



MECHANISCHE VERFAHRENSTECHNIK

Skriptaufzeichnungen

im WiSe 2019

vorgelegt von

Roman-Luca Zank

3. Semester

Chemie- und Umwelttechnik

E-Mail:	romanzank@mail.de
Matrikelnummer:	25240
Adresse:	Platz der Bausoldaten 2, Zimmer 224
Ort:	06217 Merseburg
Prüfer:	Dr. Frank Baumann

Merseburg, 9. November 2019

Inhaltsverzeichnis

1	Zerkleinern	2
1.1	Was ist „Zerkleinern“?	2
1.2	Feststoff zerkleinern	3
1.3	Energieaufwand von Mühlen (Zerkleinerungsmaschinen)	4
1.4	Bauarten von Mühlen	6
2	Trennen	8
2.1	Stoffgemische	8
2.2	Trennverfahren	8
2.2.1	Sedimentation	9
2.3	Grundlagen der Modellierung	10
	Literaturverzeichnis	11
	Anhang	11

1 Zerkleinern

- Älteste Verfahrenstechnik (prätechnologisch)
 - Kauen von Nahrung
 - Zerkleinern von Getreide im Mörser

1.1 Was ist „Zerkleinern“?

Prozessziel:

Feststoff (aber auch Flüssigkeiten oder Gase) mit vertretbarem Energieaufwand (Betriebskosten) und erträglichem Verschleiß (Wartungskosten) auf eine gewünschte Feinheit (Dispersitätszustand) nach Produktspezifikationen zu bringen.

+ Anschaffungskosten

Was kann zerkleinert werden ?

1. Getreide → Mehl, Gries, Flocken, Schrot, Spreu,...
2. Gestein → Sand, Kies, Splitt, Zement,...
3. Holz → Mulch, Spähne, Pallets, Spanplatten, OSB-Platten, Papier, Furnier,...

Wozu wird zerkleinert ?

- Erzeugen einer gewünschten, bestimmten Korngrößenverteilung (evtl. mit x_{min} und x_{max})
- vergrößern der spezifischen Oberfläche $\left[\frac{m^2}{m^3} \right] \Rightarrow \text{Reaktivität} \uparrow$
- Freilegen und Aufschließen einer Wertstoffphase (z.B. Erz)
- Struktur- und Formänderung (z.B. Haferflocken)
- mechanische Aktivierung
- Veränderung von Stoffeigenschaften nach Produktspezifikation:
 - Fließverhalten, Transportfähigkeit, Dosierfähigkeit, Lagerfähigkeit
 - Lösegeschwindigkeit, Reaktionsgeschwindigkeit, Extrahierfähigkeit
 - Farbe, Oberfläche, Form, Raumfüllung
 - ...

1.2 Feststoff zerkleinern

Einteilung erfolgt nach Größe des Produkts:

Brechen:	5 – 50mm: fein > 50mm: grob
Mahlen:	0,5 – 50mm: grob 50µm – 500µm: fein 5µm – 50µm: feinst < 5µm: kolloid

Ziel: Überwinden der inneren Bindungskräfte → Bruch

mechanische Beanspruchung:

- Druck
- Reibung
- Schlag
- Prall
- gegenseitiger Partikelstoß
- Schneiden (spalten)
- Scheren
- Scherströmung (für Tropfen, Mikroorganismen,...)
- Druckwelle (z.B. Sprengung)
- Kavitation (implodierende Dampfblase, bei der Teilchen herausgerissen wird)

nicht-mechanische Beanspruchung:

d.h. Energiezufuhr

- chemisch
- elektrisch
- thermisch

1.3 Energieaufwand von Mühlen (Zerkleinerungsmaschinen)

Ziele:

- Berechnung der Antriebsleistung einer Mühle ist abhängig von:
 - Durchsatz
 - Art des Stoffes
 - Teilchenspezifikation (Korngröße)
- Bauarten und Auswahl von Mühlen

spezifische Zerkleinerungsarbeit e :

$$e = \frac{W}{m} \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right] \quad (1.1)$$

erweitern mit $\frac{1}{t}$

$$e = \frac{W/t}{m/t} = \frac{P}{\dot{m}} \left[\frac{\text{W}}{\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}} \right] \quad (1.2)$$

Abhängigkeit von der Stoffeigenschaft:

charakterisiert durch eine Materialkonstante

c_B (Bondkonstante: experimentell bestimmt)

Abhängigkeit von der Partikelgröße:

charakteristische Teilchengröße

X_{80} d.h. $H(x_{80}) = 80\%$ Durchgang

HIER STEHT IHR BILD

→ restliche 20% werden meist ausgesiebt und wieder zurückgeführt „80-20-Regel“

Die Modellierung von Zerkleinerungsprozessen ist äußerst komplex. Deshalb werden empirische Abschätzungsgleichungen verwendet ($\pm 50\%$ Genauigkeit).
Nur bei idealen Einzelkörnern kann man eine Bruchfunktion analytisch annähern.

Name	Anwendung	Gleichung	Stoffkonstante
KICK	$x_{80\omega} > 50 \text{ mm}$	$e_{KICK} = c_K \cdot \log\left(\frac{x_{80\alpha}}{x_{80\omega}}\right)$	$c_K = 1,15 \cdot \frac{c_B}{\sqrt{0,05 \text{ m}}} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right]$
BOND	$50 \mu\text{m} < x_{80\omega} < 50 \text{ mm}$	$e_{BOND} = c_B \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{x_{80\omega}}} - \frac{1}{\sqrt{x_{80\alpha}}} \right)$	c_B : tabelliert $\left[\frac{\text{m}^{2,5}}{\text{s}^2} \right]$
RITTER	$x_{80\omega} > 50 \mu\text{m}$	$e_{RITT} = c_R \cdot \left(\frac{1}{x_{80\omega}} - \frac{1}{x_{80\alpha}} \right)$	$c_R = 0,5 \cdot c_B \cdot \sqrt{5 \cdot 10^{-5} \text{ m}}$

Hinweise:

- α : Anfangsgröße am Eingang
- ω : Endgröße am Ausgang
- Teilchengröße **immer** als [m] einsetzen!

Zerkleinerungsstrahl:

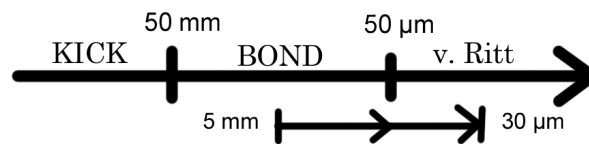


Abbildung 1.1: Zerkleinerungsstrahl

c_B -Beispiele:

Kohle:	$548 \frac{\text{m}^{2,5}}{\text{s}^2}$
Gips:	$394 \frac{\text{m}^{2,5}}{\text{s}^2}$
Eisenerz:	$745 \frac{\text{m}^{2,5}}{\text{s}^2}$
gebr. Ton:	$69 \frac{\text{m}^{2,5}}{\text{s}^2}$
Glimmer (Mineral):	$6488 \frac{\text{m}^{2,5}}{\text{s}^2}$

meist: c_B für trockenes Mahlen $>$ c_B für nasses Mahlen

Beispielaufgabe: Zerkleinern

Energieaufwand beim Zerkleinern

- Zerkleinern ist eine sehr energieintensive Grundoperation, deshalb hohe Betriebs- und Wartungskosten
- ca. 5% der Weltenergieerzeugung für Zerkleinerung
- Zementherstellung sind 25% der Kosten für Zerkleinerung

Energie ist nötig für:

- Überwinden der inneren Bindungskräfte im Kern
- Reibung der Teilchen untereinander und im Apparat (Dissipation)
- kinet. Energie des Mahlprodukts
- Maschinenteil verschleßen
- Deformation der Teilchen ohne Bruch
- nicht ideale Einbringung der Kräfte (schiefer Stoß)

⇒ Energieeffizienz der Zerkleinerung $< 1\%$

Tabelle 1.1: Vor- und Nachteile Trocken-/Nassmahlen

	Trockenmahlen	Nassmahlen
Vorteile	<ul style="list-style-type: none">• Gut ist trocken	<ul style="list-style-type: none">• geringerer Energiebedarf• keine Staubentwicklung• Kühlung des Produkts entgegen der Reibung
Nachteile	<ul style="list-style-type: none">• hoher Energiebedarf• Staubentwicklung• keine Kühlung des Produkts entgegen der Reibung	<ul style="list-style-type: none">• Gut ist nicht trocken

1.4 Bauarten von Mühlen

- Backenbrecher

- Rundbrecher, Kegelbrecher

- **Kugelmühle**

- *Kaskadenbewegung*

Beanspruchung: Reibung $\rightarrow n = 0,6 \dots 0,7 \cdot n_{Krit}$

- *Kateraktbewegung*

Beanspruchung: Reibung und Schlag $\rightarrow n = 0,8 \dots 0,9 \cdot n_{Krit}$

Bestimmung der Grenzdrehzahl:

$$F_G = F_Z \quad (1.3)$$

$$m \cdot g = m \cdot r \cdot \omega^2 \text{ mit } \omega = 2 \cdot \pi \cdot n \text{ (n... Drehzahl)} \quad (1.4)$$

$$g = r \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot n^2 \quad (1.5)$$

$$n_{Krit} = \sqrt{\frac{g}{4 \cdot \pi^2 \cdot r}} \approx \sqrt{\frac{1 \left[\frac{m}{s^2} \right]}{4 \cdot \pi^2 \cdot r}} = \frac{1 \left[\sqrt{m} \right]}{\sqrt{2 \cdot D}} \quad (1.6)$$

$$(1.7)$$

Vorsicht mit den Einheiten ! $n_{Krit} = \left[\frac{1}{s} \right]$

Tabelle 1.2: Vor- und Nachteile der Kugelmühle

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> – sehr feines Mahlen möglich – großer Zerkleinerungsgrad $z = \zeta = \frac{x_{80,\alpha}}{x_{80,\omega}}$ – enge Korngrößenverteilung, wegen vorrangiger Zerkleinerung großer Teilchen – Mahlkörper können dem Mahlgut angepasst werden (Material, Größe) – Autogenes Mahlen möglich <ul style="list-style-type: none"> * Mahlgut selbst ist Mahlkörper * Mahlkörper werden durch Abrieb immer kleiner (Abrieb = Produkt) * Mahlkörper müssen immer weiter zugegeben werden 	<ul style="list-style-type: none"> – sehr energieaufwendig (Kugel zu heben kostet eben) – trennen von Mahlgut und Mahlkörper erforderlich – Lärm

2 Trennen

2.1 Stoffgemische

Tabelle 2.1: Stoffgemische

Kombination der Phasen	Bezeichnung
S in G	Rauch, Staub,...
S in L (Aerosol)	Suspension, Schlamm, Trübe,...
L in G (Aerosol)	Dampf Wolken, Nebel, Regen, Sprühwolke,...
G in L	Sprudelschicht, Blasenschwarm, Schaum,...
L in L	Emulsion, Tropfenschwarm

2.2 Trennverfahren

Alle Stoffsysteme sind dispers und bestehen aus mindestens 2 Phasen.

Nur dann kann man mechanische Trennverfahren anwenden.

(Grenze nach unten ist dabei die Partikelgröße)

Für einphasige Stoffsysteme müssen thermische Trennverfahren angewendet werden.

Mechanische Verfahren sind meist effizienter als thermische Verfahren.

- **Sedimentation** $\approx 10 \mu\text{m}$ (S/G, S/L, L/L, G/L, L/G)
= Absetzen/Aufsteigen von Teilchen im Schwerfeld

→ *Voraussetzung:*

unterschiedliche Dichte der Teilchen gegenüber Fluid

- **Zentrifugation** $< 10 \mu\text{m}$ (S/L)
= Trennen im Zentrifugalfeld

→ geeignet für sehr geringe Dichteunterschiede und sehr kleine Teilchen

- **Filtration** (S/G, S/L)
= Teilchendurchmesser $>$ Porendurchmesser des Filtermediums
„Sterische (räumliche) Hinderung“

- **Sieben** (S/G)
= Trennen nach Größenunterschied
→ Klassierung
- **Sichten** (S/G)
= Trennen nach Luftwiderstand und Dichte
- **Flotation** (S/S/G)
= spezielle Sedimentation
- **Zyklon** (S/G, S/L)
= ähnlich wie Zentrifugation

2.2.1 Sedimentation

= Absetzen einer dispersen Phase unter Einwirkung der Schwerkraft

Disperse Phase kann eine höhere oder niedrigere Dichte haben, als die Kontinuierliche.

→ wichtige Trennoperation, weil Apparate einfach und somit günstig sind

Bezeichnung des Sediments nach Zweck

- *Klären:*
Trennziel = klare Flüssigkeit mit möglichst wenig Teilchen
- *Eindicken:*
Trennziel = möglichst konzentrierter Schlamm mit möglichst wenig Flüssigkeit

2.3 Grundlagen der Modellierung

Bewegung eines Einzelteilchens im Schwerkraftfeld

→ Annahme: Teilchen ist starr, kugelförmig und glatt

$$d_P > 10 \mu\text{m}$$

$$\rho_P > \rho_F$$

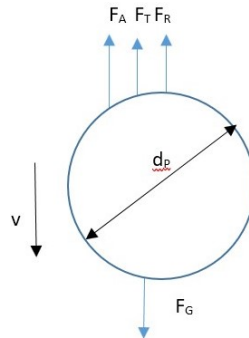


Abbildung 2.1: Skizze eines Partikels

$$F_G = m_P \cdot g = V_P \cdot \rho_P \cdot g = \frac{\pi}{6} \cdot d_P^3 \cdot \rho_P \cdot g \quad (2.1)$$

$$F_T = m_F \cdot g = V_P \cdot \rho_F \cdot g = \frac{\pi}{6} \cdot d_P^3 \cdot \rho_F \cdot g \quad (2.2)$$

“Auftrieb ist Masse der verdrängten Flüssigkeit“

$$F_R = c_W \cdot \rho_F \cdot \frac{1}{2} \cdot v_P^2 \cdot A_{\perp} \quad (2.3)$$

c_W ... Widerstandsbeiwert $c_W = f(v, \text{Geometrie, Rauigkeit, ...})$

v_P ... Relativgeschwindigkeit zwischen Teilchen und Partikel

A_{\perp} ... Projizierte Fläche des Partikels in Bewegungsrichtung

hier: Kugel → Kreis mit $A_{\perp} = \frac{\pi}{4} \cdot d_P^2$

Literaturverzeichnis

1. Praktikumsskript, Modul, Versuch, Prof. Musterprof.
2. DIN 12345, Jahr der Veröffentlichung
3. Link der Internetseite, Zugriffsdatum
4. Buchtitel, Autor, Verlag, Veröffentlichungsjahr