

Folien zur Lehrveranstaltung

**Grundlagen der Mechanischen  
Verfahrenstechnik**

*– nur zum persönlichen Gebrauch –*

PD Dr.-Ing. habil. Frank Babick  
Dr.-Ing. Benno Wessely

Dresden, Frühjahr 2021

# 4. Zerkleinerungstechnik

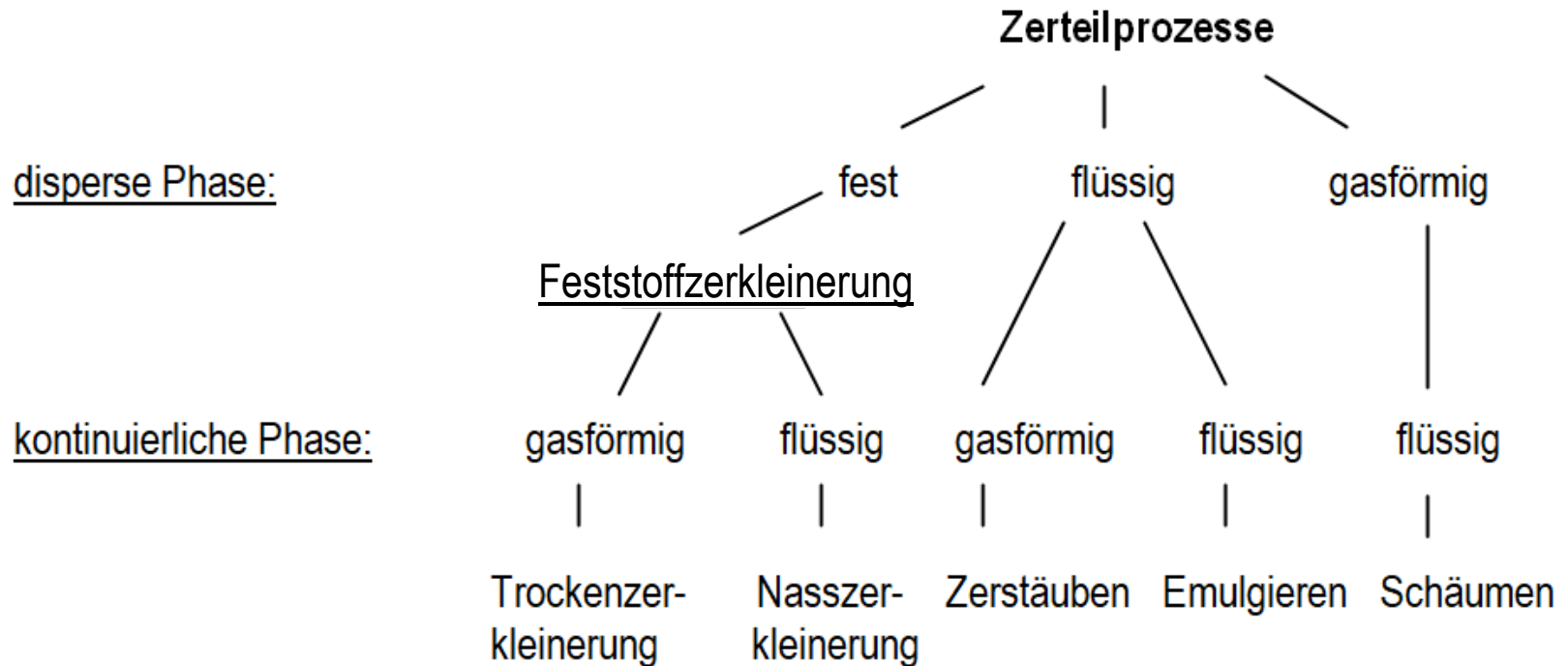
# Lernziele zu Kapitel 4

- Wissen:
  - Kenngrößen der Feststoffzerkleinerung
  - Zerkleinerungsgesetze
  - Grundsätzliche Beanspruchungsarten zur Zerkleinerung von Partikeln
- Fähigkeiten:
  - Berechnung der zur Zerkleinerung von Feststoffen benötigten Arbeit
  - Vorauswahl geeigneter Maschinen für gegebene Zerkleinerungsaufgaben

# 4. Zerkleinerungstechnik

## – Grundlagen –

# Einteilung von Zerteilprozessen



# Bereiche der Feststoffzerkleinerung

- Grobbrechen
  - Produkte:  $> 50 \text{ mm}$  → Brocken
- Feinbrechen
  - Produkte:  $5 \text{ mm} \dots 50 \text{ mm}$  → Split, Schotter
- Schroten
  - Produkte:  $0.5 \text{ mm} \dots 5 \text{ mm}$  → Schrot, Granulat
- Mahlen
  - Produkte:  $50 \mu\text{m} \dots 0.5 \text{ mm}$  → Mehl, Pulver
- Feinmahlen
  - Produkte:  $5 \mu\text{m} \dots 50 \mu\text{m}$  → Puder, Staub
- Feinstmahlen/Kolloidmahlen
  - Produkte  $< 5 \mu\text{m}$  → Feinstpuder

# Kenngrößen von Zerkleinerungsprozessen

- Zerkleinerungsgrad

- basierend auf 80%-Quantil

$$z_{80} = \frac{(x_{80,3})_{\text{Produkt}}}{(x_{80,3})_{\text{Aufgabegut}}}$$

- basierend auf spezif. Oberfläche

$$z_S = \frac{S_{m,\text{Produkt}}}{S_{m,\text{Aufgabegut}}}$$

- massenspezifische Zerkleinerungsarbeit

- Arbeit pro Masse Feststoff:

$$e = \frac{E_Z}{m_{\text{Feststoff}}}$$

- Energieausnutzung

- Oberflächenzunahme pro Arbeit

$$EA = \frac{\Delta S}{E_Z}$$

# Empirische Zerkleinerungsgesetze (1)

(spezifischer Energiebedarf zur Reduktion der Partikelgröße)

- spezif. Zerkleinerungsarbeit:  $e = E_Z / m_{\text{Feststoff}}$

- Rittinger (1867):  
Hypothese  $de_{\text{Rittinger}} = -c_R \cdot \frac{dx}{x^2}$

für  $x_{E/A} < x_{BR}$  (Feinmahlung)

Energie vor allem für Schaffung neuer Oberfläche

- Bond (1952):  
empirischer Befund  $de_{\text{Bond}} = -\frac{1}{2} c_B \cdot \frac{dx}{x^{\frac{3}{2}}}$

für  $x_{BR} < x_{E/A} < x_{KB}$  (mittl. Größen)

- Kick (1885):  
Hypothese  $de_{\text{Kick}} = -c_{\text{Kick}} \cdot \frac{dx}{x}$

für  $x_{KB} < x_{E/A}$  (Brechen)

Energie vor allem für elastische Deformation vor dem Bruch

- wobei gilt:  $c_R = \frac{1}{2} c_B \cdot \sqrt{x_{BR}}$

$$c_{\text{Kick}} = \frac{c_B}{2\sqrt{x_{KB}}}$$

- mit  $[c_R] = \text{m}^3/\text{s}^2$ ,  $[c_{\text{Bond}}] = \text{m}^{2,5}/\text{s}^2$ ,  $[c_{\text{Kick}}] = \text{m}^2/\text{s}^2$

# Empirische Zerkleinerungsgesetze (2)

(spezifischer Energiebedarf zur Reduktion der Partikelgröße)

- spezif. Zerkleinerungsarbeit:  $e = E_Z / m_{\text{Feststoff}}$
- Rittinger (1867):  $e_{\text{Rittinger}} = c_R \cdot (x_E^{-1} - x_A^{-1})$  für  $x_{E/A} < x_{BR}$  (Feinmahlung)
- Bond (1952):  $e_{\text{Bond}} = c_B \cdot (x_E^{-\frac{1}{2}} - x_A^{-\frac{1}{2}})$  für  $x_{BR} < x_{E/A} < x_{KB}$  (mittl. Größen)
- Kick (1885):  $e_{\text{Kick}} = c_{\text{Kick}} \cdot \ln \frac{x_A}{x_E} = c_K \cdot \lg \frac{x_A}{x_E}$  für  $x_{KB} < x_{E/A}$  (Brechen)

– wobei gilt:  $c_R = \frac{1}{2} c_B \cdot \sqrt{x_{BR}}$

$$c_{\text{Kick}} = \frac{c_B}{2\sqrt{x_{KB}}}$$

– Bond-Index:  $W_i = \frac{c_B}{\sqrt{100\mu\text{m}}}$

$$c_K = 1,151 \cdot \frac{c_B}{\sqrt{x_{KB}}}$$
$$e_{\text{Bond}} = W_i \cdot \sqrt{\frac{100\mu\text{m}}{x_E}} \left( 1 - \sqrt{\frac{x_E}{x_A}} \right)$$

# Koeffizient des Zerkleinerungsgesetzes nach Bond

Material	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	$c_B$ [m <sup>2.5</sup> /s <sup>2</sup> ] Naßzerkleinerung	$c_B$ [m <sup>2.5</sup> /s <sup>2</sup> ] Trockenzerkleinerung
Mittelwert aller Messungen		500	670
Andesit	2840	797	1068
Baryt, Schwerspat	4280	225	301
Basalt	2890	735	985
Bauxit	2380	340	456
Bimsstein, natürlich	1960	429	576
Bleierz	3440	410	550
Bleiglanz, Galenit	5390	367	492
Bleizinkerz	3370	409	548
Chromerz	4060	346	463
Cyanit	3230	679	910
Diorit	2780	698	936
Dolomit	2820	407	546
Eisenerz	3960	556	745
Bohnerz	3320	408	547
Eisenglanz	3290	554	743
Hämatit	3760	456	612
Magnetit	3880	368	493
Feldspat	2590	420	563
Ferrochrom	6750	319	428
Ferromangan	5910	280	375
Ferrosilizium	4910	462	619
Flint (Feuerstein)	2650	942	1262
Flußspat	2980	351	471
Gabbro	2830	664	890
Gips	2690	294	394
Glas	2580	111	149
Glimmer	2890	4842	6488
Gneiss	2710	725	971
Golderz	2860	534	715

Material	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	$c_B$ [m <sup>2.5</sup> /s <sup>2</sup> ] Naßzerkleinerung	$c_B$ [m <sup>2.5</sup> /s <sup>2</sup> ] Trockenzerkleinerung
Granat	3300	445	597
Granit	2680	518	694
Graphit	1750	1621	2172
Kalisalz	2180	296	397
Kalkstein	2690	418	560
Kalkstein für Zementproduktion	2680	366	491
Kies	2700	906	1214
Kohle	1630	409	548
Koks	1510	745	999
Korund (Schmirgel)	3480	2094	2807
Kupfererz	3020	473	633
Magnesit, gebrannt	5220	605	810
Magnesiumerz	3740	449	601
Molybdän	2700	467	626
Natriumsilikat	2100	468	627
Nickelerz	3320	428	573
Ölschiefer	1760	652	873
Phosphatdünger	2650	469	629
Phosphatstein	2660	365	489
Pottasche, Erz	2370	320	428
Pyriterz (Schwefelkies)	3480	320	429
Pyrrhotin (Magnetkies)	4040	345	462
Quarz	2640	460	616
Quarzit	2710	438	588
Rutilerz	2840	436	585
Sandstein	2680	415	556
Schiefer	2480	497	666
Schiefergestein	2580	590	791
Schlacke	2930	567	760
Schlacke aus Eisenhochofen	2390	438	587
Silbererz	2720	623	835
Siliziumdioxid	2710	487	653
Siliziumcarbit	2730	942	1262
Sinter	3000	316	423
Syenit	2730	536	719
Titaneisenerz (Ilmenit)	4270	472	632
Titanerz	4230	428	573
Ton	2230	256	343
Ton, gebrannt	2320	51	69
Trappfels	2860	760	1018
Uranerz	2700	645	865
Zementklinker	3090	486	651
Ziegelstein	2590	559	749
Zinkerz	3680	447	599
Zinnerz	3940	389	521

## Quelle:

Zogg: Einführung in die Mechanische Verfahrenstechnik, Teubner, Stuttgart, **1993**; Tabelle 2.3, S. 56f.

# Mechanismen der Feststoffzerkleinerung

- mechanische Beanspruchung an zwei Flächen
  - Druckbeanspruchung (z.B. Backenbrecher)
  - Scherung (z.B. im Walzenstuhl)
  - Schneiden (z.B. Schneidmühle)
  - Schlag (schnelle Druckbeanspruchung 0.1..5 m/s)
- mechanische Beanspruchung an einer Fläche
  - Prall (Aufprall mit  $> 5$  m/s)
  - Stöße (z.B. zwischen Partikeln in Gegenstrahlmühle)
- mechanische Beanspruchung über kontinuierliche Phase
  - Scherung in viskosen Medien (Kneten, Rühren)
  - Dehnung in viskosen Medien (Düsen, Rührwerkskugelmühle)
  - Kavitationsfelder (Ultraschallbäder)
- nichtmechanischer Energieeintrag
  - Sprengung, Schmelzen, ...

# Mechanisches Materialverhalten

- Mechanisches Materialverhalten
  - elastische und plastische Deformation
  - viskoelastische Eigenschaften (signifikante Änderungen über der Zeit)
  - Bruchverhalten
- linear elastisches Verhalten
  - reversible Deformation ~ Beanspruchung
  - Bruch oberhalb einer kritischen Belastungsgrenze
  - elastische Verformung erfordert Energie (wesentlich für Zerkleinerungsarbeit)
  - von „gummielastisch“ bis „spröde“
- plastisches Verhalten
  - z.T. irreversible Verformung („Fließen“)
  - erfordert zusätzliche Energie, die nicht zur Zerkleinerung beiträgt
- Bruchverhalten
  - Rissbildung begünstigt durch Wechselbeanspruchung
- Zerkleinerungstechnik muss passend zum Materialverhalten gewählt werden

# 4. Zerkleinerungstechnik

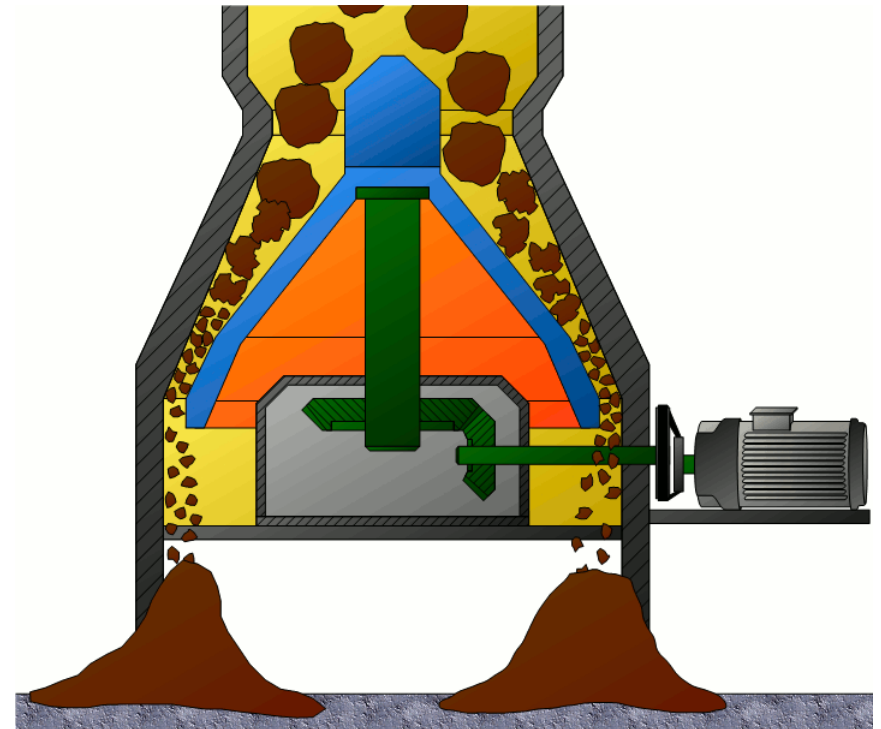
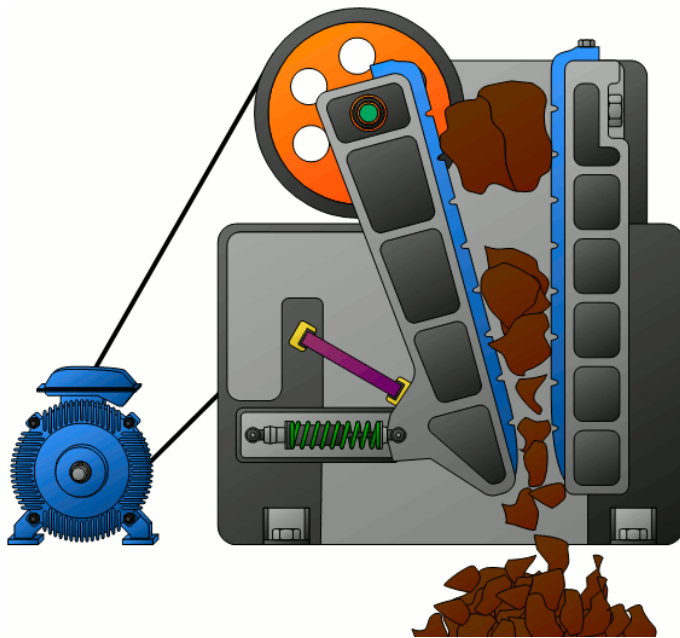
## – Maschinen –

# Zerkleinerungsmaschinen – Übersicht

Wichtigste Zerkleinerungsmaschinen für die Hart-, Mittelhart- und Weichzerkleinerung

Zerkleinerungs- maschine	Hartzer- kleinern	Mittelhart- zerkleinern	Weichzer- kleinern	Aufgabe- korngröße [mm]	Zerkleinerungs- grad [-]	Feststoffmassen- strom (Durchsatz) [kg/s]	Hauptbean- spruchung durch
<b>Brecher</b>							
Backenbrecher	ja	ja	nein	150 ... 2000	3... 7	0,2 ... 250	Druck
Schlagbrecher	ja	nein	ja	80 ... 1500	8... 12	1 ... 100	Prall, Druck
Kegelbrecher	ja	ja	ja	25 ... 400	10... 30	0,5 ... 200	Druck, Scherung
Walzenbrecher	nein	ja	ja	50 ... 500	4... 6	1 ... 250	Druck, Scherung
Prallbrecher	nein	ja	ja	50 ... 1000	20... 50	2,5 ... 250	Prall
Hammerbrecher	nein	ja	ja	50 ... 1000	10... 30	5 ... 250	Prall, Scherung
Schneidmaschinen	nein	nein	ja	50 ... 500	50... 100	0,05... 4	Schneiden
<b>Mühlen</b>							
Wälzmühle	ja	ja	ja	2 ... 30	20... 100	0,5 ... 30	Druck, Reibung
Kugelmühlen							
Trommelmühle	ja	ja	ja	10 ... 50	10... 25	2 ... 70	Prall, Reibung
Siebtrommelmühle	ja	ja	nein	10 ... 50	50... 100	2 ... 20	Prall, Reibung
Rohrmühle	ja	ja	(ja)	10 ... 50	500... 1000	10 ... 200	Prall, Reibung
Schwingmühle	ja	ja	ja	0,1 ... 10	10... 50	0,1 ... 30	Reibung, Prall
Rührwerkskugelmühle	nein	(ja)	ja	0,05... 0,5	50... 200	0,01 ... 1	Reibung, Strömung
Schlagmühlen							
Hammermühle	nein	ja	ja	1 ... 50	20... 40	0,2 ... 20	Prall, Scherung
Prallmühle	nein	ja	ja	1 ... 50	30... 500	0,2 ... 20	Prall
Strahlmühle	ja	ja	ja	0,1 ... 2	25... 100	0,01 ... 2	Prall

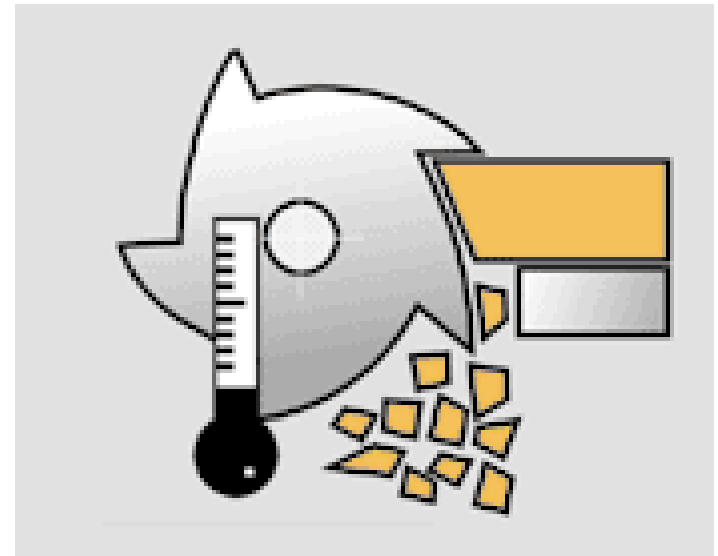
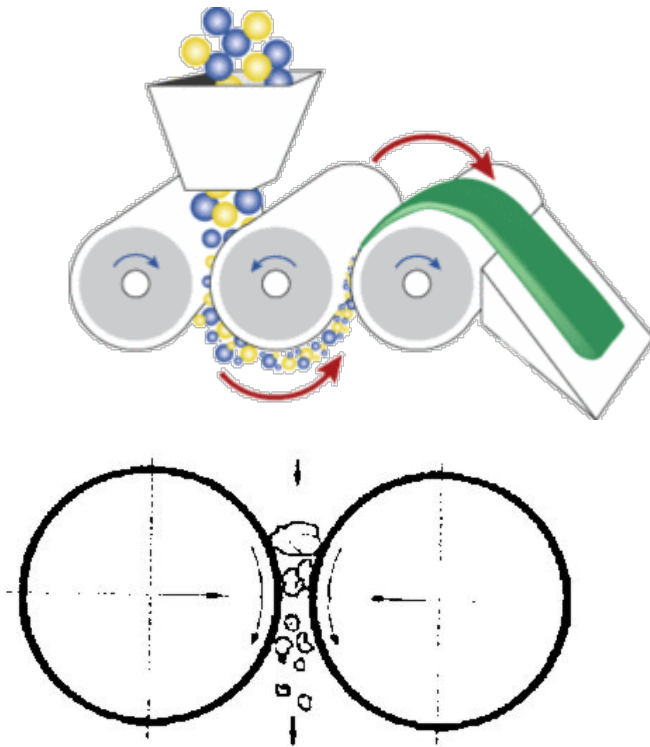
# Backenbrecher



## Bildquellen:

<https://www.tec-science.com/de/werkstofftechnik/stahl-erzeugung-herstellung/eisenerz-foerderung-und-erz-aufbereitung/> (2020)

# Walzenmühle und Schneidmühle

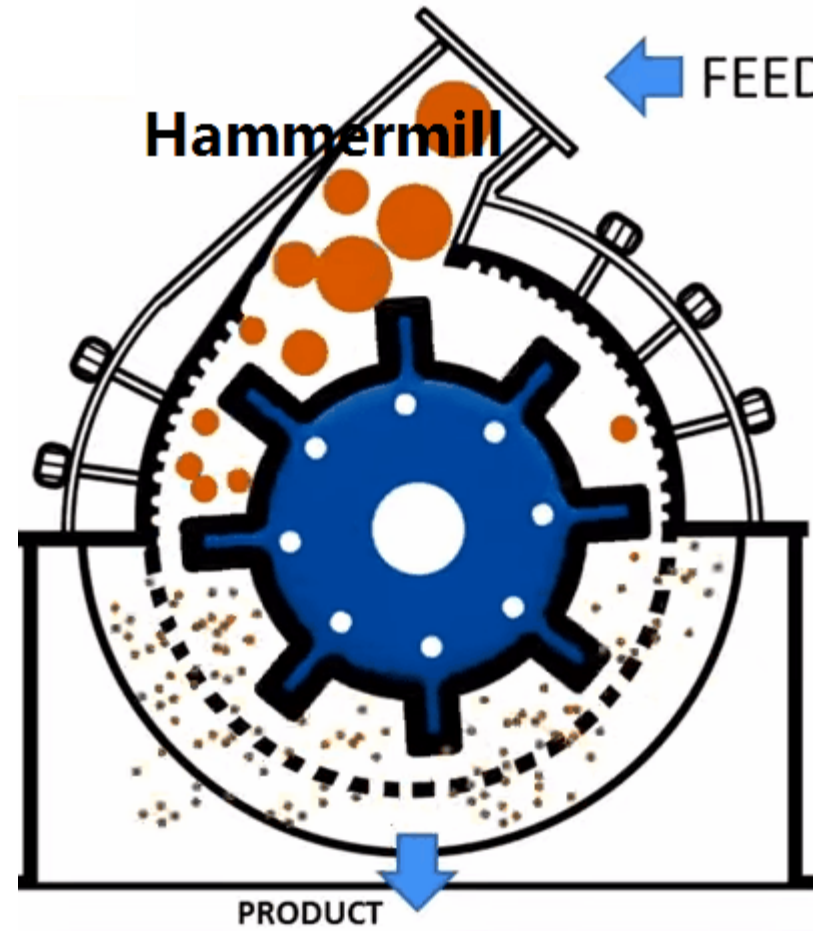
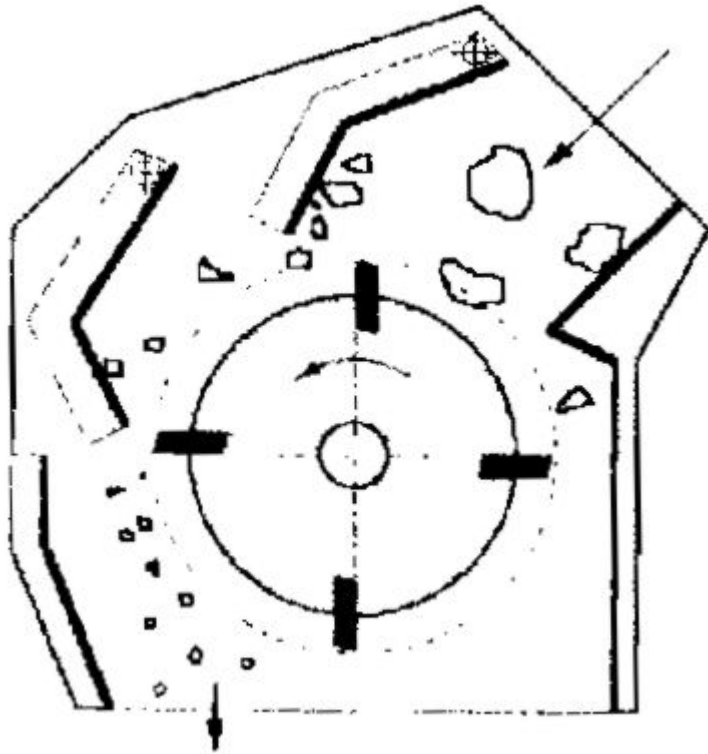


## Bildquellen:

[www.threerollmill.in/images/trm\\_working.jpg](http://www.threerollmill.in/images/trm_working.jpg) (2020)

M. Stieß, *Mechanische Verfahrenstechnik 2*. Springer, 1994; S. 250ff

# Prallbrecher (Hammermühle)

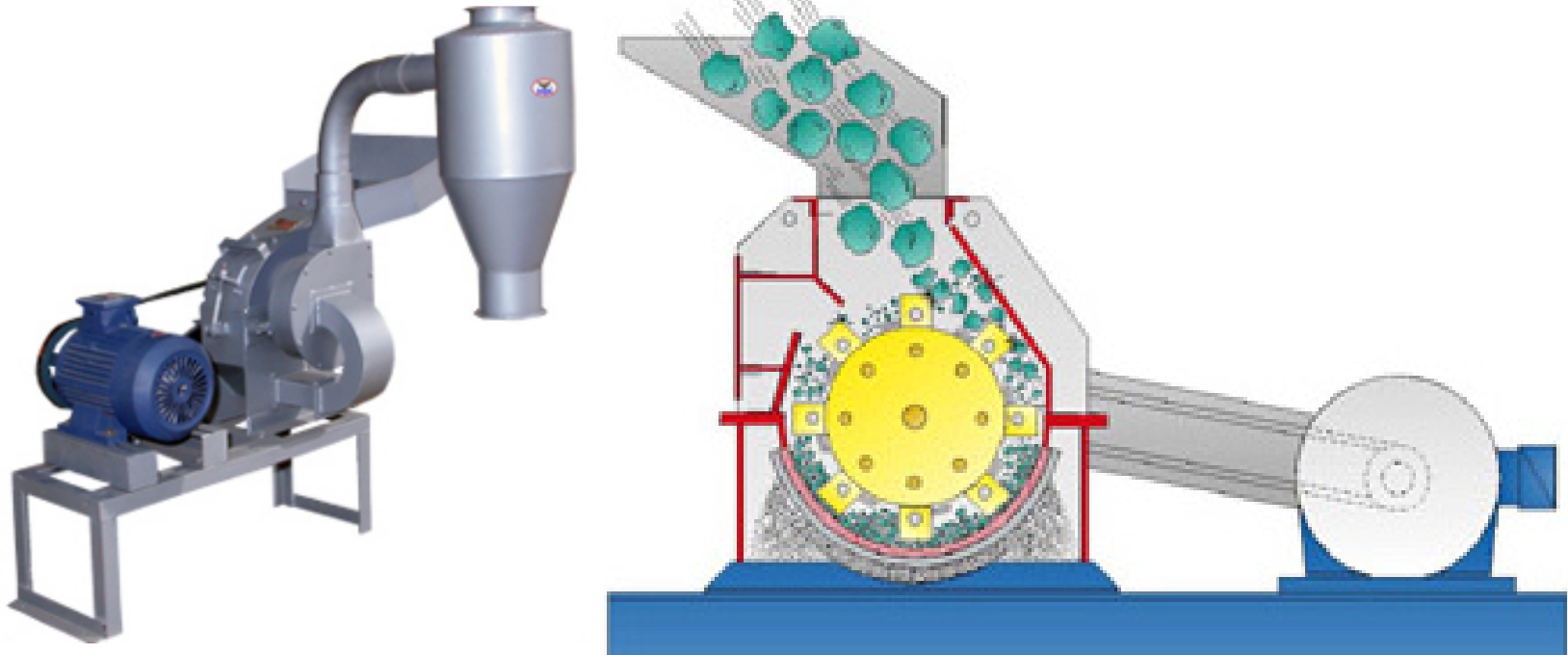


## Bildquellen:

M. Stieß, *Mechanische Verfahrenstechnik 2*, Springer, 1994; S. 250ff

<https://www.911metallurgist.com/blog/hammer-mill-working-principle> (2020)

# Hammermühle

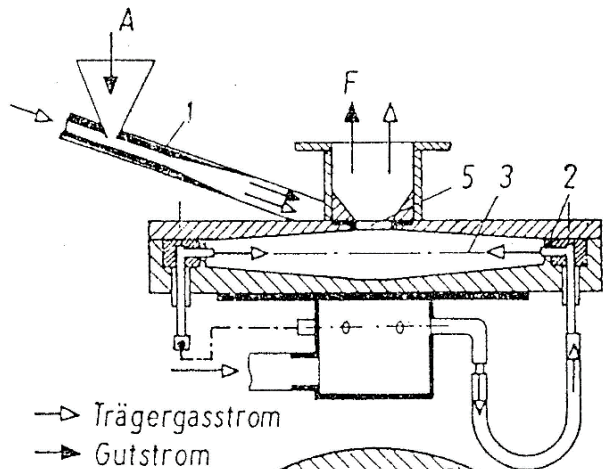


## Bildquellen:

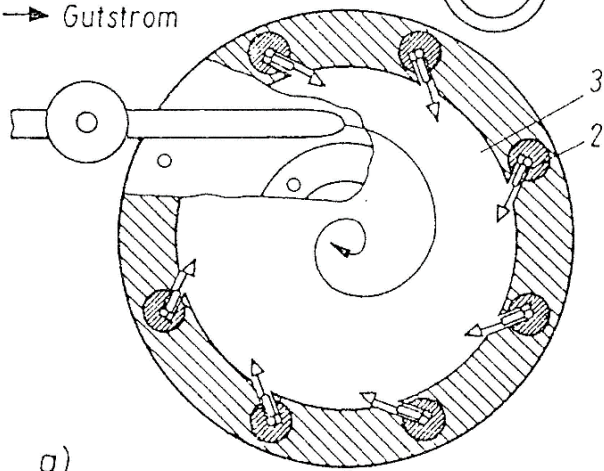
<http://www.pulverizer.co.in/hammermill.htm> (2020)

<http://www.hammermills.com/functions.htm> (2007)

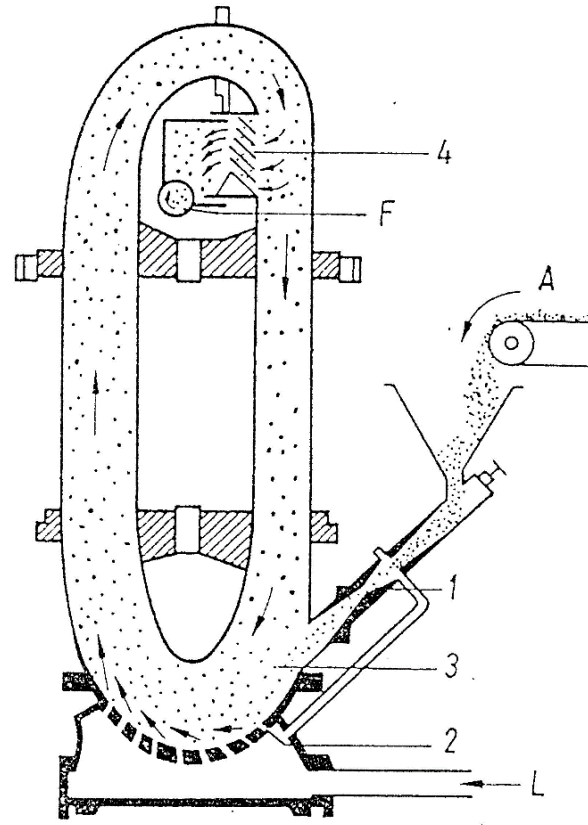
# Strahlmühle



→ Trägergasstrom  
→ Gutstrom



a)



b)

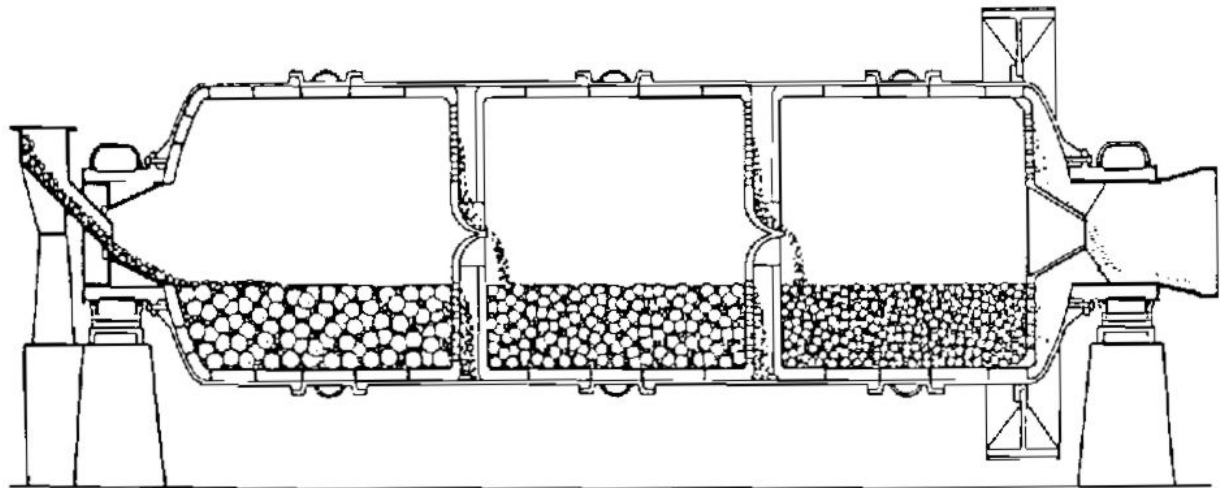
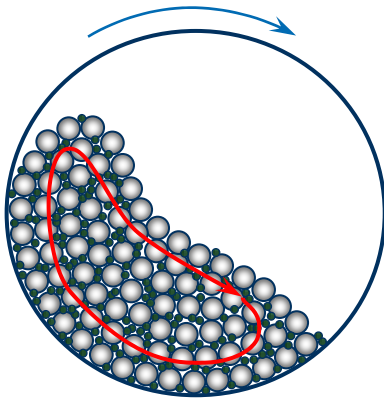
a) Spiralstrahlmühle  
b) Umlaufstrahlmühle  
1 Aufgabeeinjektor  
2 Düsen  
3 Mahlraum

4 Sieber  
5 Austragöffnung  
A Aufgabe  
F Fertiggut  
L Luft- bzw. Gasstrom

Bildquelle:

??

# Kugelmühle

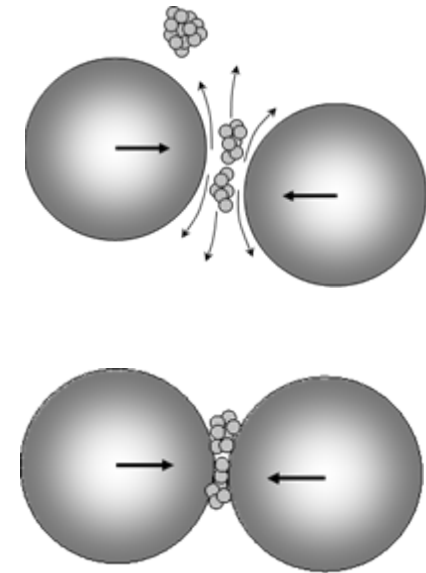
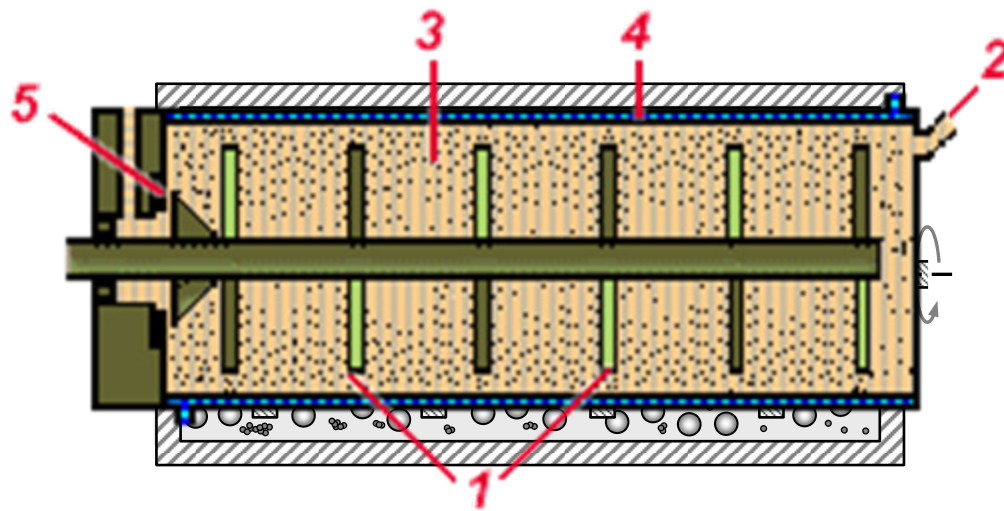


## Bildquellen:

Frank Babick ©2012

M. Stieß, *Mechanische Verfahrenstechnik 2*. Springer, 1994, S. 300

# Rührwerkskugelmühle



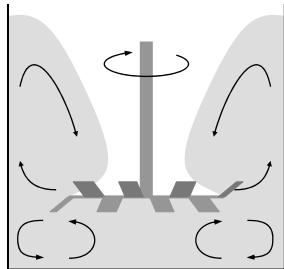
## Bildquellen:

[http://www.exakt.de/uploads/RTEmagicC\\_illu\\_dww.gif](http://www.exakt.de/uploads/RTEmagicC_illu_dww.gif) (2007)

F. Babick, *Suspensions of colloidal particles and aggregates*. Springer, 2016, S. 236

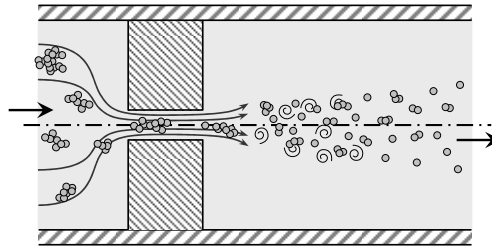
# Dispergiertechniken

## Scheibensysteme (Dissolver)



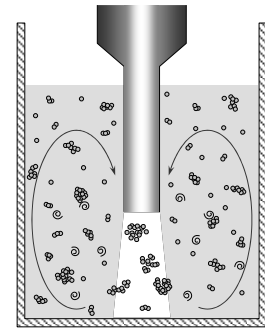
laminare Scherung in  
hochviskosen Medien

## Hochdrucksysteme (Düsen, Blenden, ...)



Dehnströmung in Düse,  
Turbulenz im Nachlauf  
(für Emulsionen)

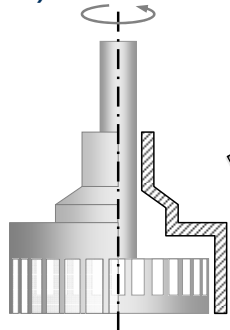
## Ultraschalldispersierer



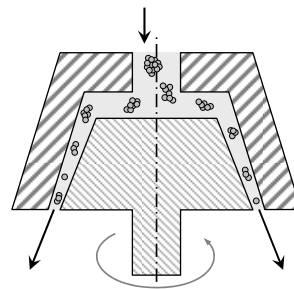
Dispergieren durch Kavitation  
(Emulsionen & Agglomerate)

## Rotor-Stator-Systeme

### a) Zahnkranzdispersierer

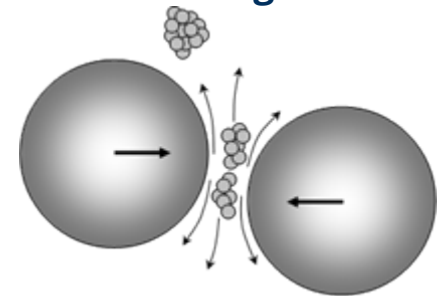


### b) Kolloidmühlen



turbulente Strömung von meist niedrig viskosen Medien  
(Emulgieren & Desagglomerieren)

## Rührwerkskugelmöhlen



Dehnströmung zur  
Desagglomeration

# 5. Zerkleinerungstechnik

– *Literaturverweise* –

# Literatur zum Thema Zerkleinerung

- M. Stieß: *Mechanische Verfahrenstechnik Bd. 2*. Springer, Berlin, **1997**;  
[doi:10.1007/978-3-662-08599-8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-08599-8)  
→ Kap. 10 (Theorie und Praxis)
- H. Schubert (Hrsg.): *Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik, Bd. 1 und 2*; Wiley-VCH, Weinheim, **2003**; [doi:10.1002/3527603352](https://doi.org/10.1002/3527603352)  
→ Bd. 1 Kap. 5 (Theorie und Praxis)
- M. Zogg: *Einführung in die Mechanische Verfahrenstechnik*. Teubner, Stuttgart, **1993**.  
→ Kap. 2 (Grundlagen und Praxis)