



# Folien zur Vorlesung

**NUR ZUM PERSÖNLICHEN GEBRAUCH!**

Mechanische Verfahrenstechnik

# Gliederung

1. Einführung in die Verfahrenstechnik
2. Gegenstand der Mechanischen Verfahrenstechnik
3. Kennzeichnung disperser Systeme
4. Sedimentation
5. Filtration
6. Mehrphasenströmungen

# 1. Einführung in die Verfahrenstechnik

# Lernziele zu Kapitel 1

- Wissen:
  - Was ist Gegenstand und Aufgabe der Verfahrenstechnik?
  - Welche Kennzahlen beschreiben die Zusammensetzung von Stoffgemischen?
- Fähigkeiten:
  - Stoffliche Bilanzierung von technischen Prozessen
  - Umrechnung von Konzentrationsangaben

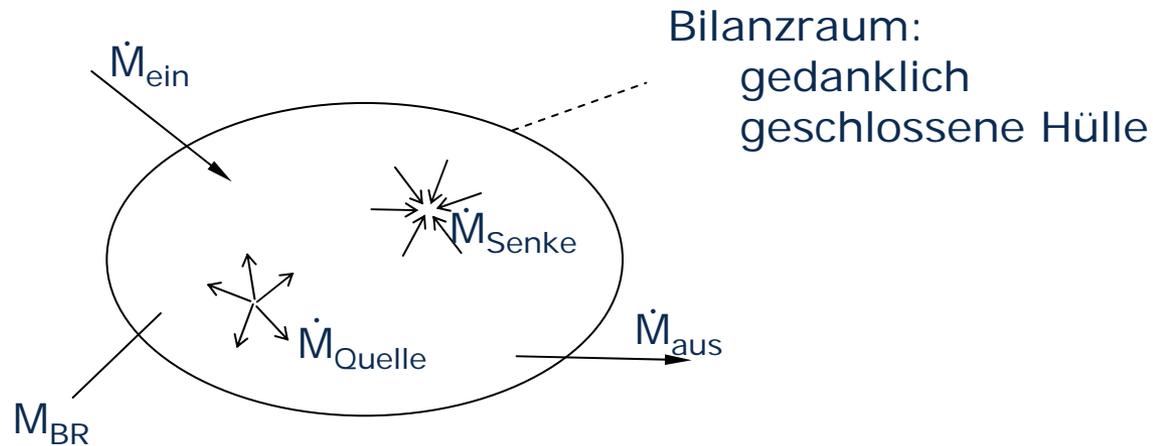
# Verfahrenstechnik ?

- Ingenieurwissenschaft, die sich mit von Stoffumwandlungsprozessen befasst, d.h. mit der Änderung des physikalischen Zustandes oder der chemischen Natur
- zum Beispiel
  - Änderung der Moleküle → Chemische Verfahrenstechnik
  - Änderung der molekularen Zusammensetzung → Thermische Verfahrenstechnik
  - Änderung im Größenbereich  $\gg$  Molekülabmessungen → Mechanische Verfahrenstechnik
  - Stoffumwandlung mit Hilfe biochemischer Prozesse → Bioverfahrenstechnik

# Tätigkeitsfeld der Verfahrenstechnik

- Aufgaben
  - Erarbeitung von Verfahrens- und Anlagenschemata, Auswahl geeigneter Apparate
  - Auslegung von Anlagen bzw. einzelner Apparate
  - Optimierung von Anlagen
  - Anpassung von Anlage (neue Endprodukte/Gesetzesänderung)
- Werkzeuge
  - VT-Grundkenntnisse (Kennzeichnung von Stoffsystemen, Funktion der einzelnen Apparate, Stoff- und Energieaustausch)
  - Bilanzen

# Bilanzierung von Stoffströmen



$$\frac{dM_{BR}}{dt} = \sum \dot{M}_{ein} - \sum \dot{M}_{aus} + \sum \dot{M}_{Quelle} - \sum \dot{M}_{Senke}$$

Welche Mengenarten „M“ lassen sich bilanzieren?

## 2. Mechanische Verfahrenstechnik

## Lernziele zu Kapitel 2

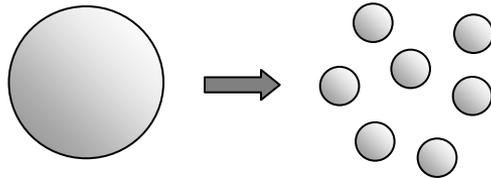
- Wissen:
  - Welche Art von Stoffsystemen sind Gegenstand der Mechanischen Verfahrenstechnik?
  - In welche Kategorien werden sie eingeteilt?
  - Wie heißen die 4 Arten der mechanischen Grundoperationen?
- Fähigkeiten:
  - Auswahl geeigneter Lehrbücher zur Mechanischen Verfahrenstechnik

# Einteilung disperser Stoffsysteme

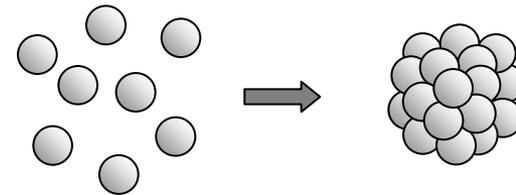
<b>kont. Phase</b>	<b>disperse Phase</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Beispiele</b>
gasförmig	fest	Aerosol; Schüttgüter	
	flüssig	Aerosol	
flüssig	fest	Suspension; Paste	
	flüssig	Emulsion	
	gasförmig	Blasensysteme; Schäume	
fest	fest	Legierungen; Gesteine	
	flüssig	organisches Gewebe	
	gasförmig	poröse Festkörper; feste Schäume	

# Grundoperationen

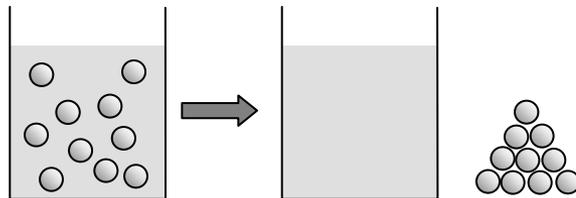
## Zerkleinern



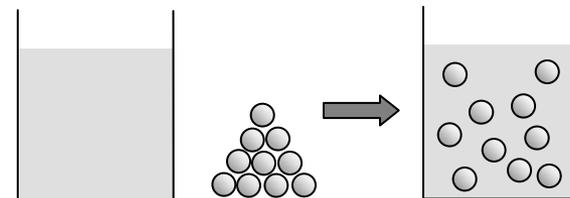
## Agglomerieren



## Trennen



## Mischen



weitere Aufgaben der MVT:

- Lagern, Fördern, Dosieren von Schüttgütern
- Partikelmesstechnik

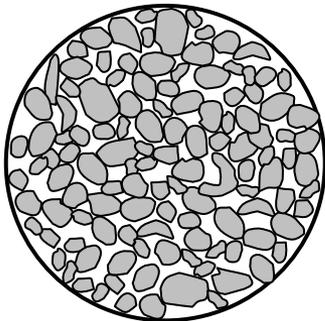
### 3. Kennzeichnung disperser Systeme

## Lernziele zu Kapitel 3

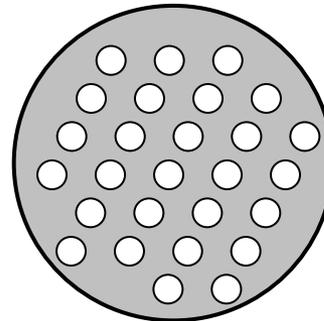
- Wissen:
  - Welche Parameter kennzeichnen die Zusammensetzung einer trockenen Schüttung?
  - Wie lässt sich die Größe eines nicht-kugelförmigen Partikels quantifizieren?
  - Auf welche Weisen wird die Häufigkeit unterschiedlich großer Partikel, d.h. die Partikelgrößenverteilung (PGV), erfasst?
- Fähigkeiten:
  - Berechnung geometrischer Äquivalentdurchmesser
  - Grafische Darstellung von PGVen und Bestimmung charakteristischer Kennzahlen (wie Modal- und Medianwert)

# Hydraulischer Durchmesser

reale Schüttung



Modellschüttung



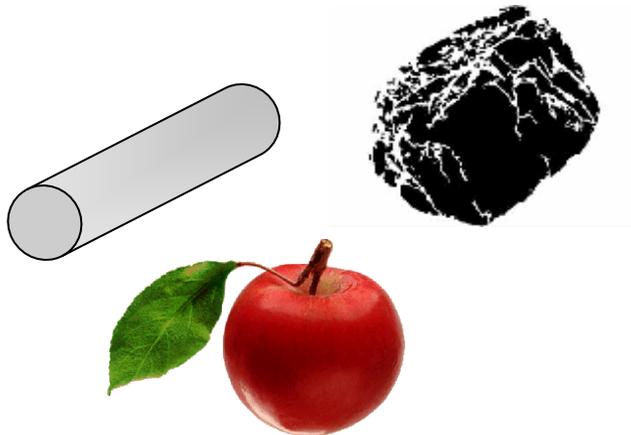
Draufsicht

hydraul. Durchmesser =

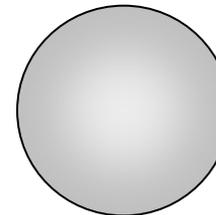
Durchmesser eines zylindrischen Rohres dessen Verhältnis von umströmter Oberfläche zu durchströmten Volumen dem der realen Schüttung gleicht

# Äquivalentdurchmesser

reale Partikel



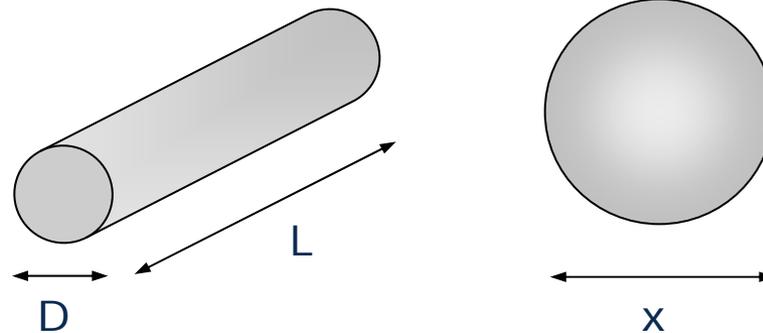
Modellpartikel  
(Kugel)



Äquivalentdurchmesser =

Durchmesser einer Kugel die in einem bestimmten geometrischem oder physikalischem Merkmal (z.B. Volumen, Sinkgeschwindigkeit) dem zu beschreibenden Partikel gleicht

## Äquivalentdurchmesser – Beispiel Zylinder



### räumliche Äquivalenz

$$\text{Volumen: } V_{\text{Zyl}} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 L \stackrel{!}{=} V_{\text{Kugel}} = \frac{\pi}{6} \cdot x^3 \Rightarrow x_V = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \cdot D^2 L}$$

$$\text{Oberfläche: } S_{\text{Zyl}} = \frac{\pi}{2} D^2 + \pi \cdot DL \stackrel{!}{=} S_{\text{Kugel}} = \pi \cdot x^2 \Rightarrow x_S =$$

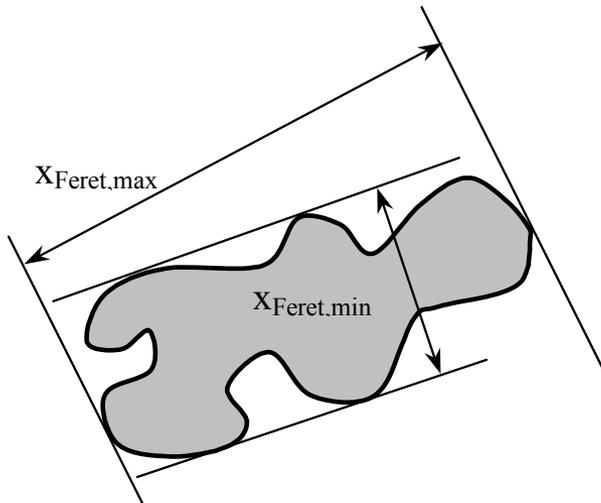
### Äquivalenz am Projektionsbild (stabilste Lage)

$$\text{Projektionsfl.: } A_{\text{Pst,Zyl}} = DL \stackrel{!}{=} A_{\text{Pst,Kugel}} = \frac{\pi}{4} \cdot x^2 \Rightarrow x_{\text{Pst}} =$$

$$\text{Umfang: } U_{\text{Zyl}} = 2 \cdot (D + L) \stackrel{!}{=} U_{\text{Kugel}} = \pi \cdot x \Rightarrow x_U =$$

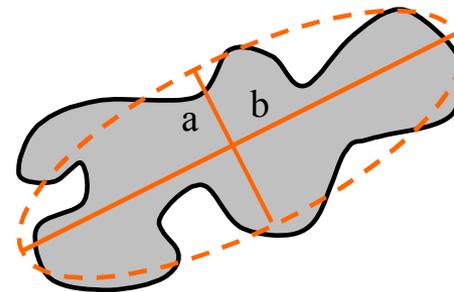
# Charakteristische Längen des Projektionsbildes

## Feret-Durchmesser:



Abstand paralleler Tangenten

## Achsen der Legendre-Ellipse:

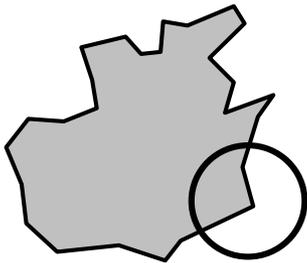


Ellipse mit identischer  
Projektionsfläche und  
Trägheitsmoment

# Partikelform – Einfluss der Betrachtungsebene

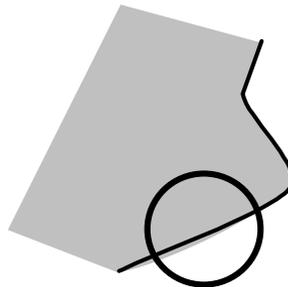
## makroskopisch:

Verhältnis der Partikel-  
proportionen  
(Kompaktheit)



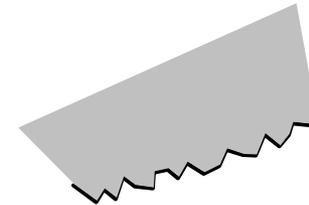
## mesoskopisch:

Strukturen nicht sehr  
viel kleiner als  
Partikelabmessungen  
(Rundheit von Ecken,  
Konkavitäten)

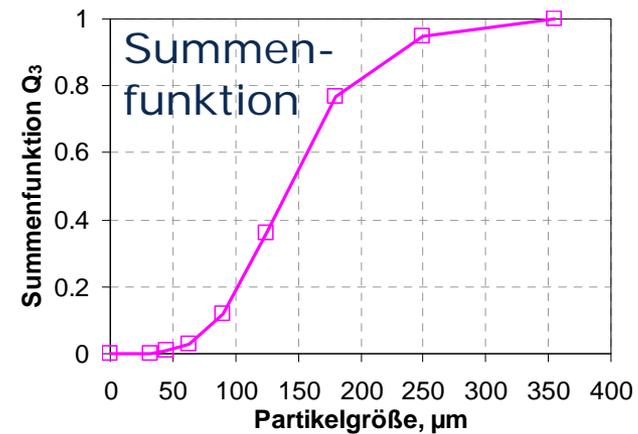
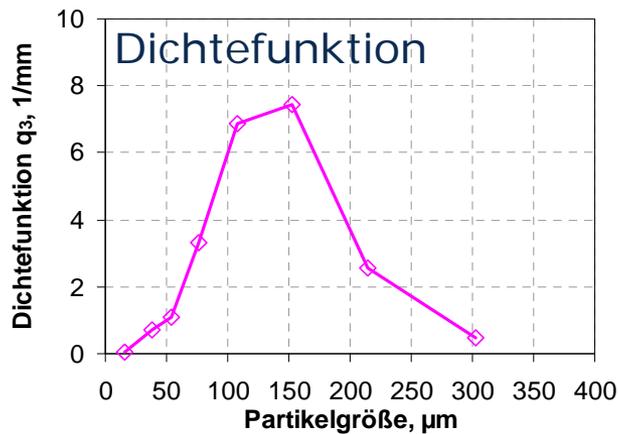
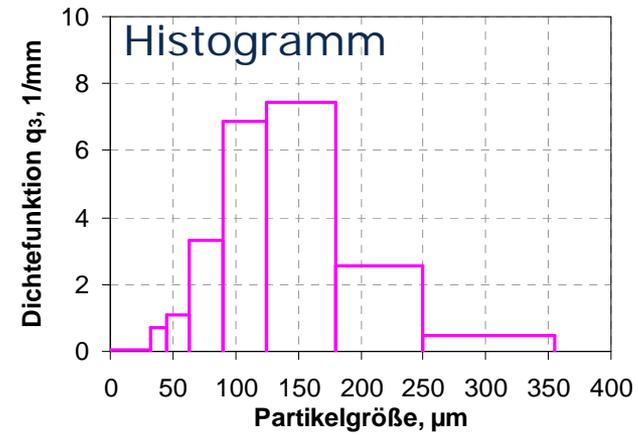
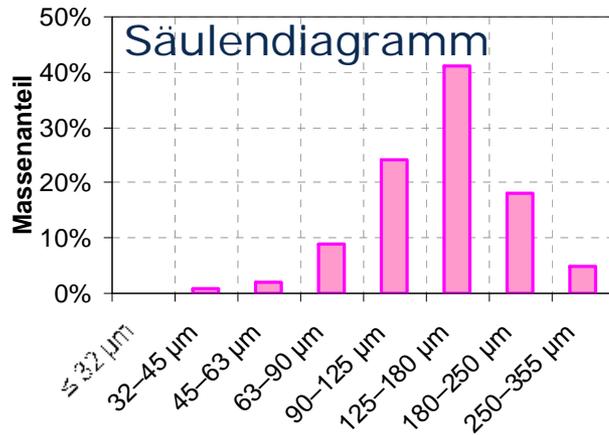


## mikroskopisch:

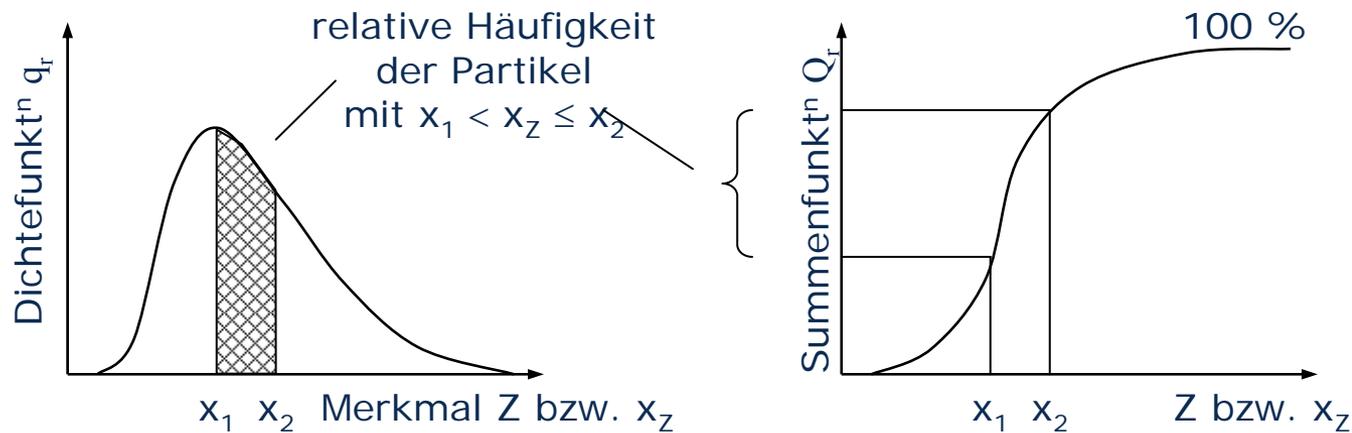
Strukturen, die viel  
kleiner als  
Partikelabmessungen  
(Rauigkeiten)



# Partikelgrößenverteilung – Darstellungsarten



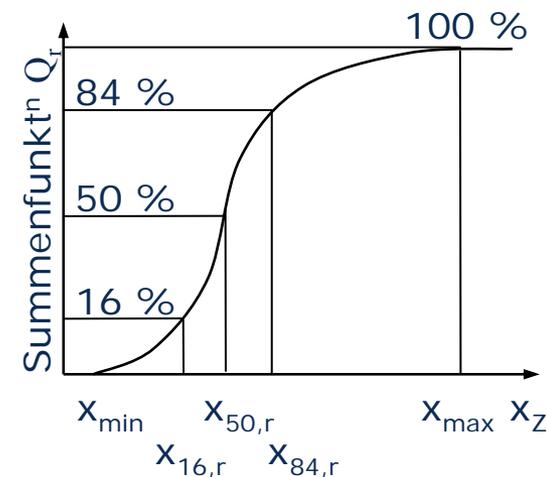
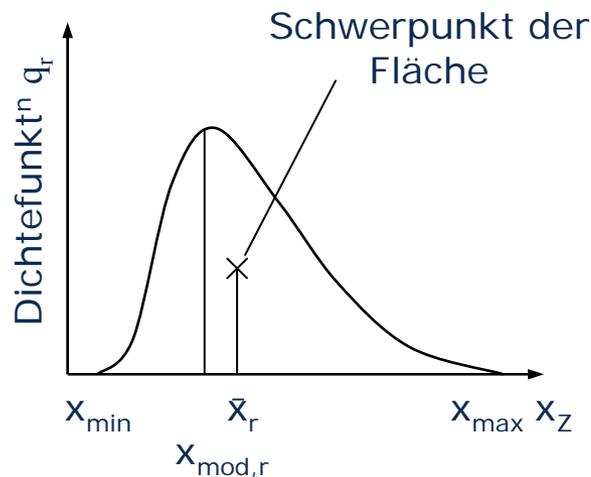
# Partikelgrößenverteilung – Definition



Definition: 
$$Q_r(x) = \frac{\{\text{Partikel} \leq x\}}{\{\text{alle Partikel}\}} = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} q_r(x) dx$$

- „relative Häufigkeit“ bezieht sich auf eine kumulierbare Eigenschaft des Partikelsystems (Anzahl, Volumen, Masse, Lichtextinktion, ...)

# Charakteristische Verteilungsparameter



aus Dichtefunktion:

- Modalwert(e)  $x_{\text{mod},r}$
- Mittelwerte
  - arithm.:  $\bar{x}_{1,r} = \bar{x}_r = \int x q_r(x) dx$
  - harmon.:  $\bar{x}_{-1,r} = \int x^{-1} q_r(x) dx$

aus Summenfunktion:

- Medianwert  $x_{50,r}$
- Quantil-Paare  $\rightarrow$  Verteilungsbreite
  - z.B.  $x_{16,r}$  &  $x_{84,r}$
  - z.B.  $x_{10,r}$  &  $x_{90,r}$

# SAUTER-Durchmesser

Partikelsystem

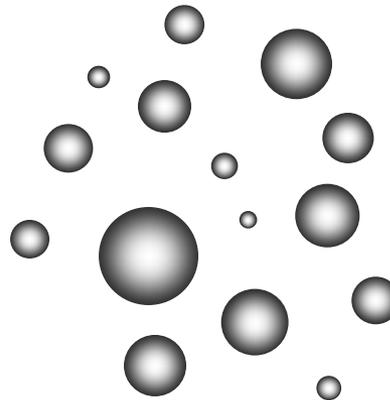


Volumen  $V_{\text{disp}}$

Oberfläche  $S_{\text{disp}}$

$$\text{vol.-spez. OF } S_V = \frac{V_{\text{disp}}}{S_{\text{disp}}}$$

volumengleiche Kugeln



Volumen  $V_{\text{disp}}$

Oberfläche  $\Psi \cdot S_{\text{disp}}$

vol.-spez. OF  $\Psi \cdot S_V$

Kugel mit  $x_{\text{ST}}$



$$x_{\text{ST}} = \frac{6}{\Psi \cdot S_V}$$

Volumen

$$\frac{\pi}{6} \cdot x_{\text{ST}}^3$$

Oberfläche

$$\pi \cdot x_{\text{ST}}^2$$

$$\text{vol.-spez. OF } \Psi \cdot S_V = \frac{6}{x_{\text{ST}}}$$

**Sauter-Durchmesser** = spezieller Mittelwert der Partikelgrößenverteilung

# Statistische Verteilungsfunktionen

Normierte Normalverteilung:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \rightarrow \Phi(x) = \int_{-\infty}^x \varphi(\xi) d\xi$$

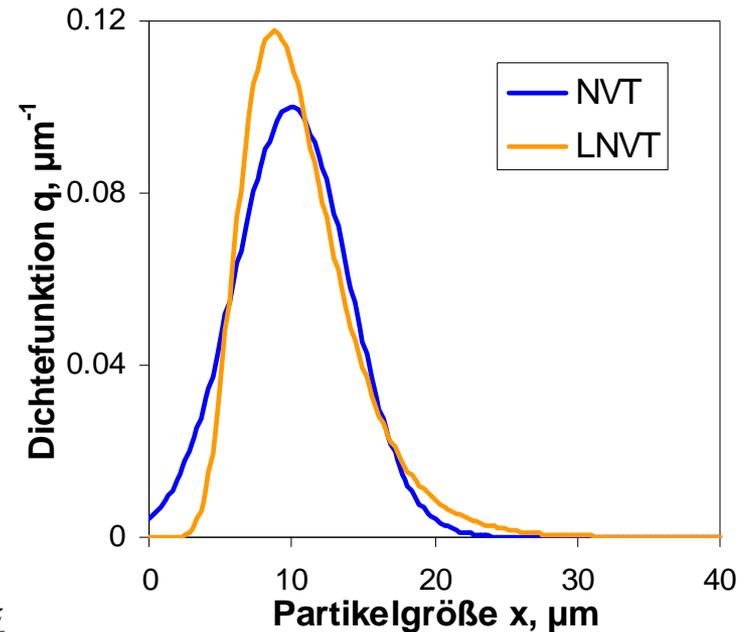
Transformation  $Q_r(x) = \Phi(z)$

Normalverteilung :

$$z = \frac{x - x_{50,r}}{s_r} \rightarrow q_r(x) = \frac{1}{s_r \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}$$

Logarithmische Normalverteilung :

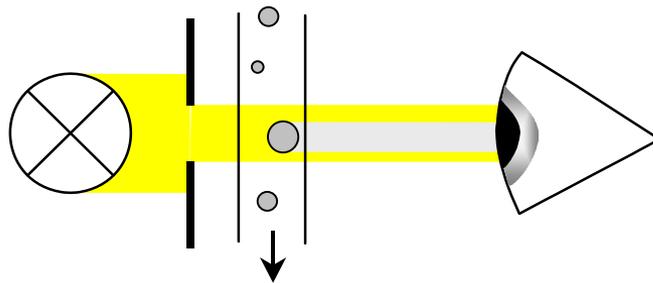
$$z = \frac{1}{\sigma_{\ln}} \ln \frac{x}{x_{50,r}} \rightarrow q_r(x) = \frac{1}{\sigma_{\ln} x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}$$



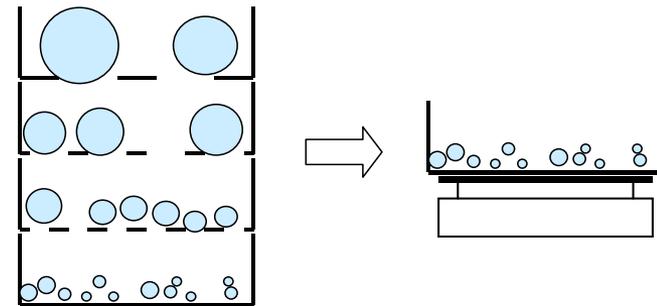
$$x_{50} = 10 \mu\text{m}, s = 4 \mu\text{m}$$

# Methoden für die Partikelgrößenanalyse

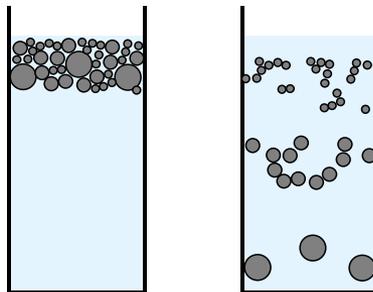
## Optischer Partikelzähler



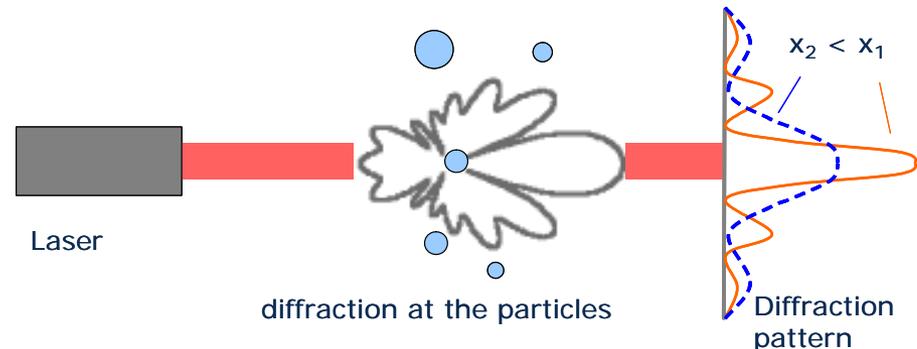
## Siebanalyse



## Sedimentationsanalyse



## Laserbeugungsspektroskopie



## 4. Sedimentation

## Lernziele zu Kapitel 4

- Wissen:
  - Was verstehen wir unter Sedimentation?
  - Unterschied zwischen Schwarm- und Zonensedimentation?
  - Welche Sedimentationsapparate für technische Trennprozesse?
  - Wie lässt sich die Effektivität von Sedimentationsprozessen beeinflussen?
- Fähigkeiten:
  - Berechnung der Sinkgeschwindigkeit von Einzelpartikeln und Partikelschwärmen
  - Ermittlung der Partikelgröße bei bekannter Sinkgeschwindigkeit
  - Auslegung eines Sedimentationsapparates bzgl. der Klärfläche

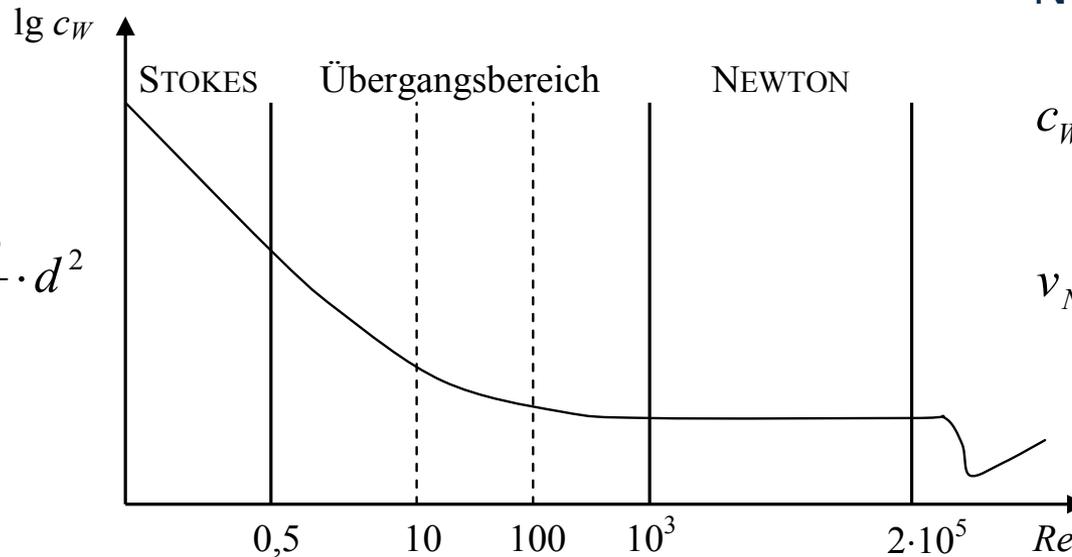
# Widerstandsbeiwert einer Kugel

$$F_W = c_W \cdot A_Q \cdot \frac{\rho}{2} v_{rel}^2$$

Stokes:

$$c_W = \frac{24}{Re}$$

$$v_{Stokes} = \frac{g \cdot \Delta\rho}{18 \cdot \eta_F} \cdot d^2$$



Newton:

$$c_W = 0,44 = konst.$$

$$v_{Newton} = \sqrt{\frac{g \cdot \Delta\rho}{0,33 \cdot \rho_F} \cdot d}$$

# Widerstandsbeiwert einer Kugel

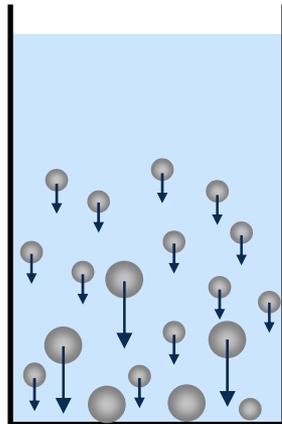
Potenzansatz: 
$$c_w = \frac{B}{Re^A}$$

Strömg.- regime	Stokes	Übergangsregime			Newton
	schleichende Strömung	ablösefrei	beginnende Ablösung	Wirbelschleppe	turbulente Nachlaufströmung
Re	$Re \leq 0.5$	$0.5 < Re \leq 10.1$	$10.1 < Re \leq 122$	$122 < Re \leq 10^3$	$10^3 < Re \leq 10^5$
Ar	$Ar \leq 9$	$9 < Ar \leq 325$	$325 < Ar \leq 1.07 \times 10^4$	$1.07 \times 10^4 < Ar \leq 3 \times 10^5$	$3 \times 10^5 < Ar \leq 3 \times 10^9$
Lj	$Lj \leq 0.014$	$0.014 < Lj \leq 3.18$	$3.18 < Lj \leq 172$	$172 < Lj \leq 3300$	$3300 < Lj \leq 3.3 \times 10^5$
A	1	0.8	0.6	0.4	0
B	24	27	17	6.5	0.44

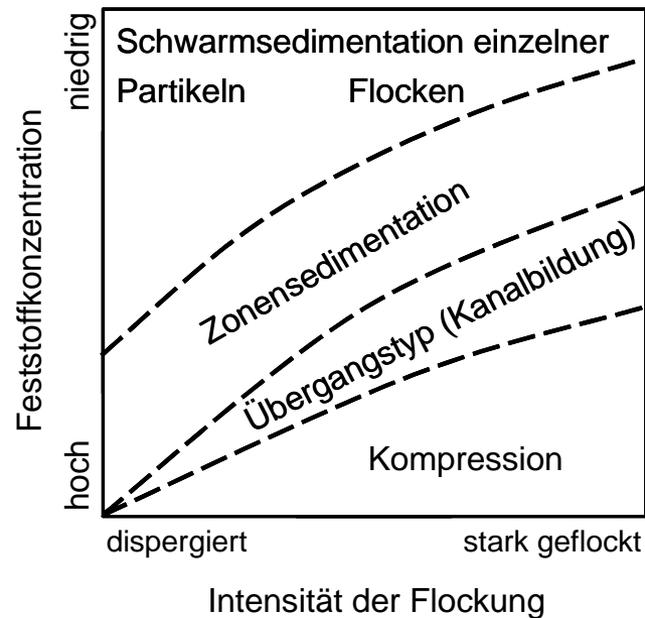
H. Schubert (u.a.), *Mechanische Verfahrenstechnik*, 3. Auflage.  
Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, **1990**.

# Schwarm- und Zonensedimentation

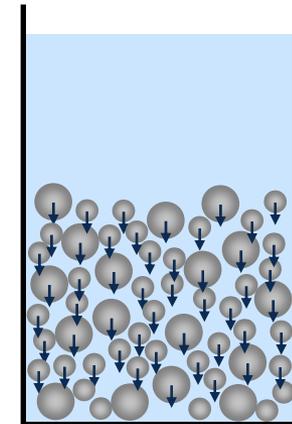
## Schwarm- sedimentation



individuelles Sinken, abh. von Dichte und Partikelgröße, beeinflusst von Konz.



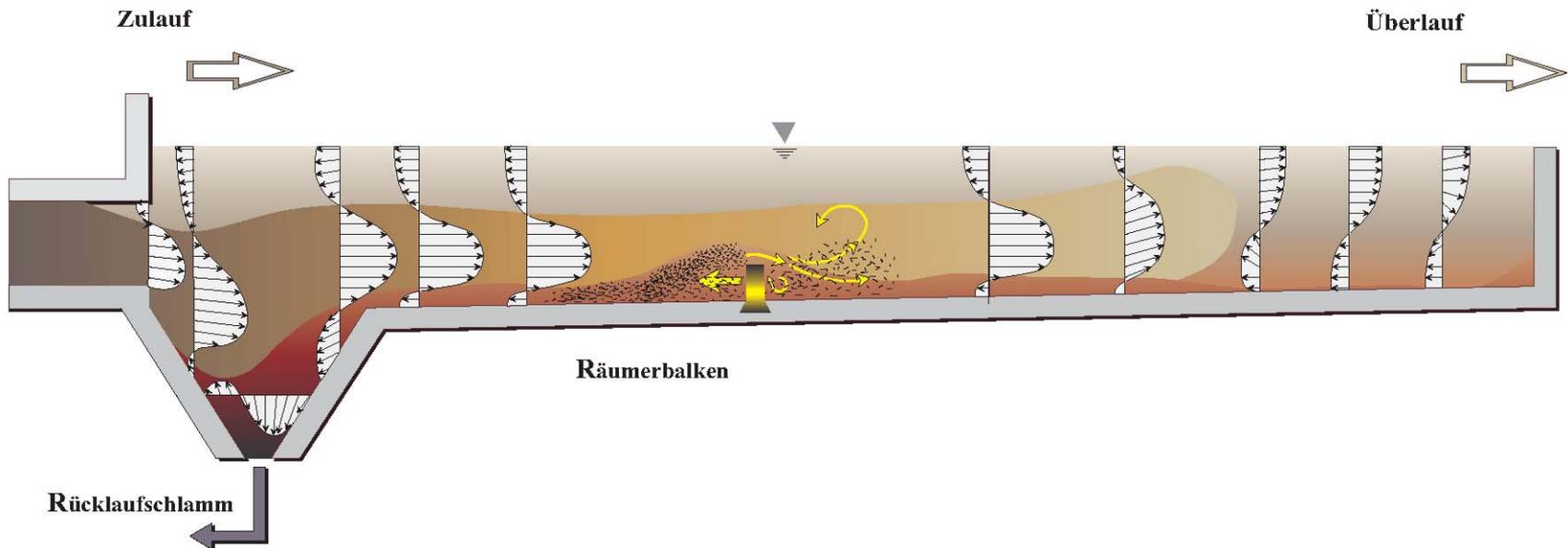
## Zonen- sedimentation



kollektives Sinken (enge Zwischenräume → kein Überholen möglich), abh. von Dichte und Konz.

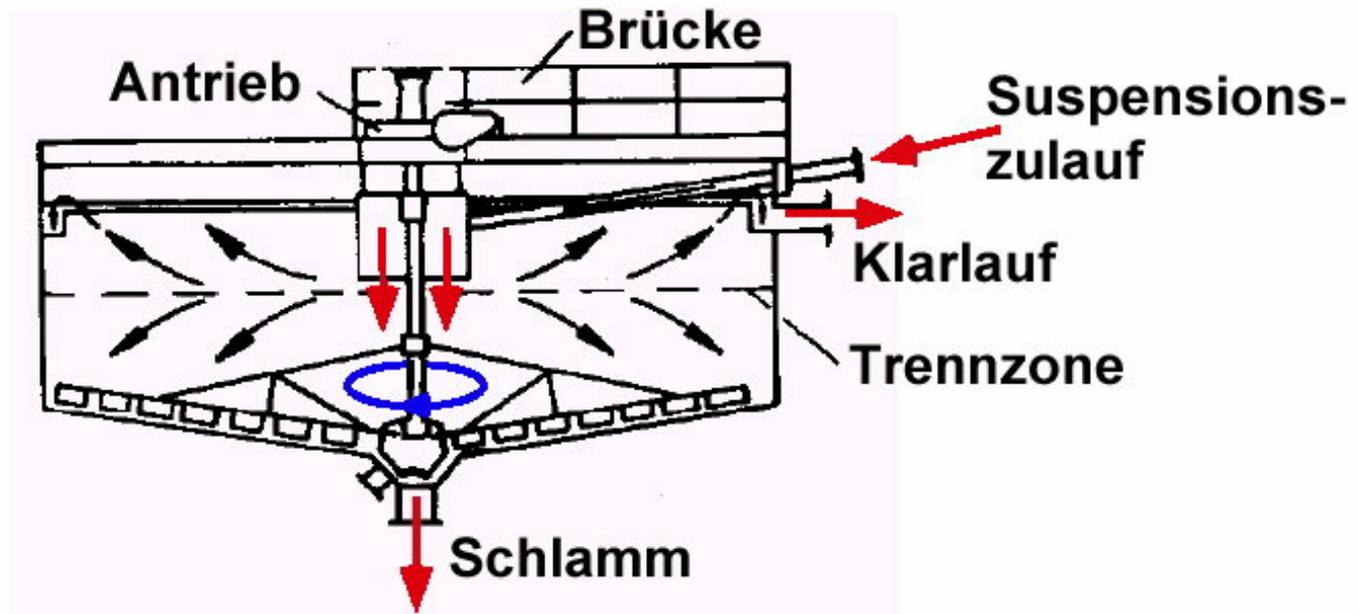
- Schema nach Fitch und Schubert

# Längsbecken

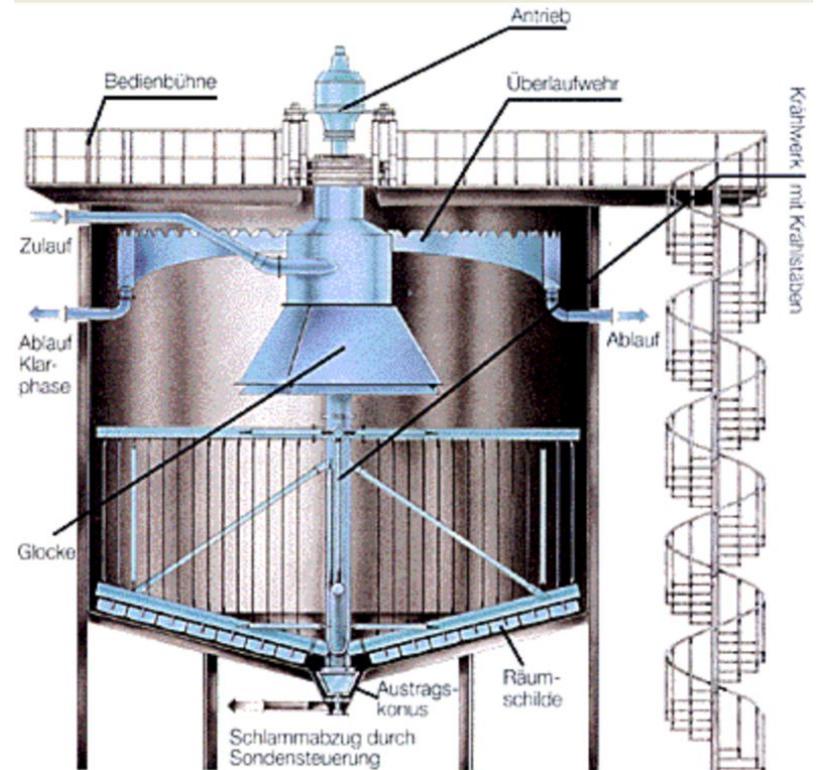


K. Winkler. *Räumung in Nachklärbecken von Abwasserreinigungsanlagen*. Dissertation, ETH Zürich, Versuchsanstalt Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, **2001**.

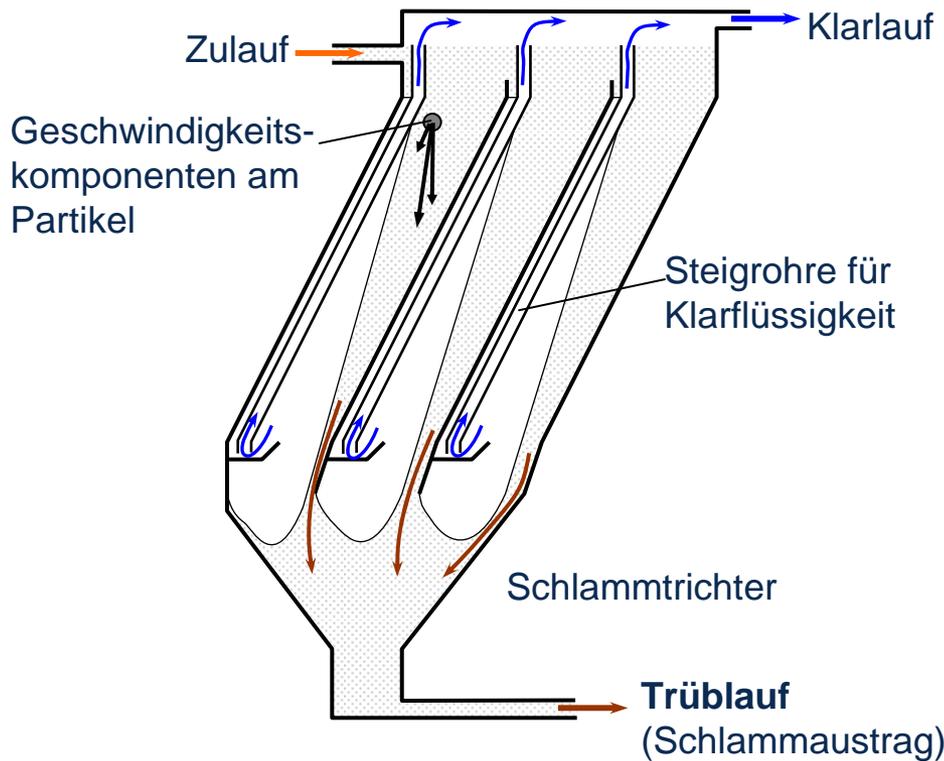
# Rundbecken



# Rundbecken – hohe Bauform

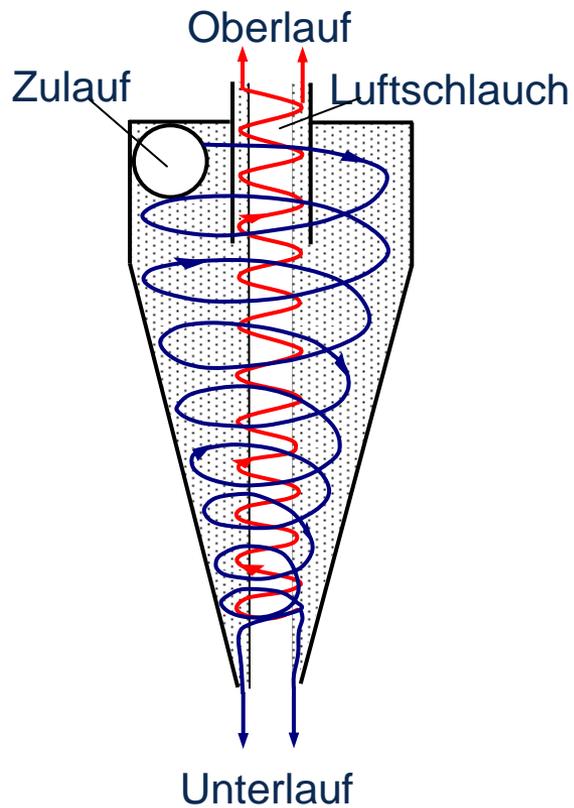


# Schrägklärer



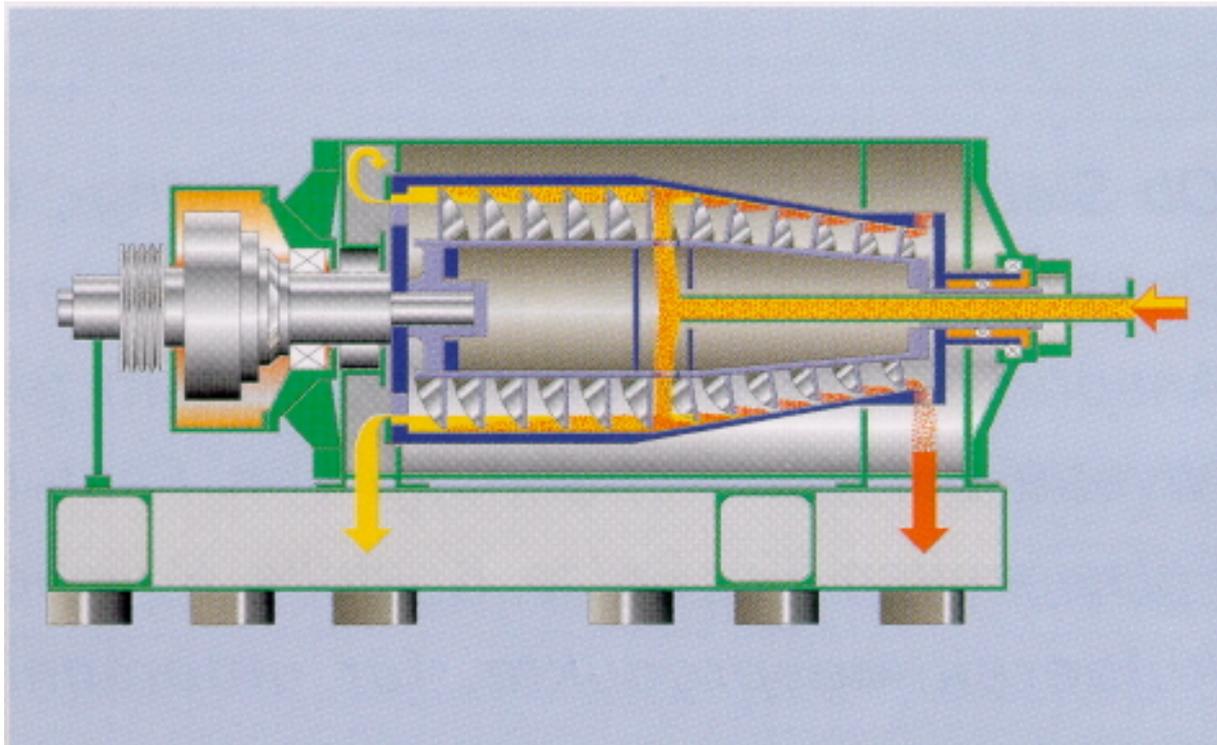
Gleichstromführung: Schema & Bauform (Fabricius Pro Terra GmbH)

# Hydrozyklon



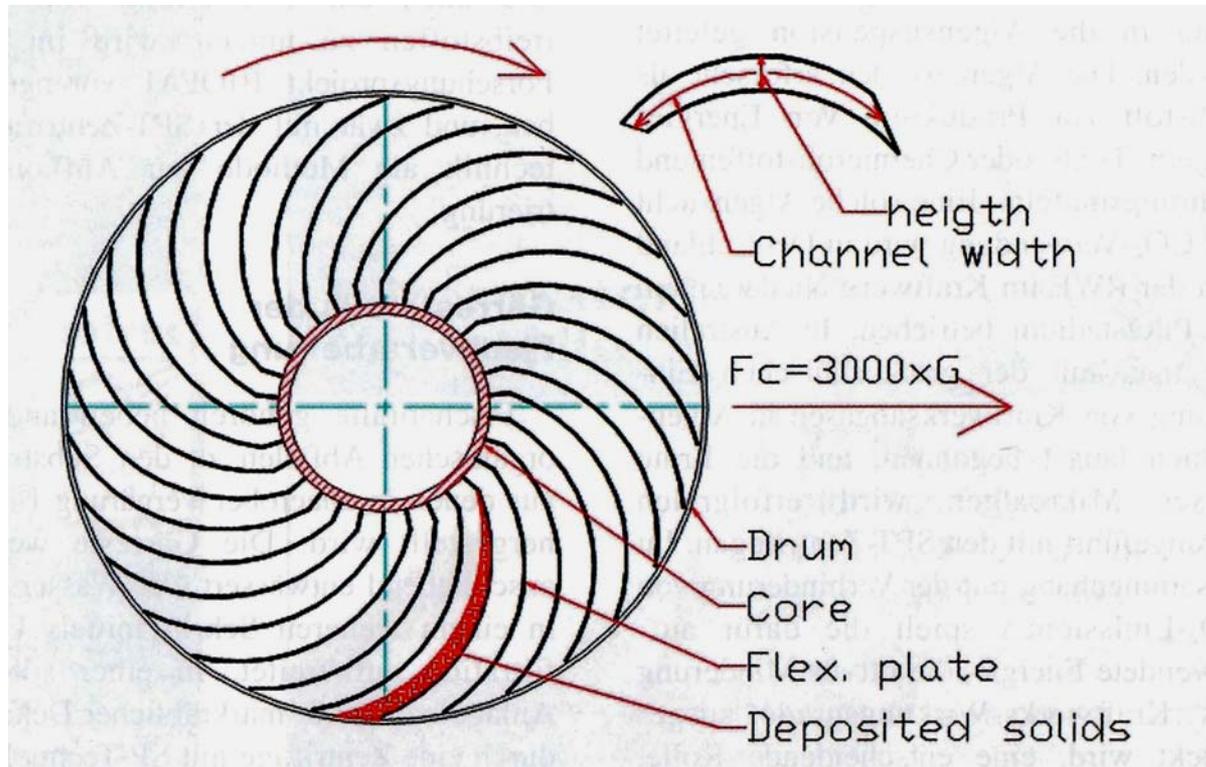
<http://www.zyklomat.de/images/zen-trifugalabscheider.jpg>

# Dekanterzentrifuge



SIEBTECHNIK GmbH, Mülheim a.d. Ruhr, WB253.4/01.2001RE

# Spiralplattenzentrifuge



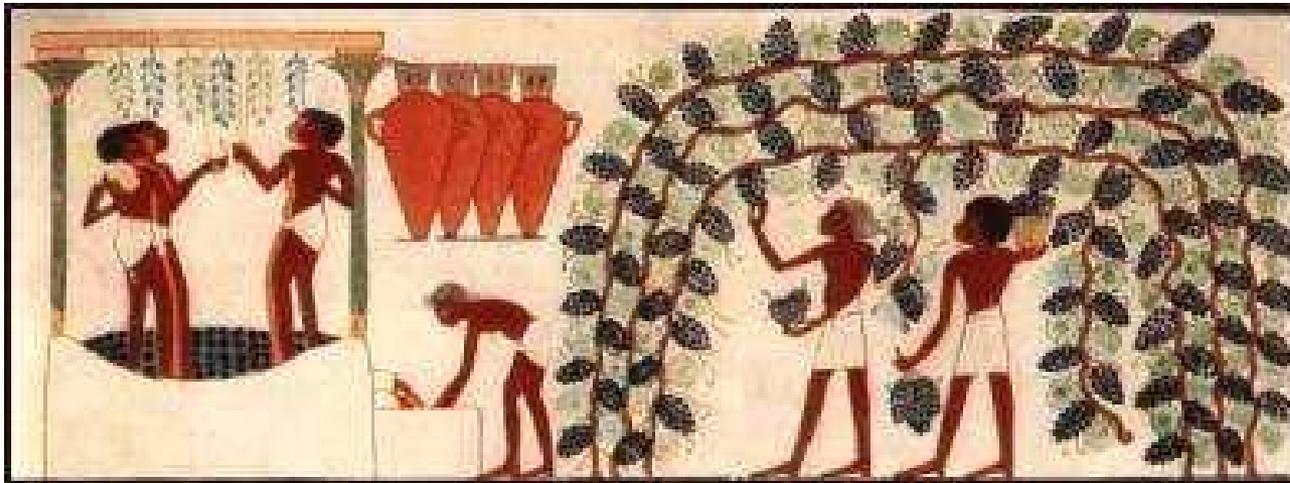
Filtrieren & Separieren, Jg. 25, Heft 5, 2011, S. 285

# Filtration

## Lernziele zu Kapitel 5

- Wissen:
  - Welche Filtrationsprinzipien werden unterschieden?
  - Für welche Trennaufgaben werden sie in der Praxis genutzt?
  - Nennen Sie 3 typische Filtrationsapparate!
- Fähigkeiten:
  - Berechnung des Druckverlustes für eine durchströmte Schüttung
  - Ermittlung der Filtrationsparameter aus dem Handfilterversuch
  - Berechnung des mittleren Filtratdurchsatzes bei der Kuchenfiltration

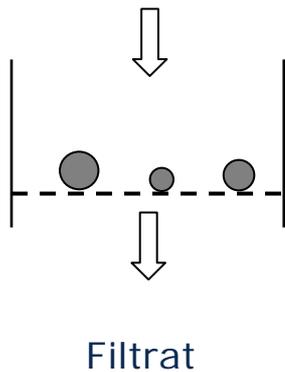
# Relevanz der Filtration



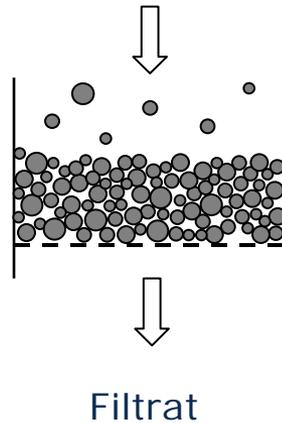
# Filtrationsprinzipien

## *Oberflächenfiltration*

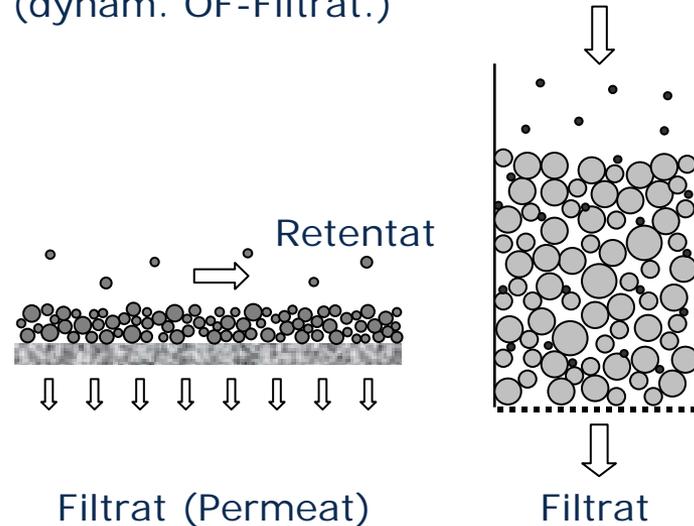
### Siebfiltration



### Kuchenfiltrat. (stat. OF-Filtrat.)



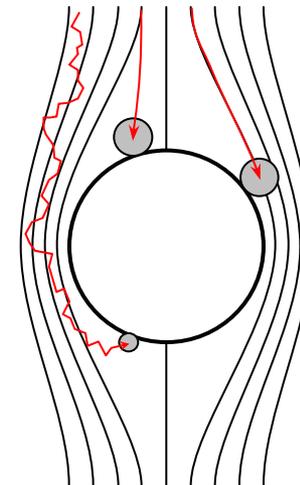
### Querstromfiltrat. Tiefenfiltration (dynam. OF-Filtrat.)



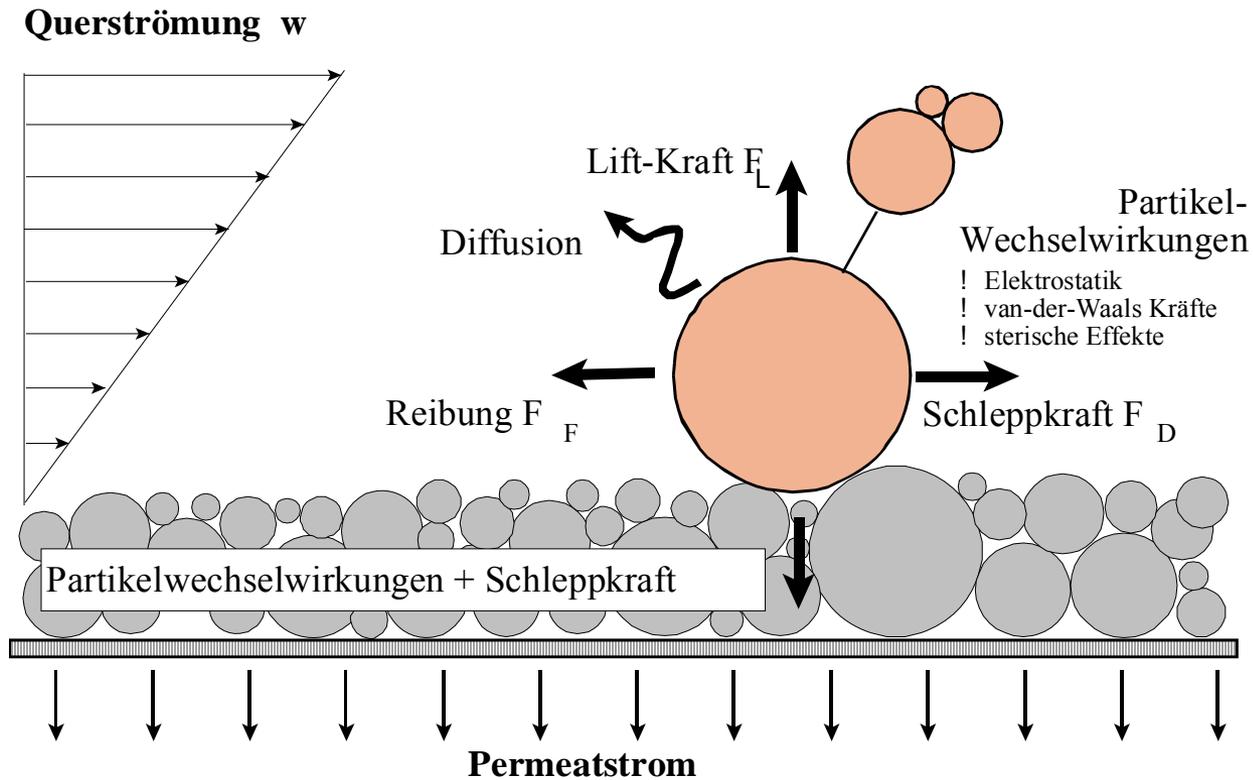
# Tiefenfiltration

## Abscheidemechanismen:

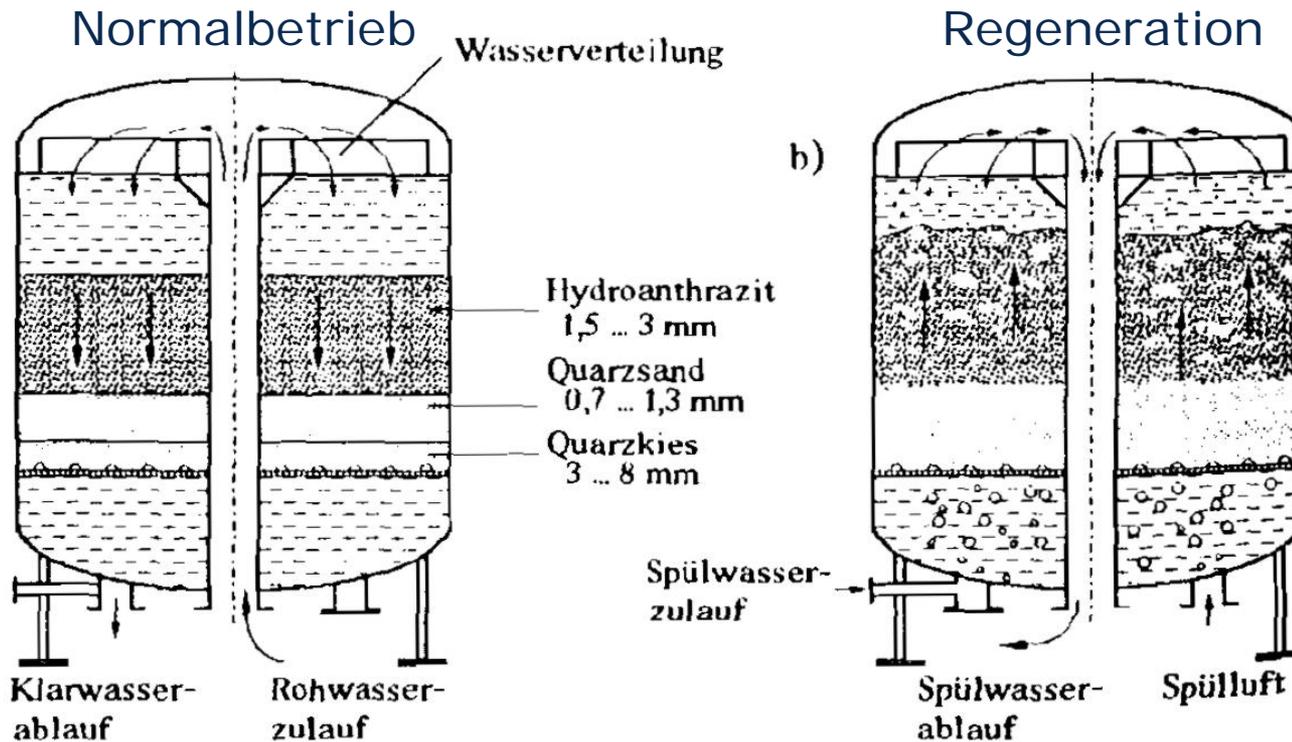
- Impaktion (Trägheitsabscheidung)
- Interzeption (Sperrereffekt)
- Diffusion
- außerdem:
  - Sedimentation
  - Siebwirkung
  - Elektrische Anziehung



# Querstromfiltration

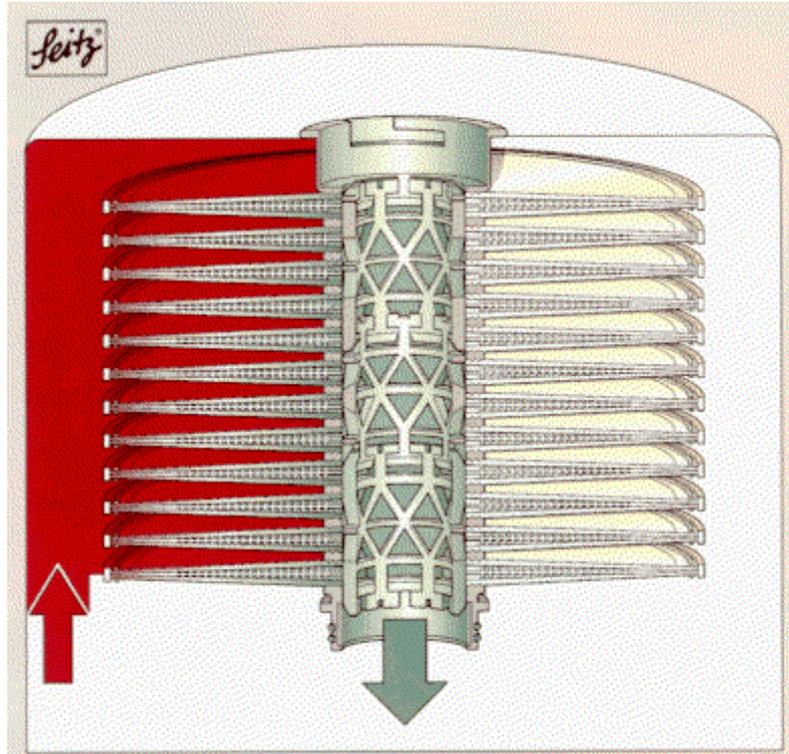


# Schüttschichtfilter



Stieß: Mechanische Verfahrenstechnik 1, Springer 1992

# Schichtenfilter



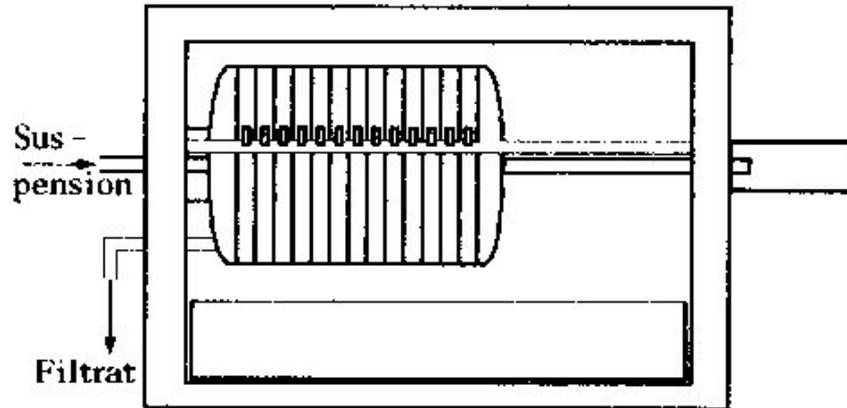
Seitz, Firmenbrochüren

## Ablagerungen auf den Fasern eines Tiefenfilters

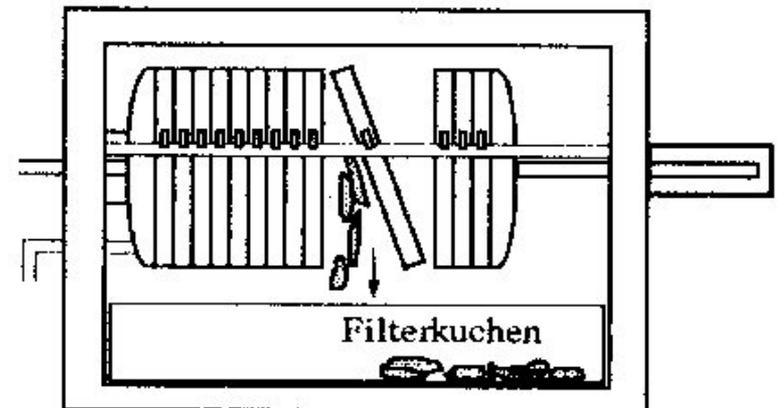


# Kammerfilterpresse

Betrieb

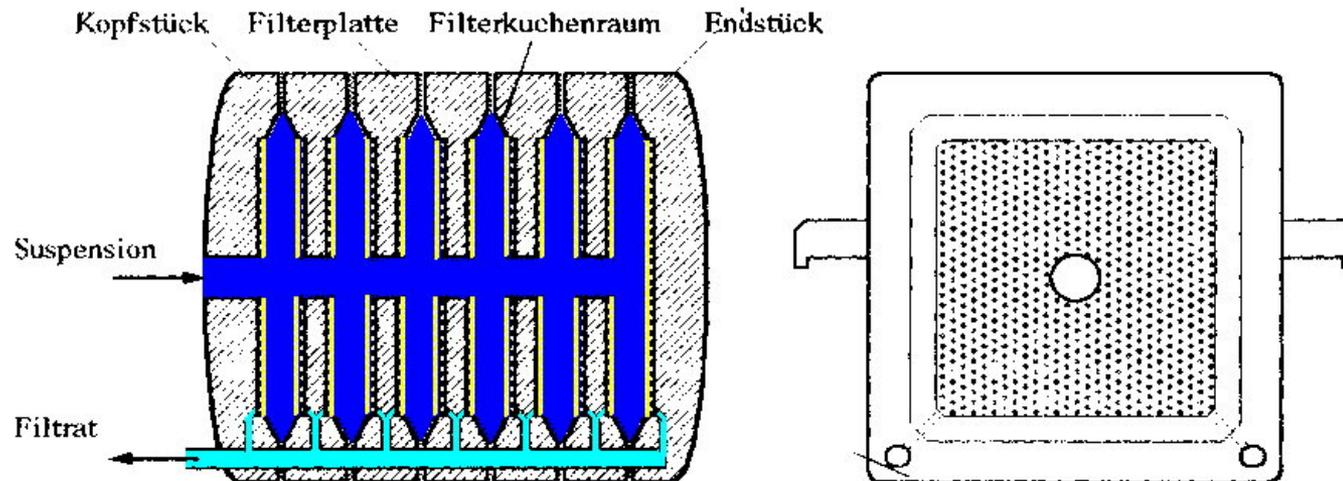


Entleeren



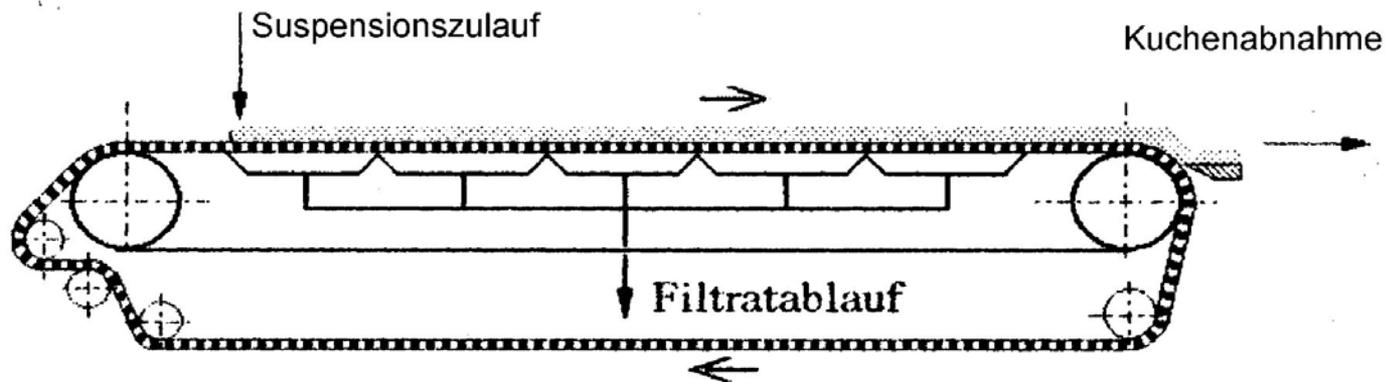
Stieß: Mechanische Verfahrenstechnik 1, Springer 1992

# Kammerfilterpresse



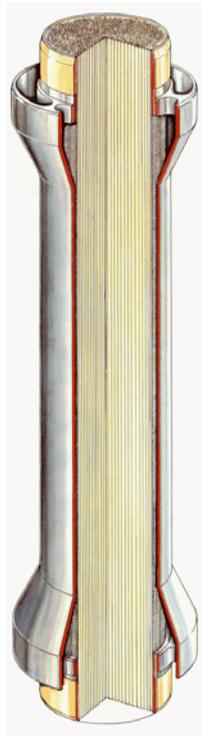
Stieß: Mechanische Verfahrenstechnik 1, Springer 1992

# Bandfilter



Stieß: Mechanische Verfahrenstechnik 1, Springer 1992

# Querstromfiltration



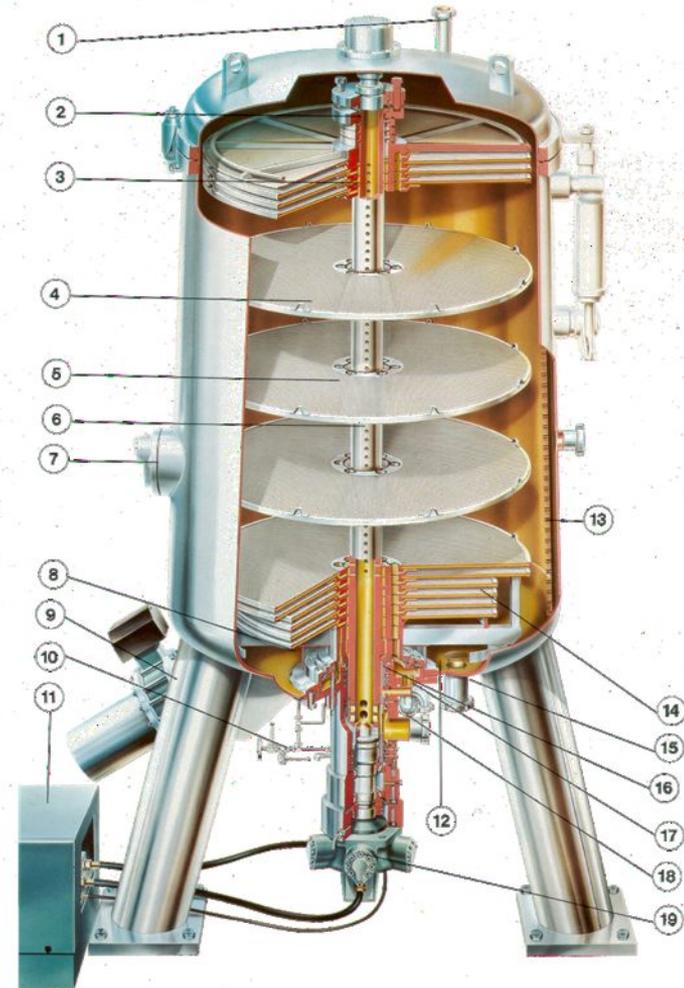
Modul aus Hohlfasermembranen



Querstromfiltrationsanlage

# Anschwemmfiltration

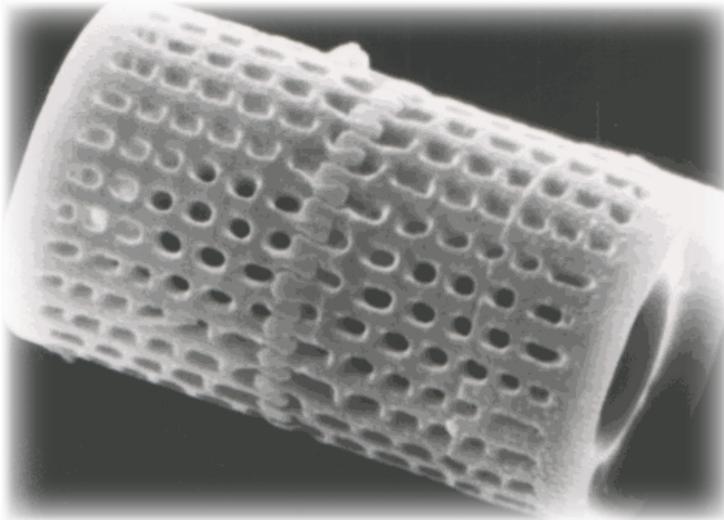
1. Entlüftung
2. Anpressvorrichtung für Filterpaket
3. Einzeleinlaufverteiler und Distanzrohr
4. Abstützfüßchen
5. Filterelement
6. Filtratablaufwelle
7. Filterkessel mit Schauluke
8. Kieselguraustragevorrichtung
9. Kieselguraustragegestutzen
10. Manschettenspülung/Leckage
11. Hydraulikaggregat
12. Zentraler Einlauf
13. Abdüsanlage
14. Restfiltrationselemente
15. Einlauf, Kessel füllen
16. Wellenabdichtung
17. Restfiltratenauslauf
18. Hauptfiltratenauslauf
19. Hydraulikmotor



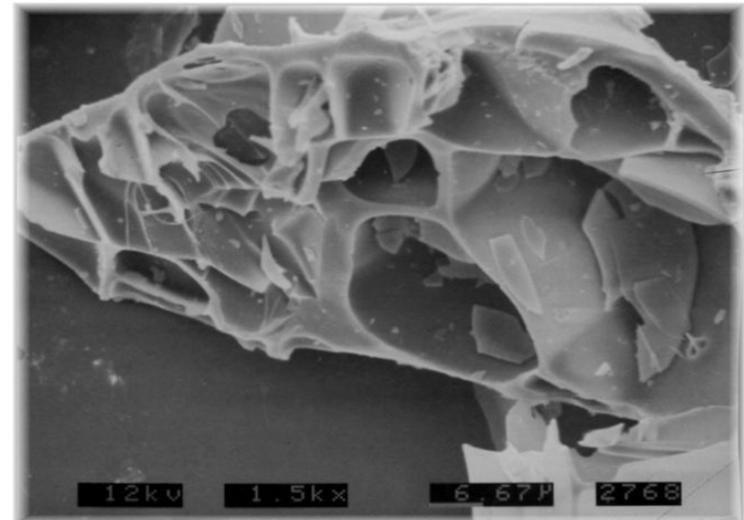
## PRIMUS Kieselgurfilter

# Filterhilfsmittel

Kieselgur



Perlite



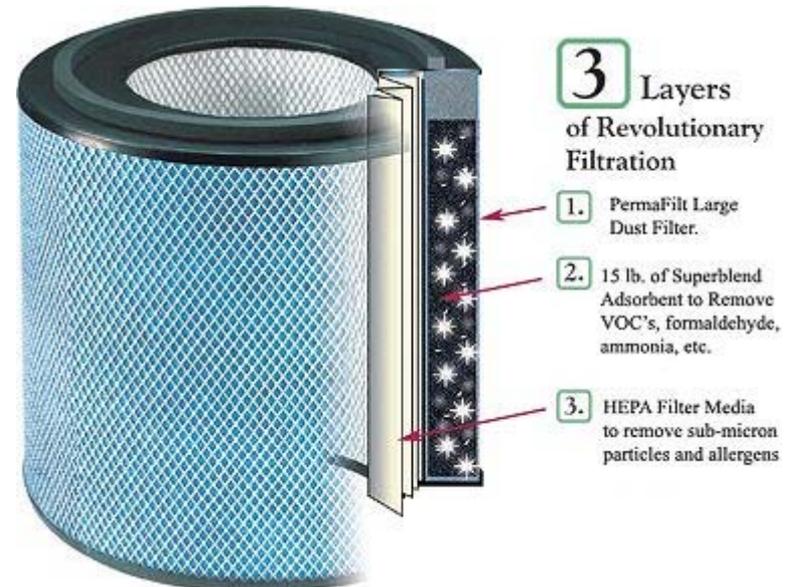
# Abluftfilter

## Beutelfilter



<http://filtrations-technik.de>

## Filterkartusche, mehrlagig



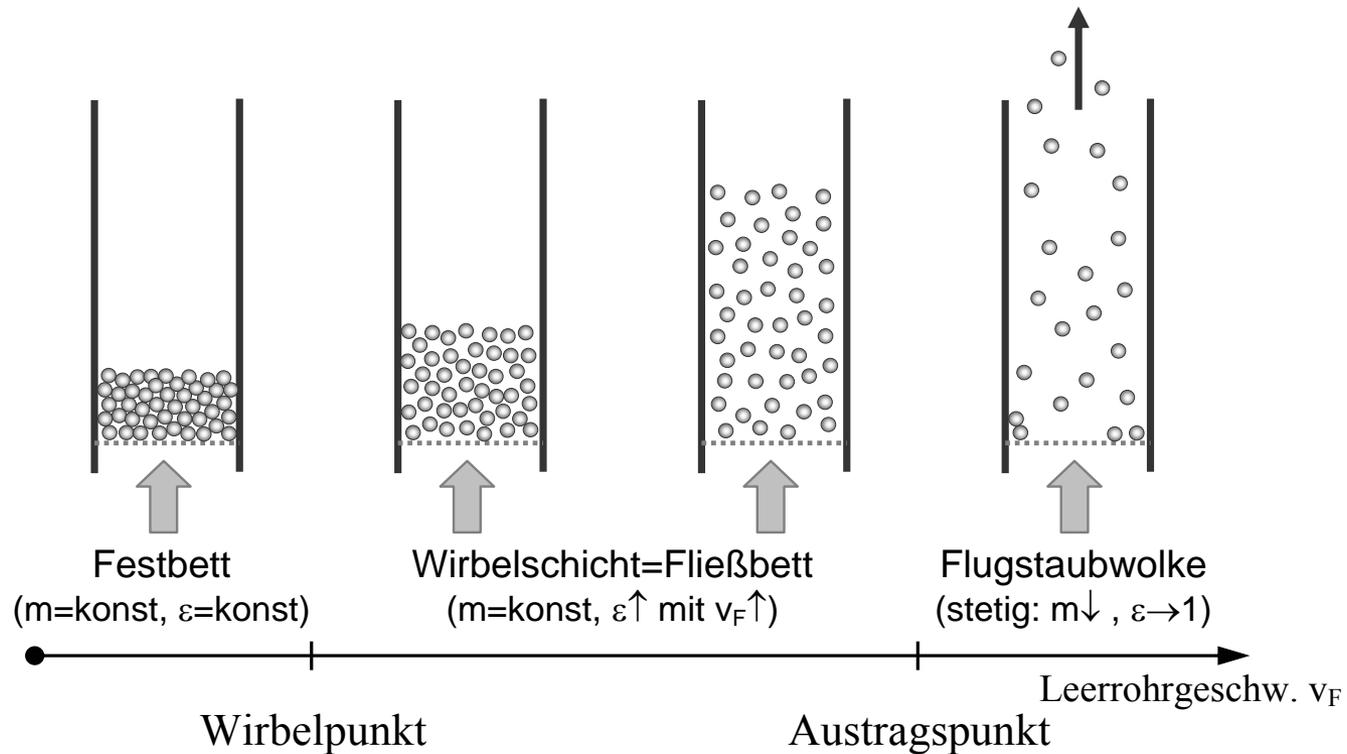
<http://www.allergytech.com/images/austinfiltersuper.jpg>

# Mehrphasenströmungen

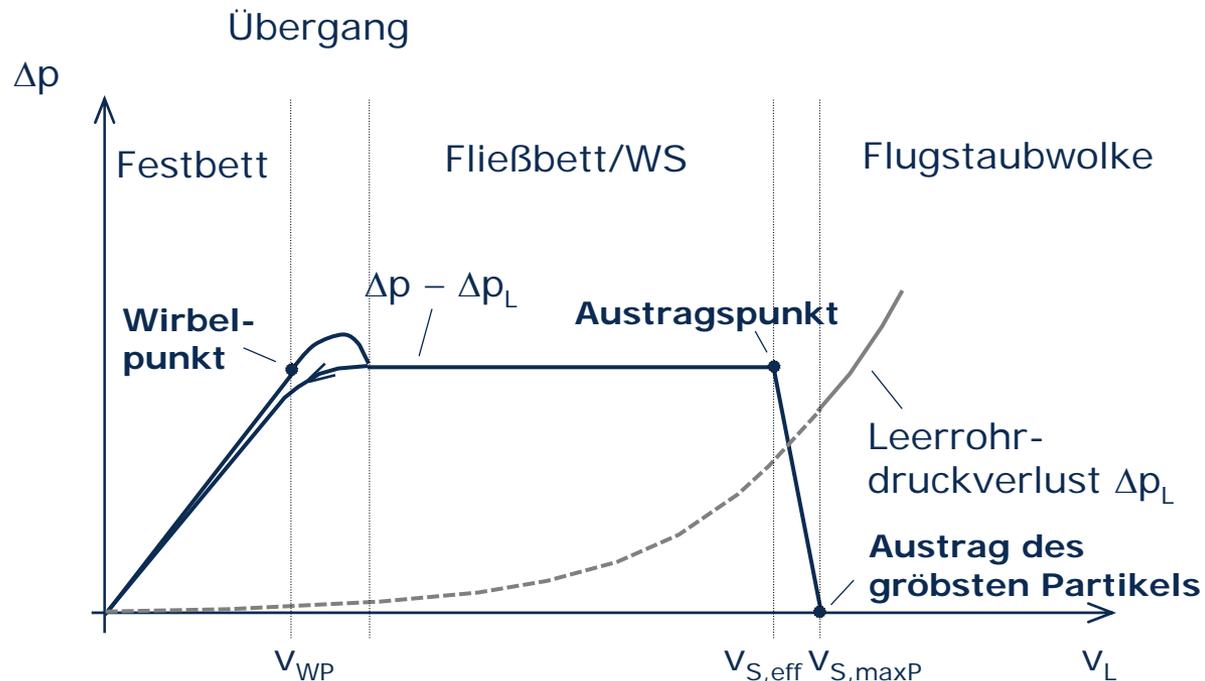
## Lernziele zum Kapitel

- Wissen:
  - Funktionsweise der Wirbelschicht
  - Unterschied homogene und inhomogene WS
  - Förderzustände beim pneumatischen Transport
  - Unterschied zwischen Flug- und Propfenförderung
- Fähigkeiten:
  - Berechnung von Austragspunkt und Druckverlust der Wirbelschicht

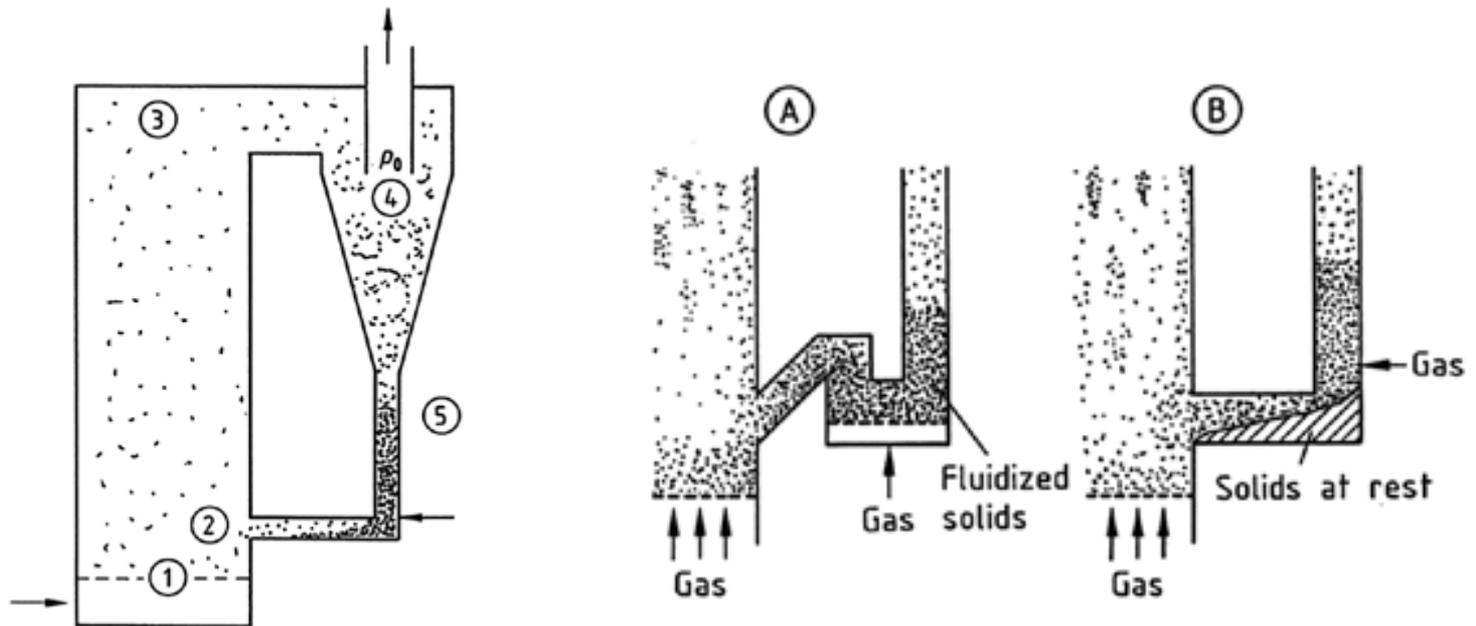
# Durchströmte Schüttungen



# Wirbelschicht – Druckverlustdiagramm



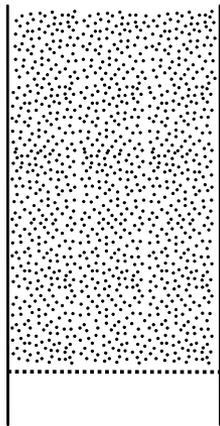
# Zirkulierende Wirbelschicht



*Ullmann's Encyclopaedia of Industrial Chemistry, 7<sup>th</sup> ed. Wiley-VCH, 2004*

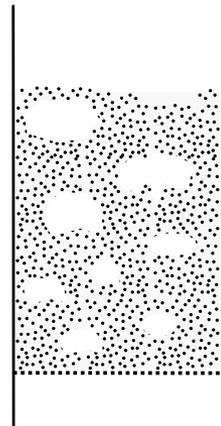
# Homogene und inhomogene Wirbelschichten

homogene WS

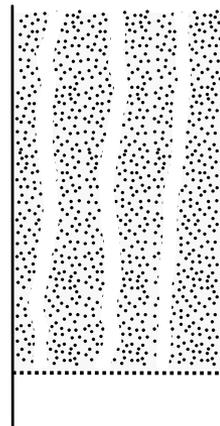


Erscheinungsformen inhomogener Wirbelschichten

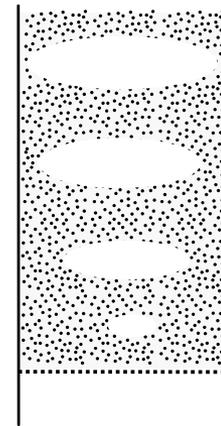
Blasen bildend



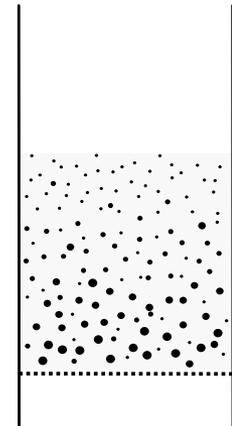
Kanal bildend



stoßend

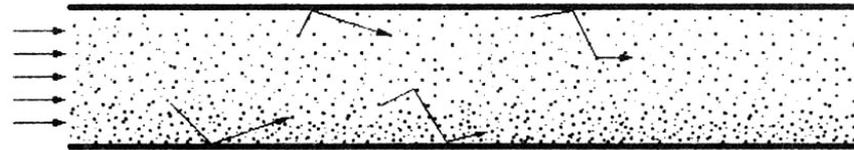


Entmischung

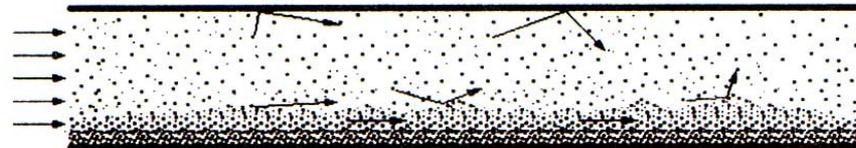


# Pneumatischer Transport - Horizontalförderung

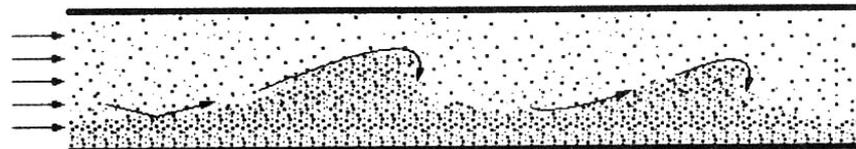
Flugförderung



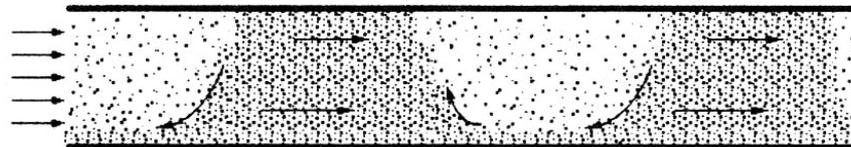
Strähnenförderung



Dünenförderung

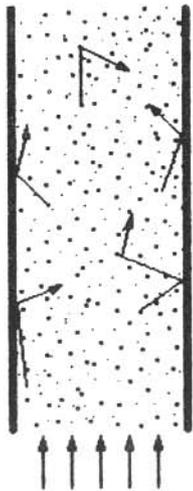


Pfropfenförderung

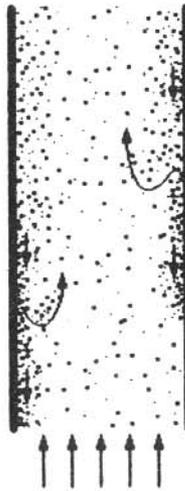


Stieß: Mechanische Verfahrenstechnik 2, Springer 1994, S. 364

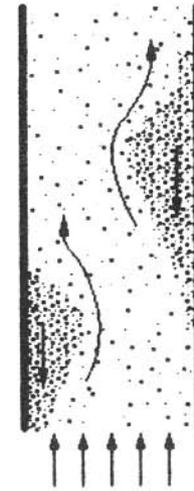
# Pneumatischer Transport - Vertikalförderung



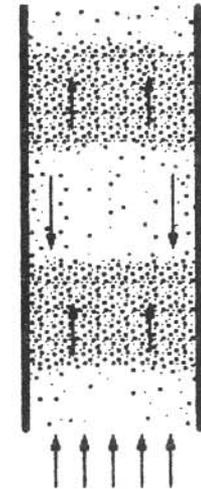
Flugförderung



Strähnenförderung



Dünenförderung



Pfropfenförderung

Stieß: Mechanische Verfahrenstechnik 2, Springer 1994, S. 364

# Auch das ist Mechanische Verfahrenstechnik:

