

Klassieren, Sortieren und Flotieren (Trennverfahren I)

1 Einleitung

1.1 Kennzeichnung einer Trennung (Massen-Verteilungsdichtekurven)

2 Klassieren

2.1 Sieben

2.1.1 Siebtechnik und Apparate

2.1.2 Grundbegriffe

2.1.2.1 Siebgütegrade

2.1.2.2 Durchsatz

2.1.2.3 Durchgangswahrscheinlichkeit und Trennkorngröße

2.1.2.4 Absiebungsziffer (Siebkennzahl)

2.2. Hydro- und Aeroklassieren

2.2.1 Apparate

2.2.2 Bewegungen von Feststoffpartikeln in strömenden Fluiden

2.2.2.1 Relativgeschwindigkeit als Anströmgeschw. der Partikel

2.2.2.2 Einwirkende Kräfte

2.2.2.3 Berechnung von Partikelbahnen

2.2.3 Sinkgeschwindigkeit und Trennkorngröße

3 Sortieren und Flotieren

3.1 Apparate und Verfahren

3.2 Trennkorndichte

1 Einleitung

zu den mechanischen Trennverfahren gehören folgende Prozesse:

- Abscheiden (Vollständige Trennung von Partikeln aus Gasen oder Flüssigkeiten) → TC II/4
- Klassieren (Trennung der dispersen Phase nach Partikelgrößen - oder Sinkgeschwindigkeitsklassen in zwei oder mehr Größenklassen) unabhängig von der Partikeldichte
- Aufbereiten
- Sortieren (Trennung nach Feststoffdichte oder anderer physik. bzw. chem. Eigenschaften: Flotieren: nach Benetzbarkeit) unabhängig von der Partikelgröße.

Die Klassierverfahren umfassen:

- Sieben (Siebklassieren) : $d_K > 40 \mu\text{m}$
- Windsichten (Aeroklassieren)
- Naßklassieren (Hydroklassieren) } $d_K < 40 \mu\text{m}$

Die Sortierverfahren umfassen:

- Dichtesortieren
- Magnetsortieren (Magnetscheiden)
- Elektrosortieren (Elektroscheiden)
- Flotieren

Trocken- oder Naßsortieren

Bedeutung der Trennverfahren

- Aufbereitung für chem. Prozesse
- Abtrennung des Endproduktes
- Umweltschutz (Luftreinhaltung, Gewässerreinigung)

1.1 Kennzeichnung einer Trennung

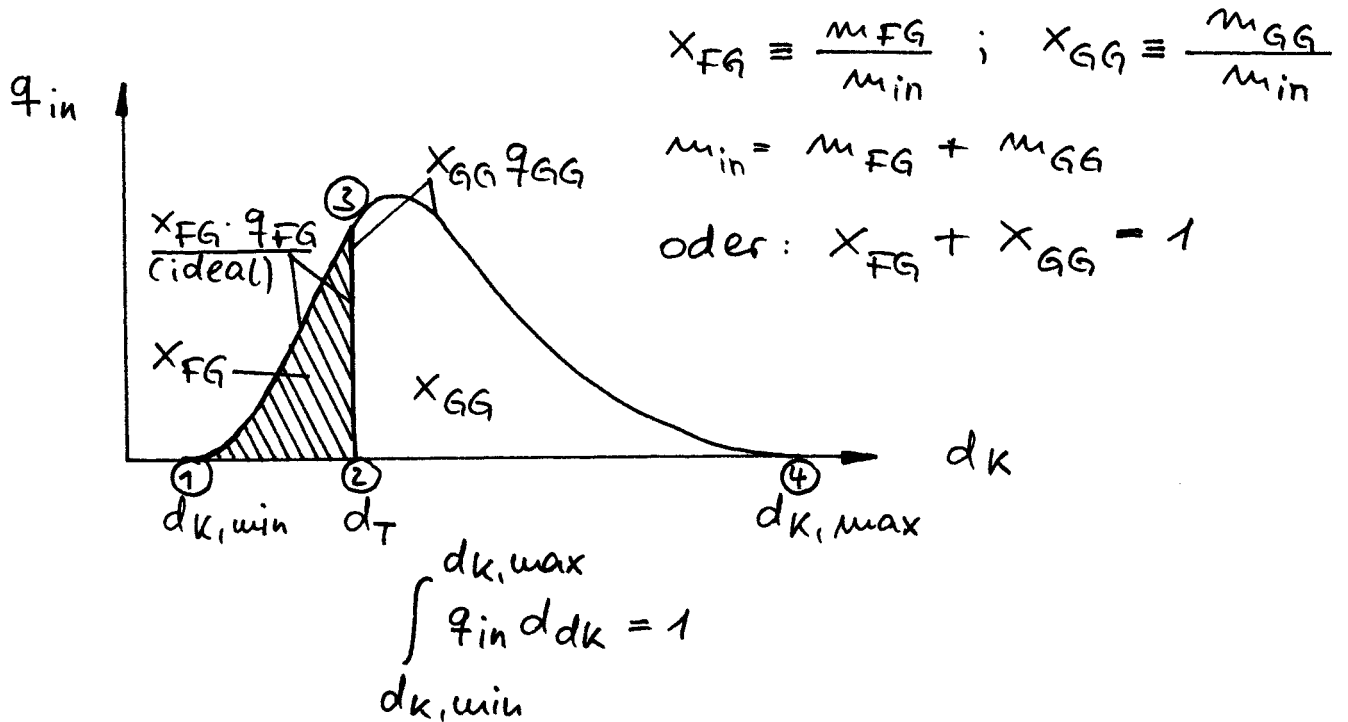


Abb. 1 Massen-Verteilungsdichtekurve q_{in} des Aufgabegutes einer idealen Trennung

m_{FG} : Masse aller Partikel mit $d_K < d_T$

m_{in} : Masse Aufgabegut

m_{GG} : Masse aller Partikel mit $d_K > d_T$

x_{GG}, x_{FG} : Massenanteile an Grobgut bzw. Feingut

d_T : Trennkorngröße, bei der die Trennung erfolgt

ideale Trennung, die bei d_T durchgeführt wird:

alle Partikel mit $d_K \leq d_T$ gelangen ins Feingut

alle Partikel mit $d_K > d_T$ gelangen ins Grobgut

$x_{FG} q_{FG}(d_k)$: ideale Massen-Verteilungsdichtekurve des Feinguts FG

$x_{GG} q_{GG}(d_k)$: id. Massens-Verteilungsdichtekurve des Grobguts GG

Fläche 1,2,3: Feines im Aufgabegut in

Fläche 3,4,2: Grobes im⁶⁵ Aufgabegut in

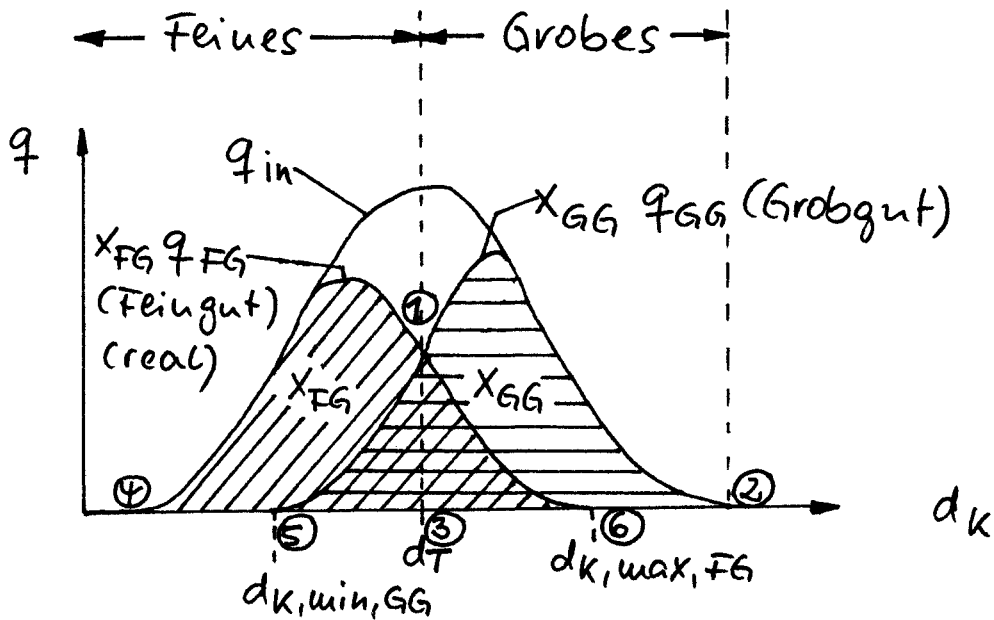


Abb. 2 Massen-Verteilungsdichtekurven des Aufgabegutes, Feingutes und Grobgutes einer realen Trennung

$x_{FG} q_{FG} (d_K)$: ^{reale} Massen-Verteilungsdichtekurve des Feingutes FG (Massenanteile)

$x_{GG} q_{GG} (d_K)$: ^{reale} Massen-Verteilungskurve des Grobgutes GG (Massenanteile)

$d_{K, \min, GG} < d_K < d_{K, \max, FG}$: bei realer Trennung :

Überlappung der Verteilungsdichtekurven des Feingutes und Grobgutes \Rightarrow es gelangen sowohl Partikel vom Grobgut ins Feingut, als auch Partikel vom Feingut ins Grobgut, d.h. es kommt zu einer teilweisen Mischung von Grob- und Feingut \Rightarrow unvollkommene Trennung:

Fläche 1,3,5 : Feines im Grobgut (Fehlkorn, Fehlüberkorn)
↑
beim Sieben

Fläche 1,3,6 : Grobes im Feingut (Fehlkorn, Fehlunterkorn)
↓

Fläche 1,2,3 : Grobes im Grobgut (Normalkorn)

Fläche 1,4,3 : Feines im Feingut (Normalkorn)

Grenzkorngröße d_T : $\hat{=}$ Abszisse des Schnittpunkts (1) der Verteilungsdichtekurven von Grob- und Feingut:
(präparative Trenngrenze, Sichtgrenze)

$$x_{FG} q_{FG}(d_T) = x_{GG} q_{GG}(d_T)$$

$$\text{da } T(d_T) = 50 \% \rightarrow \underline{d_T = d_{50}}$$

Trenngrad $T(d_{K,i})$ bzw. Trennkurve $T(d_K)$ bei Abscheider (\rightarrow TCII/4)

$$T(d_K) = \frac{\text{Masse einer best. Kornklasse im Grobgut}}{\text{Masse der best. Kornklasse im Aufgabegut}} = \frac{x_{GG} q_{GG}(d_K)}{q_{in}(d_K)} \quad (1)$$

$$T(d_K=d_T) = 50 \% \rightarrow d_T = d_{50}$$

Gesamtentstaubungsgrad T_{ges} bei Abscheider (\rightarrow TCII/4)

$$T_{ges} = \int_{d_{K,min}}^{d_{K,max}} T(d_K) q_{in}(d_K) dd_K \equiv x_{GG} = \frac{m_{GG}}{m_{in}} \quad (2a)$$

Durchlaßgrad P von Abscheidern (\rightarrow TCII/4):

$$P \equiv 1 - T_{ges} = \frac{c_{K,FG}}{c_{K,in}} \quad (2b)$$

$c_{K,FG}$: Partikelkonz. im FG

$c_{K,in}$: " " im Aufgabegut

2.1 Sieben

Siebanalyse ist auch das wichtigste Trennverfahren für die Partikelgrößenanalyse (→ Partikelmeßtechnik): z.B. Messung von integralen und differentiellen Massenverteilungskurven mit Standard-Prüfsieb-sätzen.

2.1.1 Siebtechnik und Apparate

Siebüberlauf (Grobkorn, Überkorn, Rückstand R)

Siebunterlauf (Feinkorn, Unterkorn, Durchgang D)

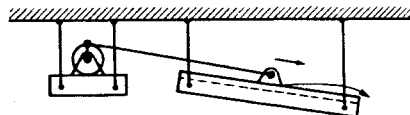
Grobsiebung : $40 \text{ mm} < d_K < 200 \text{ mm}$

Mittelsiebung : $2 \text{ mm} < d_K < 40 \text{ mm}$ → Wurfsiebe

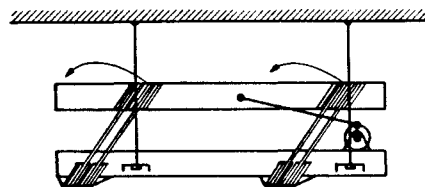
Feinsiebung : $40 \text{ bis } 60 \mu\text{m} < d_K < 2 \text{ mm}$

Trockensiebung : $d_K \geq 0.1 \text{ mm}$

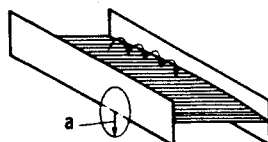
Naßsiebung : $d_K \gg 0.1 \text{ mm}$



Schwingsieb



Resonanzsieb



Wurfsieb

Abb. 3 Flachsiebe (a Amplitude der Siebschwingung)

Siebböden : entscheidend für die Güte der Absiebung: z.B. Roste, Lochbleche, Drahtnetze, Synthesefasergewebe, Gummi- oder Kunststoffböden, verformbare Siebböden.

2.1.2 Grundbegriffe

wirksame Kräfte sind:

- Schwerkraft
- Strömungskräfte
- Stoßkräfte
- Reibungskräfte
- Haftkräfte
- Klemmkräfte

2.1.2.1 Siebgütegrade

$$\eta_{FK} = \frac{\text{Feinkorn im Durchgang}}{\text{Feinkorn im Aufgabegut}} \leq 1 \leftarrow \text{immer Überkörner}^* \text{ im Durchgang}$$

$$\eta_{GK} = \frac{\text{Grobkorn im Rückstand}}{\text{Grobkorn im Aufgabegut}} \leq 1 \leftarrow \text{immer Unterkörner}^{**} \text{ im Rückstand}$$

2.1.2.2 Durchsatz

$$\dot{m}_{\text{Sieb}} = f(\text{offene Siebfläche, Siebgut [Härte, Dichte, Feuchtigkeit]}, \text{Siebaggreat, Siebbewegungen [} \rightarrow \text{ Siebkennzahl } K])$$

* größere Partikel ($d_k > e$): Fehlunterkorn
** kleinere Partikel ($d_k < e$): Fehlüberkorn

2.1.2.3 Durchgangswahrscheinlichkeit und Trennkorngröße

feines Unterkorn mit $d_K/\ell < 0.8$: W_D hoch, keine Klemmgefahr

Körner mit $d_K/\ell > 1.5$: $W_D \approx 0$, keine Klemmgefahr

Grenzkorn mit $0.8 \leq d_K/\ell \leq 1.0$: W_D klein, erhöhte Klemmgefahr

W_D : Durchgangswahrscheinlichkeit

ℓ : lichte Maschenweite des Siebs

Trennkorngröße d_T :

$$d_T \lesssim \ell$$

2.1.2.4 Absiebungsziffer (Siebkennzahl)

Für ein Einzelkorn, ohne Luftreibung, ohne gegenseitige Behinderung, gilt für einen gleitungsfreien Abwurf von der Schwingsieboberfläche, wenn es kreisförmige Schwingungen der Frequenz n mit der Amplitude a ausführt:

$$b = a \omega^2 > g \quad K \equiv \frac{a \omega^2}{g} = \frac{a 4\pi^2 n^2}{g} \quad (3a)$$

Die Zentrifugalbeschleunigung b hängt vom Abwurfwinkel α und vom Neigungswinkel β des Siebbodens ab:

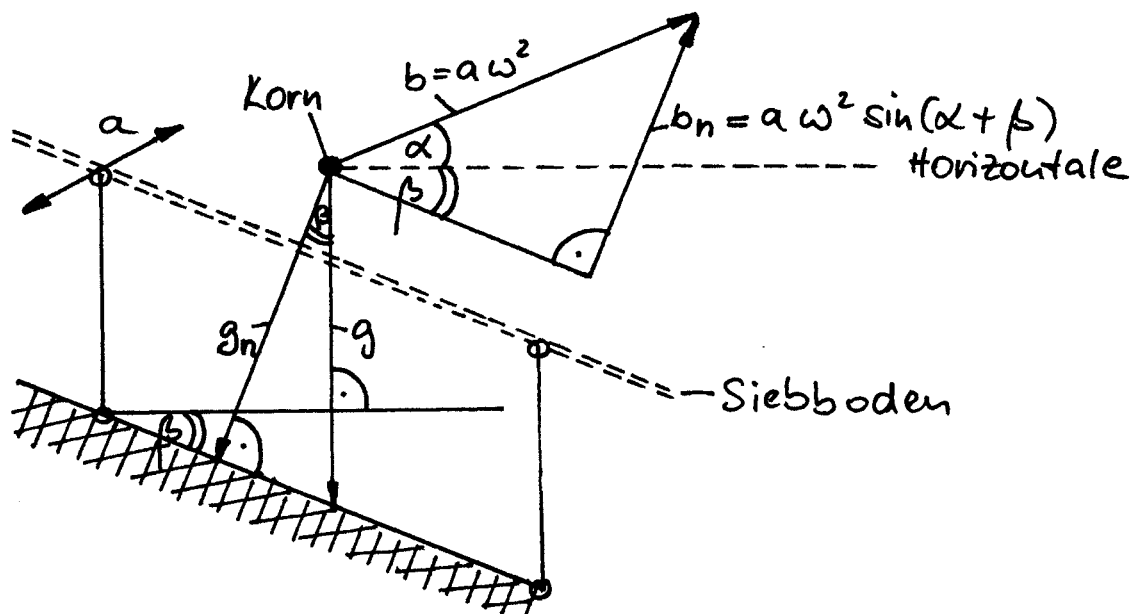


Abb. 4 zur Herleitung der Absiebungsziffer K bei Schwingsieben, wenn die Winkel α und β berücksichtigt werden.

Analog Gl.(3a) folgt:

$$K \equiv \frac{b_n}{g_n} = \frac{a\omega^2 \sin(\alpha+\beta)}{g \cos \beta} = \frac{a 4\pi^2 n^2 \sin(\alpha+\beta)}{g \cos \beta} \quad (3b)$$

Folgerungen aus Gl.(3b):

1. je größer K umso intensiver ist Umwälzung der Körner, umso rascher wird eingeklemmtes Korn frei; allerdings zunehmende Beanspruchung des Siebes
2. je höher α, β umso größer K
3. $K = 3.3$: statistische Resonanz, d.h. die Wurfdauer (Flugzeit) des Korns = Schwingungsdauer des Siebes \Rightarrow optimale Nutzung der Antriebsenergie.
4. $K = 1.4$ bis 1.8 : schonende Absiebung für leicht siebbares Gut (Nachklassieren von Steinkohle); $\alpha = 30$ bis 60°
 $K = 2.1$ bis 2.3 : schonende Absiebung für schwer siebbares Gut (Nachklassieren von Koks, Klemmgefahr); $\alpha = 30$ bis 60°
 $K = 3.0$ bis 3.2 : Scharfe Absiebung bei schwer siebbarem Gut mit großen Mengen Feinkorn (Vorklassieren von Steinkohle, Klassieren von Erzen, Absieben von Schotter und Splitt); $\alpha \geq 60^\circ$
 $K = 5$ bis 6 : besonders schwieriges Siebgut

2.2 Hydro- und Aeroklassieren

Hydroklassieren: Trennung der Korngemenge (Suspensionen) nach Gleichfälligkeit, d.h. nach Teilchen mit gleicher Sinkgeschwindigkeit (Absetzgeschwindigkeit)

Aeroklassieren: ebenfalls Trennung nach Teilchen gleicher Sinkgeschwindigkeit

2.2.1 Apparate

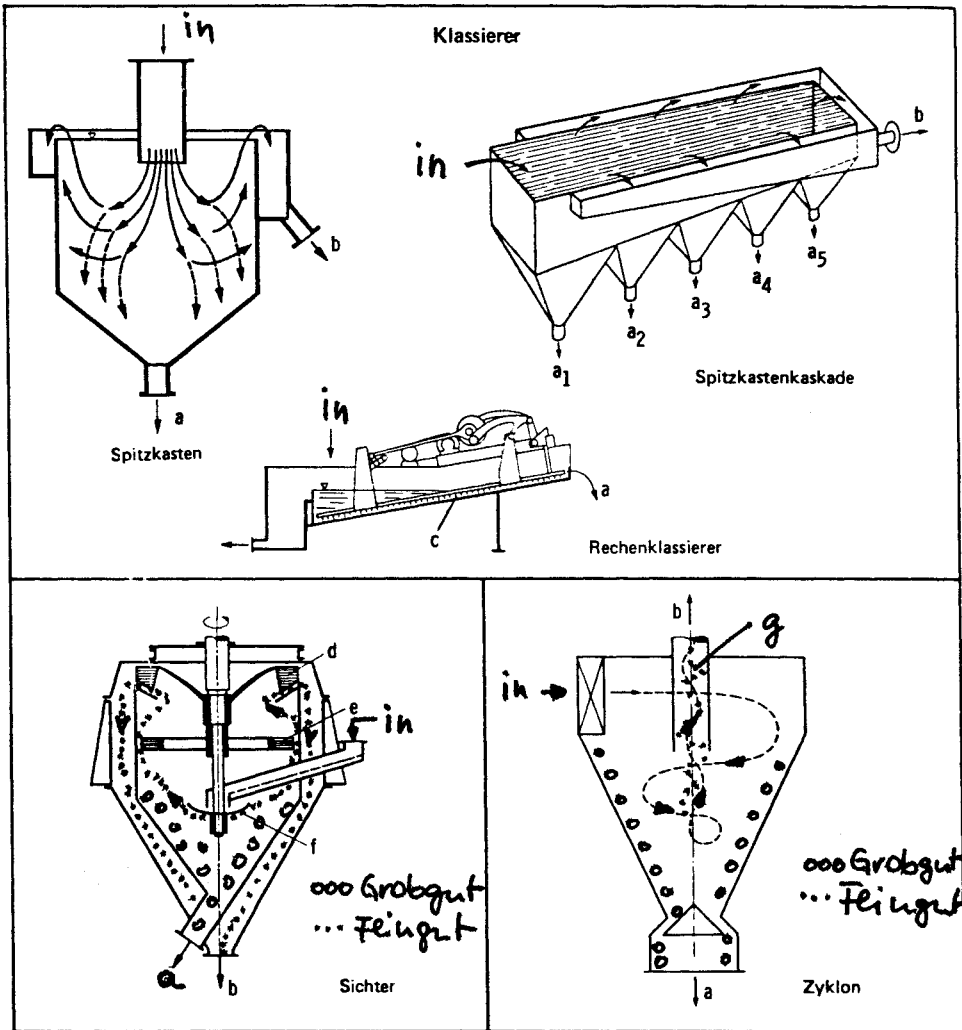


Abb. 5 Klassierer, Sichter, Zyklone
 a) Grobfraktion; b) Feinfraktion; c) Rechen; d) Lüfterrad; e) Gegenflügel-system; f) Streuteller, g) Tauchrohr

2.2.2 Bewegungen von Feststoffpartikeln in strömenden Fluiden

2.2.2.1 Relativgeschwindigkeit als Anströmgeschw. der Partikel

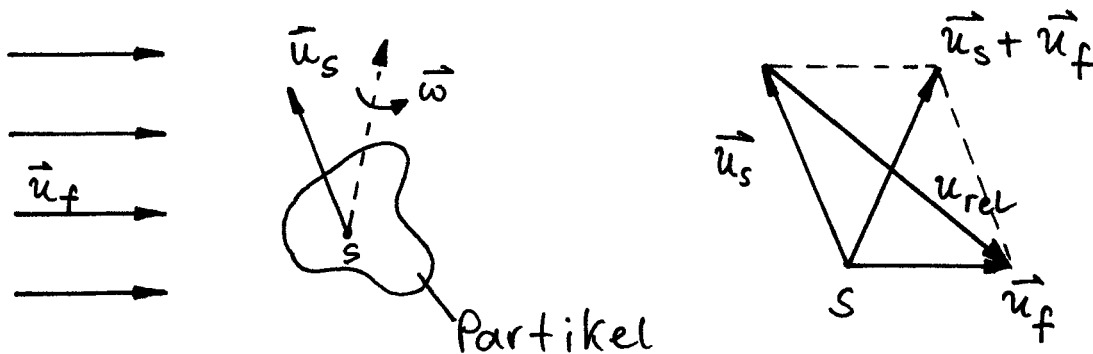


Abb. 6 zur Definition von \vec{u}_s , \vec{u}_f und \vec{u}_{rel}

Es gilt der Differenz -Vektor :

$$\boxed{\vec{u}_{rel} = \vec{u}_f - \vec{u}_s} \quad (4)$$

S : Schwerpunkt der Partikel

\vec{u}_f : Fluidgeschwindigkeit (Gas- oder Flüssigkeit)

\vec{u}_s : Partikelgeschwindigkeit

\vec{u}_{rel} : Relativgeschw. zwischen Fluid und Partikel
 = Anströmgeschw. der Partikel durch das Fluid

2.2.2.2 Einwirkende Kräfte

1. Feldkräfte (Schwerkraft F_G , elektrische oder magnetische Kräfte)

$$F_G = m_s g = V_s \rho_s g \quad (5a)$$

V_s : Volumen der Partikel

ρ_s : Dichte der Partikel

m_s : Masse der Partikel

2. Druckkräfte auch dann vorhanden, wenn $u_{rel} = 0$; infolge von

Druckgradienten $\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)$:

$$F_P = - V_s \text{grad } P \quad (5b)$$

3. Trägheitskräfte (d'Alembert)

$$F_T = - m_s b = - V_s \rho_s \frac{d u_s}{dt} \quad (5c)$$

4. Strömungskräfte

infolge von \vec{u}_{rel} (Anströmgeschw.) wirken auf das Partikel eine:

a) Widerstandskraft \vec{F}_W in Richtung von \vec{u}_{rel}

b) dynamische Auftriebskraft $\vec{F}_{A,dyn.} \sim \vec{u}_f \omega$ senkrecht zu \vec{u}_{rel}

c) statische Auftriebskraft $\vec{F}_A = \rho_f g V_s$ (5d)
in Richtung von \vec{u}_{rel}

und ein

d) Drehmoment \vec{M}

Für die Widerstandskraft gibt es nur eine näherungsweise Beschreibung. Zunächst werden folgende Vereinfachungen angenommen:

- Die Partikel hat die Form einer Kugel, hat eine glatte Oberfläche, ist nicht deformierbar und rotiert nicht in der Strömung,
- feste Wände und freie Oberflächen sind so weit entfernt, daß sie die Strömung praktisch nicht beeinflussen,
- das Fluid (Grundströmung) ist inkompressibel, weist Newtonsches Fließverhalten auf und kann als Kontinuum betrachtet werden und ist stationär,
- die Anströmung ist gleichförmig, laminar und stationär.

$$\Rightarrow \vec{M} = 0, \quad \vec{F}_{A,dyn.} = 0$$

für eine Kugel ($\Gamma=1$) gilt:

$$F_W = w_K(Re) A \frac{1}{2} \rho_f u_{rel}^2 \quad (5e)$$

$A \equiv \pi d_K^2 / 4$ (Projektionsfläche der Partikel)

$$Re \equiv \frac{u_{rel} d_K}{\nu}$$

ν : Kinemat. Zähigkeit des Fluids

w_K : Widerstandszahl der Kugel

ρ_f : Dichte des Fluids

$$\text{für } Re \leq 0.25 : w_K = \frac{24}{Re} \quad (6a)$$

d.h. Stokes'sches Gesetz [Gln. (5e) und (6a)] stimmt gut mit Experimenten überein.

bis $Re \approx 100$: numerische Lösungen der Navier-Stokes-Gleichungen

für $Re > 100$: nur experimentelle Ergebnisse:

$$w_K \approx \frac{24}{Re} + 4 / \sqrt{Re} + 0.4 \quad (6b)$$

Bei instationärer Anströmung, d.h. wenn sich das Partikel beschleunigt oder verzögert in der Strömung bewegt, dann wird :

$$F_W(t) = F_W + \frac{1}{2} \frac{\gamma}{6} d_K^3 S_f \frac{d u_{rel}}{dt} + \frac{3}{2} d_K^2 \sqrt{\tau S_f \gamma} \int_{t_0}^t \frac{d u_{rel} / dt}{\sqrt{t-t_0}} dt \quad (5f)$$

t_0 : Beginn der Geschw.änderung

$F_W(t)$: instationäre Widerstandskraft

F_W : stationäre Widerstandskraft

Für $18 < Re < 540$:

F_W nach Gln.(5e) und (6b)

für Re sehr groß:

$$F_W(t) = F_W$$

2.2.2.3 Berechnung von Partikelbahnen

Zur Berechnung von Partikelbahnen in einem strömenden Fluid geht man von der Vektorsumme aller angreifenden Kräfte aus, die Null ergibt (Kräftebilanz):

$$-\vec{F}_G + \vec{F}_W(t) + \vec{F}_{A,dyn} + \vec{F}_A + \vec{F}_P + \vec{F}_T = 0 \quad (7a)$$

Für Gasströmungen vereinfacht sich Gl.(7a) zu:

d.h. $F_W(t) = F_W$; $F_{A,dyn} = 0$; $F_P = 0$: (Gl.7a folgt auch aus der Navier-Stokes-Gl. [TCI/4])

$$F_T = F_G - F_W - F_A \quad (7b)$$

oder mit Gln.(5c), (5a), (5e) und (5d); wenn für $v_s = \frac{\pi}{6} d_K^3$ gesetzt wird:

$$-\frac{\bar{u}}{6} d_K^3 \rho_s \frac{du_s}{dt} = \frac{\bar{u}}{6} d_K^3 \rho_s g - w_K \frac{\bar{u}}{4} d_K^2 \frac{1}{2} \rho_f u_{rel}^2 - \rho_f g \frac{\pi}{6} d_K^3 \quad (7c)$$

Die Integration von DGL (7c) liefert die Partikelgeschw.

$$u_s(t) = \frac{dx(t)}{dt}, \text{ woraus durch eine weitere}$$

Integration die Bahnkurve $x(t)$ der Partikel folgt.

Schließlich ist zu berücksichtigen, daß die Widerstandskraft F_W auch abhängt :

- vom Wandeinfluß d.h. dem Abstand der Wände zwischen denen das Fluid strömt
- von der gegenseitigen Wechselwirkung der Partikel

2.2.3 Sinkgeschwindigkeit und Trennkorngröße

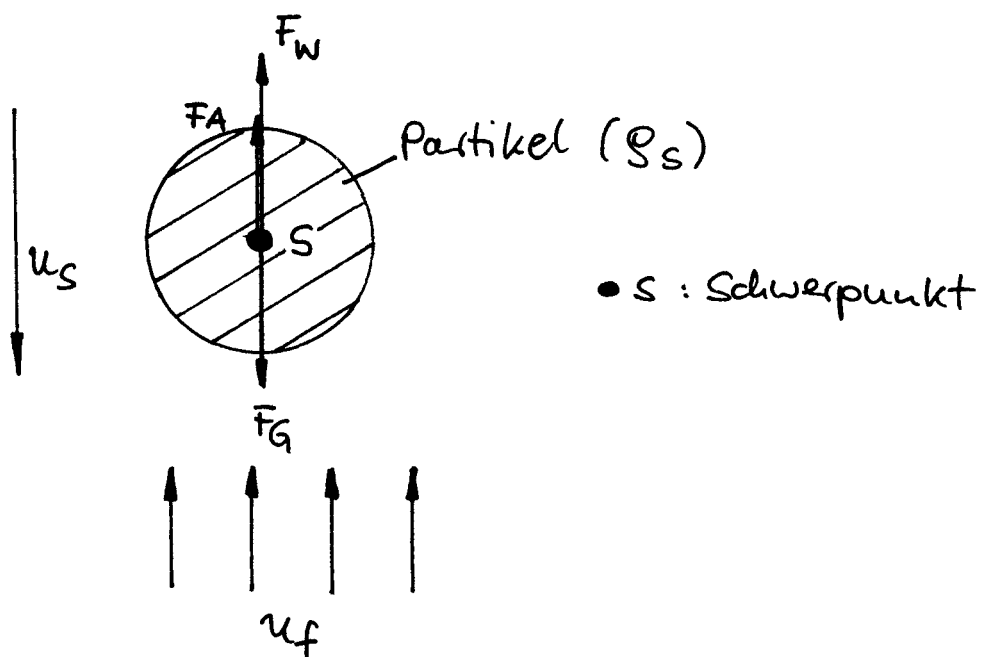


Abb. 7 Zur Berechnung der Sinkgeschwindigkeit $u_f - u_s \equiv u_{rel}$ einer Partikel

Für den stationären Bewegungszustand der Partikel folgt aus Gln. (7b), (7c), (4) ($\vec{F}_T = 0$):

$$F_W = F_G - F_A \quad (8a)$$

$$u_{rel} = u_f - u_{s,s} = \sqrt{\frac{4(\rho_s - \rho_f) g d_K}{3 \rho_f w_K(Re)}} \quad (8b)$$

Sinkgeschwindigkeit

$u_{s,s}$: stationäre Partikelgeschw.

u_{rel} : Sinkgeschw. der Partikel

aus $u_{s,s} = u_f - u_{rel}$ folgt:

$u_{s,s} > 0$: $u_f > u_{rel}$: Partikel steigt \Rightarrow Feinkorn, $d_K < d_T$
(folgt der Strömung)

$u_{s,s} < 0$: $u_f < u_{rel}$: Partikel fällt \Rightarrow Grobkorn, $d_K < d_T$

$u_{s,s} = 0$: $u_f = u_{rel}$: Partikel schwebt \Rightarrow **Grenzkorn**, $d_K \equiv d_T$

Trennkorngröße d_T

für $u_f = u_{rel}$, d.h. $u_{s,s} = 0$ folgt aus Gl.(8b) mit $d_K \equiv d_T$:

$$d_T = \frac{3 \rho_f u_f^2 w_K(Re)}{4(\rho_s - \rho_f) g} \quad (9)$$

REYNOLDS-Zahl	Widerstandszahl	Sinkgeschwindigkeit u_{rel} m/s	Trennkorngröße d_T m
laminar $Re < 1$	$w_K = 24/Re$ (Stokes)	$u_{rel} = \frac{d_K^2 (\rho_s - \rho_f)}{18 \eta}$	$d_T = \sqrt{\frac{18 \eta u_f}{(\rho_s - \rho_f) g}}$
Übergang $5 < Re < 1000$	$w_K = 16/\sqrt{Re}$	$u_{rel} = \left[\frac{12 \rho_f \sqrt{v}}{(\rho_s - \rho_f) g} \right]^{-2/3} d_K$	$d_T = \left[\frac{12 \rho_f \sqrt{v}}{(\rho_s - \rho_f) g} \right]^{2/3} u_f$
turbulent $10^3 < Re < 3 \cdot 10^5$	$w_K = 0,44$ (Newton)	$u_{rel} = \sqrt{\frac{3(\rho_s - \rho_f) g}{\rho_f}} d_K$	$d_T = 0,33 \frac{\rho_f}{(\rho_s - \rho_f) g} u_f^2$

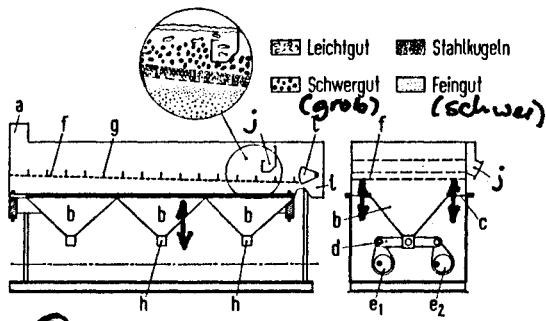
Tab. 1 Trennkorngrößen d_T nach Gl.(9) und Sinkgeschwindigkeiten u_{rel} nach Gl.(8b) in Abhängigkeit vom Strömungszustand

Korrekturen für die Sinkgeschwindigkeit u_{rel} nach Gl.(8b) bzw. Tab.1 \rightarrow TCII/4

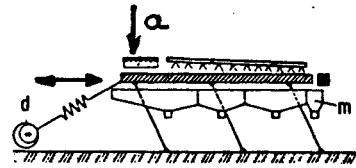
3 Sortieren

Trennen in: das Konzentrat (erwünschter, wertvollerer Stoff) und in die Abgänge od. Berge (enthalten wertlose Bestandteile).
I.a. ist hierfür eine Vorklassierung auf etwa gleiche Korngröße d_K erforderlich: Korngrößenverteilungskurve muß umso enger sein, je geringer die Dichtedifferenzen $\Delta \rho$ sind: \rightarrow Naßsortieren ($\Delta \rho$ relativ klein) gibt i.a. bessere Stofftrennung als Trockensortieren ($\Delta \rho$ relativ groß).
Schwergut (ρ groß) und Leichtgut (ρ klein).

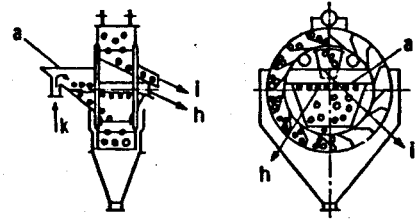
3.1 Apparate und Verfahren



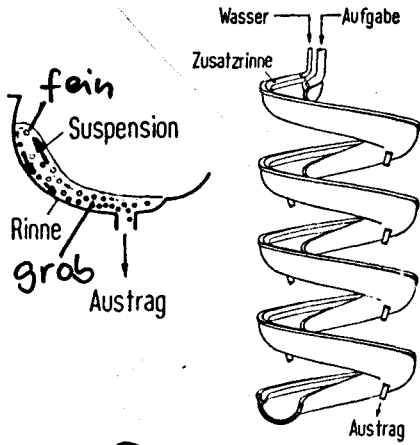
① Membransetzmaschine (BAUART REMER-SIEBTECHNIK)



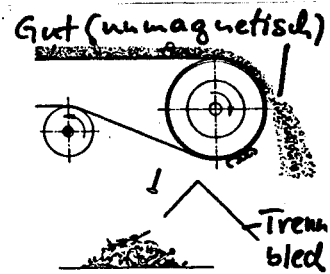
② Schüttelherd



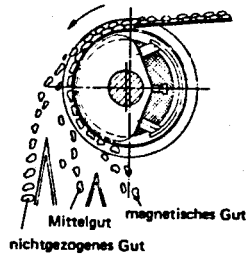
④ Schwerflüssigkeitsscheider



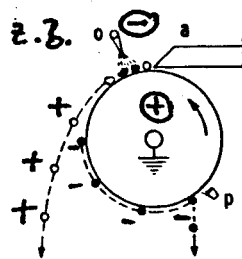
③ Wendelscheider (HUMPHREY-Scheider, nach KIRCHBERG), daneben schematischer Rinnenquerschnitt mit Veranschaulichung der Querströmung



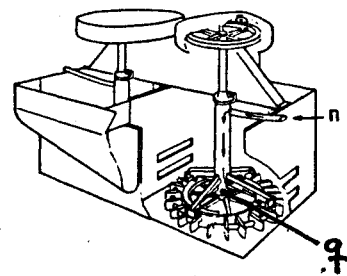
⑤ Magnetscheider für Fremdkörper



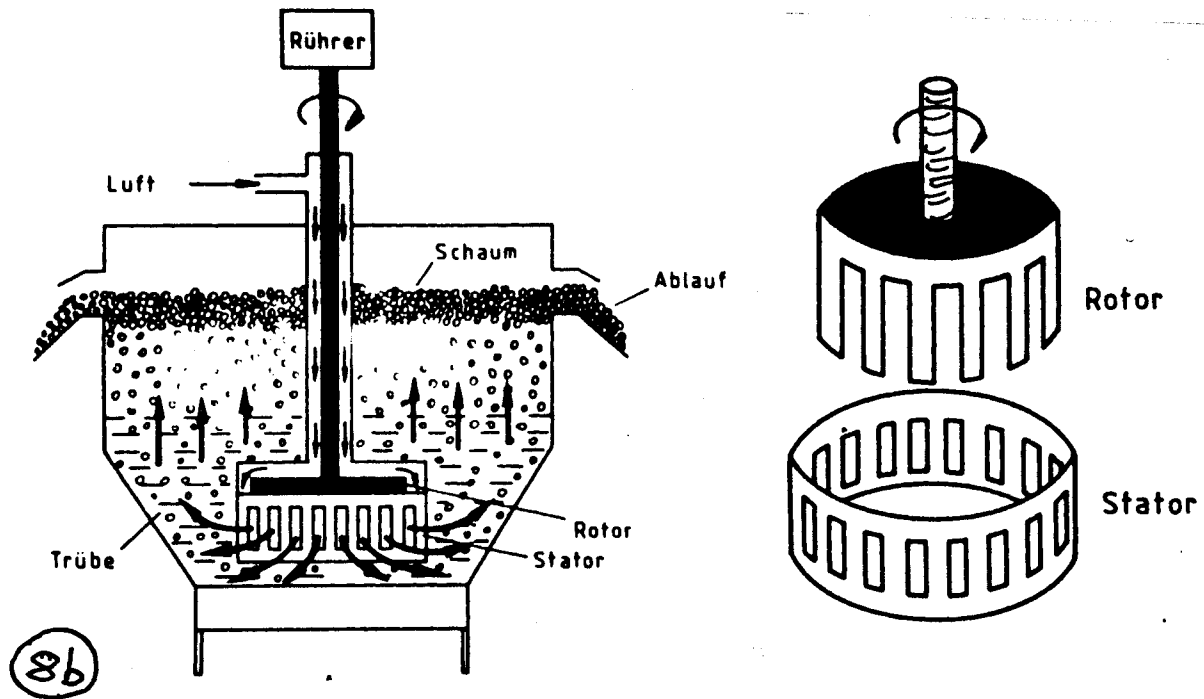
⑥ Starkfeldscheider



⑦ Elektrowalzenscheider



⑧a Flotationzelle



Schnitt durch eine Flotationszelle mit Blasenverteilung nach dem Rotor/Stator-Prinzip

Abb. 8 Maschinen zum Sortieren von Feststoffen
 a) Aufgabe; b) unterer, bewegter Teil des Setzfasses; c) Membranen; d) Exzenterantrieb; e) Exzenter;
 f) Setzgutträger; g) Querleisten; h) Leichtgutausläufe; i) Schwergutauslauf; j) Leichtgutrinne; k) Trübe;
 l) Wasser; m) Produkt-Auffangrinnen; n) Luft; o) Ionisator; p) Bürste; ● schlechte Leiter; ○ gute Leiter.
 q) Rührer

- ① Aufbereitung von Erzen u. Mineralien. Reinigen von Naturkies und Sand von organ. Stoffen, wie Kohle, Torf, Holz, Mineralien.
- ② Für sehr feinkörnige Feststoffgemenge, Gewinnung von Bleiglanz, Zinkblende, reinem Quarz; Abscheiden von Schwefelkies aus Kohle; großer Platzbedarf; großer Wasserbedarf, relativ kleine Leistung.
- ③ Unter dem Einfluß der Coriolis- Kräfte ($\vec{\omega} \times \vec{v}$) überlagert sich der Längsströmung eine Querströmung, die in der oberen Schicht nach außen, in der unteren Schicht nach innen strömt; für hämatitische Eisenerze, Schwermineralsande und Phosphorite; werden in großen Stückzahlen gebaut.
- ④ Für Kornbereiche zwischen $d_K=5$ mm bis 150 mm. Trennung durch Trennflüssigkeit hoher Dichte mit $\rho \approx 1300$ bis 3500 kg/m³ (Ferrosilicium-, Magnet- oder Schwerspat-, Ton-, Sandteilchen als Suspensoide), denn $F_A \sim \rho_f$; keine Vorklassierung erforderlich, hoher Durchsatz, ausreichende Trennschärfe; Trennen von Mineralien, Sortieren von Kohle.
- ⑤ Trommel ist über gesamten Umfang magnetisch.
- ⑥ Für grobkörnige oder stückige Stoffe bis $d_K \approx 160$ mm. Nur bestimmte schmale Zonen wirken magnetisch. Zur Abtrennung von Hämatit, Kryolith, Siderit, Eisen aus Siliciumcarbid.
- ⑦ Trennen trockener, feinkörniger ($0.05 < d_K < 3$ mm!) Gemenge in Nichtleiter und Leiter: zunächst werden durch ein E-Feld (20 bis 40 kV, Gleichspannung) alle Gutteilchen gleichsinnig z.B. negativ aufgeladen. Nach dieser Zone erfolgt eine teilweise Entladung: gute Leiter werden \oplus geladen und wandern daher nach außen, schlechte Leiter bleiben \ominus und haften folglich an der Walze; Sortieren von Schwermineralsande, Quarz und Feldspat, Kabelschrott aus Fasern und Kunststoffen; Trennung von Kakao und Schalen (im Versuchsstadium).
- ⑧ Trennen von Gemengen aus vielen, feinsten, sehr oberflächenreicher Teilchen nach der unterschiedlichen Benetzbarkeit:
Hydrophile Gutteilchen werden durch Sammler (Tab. 2) hydrophobiert:

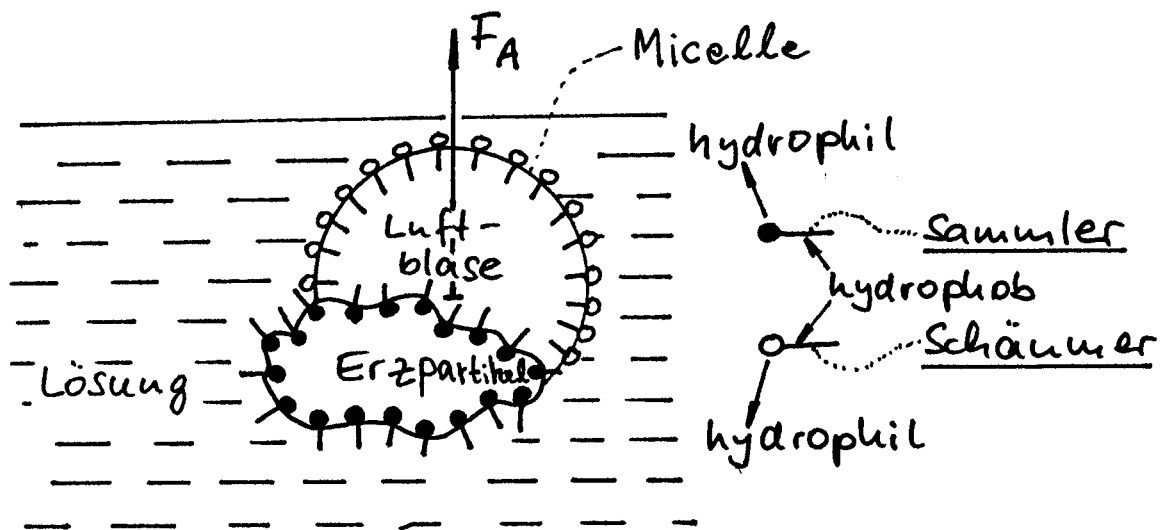
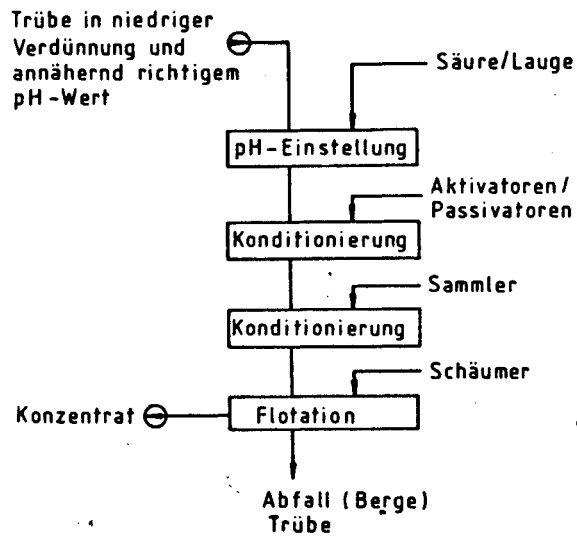


Abb. 9 Prinzip der Flotation: hydrophile Erzteilchen werden durch Sammler hydrophobiert und hängen sich an die hydrophoben Luftblasen, die durch Schäumer stabilisiert werden. Die vom Sammler nicht hydrophobierten Erzteilchen bleiben hydrophil und gelangen folglich nicht nach oben sondern bleiben unten liegen. Aktivatoren; verbessern Chemisorption der Sammler an den Erzteilchen.
Drücker: passivieren die Adsorption bei unselektiver Adsorption der Sammler auch an nicht abzuflotierenden Bestandteilen.

Der Rührer q der Flotationszelle muß die Trübe umwälzen, sowie die Luft verteilen und ansaugen. Die Apparatevarianten unterscheiden sich insbesondere in der Erzeugung kleiner Luftbläschen bei gleichzeitiger Aufwirbelung der Trübe: in der Variante (Pb) wird die zwischen dem drehenden Rotor und dem feststehenden Stator eingeblasene Luft zu feinen Bläschen zerteilt.



Arbeitsgänge bei der Flotation

Trennung zahlreicher sulfidischer und oxidischer Erze (z.B. der Fe, Cu, Ni, Co, Pb, Zn, W, Sn, Ti, Edelmetalle) von Verunreinigungen; Kohle Graphit, Kalisalze, Feldspat, Schwerspat von Verunreinigungen

Reinigung von Nahrungsmitteln: Erbsen, Weizen

pharmazeutische Stoffe: Mutterkorn-Abtrennung

pflanzliche Rohstoff-Gewinnung: Gummiharz der Wolfsmilch

Zusatz	Beispiele	Trennproblem
Sammler <i>(Tenside)</i>	<i>anionische:</i> $\text{Xanthogenate } \text{R}-\text{O}-\overset{\text{S}}{\parallel}{\text{C}}-\text{SNa (K)}$ $\text{(R: C}_2\text{-C}_6\text{-Alkyl)}$ $\text{Dialkyldithiophosphate (RO)}_2\overset{\text{S}}{\parallel}{\text{P}}-\text{SNa(K)}$ $\text{(R: Ethyl, Kresyl) Xylol}$ $\text{ungesättigte Fettsäuren (z. B. Ölsäure)}$ $\text{Alkylsulfate } \text{R}-\text{O}-\text{SO}_3\text{Na (R: C}_{10}\text{-C}_{18})$ $\text{Alkylsulfonate } \text{R}-\text{SO}_3\text{Na (R: C}_{10}\text{-C}_{18})$ $\text{Alkylarylsulfonate } \text{R}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{SO}_3\text{Na}$ $\text{(R: C}_{10}\text{-C}_{14})$	$\left. \begin{array}{l} \text{Sulfiderze} \\ \\ \\ \text{Nichtsulfidische} \\ \text{Mineralien (z. B.} \\ \text{Apatit, Kalk-} \\ \text{spat, Flußspat)} \end{array} \right\}$
	<i>kationische:</i> quartäre Ammoniumsalze $(\text{R}-\text{NR}'_3)^{\oplus}\text{Cl}^{\ominus}$ (R: C ₈ -C ₁₆)	Silikate, Halogenide, oxid. Zinkerze
	<i>nichtionische:</i> a) unpolare: Petroleum Öle b) polare: $\text{Dithiocarbamate } \text{R}^1-\text{NH}-\overset{\text{S}}{\parallel}{\text{C}}-\text{S}-\text{R}^2$ $\text{Thiocarbamate } \text{R}^1-\text{NH}-\overset{\text{S}}{\parallel}{\text{C}}-\text{O}-\text{R}^2$ $\text{(z. B. R}^1\text{: C}_2\text{H}_5\text{, R}^2\text{: i-C}_3\text{H}_7\text{)}$ Thiocarbamilid (C ₆ H ₅ NH) ₂ C=S	$\left. \begin{array}{l} \text{vielseitig einsetz-} \\ \text{bar} \\ \text{Vielmetallerze} \\ \text{(hohe Selektivität)} \end{array} \right\}$
Schäumer	Terpenol (z. B. „Pine oil“) Kresole Methylisobutylcarbinol (MIBC) Triethoxybutan Propylenglykolether	$\left. \begin{array}{l} \text{verschiedene} \\ \text{Erzaufbereitun-} \\ \text{gen} \\ \\ \text{Sulfidmineralien} \end{array} \right\}$
pH-Regulierer	NaOH, Na ₂ CO ₃ , Ca(OH) ₂ , H ₂ SO ₄	
Drücker (Passivatoren)	Dichromat Stärke, Stärkederivate Cellulosederivate (z. B. CMC, vergl. 6.2.2.4) EDTA	$\left. \begin{array}{l} \text{Bleiglanz} \\ \text{verschiedene} \\ \text{Erzaufbereitun-} \\ \text{gen} \end{array} \right\}$
Aktivatoren	CuSO ₄ ZnSO ₄	Zinkblende Blei-Zinkerze

Tab. 2 Hilfsmittel für die Flotation

3.2 Trennkorndichte

In Analogie zur Trennkorngröße (Gl (9)) lässt sich aus Gl (8b) eine Trennkorndichte

berechnen nach: $\rho_s \equiv \rho_T$ ($u_{s,s} \equiv u_f - u_{rel} = 0$, d.h. $u_{rel} = u_f$)

$$\rho_T = \rho_f + \frac{3 w_K(Re) \rho_f u_f^2}{4 g d_K} \quad (10)$$

$u_{s,s} = 0$	$u_f = u_{rel}$: Partikel schwebt \Rightarrow Grenzkorn mit $\rho_K = \rho_T$
$u_{s,s} > 0$	$u_f > u_{rel}$: Partikel steigt \Rightarrow Leichtkorn mit $\rho_K < \rho_T$
$u_{s,s} < 0$	$u_f < u_{rel}$: Partikel sinkt \Rightarrow Schwere Korn mit $\rho_K > \rho_T$

aus Gl (10) folgt:

$\rho_T = f(u_f)$, wobei sich u_f in den Apparaten einstellen lässt.

REYNOLDS-Zahl	Widerstandszahl	Trennkorndichte ρ_T (kg/m ³)
laminar $Re < 1$	$w_K = 24/Re$ (Stokes)	$\rho_T = \rho_f + \frac{18 \eta u_f}{g d_K^2}$
Übergang $5 < Re < 1000$	$w_K = 16/\sqrt{Re}$	$\rho_T = \rho_f + \frac{12 \rho_f \sqrt{v}}{g} \left(\frac{u_f}{d_K}\right)^{3/2}$
turbulent $10^3 < Re < 3 \cdot 10^5$	$w_K = 0,44$ (Newton)	$\rho_T = \rho_f + \frac{0,33 \rho_f u_f^2}{g d_K}$

Tab. 3 Trennkorndichten ρ_T nach Gl. (10) in Abhängigkeit vom Strömungszustand