

II Laborkugelmühle

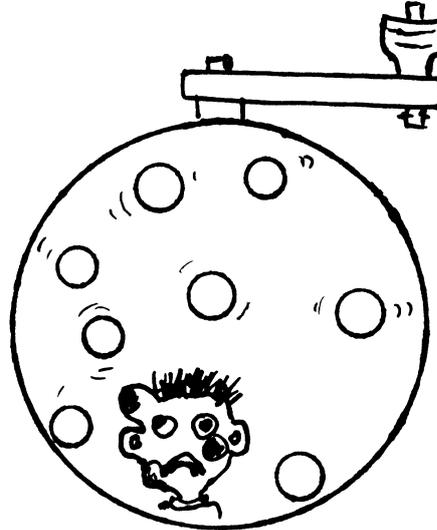
Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Wiederholung wichtiger theoretischer Grundlagen	3
	2.1 Drehbewegungen	3
3	Grundlagen zur Laborkugelmühle	5
	3.1 Beschreibung des Zerkleinerungsvorganges	5
	3.2 Arbeitsdrehzahlen	6
	3.3 Füllung der Mahltrommel	7
	3.3.1 Mahlkörper	7
	3.3.2 Mahlgut	8
4	Versuchsteil	10
	4.1 Versuchsaufbau	10
	4.2 Versuchsplanung	11
	4.3 Rücksprache vor Versuchsbeginn	12
	4.4 Versuchsdurchführung	13
5	Was war wichtig?	14
6	Formelzeichen	15
7	Literaturverzeichnis	16

II Laborkugelmühle

1 Einleitung

Das Zerkleinern stellt ein wichtiges Aufgabengebiet der Verfahrenstechnik dar. Es spielt bereits seit der anfänglichen Entwicklung unserer heutigen Technik eine wichtige Rolle (z.B. Zerkleinern von Getreide oder Farbstoffen). Man erkennt den bedeutenden Stellenwert unter anderem am Energiebedarf der Industrie für Zerkleinerungsaufgaben, der heutzutage weltweit bei ca. 6% [Hemming] des erzeugten Stromes liegt.



Die Qualität von Stoffen, ihr physikalisches und chemisches Verhalten hängen von der Partikelgröße der einzelnen Teilchen und von deren Verteilung ab. Der Grund dafür liegt in den Auswirkungen auf die Größe der Partikeloberfläche. Denkt man an das Lösen von Zucker im Kaffee oder an das Verbrennen von Holz wird die Bedeutung der Partikelgröße verständlich. Zerkleinerungsaufgaben finden daher in fast allen Industriebereichen statt von A wie Abfallverwertung bis Z wie Zementherstellung.

Die Zerkleinerungsaufgaben haben sich aus verschiedenen Aufgabenstellungen entwickelt. Die dabei verwendeten Apparate wurden weiterentwickelt und aufgrund gesammelter Erfahrungen verbessert. Durch die vielen unterschiedlichen Aufgaben der einzelnen Betriebe und Industrien ist eine sehr große Zahl unterschiedlicher Zerkleinerungsapparate entstanden. Der Zerkleinerungsvorgang kann dabei durch verschiedene physikalische Vorgänge erfolgen, wie beispielsweise: Druck, Prall, Reibung, Scherung oder Schneiden.

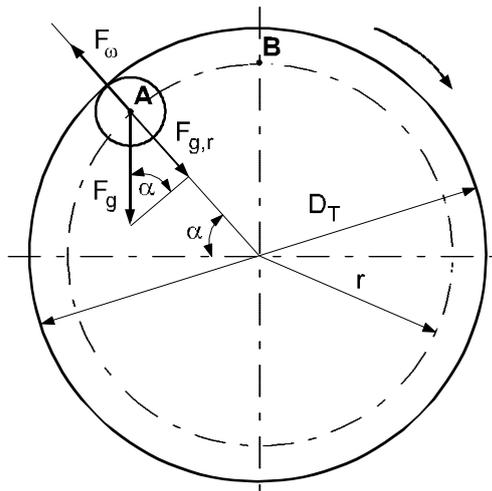
Einer der wichtigsten Apparate zur Zerkleinerung von mittelharten bis harten Produkten ist die Kugelmühle. Sie wird beispielsweise bei der Keramik- und der Zementherstellung verwendet. Neben großen Kugelmühlen finden ebenfalls kleinere Ausführungen im Labor Verwendung, wenn es um die Qualitätskontrolle oder das Forschen nach neuen Materialien geht.

2 Wiederholung wichtiger theoretischer Grundlagen

2.1 Drehbewegungen

Betrachten wir eine Kugel (Abb.II-1), die sich auf einer Kreisbahn an der Innenwand einer Trommel dreht.

Frage: Wie groß muß die minimale Geschwindigkeit bzw. die Drehzahl der Kugel sein, damit sie auf der Kreisbahn bleibt?



- m : Masse der Kugel in kg
- ω : Winkelgeschwindigkeit in 1/s
- D_T : Innendurchmesser der Trommel in m
- r : Radius der Kreisbahn in m
- α : Winkel (Position der Kugel) in °

Abb.II-1: Kugel auf Kreisbahn

Betrachten wir die vorhandenen Kräfte:

F_ω : Zentrifugalkraft in N
 $F_\omega = m \cdot r \cdot \omega^2$

F_g : Schwerkraft in N
 $F_g = m \cdot g$

$F_{g,r}$: Radiale Komponente der Schwerkraft in N
 $F_{g,r} = m \cdot g \cdot \sin \alpha$

Auf die Kugel wirken (Abb.II-1) die Fliehkraft und die Schwerkraft. Damit die Kugel auf ihrer Kreisbahn bleibt, muß die Zentrifugalkraft größer oder gleich groß der Komponenten $F_{g,r}$ der Schwerkraft sein, die radial wirkt:

$$F_\omega \geq F_{g,r}$$

Im Gleichgewicht gilt:

$$F_\omega = F_{g,r}$$

das heißt

$$m \cdot r \cdot \omega^2 = m \cdot g \cdot \sin \alpha$$

oder

$$\omega^2 = \frac{g \cdot \sin \alpha}{r}$$

(II.1)

Die radiale Komponente der Schwerkraft ist maximal im Punkt B.

Dort gilt:

$$\alpha = 90^\circ$$

und somit

$$\sin\alpha = 1$$

Die minimale Winkelgeschwindigkeit die erforderlich ist, damit die Kugel nicht nach unten fällt, bezeichnet man als kritische Winkelgeschwindigkeit ω_k . Sie errechnet sich im Punkt B aus Gleichung (II.1) zu

$$\omega_k^2 = \frac{g}{r} \quad (II.2)$$

Für kleine Durchmesser der Mahlkörper gegenüber dem Trommel-durchmesser können wir annehmen:

$$r \approx \frac{D_T}{2}$$

Daraus errechnet sich mit Gleichung (II.2) die kritische Winkelgeschwindigkeit zu

$$\omega_k^2 = \frac{2 \cdot g}{D_T} \quad (II.3)$$

Der Zusammenhang zwischen Winkelgeschwindigkeit und Drehzahl lautet:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n \quad (II.4)$$

Die kritische Drehzahl n_k , ab der die Kugel auf der Kreisbahn bleibt, errechnet sich aus den Gleichungen (II.3) und (II.4) zu

$$\frac{2 \cdot g}{D_T} = (2 \cdot \pi \cdot n_k)^2$$

$$n_k^2 = \frac{g}{2 \cdot \pi^2 \cdot D_T}$$

$$n_k = \sqrt{\frac{g}{2 \cdot \pi^2}} \cdot \sqrt{\frac{1}{D_T}}$$

$$n_k = 0,705 \cdot \sqrt{\frac{1}{D_T}} \quad (II.5)$$

D_T : Innendurchmesser der Trommel in m

n_k : Kritische Drehzahl in 1/s

3 Grundlagen zur Laborkugelmühle

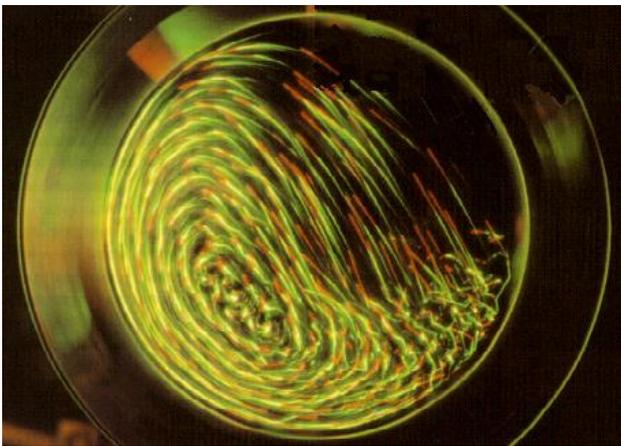
3.1 Beschreibung des Zerkleinerungsvorganges

Die Laborkugelmühle besteht aus einer hohlen zylindrischen Trommel, die an den Stirnflächen verschlossen ist und um ihre Mittelachse gedreht wird. In der Trommel befinden sich das Mahlgut (der Stoff der zerkleinert werden soll) und die Mahlkörper. Die Mahlkörper sind entsprechend dem Namen des Apparates meistens Kugeln, es werden aber auch Zylinder, Quader oder beliebig geformte Körper verwendet. Die Dichte der Mahlkörper sollte ungefähr drei- bis viermal größer sein als die Dichte des Mahlgutes [Stieß2], um den Verschleiß der Mahlkörper durch Abrieb möglichst gering zu halten. Die Zerkleinerung erfolgt durch zwei Vorgänge:

- Die Mahlkörper schlagen auf das Mahlgut auf.
 - Das Mahlgut wird zwischen den Mahlkörpern oder der Trommelwand zerrieben.
- Die Qualität der Zerkleinerung hängt neben der Menge und der Größe der Mahlkörper insbesondere von der Bewegungsenergie der Kugeln und somit von der Drehgeschwindigkeit der Trommel ab.

Bei kleinen Drehgeschwindigkeiten werden die Mahlkörper durch die Zentrifugalkraft an der Trommelwand in Drehrichtung etwas mitgenommen, bis sie sich ablösen und abgleiten. Durch diese Rollbewegungen wird Mahlgut zwischen Mahlkörpern oder Mahlkörpern und Wand zerrieben.

Bei größeren Drehgeschwindigkeiten der Mühle ist die Zentrifugalkraft größer und die Mahlkörper werden weiter mitgenommen.



Wenn sie sich von der Trommelwand lösen, beschreiben sie eine Flugbahn (Abb.II-2) [Dutton] durch die Trommel und prallen auf das Mahlgut.

Da die Bewegungsenergie der fliegenden Mahlkörper größer ist als beim Abrollen, wird größeres Mahlgut zerkleinert.

Abb.II-2: Mahlkörper in bewegter Trommel

Ab einer bestimmten Drehgeschwindigkeit haften die Mahlkörper durch die hohe Zentrifugalkraft an der Außenwand der Trommel. Diese Drehzahl nennt man kritische Drehzahl. Da ab dieser Drehzahl quasi keine Bewegung mehr zwischen Mahlkörpern und Mahlgut erfolgt, findet auch keine Zerkleinerung mehr statt.

3.3 Füllung der Mahltrommel

Die Mahltrommel wird mit den Mahlkörpern (Index "MK") und dem Schüttgut (Index "SG"), das zerkleinert werden soll, dem sogenannten Mahlgut, befüllt. Bei den Mengen, die jeweils in die Trommel eingefüllt werden, spricht man von den entsprechenden Füllungsgraden.

3.3.1 Mahlkörper

$$\varphi_{MK} = \frac{V_{s,MK}}{V_T} \quad (II.7)$$

φ_{MK} : Mahlkörperfüllungsgrad (ohne Einheit)

$V_{s,MK}$: Schüttvolumen der Mahlkörper in m^3

V_T : Volumen der Mahltrommel in m^3

Das Schüttvolumen der Mahlkörper errechnet sich aus der Masse m_{MK} an Mahlkörpern, deren Porosität oder Hohlraumvolumenanteil ε_{MK} und der Feststoffdichte ρ_{MK} .

$$V_{s,MK} = \frac{m_{MK}}{\rho_{s,MK}} \quad (II.8)$$

$V_{s,MK}$: Schüttvolumen der Mahlkörper in m^3

m_{MK} : Masse der Mahlkörper in kg

$\rho_{s,MK}$: Scheinbare Dichte oder Schüttdichte der Mahlkörper in kg/m^3

Die scheinbare Dichte oder Schüttdichte berechnet sich wie folgt:

$$\rho_{s,MK} = \rho_{MK} \cdot (1 - \varepsilon_{MK}) \quad (II.9)$$

ρ_{MK} : Feststoffdichte der Mahlkörper in kg/m^3

ε_{MK} : Porosität (Hohlraumvolumenanteil) der Mahlkörper (ohne Einheit)

Der Mahlkörperfüllungsgrad liegt üblicherweise zwischen 0,1 und 0,4. Dabei werden öfters Werte von 0,3 bis 0,4 verwendet, weil bei 0,4 die Aufnahme an Zerkleinerungsenergie maximal ist [*Hemming*].

Die Größe der Mahlkugeln wird in Abhängigkeit des Trommeldurchmessers gewählt, bei Kugeln gilt für den Kugeldurchmesser [*Hemming*]:

$$d = \frac{D_T}{24} \text{ bis } \frac{D_T}{18} \quad (\text{II.10})$$

d: Durchmesser der Mahlkugel in m

D_T : Durchmesser der Mahltrommel in m

Zum Grobmahlen [*Stieß*] werden große Mahlkörper verwendet, beim Feinmahlen finden kleinere Mahlkörper Anwendung. Dabei sollten die Kugeln mindestens doppelt so groß sein wie das zu zerkleinernde Schüttgut.

Die erforderliche Masse an Mahlkörpern errechnet sich aus Gleichung (II.8) durch Einsetzen der Gleichungen (II.7) und (II.9).

3.3.2 Mahlgut

Der Füllungsgrad des Mahlgutes (oder Schüttgutes, Index "SG") wird nicht auf die Trommel bezogen, sondern auf den Hohlraum zwischen den Mahlkörpern.

$$\varphi_{SG} = \frac{V_{s,SG}}{V_{H,MK}} \quad (\text{II.11})$$

φ_{SG} : Mahlgutfüllungsgrad (ohne Einheit)

$V_{s,SG}$: Schüttvolumen des Mahlgutes (Schüttgutes) in m^3

$V_{H,MK}$: Hohlraumvolumen der Mahlkörper in m^3

Das Schüttvolumen des Mahlgutes errechnet sich aus der Masse m_{SG} an Mahlgut, deren Porosität ε_{SG} und der Feststoffdichte ρ_{SG} .

$$V_{s,SG} = \frac{m_{SG}}{\rho_{s,SG}} \quad (\text{II.12})$$

$V_{s,SG}$: Schüttvolumen des Mahlgutes in m^3

m_{SG} : Masse des Mahlgutes in kg

$\rho_{s,SG}$: Scheinbare Dichte oder Schüttdichte des Mahlgutes in kg/m^3

$$\rho_{s,SG} = \rho_{SG} \cdot (1 - \varepsilon_{SG}) \quad (\text{II.13})$$

ρ_{SG} : Feststoffdichte der Mahlkörper in kg/m^3

ε_{SG} : Porosität (Hohlraumvolumenanteil) des Mahlgutes (ohne Einheit)

Das Hohlraumvolumen zwischen den Mahlkörpern berechnet sich mit Hilfe der Porosität der Mahlkörper-Schüttung:

$$V_{H,MK} = \varepsilon_{MK} \cdot V_{s,MK} \quad (II.14)$$

$V_{H,MK}$: Hohlraumvolumen der Mahlkörper in m^3

ε_{MK} : Porosität (Hohlraumvolumenanteil) der Mahlkörper
(ohne Einheit)

$V_{s,MK}$: Schüttvolumen der Mahlkörper in m^3

Die Menge an Mahlgut wird so gewählt, daß die Hohlräume zwischen den Mahlkörpern aufgefüllt sind. Da die Mahlkörper durch die Bewegung etwas aufgelockert werden, gibt man zwischen 10% und 15% mehr Mahlgut hinzu [Stieß2] als es Hohlraumvolumen gibt.

Man wählt somit als Werte für den Mahlgutfüllungsgrad

$$\varphi_{SG} = 1,10 \text{ bis } 1,15.$$

Aus Gleichung (II.11) errechnet sich dann durch Einsetzen aller anderen Formeln die erforderliche Masse an Mahlgut.

4 Versuchsteil

4.1 Versuchsaufbau

Zum Versuchsaufbau (Abb.II-4) der Laborkugelmühle gehören ein Rollenbock, ein Motor mit regelbarem Getriebe, zwei Mahltrommeln und verschiedene Mahlkugeln.

Eine Rolle des Rollenbocks wird über eine Kette vom Motor angetrieben. Mit dem Getriebe kann die Drehzahl der Antriebsrolle verändert werden, wobei darauf zu achten ist, daß das Getriebe nur bei laufendem Motor verstellt werden darf.

Die Mahltrommel wird auf den Rollenbock gelegt und durch die angetriebene Rolle ebenfalls in Drehung versetzt. Die Drehzahl der Trommel hängt von der Drehzahl der Antriebsrolle und den Durchmessern von Rolle und Trommel ab.

Die genaue Drehzahl der Trommel wird mit Hilfe eines Drehzahlmessers bestimmt.

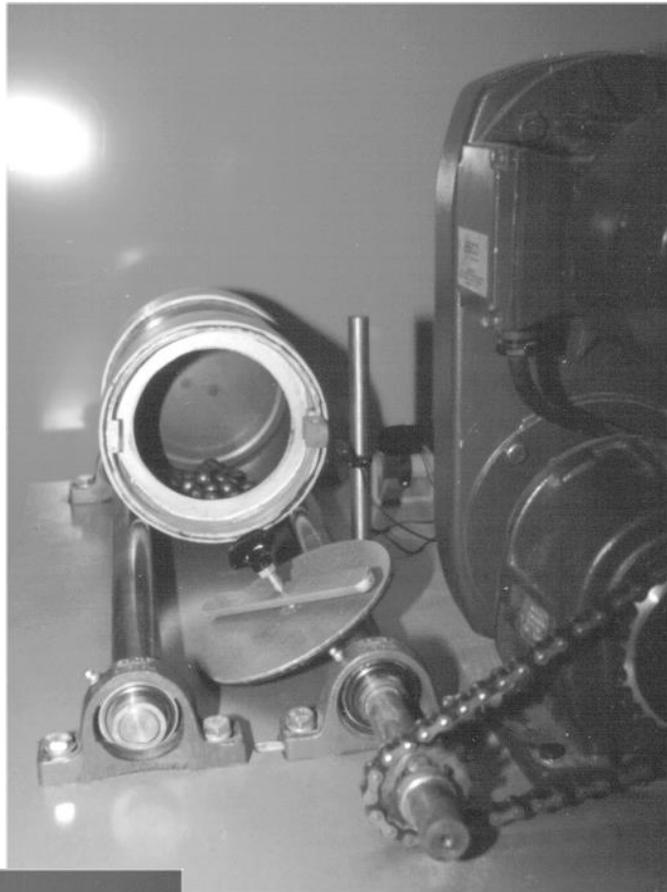


Abb.II-5: Trennvorrichtung

Laborkugelmühle

Desweiteren ist eine Vorrichtung vorhanden, um die Mahlkugeln und das Mahlgut zu trennen (Abb.II-5). Diese besteht im wesentlichen aus einem Lochblech, dessen Öffnungen etwas kleiner als die Mahlkugeln sind.

Zusätzlich ermöglicht das Gerät eine gleichmäßige Teilung des Mahlgutes in zwei Hälften. Für die anschließenden Untersuchungen wird eventuell eine kleinere Menge benötigt.

4.2 Versuchsplanung

- Berechnet alle erforderlichen Größen, die Ihr für den Versuch benötigt. Schreibt die Ergebnisse übersichtlich nieder.
- Überlegt Euch genau, wie Ihr bei der Versuchsdurchführung vorgehen werdet. Notiert die wichtigsten Schritte in kurzen Sätzen.
- Was braucht Ihr alles zur Versuchsdurchführung?

Hinweis: Die Mengen an Mahlkörpern und an Mahlgut sollen durch Wiegen bestimmt werden.

4.3 Rücksprache vor Versuchsbeginn

Besprecht den Versuch mit dem Lehrer.

Zeigt ihm die Ergebnisse Eurer Berechnungen und die geplante Vorgehensweise zur Versuchsdurchführung.

4.4 Versuchsdurchführung und -auswertung

Vorsicht: Das Getriebe darf nur bei laufendem Motor verstellt werden.

Während der gesamten Versuchsdauer soll die Drehzahl konstant bleiben, bei Abweichungen muß daher nachreguliert werden.

Haltet die Versuchsparameter schriftlich fest - und vergeßt nicht sie später auch zu verwenden ☺.

Entleert nach Ablauf der Mahldauer die Trommel und trennt Mahlgut und Kugeln mit der hierfür vorgesehenen Trennvorrichtung.

Was könnt Ihr über die Qualität Eures Zerkleinerungsvorganges sagen?

Präsentiert später in einer gemeinsamen Bewertung der Versuche II, III und IV die von Euch eingestellten Versuchsparameter in übersichtlicher Weise.

5 Was war wichtig?

- Wodurch wird das Mahlgut in einer Kugelmühle zerkleinert?
- Welche Kräfte wirken auf die Mahlkörper?
- Wovon hängt die kritische Drehzahl der Mahltrommel ab?
- Welches Meßverfahren kann zur Beurteilung des Zerkleinerungsvorganges verwendet werden?

6 Formelzeichen

Symbol	Bezeichnung	Einheit
d:	Durchmesser der Mahlkugel	m
D_T :	Innendurchmesser der Trommel	m
F_ω :	Zentrifugalkraft	N
F_g :	Schwerkraft	N
$F_{g,r}$:	Radiale Komponente der Schwerkraft	N
g:	Erdbeschleunigung	m/s^2
L:	Trommellänge	m
m_{FL} :	Masse einer Kugel	kg
m_H :	Masse der Hohlräume	kg
m:	Masse eines Mahlkörpers	kg
m_{MK} :	Masse aller Mahlkörper	kg
m_{SG} :	Masse an Mahlgut (Schüttgut)	kg
n:	Drehzahl	1/s
n_V :	Drehzahl im Versuch	1/s
n_A :	Arbeitsdrehzahl	1/s
n_K :	Kritische Drehzahl	1/s
r:	Radius der Kreisbahn der Kugel	m
t:	Mahldauer	s
$V_{H,MK}$:	Hohlraumvolumen der Mahlkörper	m^3
$V_{s,MK}$:	Schüttvolumen der Mahlkörper	m^3
$V_{s,SG}$:	Schüttvolumen des Mahlgutes	m^3
V_T :	Volumen der Mahltrommel	m^3
ε_{MK} :	Porosität oder Hohlraumvolumenanteil der Mahlkörper	-
ε_{SG} :	Porosität oder Hohlraumvolumenanteil des Mahlgutes	-
φ_{MK} :	Mahlkörperfüllungsgrad	-
φ_{SG} :	Mahlgutfüllungsgrad	-
ρ_{MK} :	Feststoffdichte der Mahlkörper	kg/m^3
ρ_{SG} :	Feststoffdichte des Mahlgutes	kg/m^3
$\rho_{s,MK}$:	Schüttdichte oder scheinbare Dichte der Mahlkörper	kg/m^3
$\rho_{s,SG}$:	Schüttdichte oder scheinbare Dichte des Mahlgutes	kg/m^3
ω :	Winkelgeschwindigkeit	1/s
ω_k :	Kritische Winkelgeschwindigkeit	1/s

7 Literaturverzeichnis

- [*Armco*] Armco Mineral Processing Vertriebsgesellschaft mbH
Technische Produktinformationen Stahlmahlkugeln
- [*Dutton*] Dutton, John:
Grist to the mill
Artikel in:
International Cement Review
März 1997
- [*Hemming*] Hemming, Werner:
Verfahrenstechnik
Komprath-Reihe
Vogel Fachbuch
ISBN 3-8023-0084-X
- [*Stieß2*] Stieß, Matthias:
Mechanische Verfahrenstechnik 2
Springer-Verlag
ISBN 3-540-55852-7
- [*TPPhFest*] Praktikumsversuch III:
Physikalische Größen von Feststoffen
- [*TPSieb*] Praktikumsversuch IV:
Siebanalyse
- [*Zogg*] Zogg, Martin:
Einführung in die Mechanische Verfahrenstechnik
B.G.Teubner, Stuttgart
ISBN 3-519-16319-5