

Zerkleinern

- 1 Einleitung
- 2 Zerkleinerungsapparate
 - 2.1 Brecher (Grobzerkleinerung)
 - 2.2 Mühlen (Feinzerkleinerung)
 - 2.3 Zerkleinerungsanlage
- 3 Zerkleinerungsvorgänge
- 4 Partikelgrößenverteilung eines Haufwerks
 - 4.1 Definitionen
 - 4.2 Integrale Massenverteilung (Verteilungssummenkurve)
 - 4.3 Differentielle Massenverteilung (Verteilungsdichtekurve)
 - 4.4 Spezifische Oberfläche des Haufwerks
- 5 Berechnungsgrundlagen
 - 5.1 Zerkleinerungsprozesse
 - 5.2 Kugelmühle
 - 5.2.1 Zeitgesetz
 - 5.2.2 Bruchenergie von Mahlgütern
 - 5.2.3 Bewegungsvorgänge
 - 5.2.4 Kritische Drehzahl
 - 5.2.5 Kugelgröße
 - 5.2.6 Spezifischer Arbeitsbedarf
 - 5.2.7 Leistungsbedarf, Antriebsleistung und Auslegung einer Kugelmühle

1 Einleitung

fast alle festen Rohstoffe, Zwischen- und Endprodukte müssen zerkleinert werden:

- Erzeugen einer bestimmten Korngrößenverteilung
- Erzeugen einer geforderten spezifischen Oberfläche
- Aufschluß von Naturstoffen (Rohstoffen) z.B. Bauxit, um Wertstoffe anzureichern oder Schadstoffe abzureichern

Zerkleinerungsprozesse sind sehr energieaufwendig:

weltweit \approx 5% der Welt-Elektroenergieerzeugung.
Diese Energiemengen können jedoch nur im ‰-Bereich zum Zerkleinerungsvorgang ausgenutzt werden.

⇒ belastet Herstellkosten, z.B. bei Zement mit 20 bis 25 %.

Tribochemie: beim Zerkleinerungsvorgang können auch chemische und physikalische Vorgänge ablaufen.

	Mohs-Härte
- Hart-Zerkleinern , z.B. Zement, Glas, Carbid, Feldspat, Quarz; (in der chem. Industrie vorwiegend)	5 bis 10
- Mittelhart-Zerkleinern, z.B. Kohle, Salze, Kalkstein	2 bis 5
- Weich-Zerkleinern, z.B. Getreide, Graphit, Talkum	\leq 1

Nach den Korndurchmesser des Gutes unterscheidet man:

	n_z	$d_{ex,max,80}$
- Grobzerkleinerung → Grobbrechen	3 bis 6	$d > 50 \text{ mm}$
- Mittelzerkleinerung → Feinbrechen	4 bis 10	$5 < d < 50 \text{ mm}$
- Schroten	5 bis 10	$0,5 < d < 5 \text{ mm}$
- Feinmahlen	10 bis 50	$50 < d < 500 \mu\text{m}$
- Feinstmahlen	> 50	$5 < d < 50 \mu\text{m}$
- Kolloidmahlen	> 50	$d < 5 \mu\text{m}$

Zerkleinerungsgrad n_z :

$$n_z \equiv \frac{d_{in,max,80}}{d_{ex,max,80}}$$

in : im Eingangs-(Aufgabe) gut

ex : im Auslaufgut, nach dem Zerkleinern

max: Größt-Korndurchmesser

d_{80} : Korndurchmesser \equiv Siebmaschenweite durch die 80 % des Eingangsguts durchfällt.

Trockenmahlen: Trägerfluid Luft oder N_2 , CO_2

Naßmahlen: Trägerfluid (meist) Wasser, geringerer Energieaufwand als bei Trockenmahlung, infolge höherer Viskosität; staubfrei

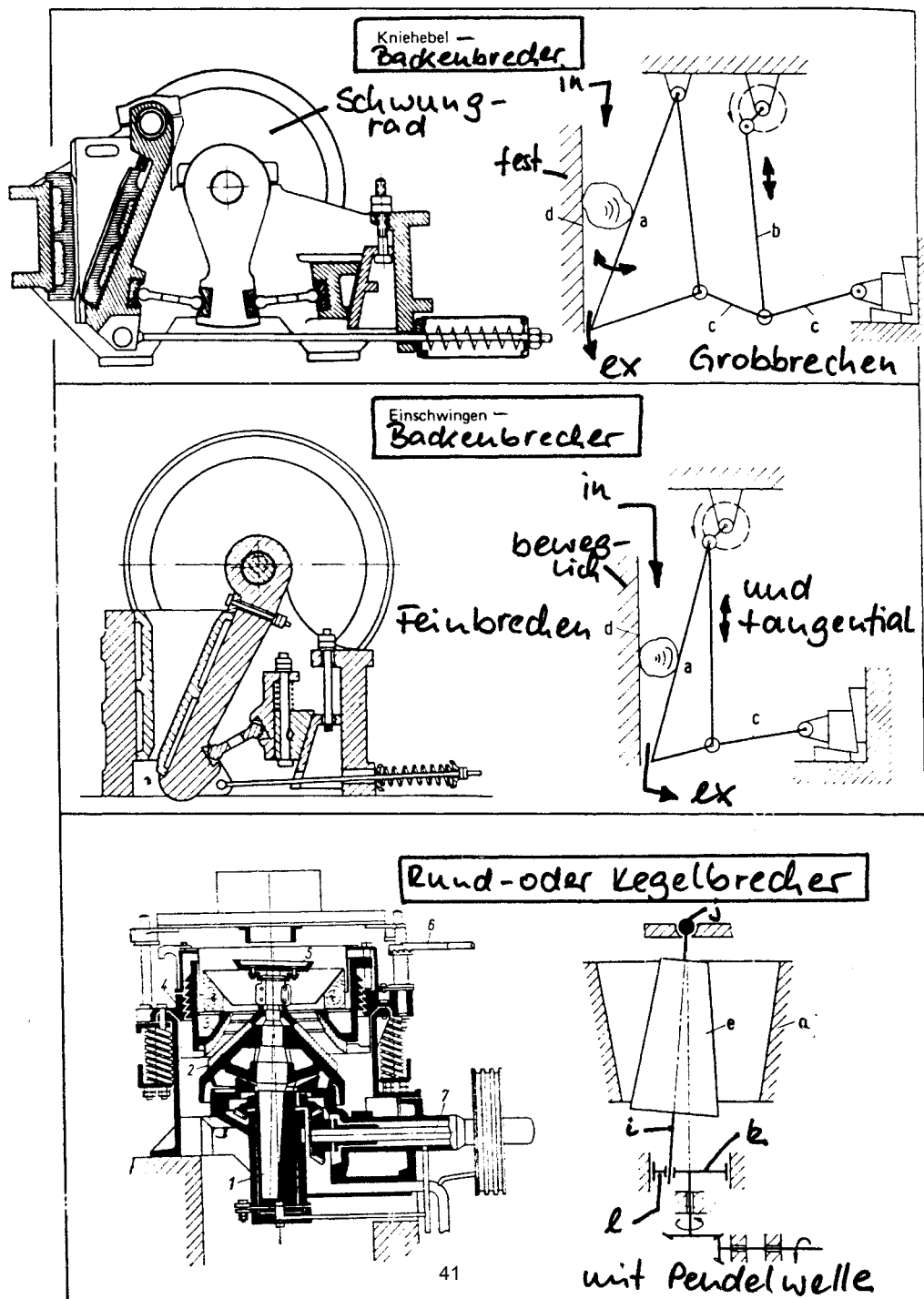
Feingut in Mühlen: n_z sollte nicht zu groß werden, sonst

- Erhöhung des Energieverbrauchs
- Verschleiß nimmt zu
- Verstopfung der Mühlen

Verschleiß: starker Abrieb, der das Mahlgut verunreinigt
 Mahlkörper müssen nach einer gewissen Zeit ersetzt werden.

2 Zerkleinerungsapparate

2.1 Brecher (Grobzerkleinerung)



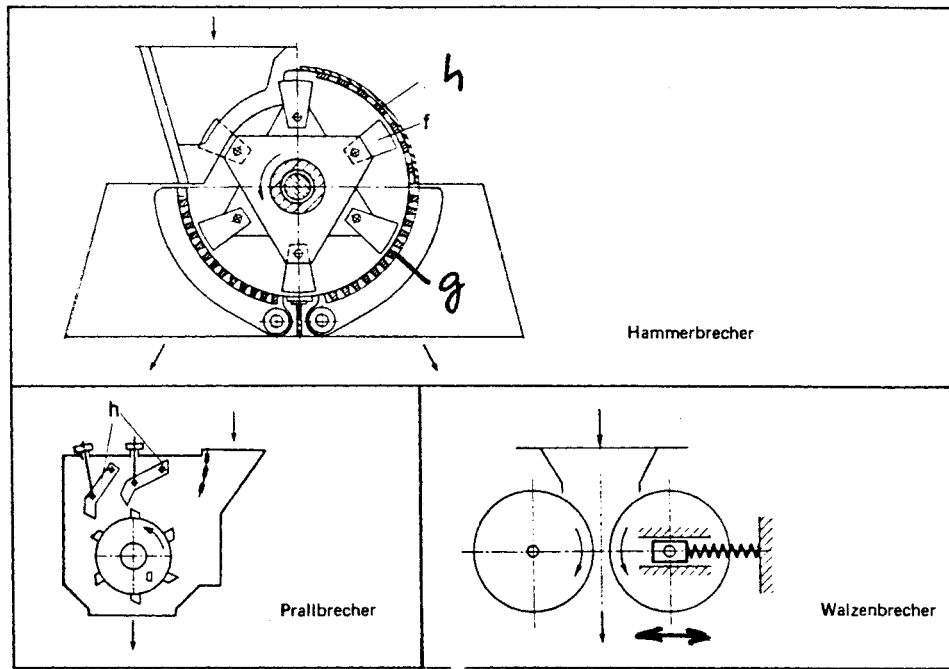


Abb. 1 Maschinen für die Grobzerkleinerung

^{sch.} a) Brechwinde; b) Hubstange; c) Stützplatte; d) Druckplatte; e) Brechkegel; f) Prallwerkzeug; g) Siebrost; h) Prallplatten.

i) Pendelwelle (Kegelachse)

j) Lager

k) und l) Exzenter

$d_{ex, 80} > \text{einige cm}$

Einteilung der Übersicht zu Abb. 1

	Zerkleinerungsgrad n_z	Stückgröße Austritt mm	Durchsatz t/h	Leistungsbedarf kW
Kniehebel - Einschwingen- } Backen- } brecher	5 bis 6	50 bis 300	8 bis 400	9 bis 170
Grobbrecher	5 bis 6	15 bis 60	0,5 bis 22	5 bis 50
Feinbrecher	6 bis 10	15 bis 25	3 bis 20	7 bis 32
Kegelbrecher				
Grobbrecher	4 bis 6	25 bis 250	12 bis 1600	14 bis 280
Feinbrecher	4 bis 20	8 bis 20	20 bis 85	20 bis 75
Hammerbrecher	4 bis 10	10 bis 40	10 bis 90	15 bis 100
Prallbrecher	4 bis 12	5 bis 40	5 bis 50	4 bis 50
Walzenbrecher	3 bis 4	1 bis 40	4 bis 70	4 bis 65

2.2 Mühlen (Feinzerkleinerung)

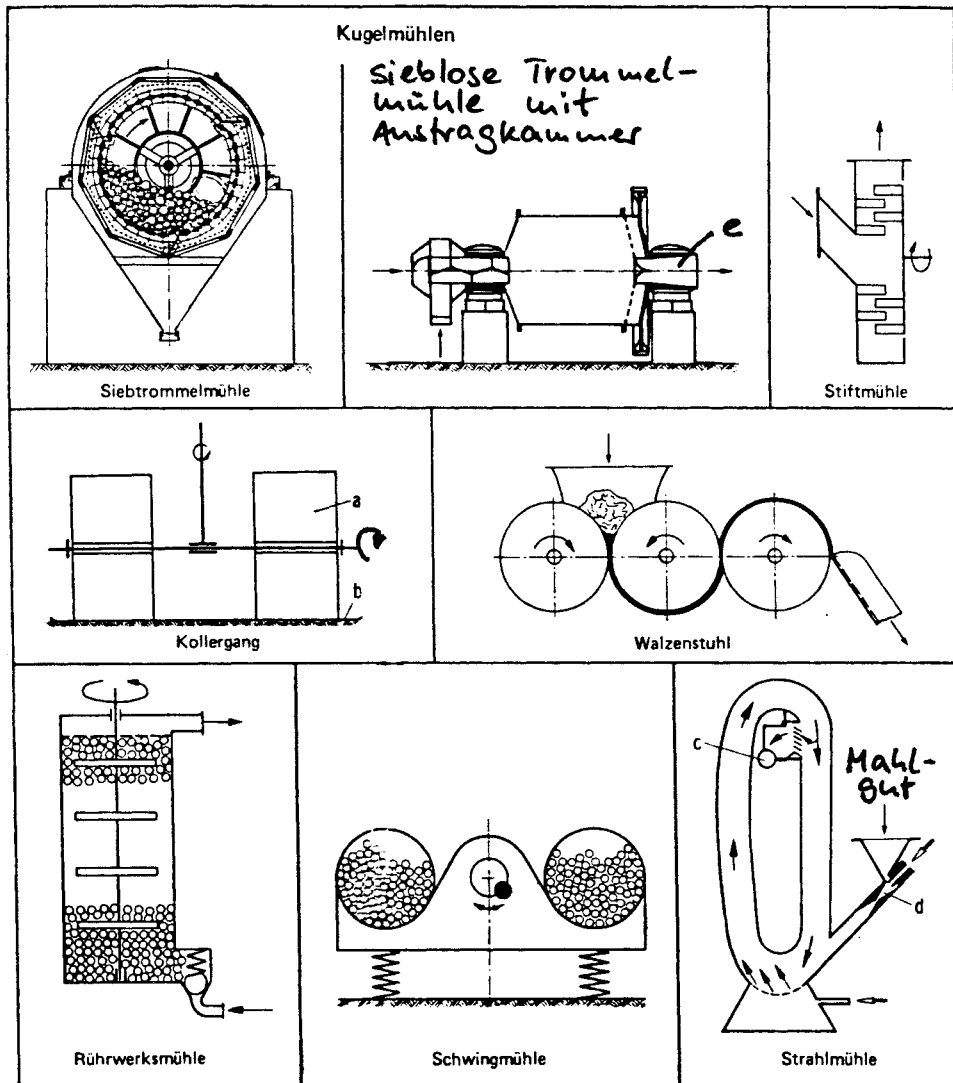


Abb. 2. Maschinen für die Feinzerkleinerung
 a) Koller (Walze); b) Mahlbahn; c) Austrag; d) Injektor; = Treibmittel, e) Austragsbüchse mit Kegel

$d_{ex, 80} < \text{einige } \mu\text{m}$

2.3 Zerkleinerungsanlage

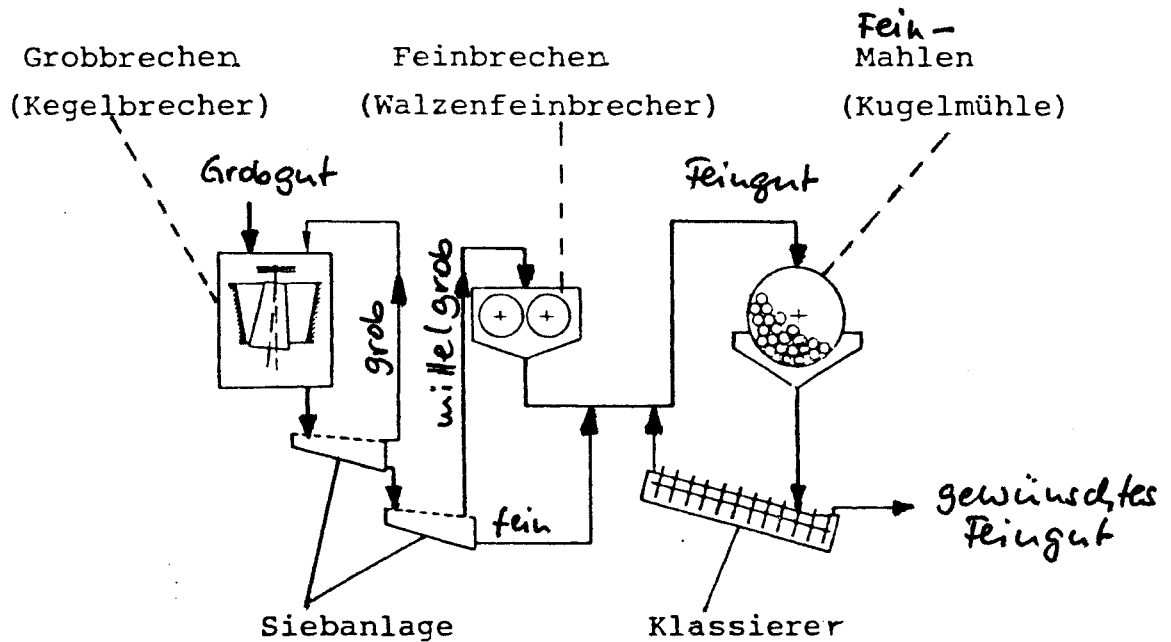


Abb.3 Beispiel einer Zerkleinerungsanlage

3 Zerkleinerungsvorgänge

Bruchbeginn und Bruchausbreitung, Bruchwahrscheinlichkeit
Energiebedarf ist um 10^2 bis 10^3 höher als die spezifische freie
Grenzflächenenergie bei idealer, reversibler Spaltung \Rightarrow
reaktive Bruchflächen \rightarrow Mechanochemie

Agglomerationszustand nach Beanspruchung

noch viele Fragen ungelöst.

4 Partikelgrößenverteilung eines Haufwerks

Zerkleinerte Feststoffe stellen ein Haufwerk von Teilchen (Schüttgut) dar, die sich in Masse, Größe und Form voneinander unterscheiden \rightarrow auch Unterschiede in: Sinkgeschwindigkeit, Oberfläche, Volumen und Anzahl von Teilchen.

4.1 Definitionen

4.1.1 Teilchen- bzw. Korngröße d_K ("Feinheit")

a) Korngröße $d_K \equiv$ [ichte Maschenweite eines Prüfsiebes, durch das ein bestimmter Massenanteil (Siebdurchgang D) des Aufgabegutes gerade noch fällt.

z.B. $d_{80} = 1 \text{ mm}$: 80 Massen% des Haufwerks fallen durch ein Sieb der Maschenweite 1 mm, bzw. der Siebdurchgang D ist 80 %, wenn das Sieb die Maschenweite 1 mm hat.

$$\Rightarrow \boxed{d_K \equiv d_{80}}$$

Unterkorn : Körner mit $d_K < d_{80}$, d.h. sie können das Sieb passieren

Überkorn : Körner mit $d_K > d_{80}$, d.h. sie können das Sieb nicht passieren (und bilden den Siebrückstand R).

b) Äquivalentdurchmesser $d_{\text{äq}}$ und Formfaktor f (Heywood-Zahl)

$d_{\text{äq}}$: Durchmesser von Kugeln, die die gleichen physikal. Eigenschaften aufweisen wie die tatsächlichen, völlig unregelmäßig geformten Teilchen: z.B. volumengleiche, oberflächengleiche Kugeln

$$\Rightarrow \boxed{d_K \equiv d_{\text{äq}}}$$

$$d_{\text{äq}} = d_V \quad \text{oder} \quad d_{\text{äq}} = d_S$$

(Handwritten: $\frac{6}{\pi} V_{\text{Kugel}}$)

d_V Kugeldurchmesser volumengl. Kugeln

d_S Kugeldurchmesser oberflächengl. Kugeln

Heywoodzahl f

$$f \equiv \frac{O_{\text{eff}}}{O_{\text{Kugel}}} = \frac{d_{\text{eff}}^2}{d_V^2} = \frac{d_{\text{eff}}^2}{d_S^2} \geq 1 \quad (1a)$$

f : Maß für die Abweichung von der Kugelform.

$$\psi \equiv \frac{1}{f} = \frac{O_{\text{Kugel}}}{O_{\text{eff}}} = \frac{\pi d_{\text{Kugel}}^2}{O_{\text{eff}}} = \frac{\pi \frac{6}{\pi} V_{\text{Kugel}}^{2/3}}{O_{\text{eff}}} \quad (1b)$$

ψ : Sphärizität

	f
Kugeln	1
Sand	1,3 bis 1,4
Zement	1,8
Kohlenstaub	1,8 bis 2,1
Flugstaub	1,2 bis 2,3
Quarz	1,8 bis 4,0
Glimmerplättchen	9,3

$$O_{\text{Kugel}} = 4\pi r^2 = \pi d_{\text{Kugel}}^2$$

$$V_{\text{Kugel}} = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{\pi}{6} d_{\text{Kugel}}^3 \Rightarrow d_{\text{Kugel}} = \left(\frac{6}{\pi} V_{\text{Kugel}}\right)^{1/3}$$

c) k. Momente der Korngrößen-Verteilungsdichtekurve $q(d_K)$

z.B.
 $k=1$ (1. Moment) : $\bar{d}_{K,1} = \int_{d_{K,\min}}^{d_{K,\max}} d_K q(d_K) d d_K$ (2a)

$k=2$ (2. Moment) : $\bar{d}_{K,2} = \sqrt{\int_{d_{K,\min}}^{d_{K,\max}} d_K^2 q(d_K) d d_K}$ (2b)

\Rightarrow $\boxed{d_K \equiv \bar{d}_{K,1}}$ oder $\boxed{d_K \equiv \bar{d}_{K,2}}$

Körnungs-Analyse (nach Korn-Feinheit und -Verteilung) erfolgt experimentell durch:

für $d_K \geq 60 \mu\text{m}$: Siebanalyse

für $d_K \leq 60 \mu\text{m}$: Sedimentationsanalyse, Windsichten oder Schlämmen

4.1.2 Siebdurchgang D und Siebrückstand R

Masse der Körner, die ein Sieb der Maschenweite d_K passieren (3a)
 $D \equiv \frac{\text{Gesamtmasse der Siebaufgabe}}{\text{Gesamtmasse der Siebaufgabe}}$

$0 \leq D \leq 1$ oder $0 \% \leq 100 D \leq 100 \%$

Massenanteil, der auf den Korngrößenbereich $< d_K$ entfällt.

Masse der Körner, die auf dem Sieb der Maschenweite d_K bleiben
 $R \equiv \frac{\text{Gesamtmasse der Siebaufgabe}}{\text{Gesamtmasse der Siebaufgabe}}$ (3b)

$0 \leq R \leq 1$ oder $0 \% \leq 100 R \leq 100 \%$

Massenanteil der auf den Korngrößenbereich $> d_K$ entfällt.

aus (3a) und (3b) folgt:

$$\boxed{D + R = 1} \quad (3c)$$

4.2 Integrale Massenverteilung (Verteilungssummenkurve)

Abszisse: $d_{\ddot{a}q} \equiv d_K$ (Siebmaschenweite)

Ordinate: normiertes Mengenmaß Q , z.B. Anzahl, Länge oder Masse bzw. Volumen von Partikeln

Verteilungssummenkurve: $Q(d_K) \equiv R(d_K)$

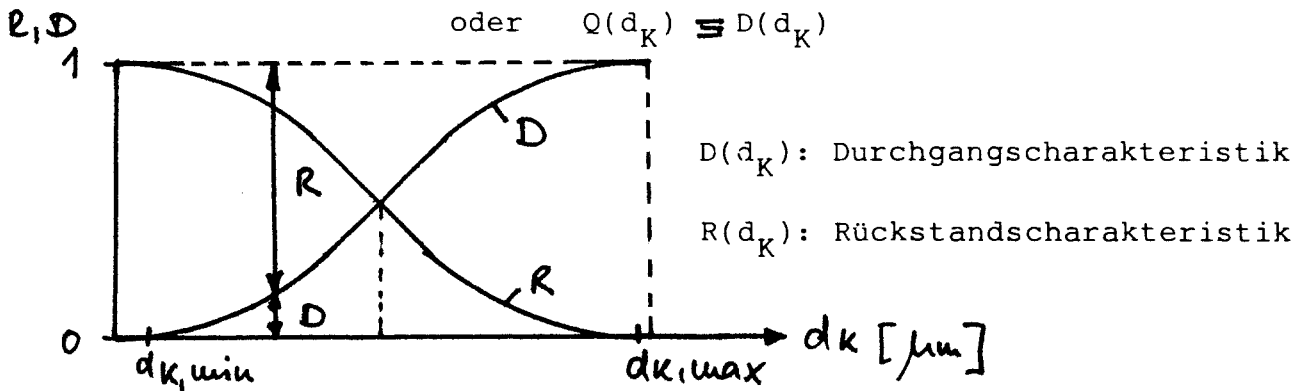


Abb. 4 Integrale Massenverteilungskurven (Massen-Verteilungssummenkurve) eines Haufwerks

Verteilungsfunktion nach Rosin, Rammler, Sperling und Bennett aus gemessenen Rückstandscharakteristiken (R R S B -Verteilung):

$$R(d_K) = e^{-\left(\frac{d_K}{\bar{d}_K}\right)^n} \quad (4a)$$

\bar{d}_K : statistischer Mittelwert von $R(d_K)$, statistisches Kornmittel, Lageparameter, Mittelfeinheit, abhängig von:

Mahlgut, Zerkleinerungsapparat, Durchsatz \dot{m} , Mahlorgane

n : Streuungsparameter von $R(d_K)$, Gleichmäßigkeitszahl (-faktor), Richtungsfaktor; abhängig von: Mahlgut, Zerkleinerungsapparat, \dot{m} des Mahlgutes.

$$\lg \frac{1}{R} = \left(\frac{d_K}{\bar{d}_K} \right)^n \lg e$$

$$\lg \left(\lg \frac{1}{R} \right) = n \lg d_K - n \lg \bar{d}_K + \lg (\lg e) \quad (4b)$$

für $d_K = \bar{d}_K$ folgt aus Gl.(4a):

$$R (d_K = \bar{d}_K) = \frac{1}{e} \approx 0.368$$

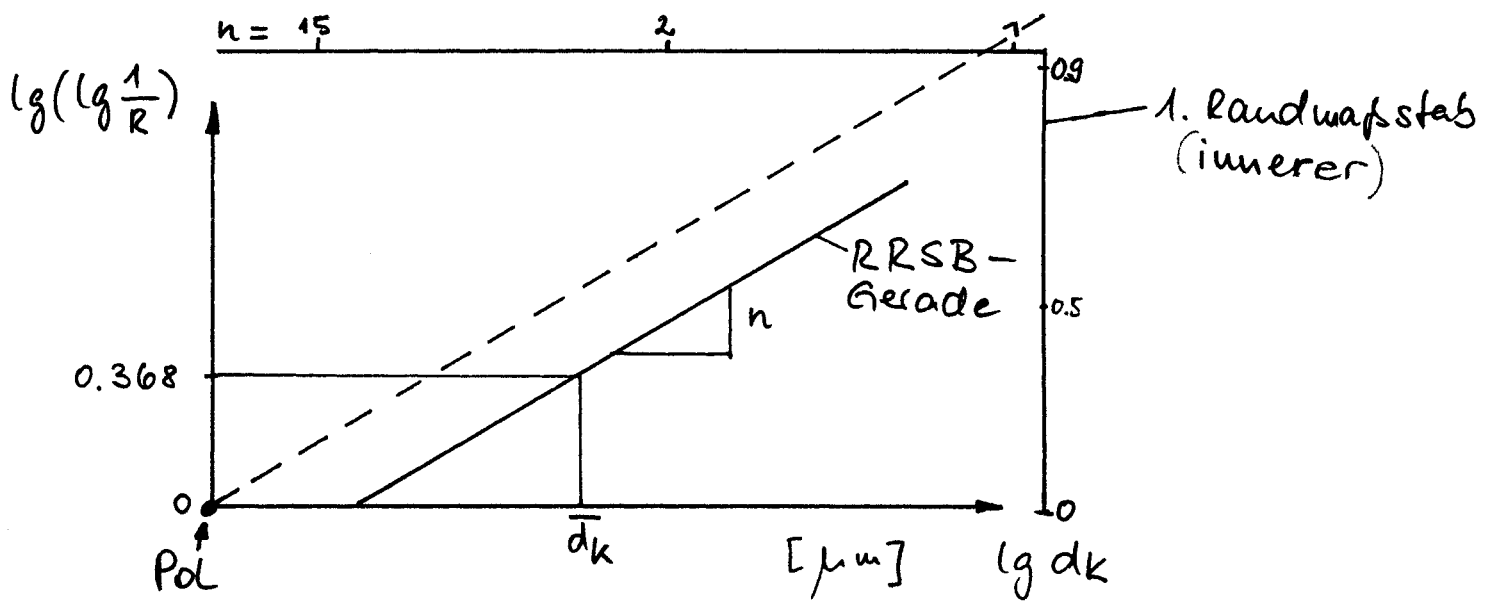


Abb. 5 R R S B -Gerade nach Gl.(4b) zur grafischen Ermittlung von n und \bar{d}_K .

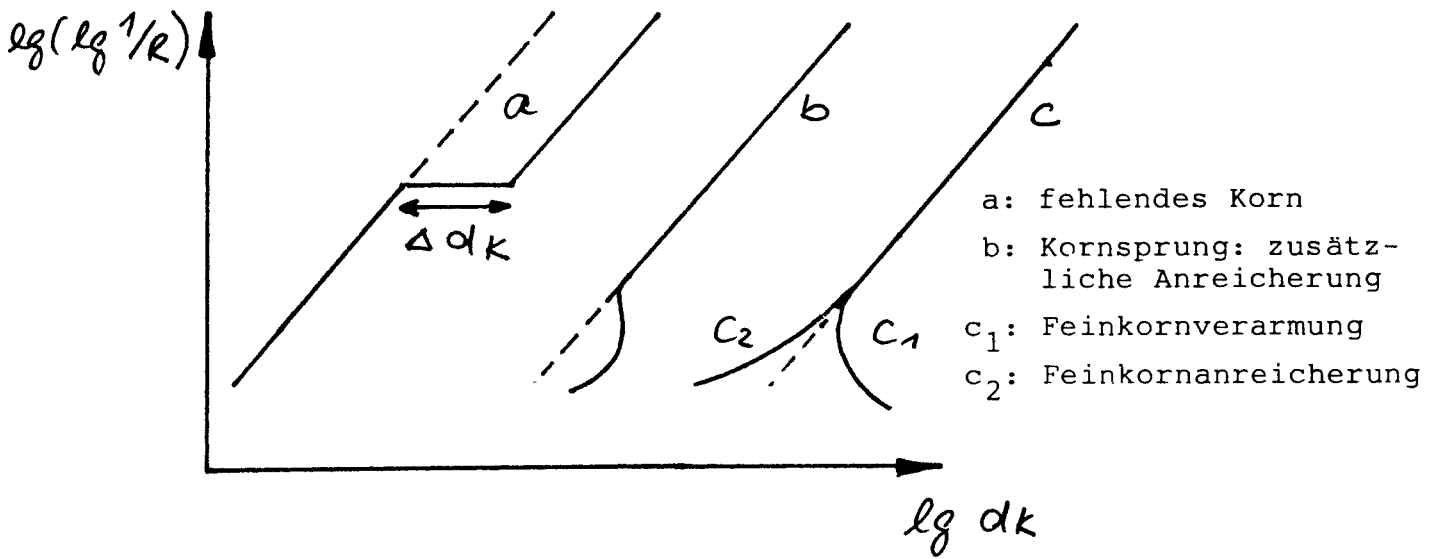


Abb. 6 Abweichungen von der R R S B -Geraden

Für das Grob-Zerkleinern in Brechern ist R R S B -Gerade ungültig!

4.3 Differentielle Massenverteilung (Verteilungsdichtekurve)

Verteilungsdichtekurve $q(d_K) \equiv \frac{dQ(d_K)}{dd_K} = - \frac{dR}{dd_K} = \frac{dD}{dd_K} \quad (5)$

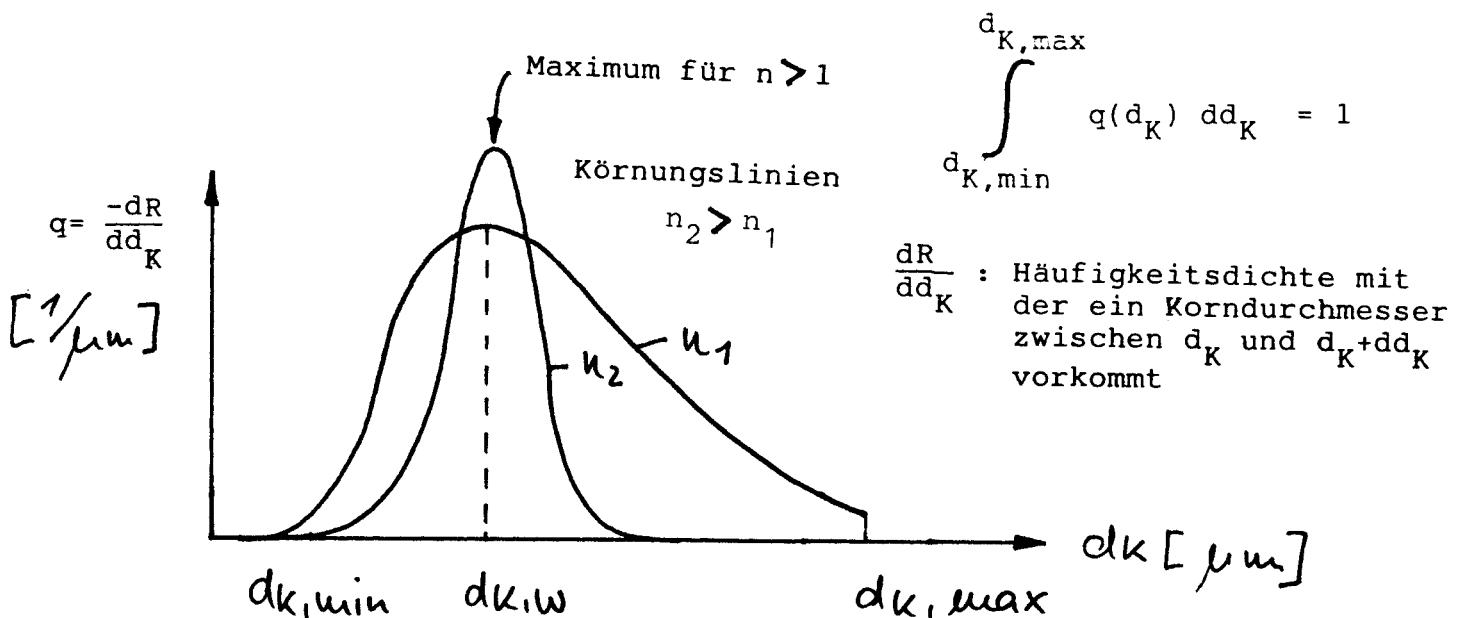


Abb. 7 Differentielle Massenverteilungskurven (Massen-Verteilungsdichtekurven) eines Haufwerkes

Die Verteilungsdichtekurven beeinflussen folgende Eigenschaften eines Haufwerkes:

- Fließfähigkeit
- Raumausnutzung
- Löslichkeit
- Agglomerationsneigung

4.4 Spezifische Oberfläche des Haufwerkes

Oft wird in der chem. Technik eine Produkteigenschaft von der spezifischen Oberfläche S_V oder S_m bestimmt, die durch die Partikelgrößenverteilung $q(d_K)$ ausgedrückt werden kann:

$$S_m = 6 f \int_{d_{K, \min}}^{d_{K, \max}} \frac{q(d_K)}{\rho_s d_K} dd_K \quad (8a)$$

$q(d_K)$: Massen-Verteilungsdichtekurve

ρ_s : Dichte des Haufwerkes

S_m : massenbezogene Oberfläche des Haufwerkes $\left[\frac{m^2}{kg} \right]$

S_V : volumenbezogene Oberfläche des Haufwerkes $\left[\frac{m^2}{m^3} \right]$

S_V läßt sich aus den 2. und 3. Momenten der Anzahl-Verteilungsdichtekurven $q_0(d_S)$ und $q_0(d_V)$ berechnen nach:

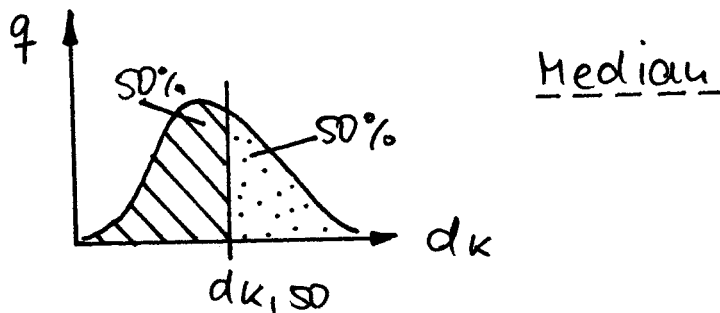
$$S_V = \frac{\int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \pi d_S^2 q_0(d_S) d d_S}{\int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \pi/6 d_V^3 q_0(d_V) d d_V} \quad (8b)$$

Empirisch gemessene Massen-Verteilungsdichtekurven lassen sich oft als logarithmische Normalverteilungen (logarithm. Abszisse) darstellen:

$$-\frac{dR}{dd_k} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\frac{(\ln d_k - \ln d_{k,50})^2}{2\sigma^2} \right] \equiv f(d_k) \quad (6)$$

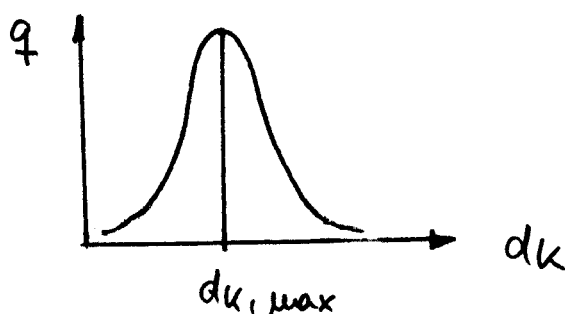
σ : Streuungsparameter

$d_{k,50}$: Medianwert der Verteilungsdichtekurve, d.h. der Korndurchmesser der sich ergibt, wenn die Fläche 50 % beträgt:



Manchmal, z.B. bei Getreidekörner, ist die Normalverteilung erfüllt:

$$-\frac{dR}{dd_k} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp - \left[\frac{(d - d_{k,max})^2}{2\sigma^2} \right] \quad (7)$$



$$S_V = \int S S_m \quad (8c)$$

Berechnung von S_V aus dem R R S B - Netz:

Die dimensionslose Oberflächenkennzahl A:

$$A \equiv \frac{S_V \bar{d}_K}{f} \quad (9)$$

kann im RRSB-Netz am 2. (äußeren) Randmaßstab abgelesen werden:

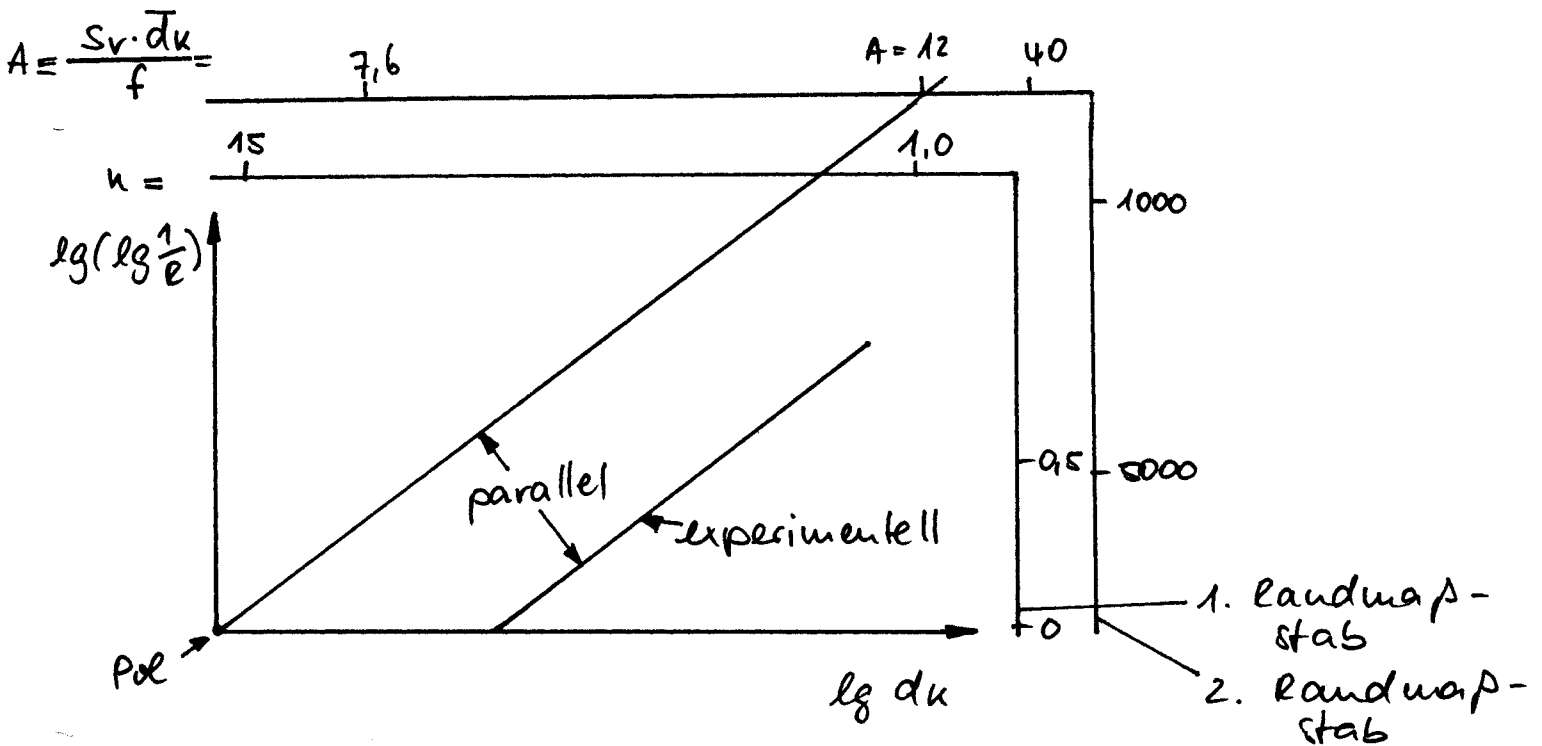


Abb. 8 RRSB-Netz zur Ermittlung von S_V eines Haufwerks

5 Berechnungsgrundlagen

5.1 Zerkleinerungsprozesse

Für Einzelkörner hat man folgende "Zerkleinerungsgesetze" gefunden:

$$\frac{dA_{m,Z}}{d\bar{d}_K} = -c \cdot \bar{d}_K^p \quad (10)$$

p, c : Konstanten

Zerkleinerungsgesetze

$$p = -2 \quad \text{v. Rittinger (1867)} \Rightarrow : A_{m,Z} = c(1/d_{\text{ex}} - 1/d_{\text{in}}) \quad (11a)$$

$$p = -1 \quad \text{Kick (1885)} \Rightarrow : A_{m,Z} = c(\ln d_{\text{in}} - \ln d_{\text{ex}}) \quad (11b)$$

$$p = -3/2 \quad \text{Bond (1952)} \Rightarrow : A_{m,Z} = 2c(1/\sqrt{d_{\text{ex}}} - 1/\sqrt{d_{\text{in}}}) \quad (11c)$$

Integration von $d_{\text{in}} \rightarrow d_{\text{ex}}$

$A_{m,Z}$: spezifische Zerkleinerungsarbeit bzw. spezifischer Arbeitsbedarf für eine Mahlung bezogen auf die Masse
 [J/kg] Mahlgut

Gln. (10) und (11) können nicht auf die maschinelle Zerkleinerung angewandt werden. Hierfür bessere Methode: Mathematische Simulation, mit der die Änderung der Partikelgrößenverteilung mit der Zeit erfaßt wird. Es werden Massenbilanzen für jede Kornklasse i aufgestellt, wobei die Massenabnahme \sim der vorhandenen Masse m_i ist:

$$\frac{dm_i}{dt} = -V_{Z,i} m_i + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} V_{Z,i} m_j \quad (12a)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, n$

$$m_i(t=0) = m_{i,0}$$

m_i : Massenanteil der Fraktion i

$V_{Z,i}$: Zerkleinerungsgeschwindigkeit

b_{ij} : Massenanteil von Bruchstücken der Partikeln aus Fraktion j , die in die i -te Kornklasse fallen. (*Verteilungskoeff. der Bruchstücke*)

n : Anzahl der Kornklassen i , $i=1$: größte Partikel

$V_{Z,i}$ und b_{ij} werden experimentell bestimmt und sind in Kugelmühlen (\rightarrow Abschnitt 5.2) bei Trockenmahlung etwa konstant.

5.2 Kugelmühle

5.2.1 Zeitgesetz

$$v_z = - \frac{\Delta m}{\Delta t} = k_z m^q \quad (13)$$

v_z : Zerkleinerungsgeschw.

Δm : Masse des gebildeten Feingutes

Δt : Zerkleinerungszeit

m : jeweils vorhandene Masse des Aufgabegutes

k_z : Zerkleinerungsgeschw.konstante;

q : Ordnung des Zerkleinerungsprozesses;

$q=f(G)$: $q < 0$ bei sehr großem G ; v_z fällt

$q=0$ bei großem G ; v_z maximal

$q=1$ bei sehr kleinem G

5.2.2 Bruchenergie von Mahlgütern

E_b : Bruchenergie. diejenige Energie, die für ein Einzelkorn bestimmter Größe und eines bestimmten Stoffes zu Bruch führt.

E_b ist innerhalb der Mahlgutteilchen nicht konstant sondern es liegt eine Bruchenergieverteilung $W_i(E_b)$ in Form einer logarithmischen Normalverteilung vor:

$$\frac{dw_i}{dE_b} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma E_b} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \left(\ln \frac{E_b}{\bar{E}_b} \right)^2 \right] \quad (14)$$

$\sigma, \bar{E}_b = f(d_K, \text{Material})$

σ : Streuungsparameter der Verteilung

\bar{E}_b : Mittelwert der Verteilung

W_i : Bruchanteil

$$\frac{dm_0}{dt} = \dot{m}_K \{ \quad (15a)$$

worin \dot{m}_K das Trefferglied:

$$\dot{m}_K = z_K \frac{z_{Ku}}{\bar{t}_{Ku}} \bar{m}_K$$

$\frac{dm_0}{dt}$: Anfangszerkleinerungsgeschw.
 \dot{m}_K : Mahlgutmassenstrom, der getroffen wird.
 (15b)

z_K : mittlere Anzahl der von einer Mahlkugel getroffenen Körner

z_{Ku} : Anzahl der Mahlkugeln

\bar{t}_{Ku} : mittl. Umlaufdauer einer Kugel

\bar{m}_K : mittl. Masse eines Kornes

und $\{$ das Energieglied darstellt:

$$\{ = \int_0^{\infty} \left(\int_{E_b}^{\infty} \frac{dg}{dE_{Ku}} dE_{Ku} \right) \frac{dW_i}{dE_b} dE_b \quad (15c)$$

worin

$\frac{dg}{dE_{Ku}}$ die Verteilung der ausnutzbaren Kugelenergie darstellt, die

von $E_{Ku} = E_b$ bis ∞ integriert werden muß, da ein Korn für

$E_{Ku} \geq E_b$ zerbricht.

Außerdem muß über die Verteilung der Bruchenergie E_b integriert werden, die zwischen $E_b = 0$ und ∞ liegen kann.

$\Rightarrow \xi$ ist also der Anteil der getroffenen Körner, der wirklich zerkleinert wird.

5.2.3 Bewegungsvorgänge

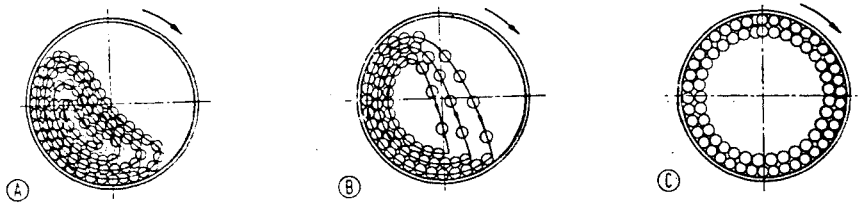


Abb. 9 Bewegungszustände in einer Kugelmühle
A Abrollen; B Kugelfall; C Zentrifugieren

$$f_M \equiv \frac{V_{\text{Kugel}}}{V_{\text{Mühle}}} : \text{Kugelfüllungsgrad; } 25\% < f_M < 45\%$$

Es gibt alle Übergangszustände (auch erheblicher Schlupf zwischen Kugeln und Mühlenwand) der obigen 3 Grenzfälle von Bewegungszuständen die von f_M und n abhängig sind:

bei kleinem f_M kann es zu Schwingungen der Kugelpackung kommen

$$\Rightarrow d_{\text{Ku}} < \frac{1}{20} d_{\text{Mü}}$$

5.2.4 Kritische Drehzahl

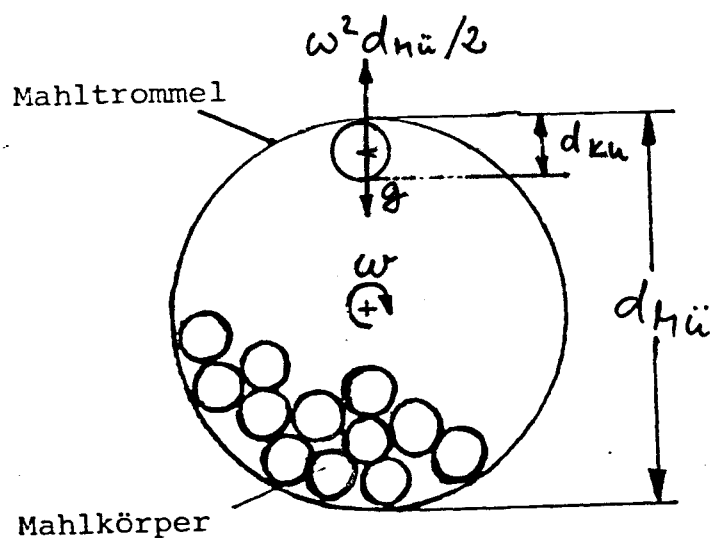


Abb. 10 Zur Berechnung der kritischen Drehzahl n_{cr} der Kugelmühle

Zentrifugalbeschleunigung = Fallbeschleunigung

$$\frac{d_{Mü} - d_{Ku}}{2} \omega^2 = g$$

mit $\omega = 2\pi n$ gilt:

$$n_{cr} = \sqrt{\frac{2g}{4\pi^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{d_{Mü} - d_{Ku}}}$$

$$n_{cr} = \frac{0,705}{\sqrt{d_{Mü} - d_{Ku}}} \quad (16)$$

$g \left[\frac{m}{s^2} \right]$	Fallbeschleunigung
$d_{Mü} [m]$	Mühlendurchmesser
$\omega [s^{-1}]$	Winkelgeschwindigkeit
$n [s^{-1}]$	Drehzahl der Mühle
$n_{cr} [s^{-1}]$	kritische Drehzahl
$d_{Ku} [m]$	Kugeldurchmesser

optimale Drehzahl $\approx 0,6$ bis $0,8 n_{cr}$

Gl.(16) ist vereinfacht:

$$n_{cr} = f(\text{Art und Form der Trommelpanzerung, Art und Form der Mahlkörper, } f_M)$$

5.2.5 Kugelgröße

Die Schlagenergie E_S einer Kugel muß ausreichen, die größten Körner zu zerkleinern, andererseits soll das Feingut dadurch nicht wieder brikettiert werden:

$$E_S = m_{Ku} \cdot g \cdot h = \underset{\substack{\text{Fallhöhe der} \\ \text{Kugeln Ku}}}{h} g V_{Ku} \rho_{Ku} = \rho_{Ku} \frac{\pi}{6} d_{Ku}^3 g h \approx d_{Ku}^3 \rho_{Ku} g \cdot d_{Mü} \quad (17)$$

Nach gl.(17) kann E_S durch den Kugeldurchmesser eingestellt werden, wenn ρ_{Ku} und $d_{Mü}$ festliegen. d_{Ku} kann empirisch abgeschätzt werden aus den Zahlenwertgleichungen:

$$d_{Ku} = 28 \sqrt[3]{\bar{d}_K} \quad (18a)$$

$$\bar{d}_K \text{ in [mm]}$$

$$d_{Ku} \text{ in [mm]}$$

oder

$$d_{Ku} = 6 \log \frac{d_{K,ex}}{\sqrt{d_{K,in}}} \quad (18b)$$

$$d_{K,ex} \text{ [mm] : Endkorngröße}$$

$$d_{K,in} \text{ [mm] : Eingangskorngröße}$$

und

$$d_{Ku} \leq 1/20 d_{Mü} \quad (18c)$$

5.2.6 Spezifischer Arbeitsbedarf

Aufgrund umfangreicher Messungen nach Bond, lassen sich Kugelmühlen auslegen, d.h. der Arbeitsbedarf $A_{m,Z}$ wird bestimmt nach:

$$A_{m,Z} = A_i \left(\frac{10}{\sqrt{d_{K,80,ex}}} - \frac{10}{\sqrt{d_{K,80,in}}} \right) \quad (19)$$

$d_{K,80,in} \quad [\mu m]$: Korndurchmesser bei $D=80 \%$ im Eingangsgut

$d_{K,80,ex} \quad [\mu m]$: " " " " im Auslaufgut

$A_i \quad [kWh/t]$: Mahlbarkeit, Arbeitsbedarf pro Masse Gut für eine Mahlung auf $d_{K,80,ex} = 100 \mu m$

$$\Rightarrow A_{m,Z} \approx A_i \frac{10}{\sqrt{100}} = A_i$$

	$A_i \quad \left[\frac{kWh}{t} \right]$
Basalt	22
Zementklinker	15 bis 18
Kohle	12
Koks	23
Glas	3
Eisenerz	16 bis 20
Quarz, Kalkstein, Feldspat	13 bis 15
Korund	64
Bleierz, Chromerz	11 bis 13

Tab. 1 Richtwerte für die Mahlbarkeit A_i zur Anwendung der Formel (19)

5.2.7 Leistungsbedarf, Antriebsleistung und Auslegung einer Kugelmühle

Der maximale Leistungsbedarf N_{\max} einer Kugelmühle, bei schlupffreier Mitnahme der Kugeln, für $n/n_{\text{cr}} = 0.7$ bis 0.8 ,

$d_{\text{Ku}} = (10 \text{ bis } 20) d_{\text{K}}$ und $f_{\text{M}} = 0.35$ bis 0.45 berechnet sich nach:

$$N_{\max} = (0.035 \text{ bis } 0.042) \left[1 + 0.4 f_{\text{G}} \frac{\rho_{\text{G}}}{\rho_{\text{Ku}}} \right] \frac{n}{n_{\text{cr}}} \rho_{\text{Ku}} l \sqrt{g^3 d_{\text{Mü}}^5} \quad (20a)$$

$$f_{\text{G}}: \text{Mahlgutfüllungsgrad} = \frac{V_{\text{Gut}}}{V_{\text{Mühle}}} \approx 1$$

ρ_{G} : Dichte des Mahlgutes

l : Mühlenlänge

$0.4 \approx 1 - \epsilon$: Feststoffvolumenanteil der Trübe, die möglichst dick sein soll

für $n/n_{\text{cr}} = 0.75$ gilt nach Blanc-Eckardt:

$$N = c m_{\text{Ku}} \sqrt{d_{\text{Mü}}} \quad (20b)$$

$$c \left[\frac{W}{\text{kg m}^{1/2}} \right]: \text{ zwischen } 6.8 \text{ und } 13.3$$

$$m_{\text{Ku}} \text{ [kg]} : \text{ Masse der Mahlkugeln}$$

Antriebsleistung N_{Mo}

Die Antriebsleistung einer Kugelmühle berechnet sich nach:

$$N_{\text{Mo}} = \dot{m}_{\text{G}} A_{\text{m,Z}} \quad (21a)$$

mit dem Durchsatz \dot{m}_{G} an Mahlgut:

$$\dot{m}_{\text{G}} \approx 0.35 \left[1 - 0.6 \frac{d_{\text{L}}}{d_{\text{Ku}}} \right] a_{\text{L}} a_{\text{A}} \rho_{\text{G}} d_{\text{Mü}}^2 \sqrt{g d_{\text{L}}} \quad (21b)$$

d_L : Durchmesser der Rundlöcher in der Austragswand

a_L : Flächenanteil der Rundlöcher

a_G : Flächenanteil der Gutaufstiegszone

Nach Gl.(21a) gilt also für die Auslegung einer Kugelmühle:

\dot{m}_G und $A_{m,Z}$ müssen bekannt sein \Rightarrow Ermittlung von N_{Mo}

dann:

1. Berechnung von $d_{Mü}$ aus Gl.(21b)

2. Berechnung von ℓ aus Gl.(20a) für $N_{max} = N_{Mo}$.