslegung in der Praxis



**Zoz
GmbH**

Zoz GmbH

Maltoz[®]-Strasse
D 57482 Wenden
Tel. +49 (0) 2762 - 9756 - 0
Fax +49 (0) 2762 - 9756 - 7
e-mail: info@zoz.de
<http://www.zoz.de>

Anwendung und Auslegung von Trommelmühlen



Der Hauptautor Henning Zoz (37) ist Geschäftsführer der Zoz GmbH, Wenden, die er in den letzten 10 Jahren von einem kleinen metallverarbeitenden Betrieb zum weltweit führenden Hersteller von Anlagen zum Mechanischen Legieren, Hochenergie- und Reaktivmahlen umgebaut hat. Neben der Beteiligung an Projekten zeichnet er für eine Reihe von Erfindungen und Entwicklungen in der Werkstoff- und Prozessentwicklung verantwortlich.

H. Zoz, R. Reichardt, J.-S. Kim

Kurzfassung

Trommelmühlen werden sowohl im Labormaßstab als auch in der industriellen Anwendung hauptsächlich zur Zerkleinerung eines Aufgabeproduktes eingesetzt. Die verschiedenen Trommelgrößen und -geometrien erfordern unterschiedliche Einstellungen der Drehzahlen und Füllgrade. Die Kollisionen und Reibungen des Mahlkugelpaketes in der Trommel bestimmen maßgeblich das Endprodukt.

Diese Veröffentlichung erklärt die Kinematik innerhalb der Trommel und leitet die Flugbahnen und Auftreffwinkel der Mahlkugeln während

des Betriebs einer Trommelmühle her. Der Anwender kann mit Hilfe der speziell für Trommelmühlen entwickelten Diagramme die Drehzahl der Trommel so vorgeben, dass sich das gewünschte Flugverhalten einstellt. Es werden verschiedene Trommeltypen (mit und ohne Hubbalken) erläutert, sowie deren Einfluss auf das Mahlverhalten bzw. die Rundlaufeigenschaften. Die hergeleiteten Formeln werden durch Fotos belegt und für den Endanwender aufbereitet dargestellt.

Abstract: Application and Construction of Drum Mills

Drum mills are generally used for particle size reduction not only in laboratory scale but also in industrial application. Various sizes and geometry of drum mills require an adjustment of processing variables like rotation speed and loading parameters. Collision and friction of all grinding medium in the drum substantially determine the characteristics of the final product. The present paper accounts for kinetics in the drum, trajectory and collision angle of grinding medium during the

milling process using a drum mill. With the help of a specially developed diagram for drum mills, the user can preset their rotational speed in order to achieve an ideal kinetic behaviour of grinding medium. Different types of drum mills (with and without lifters) are presented in relation to their effect on milling behaviour and rotational movement characteristics. Derived equations are graphically exemplified by photos in order to make them more application-friendly for the end user.

Keram. Z. 53 (2001) [5]



Roland Reichardt (30) ist Abteilungsleiter für Softwareentwicklung bei der Zoz GmbH. Nach dem Maschinenbau-Studium an der Universität Siegen arbeitet er dort seit 1997, entwickelte Software zur Regelung von Hochenergiemühlen und ist in der Entwicklung von Hochenergie-Mahltechnologien involviert.

1 Einleitung

Trommelmühlen werden hauptsächlich zur Zerkleinerung des Aufgabeproduktes eingesetzt. Im Gegensatz zu dem komplexen Mahlvorgang ist das Grundprinzip der Trommelmühle sehr einfach. Im einfachsten und auch universellsten Fall wird ein zylindrischer Behälter mit Mahlhilfsmitteln (Kugeln, Zylinder, Fluid etc.) und Mahlgut gefüllt und dieses geschlossene System (Batch-Prozess) in eine Rotationsbewegung um die Mittelachse versetzt. Nach Abstimmung der Betriebs- und Füllparameter sowie der Geometrie und Materialauswahl wird ein solcher Apparat jedenfalls Mahlarbeit verrichten und fällt in die Klasse der Kugelmühlen [1].

2 Funktionsprinzip

Kugelmühlen sind Geräte, bei denen ein Produkt einer Belastung durch (Mahl-)Kugeln ausgesetzt wird. Kugelmühlen unterscheiden sich im Wesentlichen durch die unterschiedliche Art dieser Belastung, die grundsätzlich in Scherung, Reibung und Kollision zu unterteilen ist, wobei eine klare Trennung nur selten möglich ist. Die Kugeln übernehmen

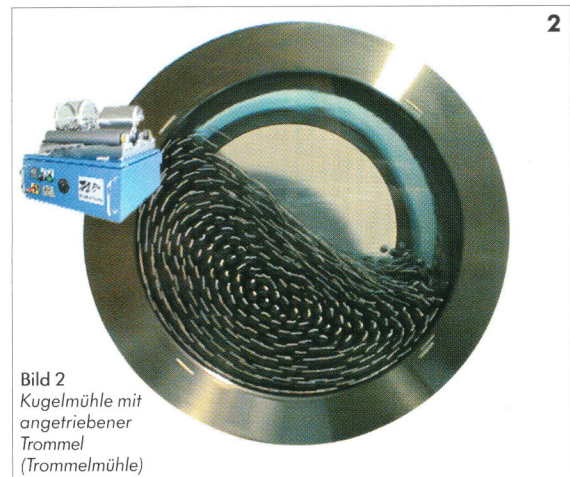


Bild 2
Kugelmühle mit
angetriebener
Trommel
(Trommelmühle)

dabei die Aufgabe, kinetische Energie von einem rotierenden Behälter (Rollenmühle, Trommelmühle) oder einem rotierenden Rotor (Simoloyer®, horizontal; Attritor®, vertikal) auf das Produkt zu übertragen. In Kugelmühlen, die einen hohen kinetischen Energieeintrag zulassen (Simoloyer®), erfolgt diese Übertragung vorwiegend durch Kollision freifliegender Kugeln (Bild 1), in niederkinetischen Systemen (Trommelmühlen) überwiegend durch Scherung und Reibung in einem abrollenden bis kaskaden/katarakt-förmig eingestellten Kugelpaket (Bild 2) [2].

3 Anwendungsbereich

Der Anwendungsbereich von Trommelmühlen reicht in Abhängigkeit eingestellter Parameter von Mischen, Dispergieren, De-Agglomerieren und Zerkleinern bis hin zur Beeinflussung der Gefügestruktur von Werkstoffen, unter Umständen mit chemischen und mit Festkörperreaktionen verbunden, was zum mechanischen Legieren führen kann [3, 4]. Aufgrund der relativ geringen Kinetik und der begrenzten Geschwindigkeit bei rotierenden Behältern ist letztere Anwendung allerdings extrem begrenzt und sollte besser in hochkinetischen Systemen durchgeführt werden [5].



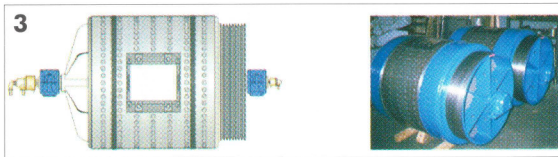
Prof. Dr. Ji-Soon Kim (41) studierte an der Hanyang Universität, Korea, promovierte an der Universität Stuttgart über Hochleistungskeramiken und war 1986–1990 Stipendiat am Max-Planck-Institut in Stuttgart. Seit 1991 ist er Professor am Institut für Materialforschung an der Universität von Ulsan, Korea; seit Februar arbeitet er als Gastforscher für ein Jahr bei der Zoz GmbH.



Bild 1
Kugelmühle mit
angetriebenem
Rotor (Simoloyer®)

Trommelmühlen finden im Grunde ausschließlich industrielle Anwendung. Das reicht von Porzellan- oder anders keramisch ausgekleideten Mühlen für die chemisch-pharmazeutische und keramische Industrie, hier insbesondere die Farbpigment- und Glasurherstellung, bis hin zur Aufbereitung von Hartphasenwerkstoffen in Stahlmühlen, oft mit Hartstoffbeschichtung. Hier kommen ebenfalls gummierte Mühlen zum Einsatz.

Zu Trommelmühlen gehören Zubehör-Baugruppen wie Zufülllager, Sicherheitsventile und Kühl- oder Heizsysteme (Bild 3). Zuzuordnende Produkte sind Siebe/Schwingsiebe, Magnetfilter, Füllrichtungen, Mahlkörper, Kugelsortieranlagen und Rührwerke, womit der gesamten Materialtransfer, das Produkthandling und der Anlagenbetrieb abgedeckt werden.



4 Aufbau einer Trommelmühle

Die Trommelmühlen in Ständerbauart sind in einem Baukastensystem aufgebaut und daher die günstigere der Bauformen. Die Ständer müssen allerdings immer auf einer Bodenplatte oder auf einem Fundament fest verankert werden. Bei Trommelmühlen in Kompaktbauart ist dieses nicht zwingend erforderlich, Trommelmühlen in Rahmenbauart sind für den Einbau in eine Etagendecke konzipiert. Trommelmühlen unterscheiden sich grundsätzlich nach folgenden Kriterien:

- das zu verarbeitende Produkt bestimmt den Trommeltyp bezüglich der Werkstoffe (Mühlenfutter wie Keramik, Gummi oder verschleißfester Stahl)
- die zu verarbeitende Produktmenge/Charge bestimmt die Baugröße
- der Zustand des Produktes und der Prozess bestimmen die Betriebsart (Nass- oder Trockenbetrieb)
- der Prozess und insbesondere der Prozessablauf bestimmt über die Notwendigkeit von Optionen wie Kühlung, Heizung oder Atmosphäre
- die Aufstellmöglichkeit bestimmt die Bauart.

5 Zerkleinerungs- und Bearbeitungsarten in einer Trommelmühle

Wenn Trommelmühlen zur Zerkleinerung des Aufgabeproduktes eingesetzt werden, kann man die Partikelgrößenreduzierung in einem solchen Prozess mit der Oberflächenvergrößerung gleichsetzen. Physikalisch betrachtet stellt sich der Mahl- und Zerkleinerungsvorgang als laufende Erzeugung von Bruchflächen dar [6, 7]. In der Literatur finden sich dazu mehrere Untersuchungen, die im Wesentlichen den Bruch von vorhandenen Fehlstellen und deren Wirksamkeit bezüglich Eigenspannung und Oberflächenrisen abhängig machen. Diese Bruchflächenenerzeugung wird in Trommelmühlen durch Reibung, Scherung und durch Schlagbelastung erzeugt. Die Verformung der einzelnen Partikel, die insbesondere durch hohe Kinetik (Schlagbelastung) hervorgerufen werden kann, kann hier dem Bereich Eigenspannung zugeordnet werden und ist ein wesentlicher Faktor, wenn es um Veränderungen im Mikrogefüge (z. B. mechanisches Legieren) gehen soll. Für das Mahlen (Zerkleinern) selber ist diese Verformung jedenfalls nur insofern von Interesse, als das sie die Bruchfortsetzung (Bruchfortpflanzung) begünstigt.

5.1 Kritische Geschwindigkeit und Abrisslinie

In der Mahltrommel (Bild 4) wirkt auf eine isoliert betrachtete Mahlkugel die Gravitationskraft:

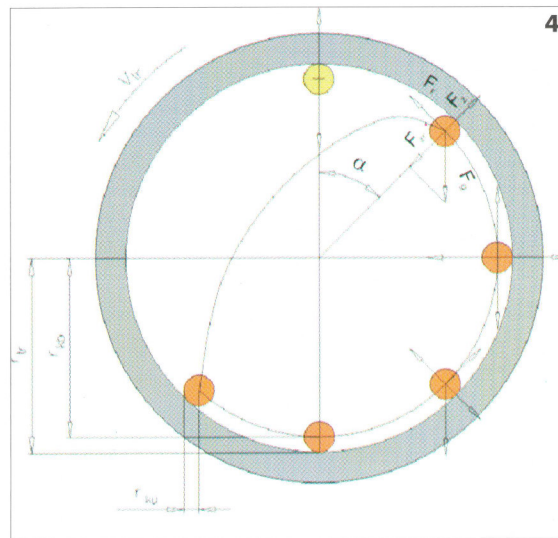


Bild 3 Mühlentrommel 800 l für Trockenmahlprozess mit Hartmetallkugeln, mit Kühlmantel, Wasser- und Zufülllager ausgerüstet

Bild 4 Einzelne Mahlkugel in einer Mahltrommel, schematisch

$$F_g = m_{ku} \cdot g \quad (1)$$

sowie die durch die Rotation hervorgerufene Zentrifugalkraft:

$$F_z = \frac{m_{ku} \cdot v_{tr}^2}{r_{kb}} \quad (2)$$

Die Umlaufgeschwindigkeit der Trommel(-Innenwand) ergibt sich aus der Umlaufgeschwindigkeit:

$$v_{tr} = 2\pi \cdot r_{tr} \cdot n_{tr} \quad (3)$$

Den Zusammenhang zwischen den Radien von Kugelbahn und Trommel beschreibt das Verhältnis:

$$r_{tr} = r_{kb} + r_{ku} \quad (4)$$

Die radiale Komponente der Gravitationskraft errechnet sich:

$$F_r = F_g \cdot \cos \alpha \quad (5)$$

Das Zusammenspiel von Gravitation und Zentrifugalkraft beschreibt das Verhältnis von Reibung und Schlag in einer Trommelmühle. Wenn die Zentrifugalkraft größer als die radiale Komponente der Schwerkraft ist, haftet die Kugel quasi an der Trommelwand, ist dieses umgekehrt, fällt die Kugel herunter. Der Gleichgewichtszustand stellt sich wie folgt dar:

$$F_z = F_r = F_g \cdot \cos \alpha \quad (6)$$

Mittels der Gleichung (6) kann man nun den Winkel der Abrisslinie, an der die Kugel die Kreisbahn verlässt und aufgrund der dann fehlenden Beschleunigung durch die Trommel parabolisch herunterfällt, bestimmen:

$$\cos \alpha = \frac{F_z}{F_g}$$

$$\cos \alpha = \frac{v_{tr}^2}{(r_{tr} - r_{ku}) \cdot g} \quad (7)$$

Bei der Annäherung, dass der Radius der Kugelbahn gleich dem Radius des Trommel ist, ergibt sich der Winkel der Abrisslinie ($r_{tr} = r_{kb}$):

$$\cos \alpha = \frac{4\pi^2}{g} \cdot r_{tr} \cdot n_{tr}^2 \quad (8)$$

und zeigt anschaulich, dass sich die Abrisslinie mit größerem Trommelradius und insbesondere mit höherer Drehzahl, nach oben verschiebt. Wird die Zentrifugalkraft gleich der Gravitationskraft, was für den Gleichgewichtszustand im Zenit, also für den Wert $\alpha = 0$, gilt, so nennt man die dazu notwendige Geschwindigkeit bei festen Trommel- und Kugelradien, die kritische Drehzahl (n_k).

In der Literatur finden sich dazu verschiedene Berechnungsmodelle (Daviskreis, Wurfparabel), die eben von einer isolierten Kugel ausgehen und daher Näherungswerte aufzeigen, da sich die eingesetzten Mahlkugeln gegenseitig beeinflussen [8]. Die nachfolgende Formel für die kritische Drehzahl der einzelnen Kugel kann daher in Anwendung auf ein Kugelpaket nur annäherungsweise gelten:

$$F_z = F_g \cdot \cos \alpha \quad \alpha = 0 \rightarrow \cos \alpha = 1$$

$$F_z = F_g \quad (9)$$

Daraus folgt:

$$\frac{m_{ku} \cdot 4\pi^2 \cdot r_{tr}^2 \cdot n_{tr}^2}{r_{kb}} = m_{ku} \cdot g$$

$$\frac{m_{ku} \cdot 4\pi^2 \cdot r_{tr}^2 \cdot n_{tr}^2}{r_{tr} - r_{ku}} = m_{ku} \cdot g$$

$$n_{tr}^2 = \frac{(r_{tr} - r_{ku}) \cdot g}{4\pi^2 \cdot r_{tr}^2} \quad (10)$$

Die kritische Drehzahl ($r_{tr} = r_{kb} + r_{ku}$) errechnet sich:

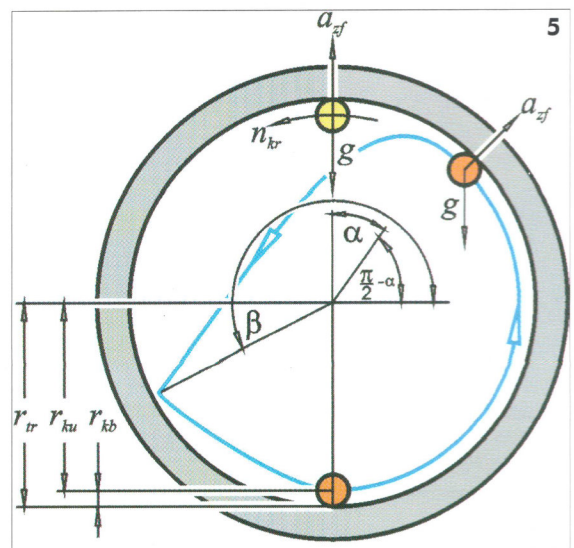
$$(r_{tr} = r_{kb} + r_{ku}) \quad n_{tr} = \sqrt{\frac{0,25}{r_{tr}} + \frac{0,25 \cdot r_{ku}}{r_{tr}^2}} \quad \left[\frac{1}{s} \right] \quad (11)$$

Da der Kugelradius erheblich kleiner ist und sein muss als der Trommelradius, kann man hier durch Annäherung, in dem man den Kugelradius auf Null und somit den Radius der Kugelbahn abermals mit dem der Trommel gleichsetzt, eine einfachere Formel erhalten. Die kritische Drehzahl ($r_{tr} = r_{kb}$) errechnet sich:

$$(r_{tr} = r_{kb}) \quad n_{tr} = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{1}{r_{tr}}} \quad \frac{0,5}{\sqrt{r_{tr}}} \quad \left[\frac{1}{s} \right] \quad (12)$$

5.2 Flugbahn

Durch die Rotation der Trommel wird die isoliert betrachtete Kugel nach oben bewegt. Mangels Zentrifugalkraft verliert die Kugel beim Abrisswinkel α die Haftung an der Trommel. An diesem Punkt startet der Flug durch die Trommel. Die Flugrichtung ist beim Abrisspunkt tangential zur Trommelwand (Bild 5).



Die Fluggeschwindigkeit kann in die x- und y-Komponenten zerlegt werden. In x-Richtung (horizontal) bleibt die Geschwindigkeit während des Fluges konstant. In y-Richtung (vertikal) wird die Kugel nach unten beschleunigt. Die Position der Kugel beim Flug durch die Mahleinheit errechnet sich, für x- und y-Koordinaten getrennt, wie folgt [9]:

$$x(t) = x_0 - v_x \cdot t \quad y(t) = y_0 + v_y \cdot t - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \quad (13)$$

Durch einsetzen in (13):

$$x_o = v_y = v \cdot \sin \alpha = r \cdot \cos \alpha, \quad v_x = v \cdot \cos \alpha,$$

und $v_y = v \cdot \sin \alpha$ ergibt sich:

Bild 5
Einzelne Mahlkugel
in einer
Mahltrommel,
schematisch

$$x(t) = r \cdot \sin \alpha - v \cdot t \cdot \cos \alpha \quad (14)$$

$$y(t) = r \cdot \cos \alpha + v \cdot t \cdot \sin \alpha - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \quad (15)$$

bezogen auf dem Kugelbahnradius mit

$$W = \frac{v \cdot t}{r} \text{ und } m \cdot g \cdot \cos \alpha = m \cdot \frac{v^2}{r}; \quad g = \frac{v^2}{r \cdot \cos \alpha}$$

$$\frac{x(t)}{r} = \sin \alpha - W \cos \alpha$$

$$\frac{y(t)}{r} = \cos \alpha + W \sin \alpha - \frac{1}{2r} \cdot \frac{v^2}{r \cdot \cos \alpha} \cdot t^2 = \cos \alpha + W \left(\sin \alpha - \frac{1}{2} \cdot \frac{W}{\cos \alpha} \right) \quad (16)$$

Die Koordinaten des Auftreffpunktes können leicht errechnet werden, wenn die Flugbahn der Kugel den Trommelradius kreuzt:

$$\left(\frac{x(t)}{r} \right)^2 + \left(\frac{y(t)}{r} \right)^2 = 1 \quad (17)$$

Nach Bestimmung der Nullstellen und Umrechnung der Auftreffkoordinaten zum Auftreffwinkel ergibt sich zwischen Auftreffwinkel β und Abrisswinkel α der Zusammenhang wie folgt:

$$\text{Falls } K = \left(\sin \alpha - \frac{1}{2} \cdot \frac{W}{\cos \alpha} \right),$$

kann die Gleichung (17) dargestellt werden:

$$(\sin \alpha - W \cos \alpha)^2 + (\cos \alpha + W \cdot K)^2 = 1$$

$$W = 4 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \quad (18)$$

Durch einsetzen in (15):

$$\frac{x(t)}{r} = \cos \beta = \sin \alpha - (4 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha) \cos \alpha = 4 \sin^3 \alpha - 3 \sin \alpha = -\sin(3\alpha) \quad (19)$$

ergibt sich als Ziel der Zusammenhang:

$$\beta = \frac{\pi}{2} + 3 \cdot \alpha \quad \alpha = \frac{2\beta - \pi}{6} \quad (20)$$

Durch Umstellung der Gleichung (10) ergibt sich:

$$n = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{r} \cdot \cos \alpha} \quad (r_{tr} \gg r_{ku}) \quad (21)$$

Die Drehzahl n_β bei Auftreffwinkel β ergibt sich dann durch Einsetzen von α :

$$n_\beta = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{r} \cdot \cos \left(\frac{2\beta - \pi}{6} \right)} \quad (22)$$

Diese Formel ist nur für eine einzige Kugel ohne Schlupf zur Trommelwand gültig. Während des Betriebs einer Trommel-

mühle befinden sich viele Kugeln in der Trommel, von denen sich nur wenige am Trommelrand befinden, die meisten sind jedoch weiter innerhalb. Je näher sich die Kugeln am Mittelpunkt der Trommel befinden, desto kleiner wird die Zentrifugalbeschleunigung, die auf sie wirkt, folglich wird der Abrisswinkel kleiner und die Kugel fliegt nicht so weit durch die Trommel.

In letzter Konsequenz müssen sich alle anderen Kugeln unterhalb der Flugbahn der äußeren Kugelschicht befinden, weil diese Kugeln die größte Geschwindigkeit haben. Zur Überprüfung der Formel wurde während des Betriebs ein Foto einer Plexiglasmahltrommel erstellt. Die Mahltrommel wird durch zwei Rollen angetrieben (Rollenmühle RM1). Um den Schlupf zwischen den Kugeln und der Trommelwand auszuschließen, wurde die äußere Kugelschicht an die Trommel geklebt (Bild 6). Der nutzbare Innenradius der Mahltrommel reduziert sich dadurch auf 7 cm. Die Drehzahl bei

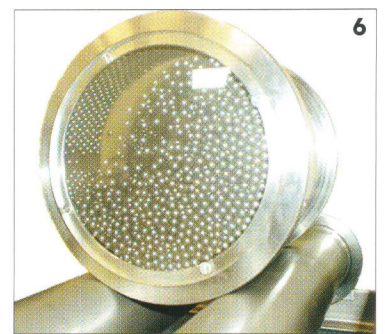


Bild 6
Plexiglasmahltrommel, äußere Kugelschicht wurde mit Trommelwand verklebt

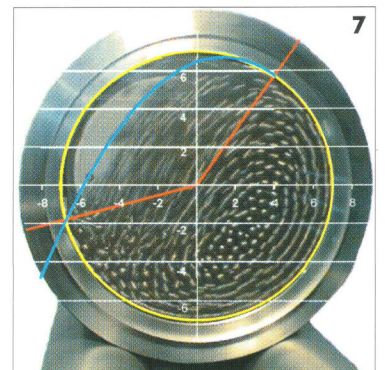


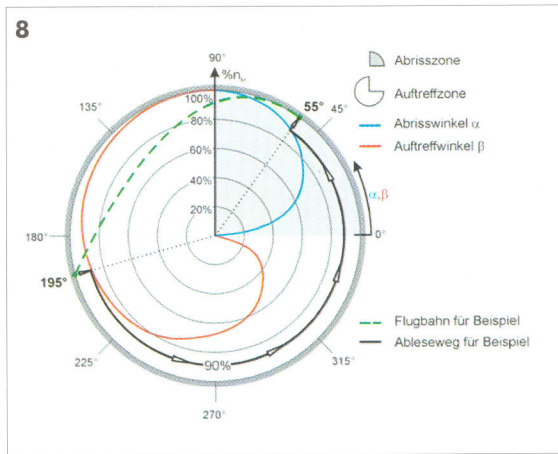
Bild 7
Foto einer Plexiglasmahltrommel mit eingeblendeter Computersimulation

der Aufnahme ist 90 % der kritischen Drehzahl. Die Trommel ist zu 50 % mit 5 mm Stahlkugeln gefüllt.

Mit Hilfe eines Computerprogramms wurde der Abrisswinkel, die Flugbahn und der Auftreffwinkel für diese Trommel visualisiert. Bild 7 zeigt das Foto der Plexiglasmahltrommel und die Computersimulation deckungsgleich. Wie deutlich zu erkennen ist, befinden sich alle Kugeln auf oder unterhalb der blau markierten Flugbahn.

Unter Zuhilfenahme des Diagramms aus Bild 8 ist es möglich, den Zusammenhang von Abrisswinkel, Auftreffwinkel und Drehzahl abzulesen. Wenn einer der drei Parameter vorhanden ist, können die anderen beiden daraus abgele-

Bild 8
Zusammenhang
zwischen Drehzahl,
Abriss- und
Auftreffwinkel



sen werden. Der Kreis symbolisiert die Trommel. Die Drehzahl nimmt von innen nach außen konzentrisch zu und ist angegeben als Prozentzahl der kritischen Drehzahl, die für den jeweiligen Trommeldurchmesser bestimmt werden muss. Die rote Linie gibt den Auftreffwinkel in Abhängigkeit der Drehzahl an, die blaue Linie den Abrisswinkel in Abhängigkeit der Drehzahl. Die Kugeln können nur im Quadranten oben rechts losfliegen und nur in einem der drei anderen Quadranten landen.

Wenn z. B. die Drehzahl und der Abrisswinkel gesucht, und der Auftreffwinkel von 195° vorgegeben ist, geht man bei 195° in Richtung Mittelpunkt bis zur roten Linie. Die Drehzahl für diesen Abrisswinkel kann man anhand des Abstandes vom Mittelpunkt bestimmen, in diesem Fall 90 % der kritischen Drehzahl. Von diesem Punkt aus folgt man entlang des 90 %-Kreises bis zur blauen Linie, von dort aus vom Mittelpunkt weg nach außen. Der Abrisswinkel wird auf diese Weise mit 55° abgelesen (Bild 8).

In der Praxis wird eine Trommelmühle mit verschiedenen Mahlkugeln gefüllt, verschiedenartiges Pulver wird gemahlen und verschiedene Materialien zur Trommelauskleidung werden verwendet. Die unzähligen Kombinationen dieser Materialien haben verschiedene Reibungskoeffizienten und verschieden raue Oberflächen. Verständlicherweise kann man schwerlich voraussagen, wie diese Materialien miteinander in Wechselwirkung stehen.

All diesen Kombinationsmöglichkeiten gemeinsam ist der Schüttwinkel γ . Bis zum Schüttwinkel ordnen sich die Kugeln stabil an, oberhalb des Schüttwinkels fängt die Oberfläche an, nach unten zu rutschen. Der Schüttwinkel kann einfach bestimmt werden, indem die Trommel langsam rotiert und dann gestoppt wird. Die Oberfläche des Kugelpaketes ordnet sich entlang des Schüttwinkels an. Dieses Verhalten ist unabhängig vom Füllgrad der Trommel, jedoch abhängig vom Reibungskoeffizienten der sich berührenden Materialien. Sobald die Trommel rotiert, steigt der Winkel der Oberfläche und die Kugeln rollen entlang der Oberfläche nach unten. Der Abrollwinkel δ ist nur wenig größer als der Schüttwinkel (Bild 9).

Für den Betrieb der Trommelmühle ist es wichtig, den Auftreffwinkel so zu bestimmen, dass die Kugeln im Kugelpaket landen und nicht in das Trommelfutter fliegen, wobei unter Umständen das Trommelfutter durch den Aufprall der Kugel beschädigt werden kann. Die Drehzahl der Trommel muss so angepasst werden, dass alle Kugeln nur im bzw. auf dem Kugelpaket landen, um die Standzeit der Trommelmühle nicht negativ zu beeinflussen und unnötige Kontaminationen des Produktes durch Materialien des Trommelfutters und der Kugeln zu vermeiden.

Da sich der Winkel des Kugelpaketes während des Betriebs, wie aus Bild 9 ersichtlich, nicht wesentlich ändert, kann der minimale Auftreffwinkel näherungsweise aus der Schüttwinkel bestimmt werden, indem die Strecke von der Unterkante der Oberfläche zur Oberkante der Trommel gemessen wird. Dies ist in der Praxis recht einfach möglich, da die Trommeln der Mühlen an der Trommelwand meistens eine Öffnung zum Befüllen haben. Der Auftreffwinkel β_{\min} für den Betrieb mit maximal zulässiger Drehzahl – ohne das die Kugeln direkt in das Trommelfutter treffen – errechnet sich aus dem Abstand der Kugeloberfläche und dem Trommelradius, wie folgt:

$$\beta_{\min} = \arcsin \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{l}{r} \right)^2 \right) \quad (23)$$

Mit Hilfe des Diagramms aus Bild 10 kann die maximale Drehzahl in Abhängigkeit des Verhältnisses l/r abgelesen werden.

So stellt sich z. B. in einer zu 50 % gefüllten Trommel mit dem Radius $r = 22$ cm ein Schüttwinkel von 30° ein. Die Länge l wird mit 38 cm gemessen, woraus sich ein Verhältnis von $l/r \approx 1,7$ ergibt.

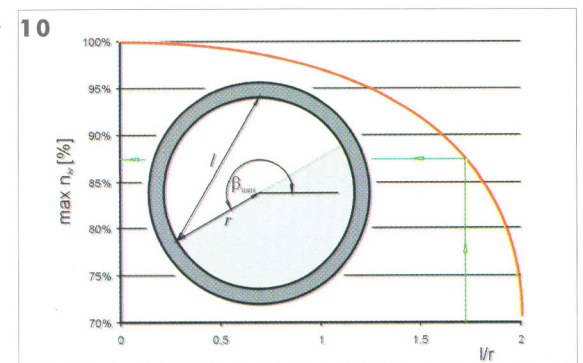
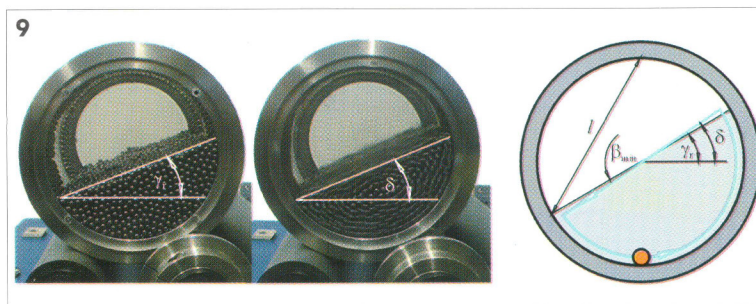
Die kritische Drehzahl der Trommel beträgt ca. 64 min^{-1} (siehe Formel 3). Aus dem Diagramm kann eine maximale Drehzahl von 87 % der kritischen Drehzahl bestimmt werden. Die Trommel sollte mit dieser Füllung also nicht schneller als 56 min^{-1} drehen, damit die Kugeln nicht bis in das Futter fliegen.

5.3 Sonderfall Hubbalken

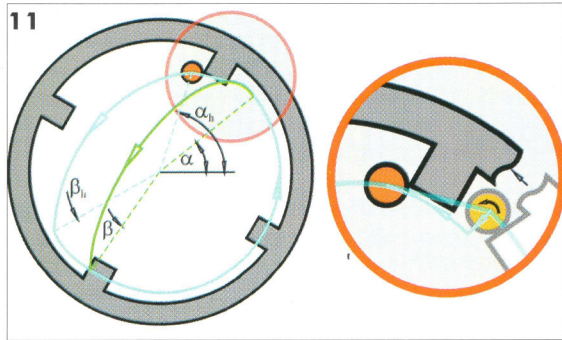
Eine Sonderbauform der Trommelmühlen stellen die Trommeln mit Hubbalken dar. Hubbalken sind axial an der Trommelwand befestigte Balken, die das Kugelpaket anheben. Der Betrieb mit Hubbalken unterscheidet sich dadurch, dass die Kugeln weiter nach oben gehoben werden und somit auch weiter durch die Trommel fliegen. Dies geschieht schubweise und zwar immer dann, wenn ein Hubbalken aus dem Kugelpaket tritt.

Bild 9
Schüttwinkel γ und
Abrollwinkel δ

Bild 10
Maximale Drehzahl
in Abhängigkeit der
Kugelpaketoberfläche
zur Oberkante der
Trommel



Im Gegensatz zur Trommel ohne Hubbalken können die Kugeln bei Trommeln mit Hubbalken nicht vom Abrisswinkel α an losfliegen, sondern beginnen ab diesem Winkel den Hubbalken entlang nach unten zu rollen (siehe Bild 11, rechts). Dabei werden Sie durch den Hubbalken in Drehrichtung zwangsgeführt, bis die Kugeln beim neuen Abrisswinkel $\alpha_n > \alpha$ vom Hubbalken fallen, auf der Parabelbahn durch die Trommel fliegen und beim Auftreffwinkel $\beta_n < \beta$ landen. Die beiden Winkel α_n und β_n sind abhängig von den Dimensionen des Hubbalkens und vom Füllgrad der Trommel.



Die Kugeln, die nicht durch die Hubbalken zwangsgeführt werden, zeigen das gleiche Flugverhalten wie in Trommeln ohne Hubbalken. Im Bild 12 ist zu erkennen, dass das durch den Hubbalken zwangsgeführte Kugelpaket weiter fliegt, als die nachfolgenden Kugeln, die nicht unter dem Einfluss des nachfolgenden Hubbalkens stehen. Dieser Schwall an Kugeln wird in dieser Trommel mit vier Hubbalken viermal pro Umdrehung durch die Trommel bewegt. Während des Betriebes kann eine Trommelmühle mit Hubbalken zum Schwingen kommen, weil die Bewegung innerhalb der Trommel ungleichmäßig ist und die fliegenden Kugelpakete eine Unwucht erzeugen. Trommelmühlen mit Hubbalken sind daher höheren Belastungen ausgesetzt und müssen entsprechend ausgelegt werden. Der Einsatz von Hubbalken wird oft mit der durch sie hervorgerufenen höheren kinetischen Energie des Kugelpaketes begründet, dies ist bei gleicher Drehzahl einer Trommel ohne Hubbalken auch zutreffend. In der Praxis ist jedoch vom Einsatz der Hubbalken abzuraten, da die Mühle und insbesondere die Mühlenfutter, zu denen die Hubbalken ja gehören, signifikant höheren Belastungen ausgesetzt sind. Schließlich ist die gleiche kinetische Energie bei Trommeln ohne Hubbalken durch eine Erhöhung der Drehzahl zu erzielen.

5.4 Geometrie, Skalierung

Der Trommeldurchmesser ist die wesentliche geometrische Komponente der Mahltrommel, da dieser bei fester Rotati-



ongeschwindigkeit die Umfangsgeschwindigkeit der Trommel bestimmt. Bei bestimmter Kugel- und Mahlgutfüllung wird somit auch die Mahlleistung mit dem Verhältnis von Reibung und Schlagbelastung beschrieben. Da ein wesentliches Ziel eines technisch bewirkten Vorganges die Reproduzierbarkeit ist, soll der Einfluss der Trommelstirnwände auf die Relativbewegungen von Mahlkörpern, Mahlgut und Trommel-Innenwand möglichst eliminiert werden. Das ist technisch nur annähernd realisierbar und hat zur simplen Konsequenz, dass die Mühle nicht zu kurz sein soll.

Zur Bestimmung der Mahlleistung/Volumen muss der Trommeldurchmesser in Verbindung mit der Trommeldrehzahl und allen einzelnen Füllparametern betrachtet werden. Daraus geht bereits hervor, dass es keine insofern festlegbare Proportion zwischen Trommeldurchmesser und Trommellänge geben kann, da letztere bezüglich der Mahlfunktion nur in vorgenannter Abhängigkeit zu bestimmen ist. So muss bei Verwendung von kugelförmigen Mahlkörpern die Trommellänge, um einen freien Fall oder ein freies Abrollen überhaupt zu gewährleisten, betragen:

$$\text{Trommellänge} \geq 2.5 \cdot D_{K \max} \quad (24)$$

Da nun aber die Trommelstirnwände die Kinetik des Mahlvorganges möglichst nicht beeinflussen sollen, ist die Trommellänge wesentlich größer zu wählen:

$$\text{Trommellänge} \geq 15 \cdot D_{K \max} \quad (25)$$

Unter Vernachlässigung der Einflüsse der Trommelstirnwände auf den Mahlprozess, was ja angestrebt ist, wäre daher die Trommellänge eine rein technische Größe zur Volumenbestimmung. In der Literatur finden sich dazu Empfehlungen mit einer großen Bandbreite:

$$\frac{\text{Durchmesser der Trommel}}{\text{Länge der Trommel}} \Rightarrow \frac{1}{0.5} \text{ bis } \frac{1}{1.6} \quad (26)$$

Die Füllparameter (Mahlkörperstückvolumen und Dichte, Mahlgutstückvolumen und Dichte sowie die Füllgrade [%]) nehmen Einfluss auf die Kinetik des Systems. Der absolute Füllgrad (Mahlkörper und Mahlgut) entscheidet bei festgelegter Umfangsgeschwindigkeit (n_k %) über die verbleibende Fall- bzw. Abrollhöhe der Mahlkörper, die bei maximaler potentieller Energie die Umlaufbahn an der Abrisslinie verlassen. Des weiteren bestimmt der absolute Füllgrad bei festgelegten Mahlkörpern und Mahlgut die Anzahl der Mahlarbeit leistenden Berührungspunkte. Man könnte insofern auch zwischen einer kinetischen Mahlleistung und einer kapazitiven Mahlleistung unterscheiden. Die hier so bezeichnete kinetische Mahlleistung wird sowohl durch den Trommeldurchmesser als auch durch die Füll- und Betriebsparameter bestimmt. Zwingend zu erwarten ist jedenfalls, dass bei entsprechender Einstellung der anderen Parameter in einer Kugelmühle mit folgendem Verhältnis jeweils die gleiche kinetische Mahlleistung zu erzielen sein muss:

$$\frac{\text{Durchmesser}}{\text{Länge}} \text{ von } \frac{1}{1.25} \text{ oder } \frac{1}{1} \text{ oder } \frac{1.25}{1} \quad (27)$$

Bild 11
Schematische Darstellung der Kugelflugbahn bei einer Trommel mit Hubbalken

Bild 12
Schwallartige Bewegung des Kugelpaketes in der Trommelmühle mit Hubbalken

13

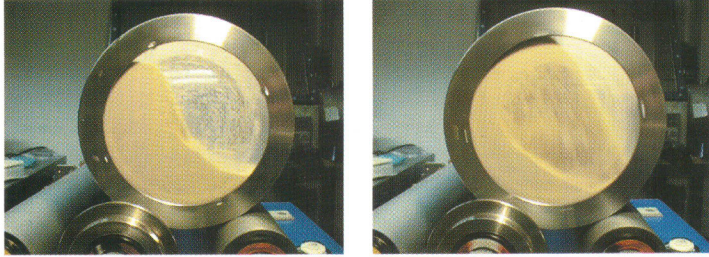


Bild 13
Kaskaden-Effekt und
Katarakt-Effekt (r),
beispielhaft beim
Sand

Die praktische Realisierung der Geometrie der Trommel ist daher denkbar einfach. Es handelt sich schlicht um die Aufgabe, mit möglichst wenig Oberfläche (Material) ein möglichst großes zylinderförmiges Volumen darzustellen. Daher soll die Länge der Trommel gleich dem Durchmesser sein. Dieses Verhältnis ändert sich erst durch bauphysikalische Grenzen, da z. B. eine Trommelmühle mit einem Trommeldurchmesser von >3 m schlecht durch Hallentore passt und durch die übergroßen Abmessungen der Transport an Land sehr erschwert wird.

Für eine lineare Produktivitätssteigerung durch Veränderung der Baugröße muss bei einer Trommelmühle nicht nur das Volumen mit entsprechend den Füllmengen berechneten Antrieben, sondern insbesondere die Kinetik in der Mühle berücksichtigt werden. Aufgrund einer Vergrößerung des Trommeldurchmessers bei proportional abgesenkter Drehzahl (n_k %) wird die Fallhöhe der frei fliegenden Kugeln und somit deren kinetische Energie ansteigen. Das Produkt wird beim Aufprall stärker verformt oder zerschlagen.

Bei Verwendung einer größeren Trommel mit gleichem Länge-Durchmesser-Verhältnis liegt bei gleichem Füllgrad eine höhere Kugelschüttung vor, wodurch das Produkt in tieferliegenden Kugelschichten einem höheren Druck ausgesetzt und somit stärker zerrieben wird.

Bei Verwendung größerer Mahlkugeln in einer wie oben beschrieben größeren Trommel vermindern sich zudem auch noch die Anzahl der Berührungspunkte, hingegen ist das Schüttgewicht in etwa konstant.

Wenn man die Trommel hingegen nur verlängert, bleiben die für den Mahlprozess verantwortlichen Parameter konstant. Aus statischen Gründen ist aber die Trommel einer Trommelmühle, jedenfalls unter Einbeziehung wirtschaftlicher Aspekte, nicht beliebig verlängerbar. Ferner ist dazu die wirtschaftliche Beschickungsmöglichkeit einer Mühle eine wesentliche Barriere.

So können z. B. beim Beladen einer überproportional langen Mühle schlecht fließfähige Produkte ohne mechanische Unterstützung nicht hinreichend in die Trommel eingefüllt werden. Beim Entladen von Nassmühlen werden z. B. fixo-

trope Schlicker durch das in der Regel zentrisch angeordnete Füllloch nur schwer oder gar nicht zu Entladen sein.

Hierzu gibt es allerdings Unterstützungsmethoden, wie das Entleeren unter Druck bei gleichzeitigem Einblasen von Luft, durch eine Steigleitung/Ringdüse am Seiher sowie seitlich über die Stirnwände und/oder die Verwendung mehrerer Fülllöcher. Bei Trockenmühlen ist darauf zu achten, dass extrem lange Trockenmühlen (Länge = $1,5 \varnothing$) auch eine entsprechend verlängerte Öffnung zum Beschicken aufweisen.

Abschließend ist die Skalierung nicht trivial, und meistens kommt man nicht umhin, neue Betriebsparameter für eine größere oder anders beschickte Trommelmühlen zu suchen.

5.5 Auslegung in der Praxis

In der Praxis werden Trommelmühlensysteme so eingestellt, das während des Betriebs in etwa der Übergang zwischen Kaskaden- und Katarakt-Effekt erreicht wird, das heißt, das Mahlkugeln gerade eben abheben, aber in jedem Fall innerhalb der Kugelfüllung wieder auftreffen (Bild 13).

Dieser Zustand wird zwischen 60 und 80 % der kritischen Drehzahl (n_k) erreicht, wenn gleichzeitig der Füllgrad (Totalfüllmenge) zwischen 50 und 70 % einer Trommel mit dem Verhältnis Durchmesser : Länge von 1 eingestellt wird.

Literatur

- [1] H. Zoz: Trommelmühlen – allgemeine Betrachtungen, *Keram. Z.* **47** (1995) [3] 190–192
- [2] H. Zoz: Performance of the Simoloyer®, 4th International Conference on Powder Metallurgy in Aerospace, Defense and Demanding Applications, eds. P. S. Goodwin, R. B. Schwarz, in Anaheim, Los Angeles, USA, May 08-10, 1995
- [3] J. S. Benjamin: *Metall. Trans.* **1** (1970) 2943–2951
- [4] J. S. Benjamin, T. E. Volin: *Metall. Trans.* **5** (1974) 1929–1934
- [5] H. Zoz, D. Ernst, H. Weiss, M. Magini, C. Powell, C. Suryanarayana, F. H. Froes: Mechanical Alloying of Ti-24Al-11Nb (at %) using the Simoloyer®, *Metall* **50** (1996) [9] 575–579
- [6] K. Schönert: Über die Eigenschaften von Bruchflächen, *Chemie-Ingenieur-Technik* **46** (1974) 711–752
- [7] H. Rumpf, K. Schönert: Zerkleinern, *Ullmanns Enzyklopädie der Technischen Chemie*, Weinheim 1972
- [8] W. Errass: Über Zerkleinerungscharakteristiken von Labor-Kugelmühlen, Diss. TH Zürich, 1961
- [9] K. Reichardt: Unveröffentlichte Unterlagen (März 2001)