

Lehrveranstaltung
Partikelmesstechnik

Folien zur Vorlesung

NUR ZUM PERSÖNLICHEN GEBRAUCH!

PD Dr.-Ing. habil. Frank Babick, 1. April 2024

4. Quantifizierung von klassierenden Trennprozessen

Lernziele zu Kapitel 4

- Wissen:
 - Unterscheidung von Trennprozessen
 - Was wird durch eine Trennfunktion (auch: *Trennkurve*) quantifiziert und wie lässt sie sich berechnen?
 - Probleme beim Klassieren und beim Bestimmen der Trennfunktion
 - Überblick zur technische Umsetzung von Klassierprozessen
- Fähigkeiten:
 - Bilanzierung eines Klassierprozesses
 - Berechnung von Gesamtabscheidegrad aus Trennkurve und Partikelgrößenverteilung des Aufgabegutes

4.1 Quantifizierung von klassierenden Trennprozessen

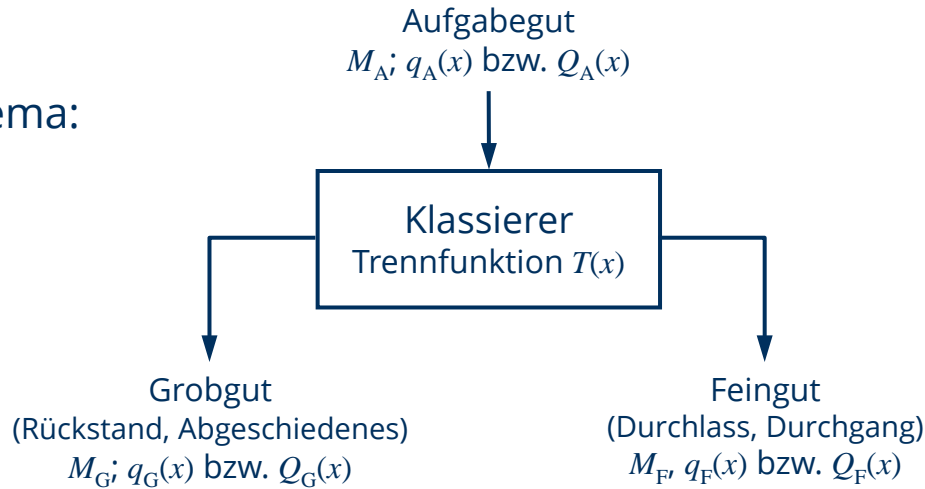
– *Klassieren* –

Trennen disperser Systeme – Grundtypen

- **Teilung** von Stoffsystemen
 - in Stoffströme identischer Zusammensetzung
 - z. B. bei Zuführung in parallel angeordnete Reaktoren oder in Zyklonbatterien zur Gasentstaubung
- **Abscheidung** der dispersen Phase
 - (eingedickte) disperse Phase und (partikelfreie) kontinuierliche Phase
 - z. B. Staubabscheidung, Klären, Entfeuchten
- **Sortieren** von heterodispersen Stoffsystemen
 - Trennung nach stofflichen Eigenschaften (Dichte, Benetzbarkeit, Magnetisierbarkeit, Form, ...)
 - z. B. Flotation, Schwimm-Sink-Sortierung, Magnetsortierung
- **Klassieren** der dispersen Phase nach Partikelgröße
 - mindestens zwei Fraktionen mit unterschiedlicher Größe (bzw. Volumen, Sinkgeschwindigkeit, ...)
 - z. B. für Schleifpulver und Baustoffe; in Mühle-Sichter-Kreisläufen

Klassieren in Grob- und Feingut

- Schema:



Menge M :

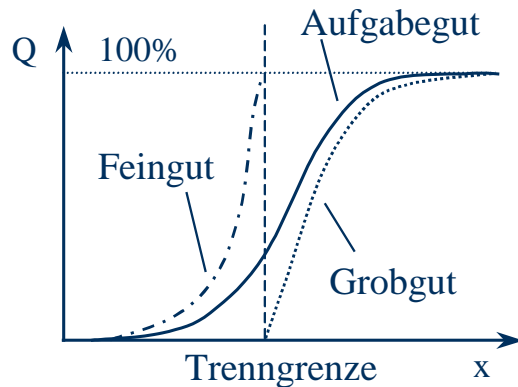
- Masse m (hohe Konzentration)
- Anzahl N (geringe Konzentration, feine Partikel)

Dichtefunktionen q sind folglich

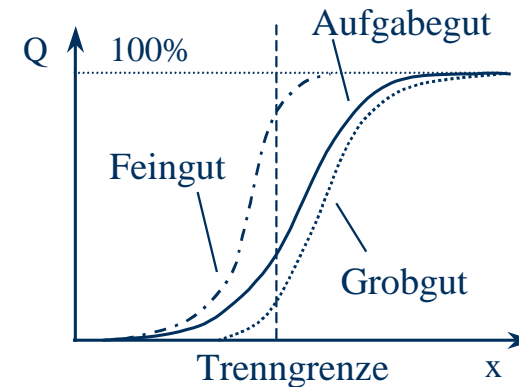
- massengewichtet ($q_3(x)$) oder
- anzahlgewichtet ($q_0(x)$)

- Partikelgrößenverteilungen von Aufgabe, Grob- und Feingut:

eines idealen Klassierprozesses



eines realen Klassierprozesses



4.2 Quantifizierung von klassierenden Trennprozessen

– Trennfunktion –

Stoffbilanz und Gesamtabscheidegrad

- Gesamtbilanz

$$M_A = M_F + M_G$$

- Bilanz an Größenfraktion k

$$M_A \cdot \Delta Q_{r,A_k} = M_F \cdot \Delta Q_{r,F_k} + M_G \cdot \Delta Q_{r,G_k}$$

- Bilanz am Größenintervall dx

$$M_A \cdot dQ_{r,A} = M_F \cdot dQ_{r,F} + M_G \cdot dQ_{r,G}$$

$$q_{r,A} = f \cdot q_{r,F} + g \cdot q_{r,G}$$

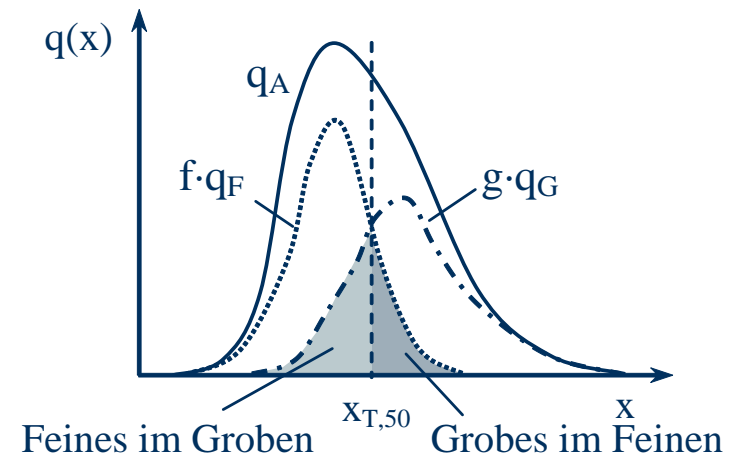
- Gesamtabscheidegrad

- Definition

$$\eta_{\text{ges}} = \frac{\text{Menge an Grobgut}}{\text{Menge an Aufgabegut}} = g$$

- Berechnung

$$\eta_{\text{ges}} = \frac{M_G}{M_A} = \frac{M_G}{M_F + M_G} = 1 - \frac{M_F}{M_A}$$



Feingutanteil

$$f = M_F / M_A$$

Grobgutanteil

$$g = M_G / M_A$$

Mediantrenngrenze

$$x_{T,50}$$

Trennfunktion

- Trennfunktion (auch: *Trennkurve*)

- Definition

$$T(x) = \frac{\text{Menge an Grobgut in Klasse } x \dots x + dx}{\text{Menge an Aufgabegut in Klasse } x \dots x + dx}$$

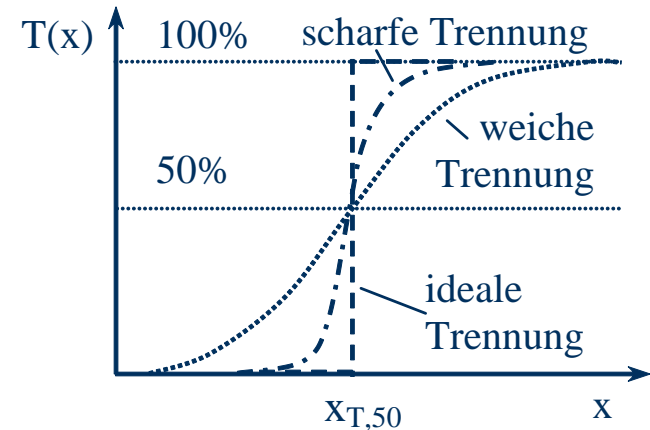
- Berechnungsvarianten

$$T_{AG}(x) = \frac{M_G \cdot dQ_{M,G}}{M_A \cdot dQ_{M,A}} = g \cdot \frac{q_{r,G}(x)}{q_{r,A}(x)}$$

$$T_{AF}(x) = 1 - f \cdot \frac{q_{r,F}(x)}{q_{r,A}(x)}$$

$$T_{FG}(x) = \frac{g \cdot q_{r,G}(x)}{f \cdot q_{r,F}(x) + g \cdot q_{r,G}(x)}$$

$$T_{AFG}(x) = \frac{1 - q_{r,F}(x)/q_{r,A}(x)}{1 - q_{r,F}(x)/q_{r,G}(x)}$$



Der **Gesamtabscheidegrad**

... resultiert aus der Trennfunktion und der Partikelgrößenverteilung des Aufgabegutes:

$$\eta_{\text{ges}} = \int T(x) q_{r,A}(x) dx = \sum T_k \Delta Q_{r,A_k}$$

T_k = Trenngrad für die Größenfraktion k
(auch: *Fraktionsabscheidegrad*)

Rechnen mit Trennfunktionen

- diskrete Partikelgrößenverteilung
 - N Klassen mit Klassenobergrenzen x_k , Klassenmitten \bar{x}_k , Mengenanteilen $\Delta Q_{r,A_k}$

- Fraktionsabscheidegrad $\eta_k = \bar{T}_k = \frac{1}{\Delta Q_{r,A_k}} \int_{x_{k-1}}^{x_k} T(x) \cdot q_{r,A}(x) dx \approx T(\bar{x}_k)$

- Gesamtababscheidegrad: $\eta_{\text{ges}} = \int_{x_{\text{min}}}^{x_{\text{max}}} T(x) \cdot q_{r,A}(x) dx \approx \sum_{k=1}^n \eta_k \cdot \Delta Q_{r,A_k}$

- Bestimmung der Mengenanteile f und g :
 - **direkt** aus von Größenbestimmung unabhängigen Messungen, z. B. Konzentrationsmessung oder Wägung der Teilströme (nicht immer möglich)

- indirekt aus PGV
via Dichtefunktionen: $g_r = \frac{q_{r,A}(x) - q_{r,F}(x)}{q_{r,G}(x) - q_{r,F}(x)}$ und $f_r = \frac{q_{r,A}(x) - q_{r,G}(x)}{q_{r,F}(x) - q_{r,G}(x)}$

- via Summenfunktionen: $g_r = \frac{Q_{r,A}(x) - Q_{r,F}(x)}{Q_{r,G}(x) - Q_{r,F}(x)}$ und $f_r = \frac{Q_{r,A}(x) - Q_{r,G}(x)}{Q_{r,F}(x) - Q_{r,G}(x)}$

meist sind die berechneten Anteile um x_T halbwegs unabhängig von x

Güte der Trennung

- Trenngrenze

- Mediantrenngrenze $x_{T,50}$

$$T(x_{T,50}) = 0.5 \quad f \cdot q_{r,F}(x_{T,50}) = g \cdot q_{r,G}(x_{T,50})$$

- analytische Trenngrenze $x_{T,a}$

$$g \cdot \int_{x_{\min}}^{x_{T,a}} q_{r,G}(x) dx = f \cdot \int_{x_{T,a}}^{x_{\max}} q_{r,F}(x) dx$$

- Trennschärfe

- Trennschärfegrad κ (n. Eder)

$$\kappa = x_{T,25} / x_{T,75}$$

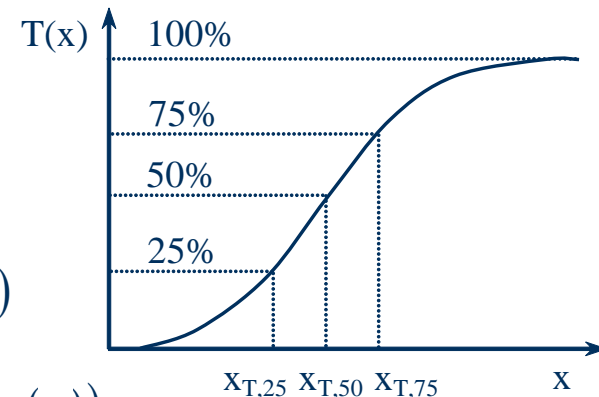
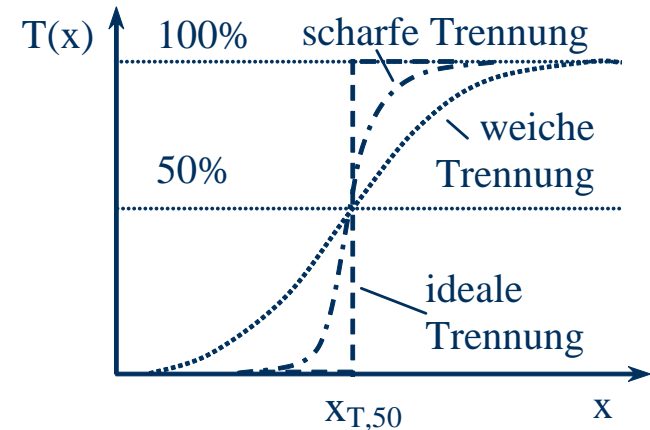
- Spannweite E_T (n. Terra)

$$E_T = 0.5 \cdot (x_{T,75} - x_{T,25})$$

- Fehlausträge

- Unterkorn: $F_{r,G} = g \cdot \int_{x_{\min}}^{x_T} q_{r,G}(x) dx = g \cdot Q_{r,G}(x_T)$
(Feines im Groben)

- Überkorn: $F_{r,F} = f \cdot \int_{x_T}^{x_{\max}} q_{r,F}(x) dx = f \cdot (1 - Q_{r,F}(x_T))$
(Grobes im Feinen)



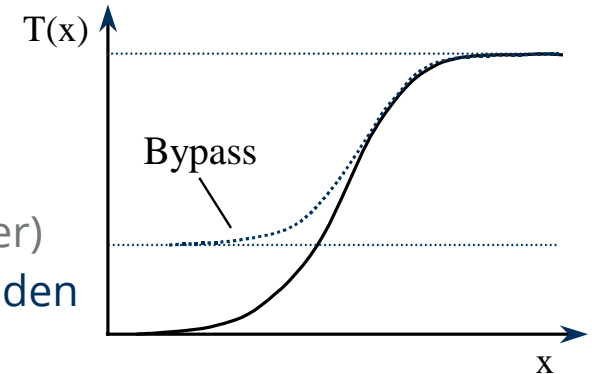
4.3 Quantifizierung von klassierenden Trennprozessen – *Abweichungen vom idealen Verlauf der Trennfunktion* –

Unzulänglichkeiten des Klassierprozesses

Bypass (Todfluss)

- Ursache

- ein Teil des Aufgabeguts / Aufgabegutstroms umgeht die Klassierung und gelangt direkt in das Grobgut (z. B. mangels Vereinzelung im Gegenstromsichter)
- trennenden Mikroprozesse werden von mischenden Mikroprozessen überlagert (z. B. für feine Partikel im Hydrozyklon)



- Auswirkung

- Grobgut enthält stets feine Partikel
- Trennfunktion für sehr feine Partikel ist endlich ($T(0) > 0$)
- Trennfunktion nähert sich asymptotisch einer Horizontalen (wie bei Teilung)

- Datenbehandlung

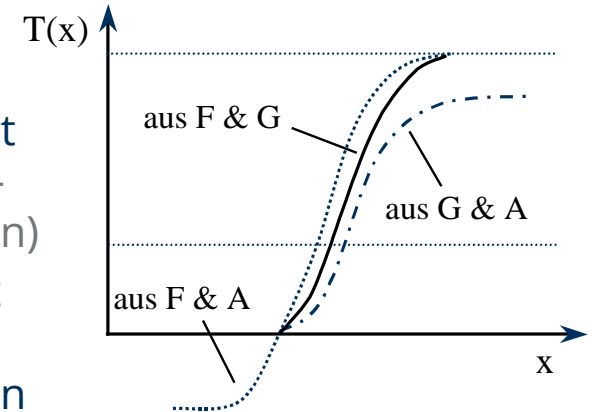
- Bestimmung des Todflussanteils $\tau = T(0)$
- ggf. Berechnung einer modifizierten Trennfunktion
$$\tilde{T}(x) = \frac{T(x) - \tau}{1 - \tau}$$

Unzulänglichkeiten des Klassierprozesses

Zerkleinerung während des Klassierens

- Ursache

- grobe Partikel werden während des Klassierens infolge mechanischer Beanspruchung zerkleinert (z. B. durch Vibrationen im Siebturm, Strömungskräfte und Prallbeanspruchung beim Windsichten)
- *Hinweis*: ein gewisses Maß an Beanspruchung ist meist gewollt, um die an der Oberfläche grober Partikel anhaftenden feinen Partikel zu vereinzeln



- Auswirkung

- die der Trennfunktion zugrunde liegende quellenfreie Bilanz der fraktionellen Mengen ist unzureichend
- Produkte enthalten mehr feine und weniger grobe Partikel als Aufgabegut
- Trennfunktionen T_{AF} , T_{AG} und T_{FG} unterscheiden sich qualitativ

- Datenbehandlung

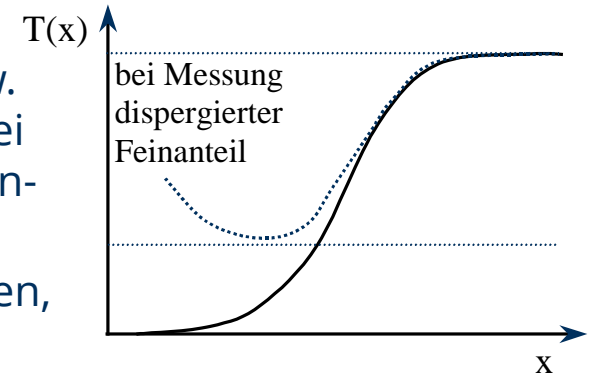
- Ermittlung des Bilanzfehlers

Probleme bei der Ermittlung von Trennfunktionen

Partikelgrößenanalyse mit effektiverer Dispergierung als beim Klassieren

- Ursache

- Agglomeraten werden beim Klassieren nicht bzw. nur unvollständig dispergiert, erfahren jedoch bei der Messung bzw. der ihr vorangehenden Probenvorbereitung eine vollständige Dispergierung
- betrifft insbesondere Agglomerate aus sehr feinen, d.h. besonders kohäsiven, Partikeln



- Auswirkung

- die Messergebnisse bilden den Klassierprozess nicht korrekt ab
- der Fehlaustrag von Feinen ins Grobe wird überschätzt, die Trennfunktion fällt nicht auf Null ab

- Maßnahmen

- Anpassung der Charakterisierungsmethode an die mechanischen Beanspruchungen beim Klassieren

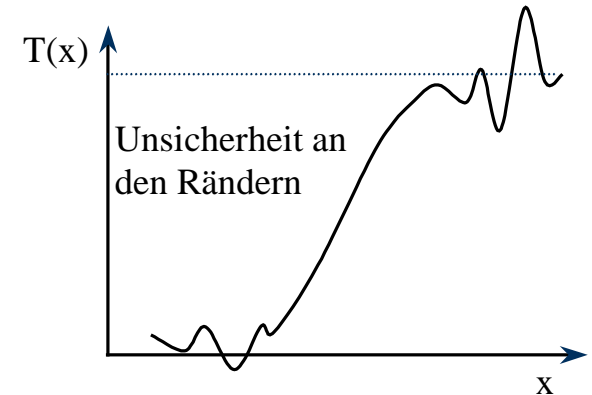
Probleme bei der Ermittlung von Trennfunktionen

unsichere Bestimmung der PGV an den Rändern der Verteilung

- Abschätzung des relativen Fehlers in $T(x)$,

- z.B. für $T_{AG}(x)$:
$$\left| \frac{\delta T_{AG}}{T_{AG}} \right| = \left| \frac{\delta g}{g} \right| + \left| \frac{\delta q_{r,A}}{q_{r,A}} \right| + \left| \frac{\delta q_{r,G}}{q_{r,G}} \right|$$

- an Ränder der PGV gilt $q_r \rightarrow 0$,
das heißt: maximale Fehlerverstärkung



- Auswirkung
 - (z.T. starke) Schwankung der berechneten Trennfunktion an ihren Rändern
 - keine sichere Aussage bezüglich systematischer Trennfehler
- Maßnahmen
 - Korrektur möglich, wenn die größenabhängige Messunsicherheit in den Verteilungsfunktionen bekannt ist

Bilanzfehler

- größenabhängige Stoffbilanz: $q_{r,A}(x) = f \cdot q_{r,F}(x) + g \cdot q_{r,G}(x)$
- Bilanzfehler
 - inkremental: $\varepsilon_r(x) = q_{r,A}(x) - f \cdot q_{r,F}(x) - g \cdot q_{r,G}(x)$
 - kumulativ: $E_r(x) = Q_{r,A}(x) - f \cdot Q_{r,F}(x) - g \cdot Q_{r,G}(x)$
 - Bilanzierung am besten für Mengenart „Masse“, die sich anders als die „Anzahl“ beim Zerkleinern oder Dispergieren nicht ändert
- Kontrollfunktion $\varphi_r(x) = 1 - \varepsilon_r(x) / q_{r,A}(x)$
- Bilanzfehler $\varepsilon(x)$ infolge von ...
 - ... Zerkleinerung: systematisch negativ für kleine x , systematisch positiv für große x
 - ... Unsicherheiten in Messung der PGV: stochastische Schwankung

Ausgleich von stochastischen Bilanzfehlern

- Voraussetzung:
 - Kenntnis des kumulativen Bilanzfehlers $E(x)$ und der größenabhängigen Unsicherheiten $\alpha(x)$ für die kumulativen Verteilungsfunktionen $Q(x)$
($\sigma(x)$ ist die Standardabweichung für die gemessenen Werte von $Q(x)$)
- Gesamtvarianz
$$\alpha^2(x) = \sigma_A^2(x) + f^2 \cdot \sigma_F^2(x) + g^2 \cdot \sigma_G^2(x)$$
- Korrektur der gemessenen PGV^{en}
 - für das Aufgabegut:
$$K_A(x) = Q_A(x) - \frac{\sigma_A^2(x)}{\alpha^2(x)} \cdot E(x)$$
 - für das Feingut:
$$K_F(x) = Q_F(x) + \frac{f \cdot \sigma_F^2(x)}{\alpha^2(x)} \cdot E(x)$$
 - für das Grobgut
$$K_G(x) = Q_G(x) + \frac{g \cdot \sigma_G^2(x)}{\alpha^2(x)} \cdot E(x)$$
 - nach der Korrektur verschwindet der Bilanzfehler und es können korrigierte Trennkurven berechnet werden

4.4 Quantifizierung von klassierenden Trennprozessen

– *Techniken des Klassierens* –

Siebklassierung – analytische & technische Zwecke

analytisches Siebklassieren



- i.d.R. viele Siebböden
 - geringe Siebbeladung
 - lange Siebdauern (diskontinuierlich)
- ➔ sehr scharfe Trennung

technisches Siebklassieren



- i.d.R. wenige Siebböden
 - mittlere bis hohe Siebbeladung
 - mittlere Siebdauern / Verweilzeiten
- ➔ moderate Trennschärfe

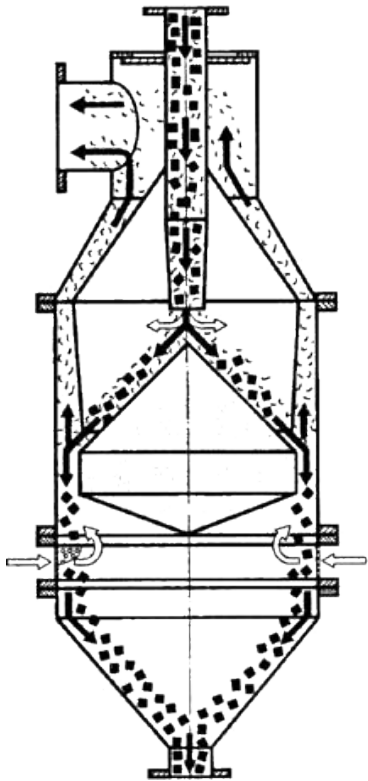
Siebklassierung – Prinzip und Umsetzung

- Prinzip:
 - Partikel können das Siebmedium prinzipiell passieren, falls ...
... die kleinste max. Sehnenlänge < Maschenweite
 - *aber*: die Durchgangswahrscheinlichkeit ist stets kleiner 100%
 - ➔ wiederholtes „Werfen“ auf die Sieboberfläche, lange Verweilzeiten auf Sieb
- technische Umsetzung
 - feste Roste mit geneigter Oberfläche für trockene Schüttgüter
 - bewegte Siebe für trockene Schüttgüter (z.B. Vibrationssiebe, Stößelsiebe, Wurfsiebe, Trommelsiebe, Taumelsiebe)
 - Luftstrahlsiebung für Pulver (lokales Freiblasen blockierter Siebmaschen & Dispergieren von Agglomeraten kombiniert mit Absaugung unter feinstem Sieb)
 - Nasssiebung (für besonders kohäsive oder feuchte, adhäsive Pulver; eine Siebbewegung ist auch hier erforderlich)
- große Bandbreite an Siebmedien und Trennteilchengröße (μm ... cm)

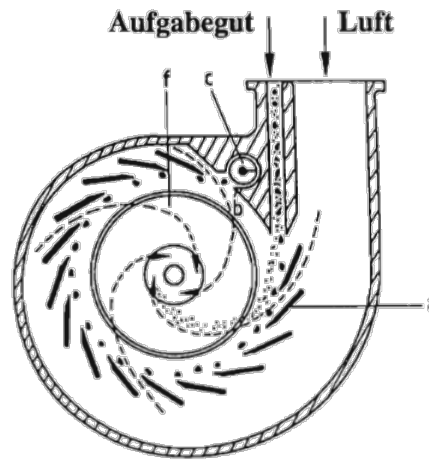
Strömungsklassieren in der Gasphase

- Prinzip
 - infolge ihrer Schwere oder Trägheit weichen die Bahnlinien der Partikel von den Stromlinien des Gases ab
 - die Abweichung ist umso größer, je schwerer bzw. träger die Partikel sind (sehr feine Partikel folgen der Gasströmung, grobe werden abgeschieden)
 - Umsetzung für das Schwerfeld oder im Zentrifugalfeld
 - Umsetzung als Querstrom oder Gegenstrom
- technische Umsetzung
 - Steigsichter (Trennung im Gegenstromprinzip)
 - Zickzacksichter (Wirbelwalzen als Querstromsichter)
 - Umlenksichter (grobe Partikel können Umlenkströmung nicht folgen)
 - Spiralwindsichter (apparativ erzwungene Rotationsbewegung)
 - Abweiseradsichter (durch Rotor erzwungene Drehströmung)
- *Hinweis*: hohe Gasgeschwindigkeiten im Zentrifugalfeld → effektive Dispergierung

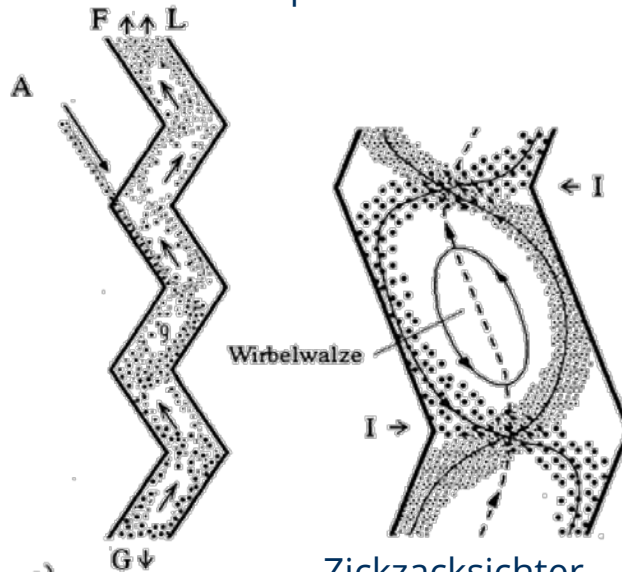
Windsichter



Steigsichter

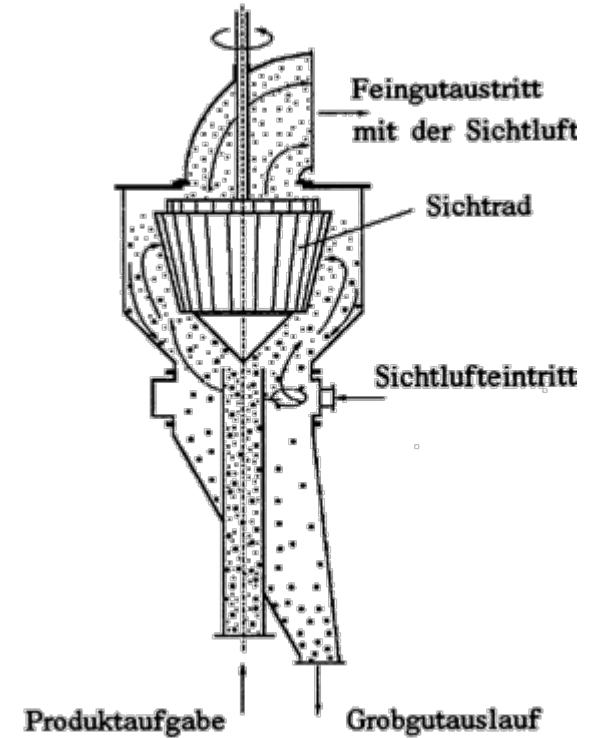


Spiralwindsichter



Zickzacksichter

(A Aufgabegut, L Luft, K_1 Grobgut, K_2 Feingut)

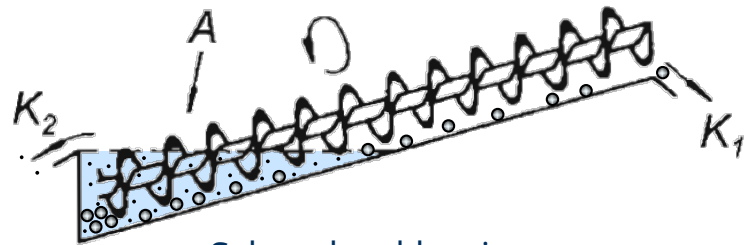


Abweiseradsichter

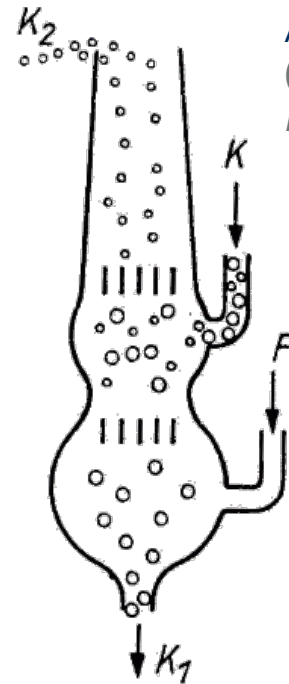
Strömungsklassieren in der Flüssigphase

- Prinzip
 - im Wesentlichen gleich wie für das Strömungsklassieren in der Gasphase
 - *aber*: der Klassiererfolg wird wesentlich von davon beeinflusst, ob die Flüssigkeitsströmung laminar oder turbulent ist
(turb. Rückvermischung führt zu deutlichen Fehlaustrag von Feinen ins Grobe)
- technische Umsetzung
 - laminare Querstromhydroklassierer (Entmischung entlang horizontalem Fluss)
 - mechanische Klassierer (Grobgutentnahme mit mechanischen Werkzeugen)
 - Aufstromhydroklassierer (Gegenstromprinzip im Schwerefeld)
 - Hydrozyklone (Trennung im spiralförmiger Wirbelfeld)
- *Hinweis*:
 - in Flüssigkeiten sind kohäsive Kräfte herabgesetzt und Strömungskräfte relativ hoch → effektive Dispergierung

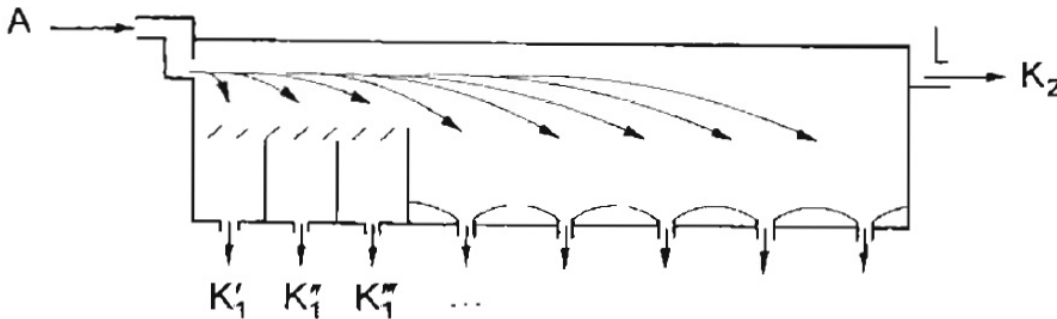
Hydroklassierer



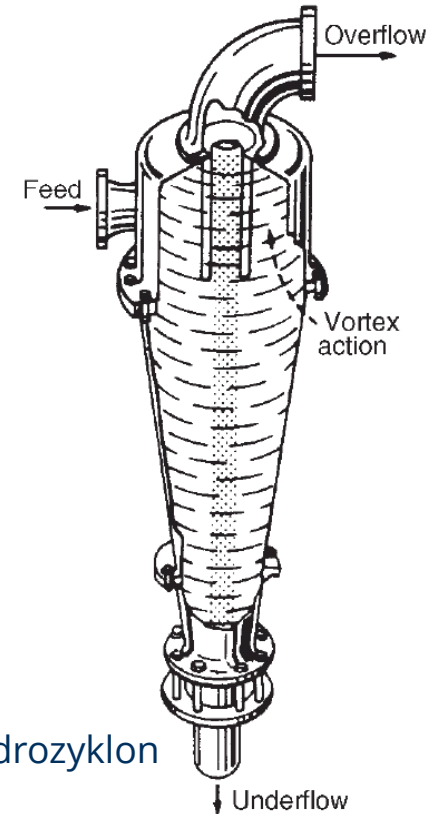
Schraubenklassierer
(A Aufgabegut, K_1 Grobgut, K_2 Feingut)



Aufstromhydroklassierer
(K Aufgabegut, Fl Spülflüssigkeit, K_1 Grobgut, K_2 Feingut)



Mehrkammerklassierer für mehrere Grobgutfractionen
(A Aufgabegut, K_1 Grobgut, K_2 Feingut)



Hydrozyklon

4.5 Quantifizierung von klassierenden Trennprozessen

– *Literaturverweise* –

Literatur zum Weiterlesen

Kennzeichnung von Merkmalsverteilungen

Bücher und Buchkapitel:

- H. Schubert (Hrsg.), *Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik, Bd. 2*; Kap. 7.2, S. 508-611; Wiley-VCH, Weinheim, **2003**; [doi:10.1002/3527603352](https://doi.org/10.1002/3527603352)
- M. Stieß, *Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1*; Kap.6, S. 261-329; Springer, **2009**; [doi:10.1007/9783-540-32552-9](https://doi.org/10.1007/9783-540-32552-9)

Normen:

- *DIN ISO 9276-4:2019*, Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen – Teil 4: Charakterisierung eines Trennprozesses.