

# Einführung in die Verfahrenstechnik und Naturstofftechnik 1-1

## Mechanische Verfahrenstechnik

### *Folien zur Vorlesung*

NUR ZUM PERSÖNLICHEN GEBRAUCH!

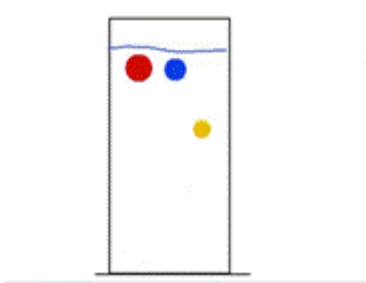
PD Dr.-Ing. habil. Frank Babick, 1. Oktober 2020

# 4. Sedimentation

*– Sedimentation in konzentrierten Partikelsystemen –*

# Klassifizierung der Sedimentationstypen

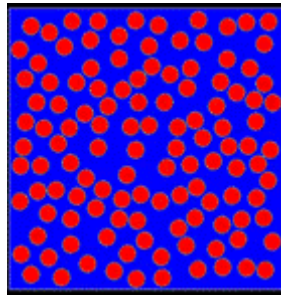
## Einzelteilchensed.



- individuelles Sinken
- Partikelbewegung ist unbeeinflusst von Nachbarpartikeln
- sehr niedrige  $\varphi_V$
- z.B. Partikelgrößenanalyse

R. Holdich, Loughborough University (2020)

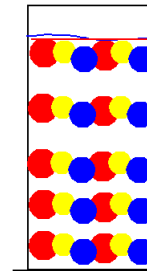
## Schwarmsed.



- individuelles Sinken
- Partikel nehmen gegenseitigen Einfluss auf Sedimentation
- niedrige bis hohe  $\varphi_V$
- Fest-Flüssig-Trennung ohne Einsatz von Flockungsmitteln

<https://gfycat.com/thunderousfeinegrub> (2020)

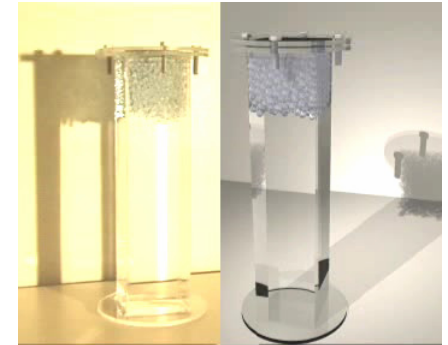
## Zonensed.



- kollektives Sinken
- gegenseitige Sedimentationsbehinderung
- Zonenbildung
- mittlere bis hohe  $\varphi_V$
- z.B. Fest-Flüssig-Trennung mit Einsatz von Flockungsmitteln

R. Holdich, Loughborough University (2020)

## Strähensed.

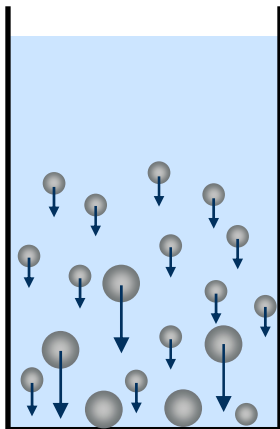


- kollektives Sinken
- Strahlenbildung bei Zugabe auf ein partikelfreies Fluid
- Dichteunterschiede und „Windschatteneffekt“
- z.B. im Zulauf von Klärbecken

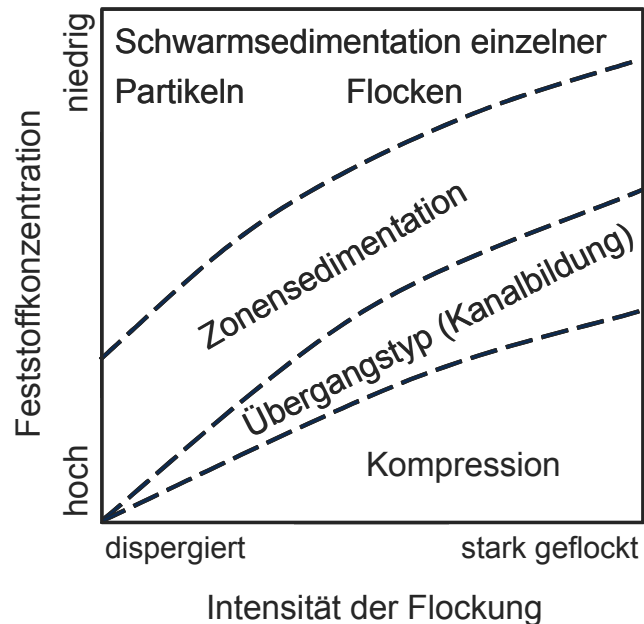
K. Höfler et al. (1998):  
[http://www.comphys.ethz.ch/hans/suspension\\_teil.mpa](http://www.comphys.ethz.ch/hans/suspension_teil.mpa)

# Schwarm- und Zonensedimentation

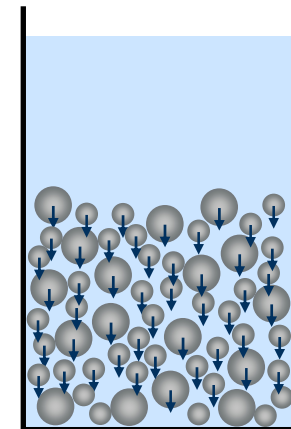
## Schwarm-sedimentation



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

# Schwarm- und Zonensedimentation

<b>Schwarmsedimentation</b>	<b>Zonensedimentation</b>
eingeeengte, aber freie Sedimentationspfade	blockierte Sedimentationspfade
individuelle Sinkgeschwindigkeit (abh. von Größe & Dichte der jeweiligen Teilchen; beeinflusst von Konzentration)	kollektive Sinkgeschwindigkeit (abh. Dichte & Konzentration der dispersen Phase)
vorhersagbar	nur experimentell bestimmbar
unscharfer Übergang zwischen Überstand und Trübe	scharfe Grenze zwischen Überstand und Trübe
niedriger Dispersphasenanteil $\varphi_{V,S}$ stabile Suspensionen	hoher Dispersphasenanteil $\varphi_{V,S}$ geflockte Suspensionen
für Analysen erwünscht	für Trennaufgaben i.d.R. erwünscht

# Schwarmsedimentation grobdispenser Systeme

Richardson & Zaki

(*Trans. Inst. Chem. Eng.*, 32:35-53, 1954)

$$\frac{u_{Sed}}{u_{Stokes}} = (1 - \phi)^n = \varepsilon^n$$

mit

$n = \text{funct.}(\text{Re}, x/D)$

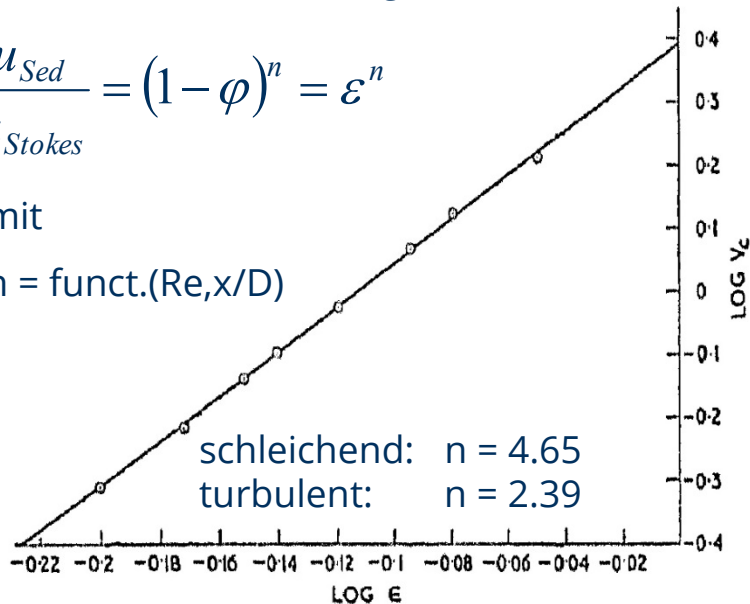
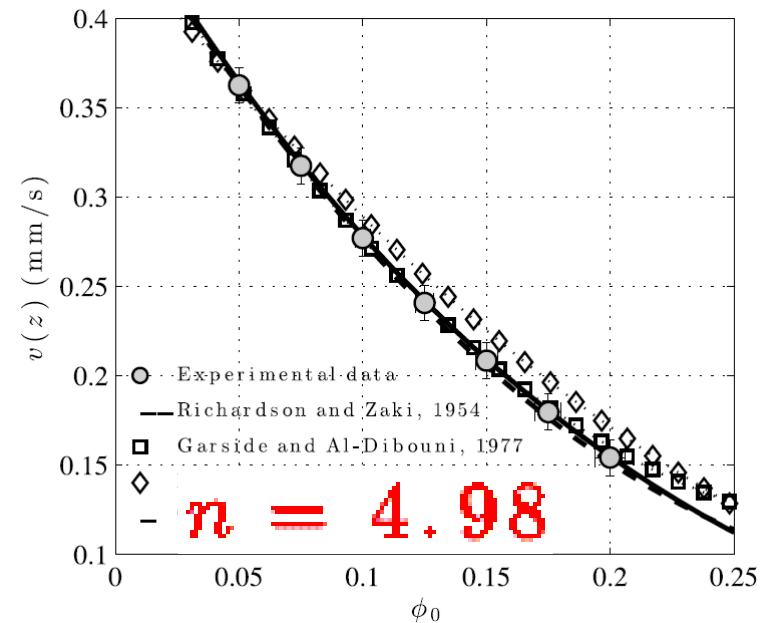


Fig. 5—Sedimentation of glass ballotini (1 mm.) in bromoform

Palma et al.

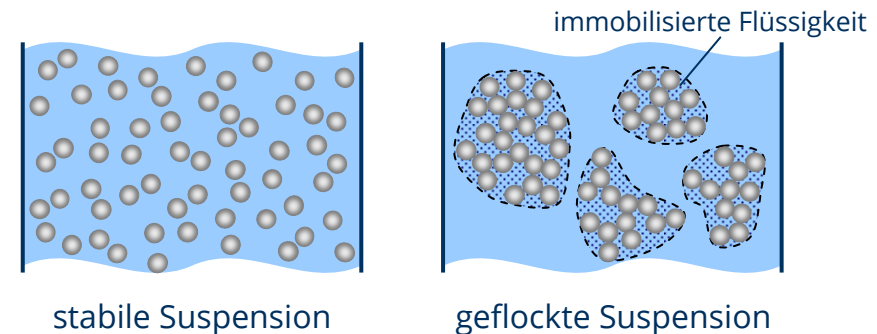
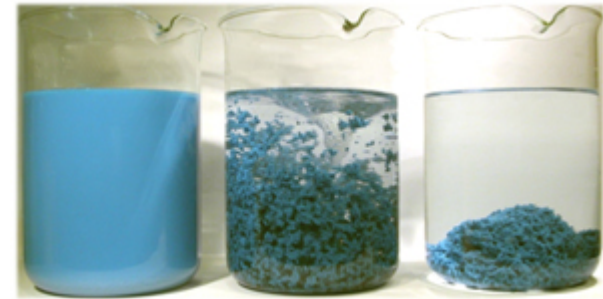
(*Phys. Fluids*, 28:073304, 2016)



Harzkugeln (125µm) in 50%iger Glycerinlösung

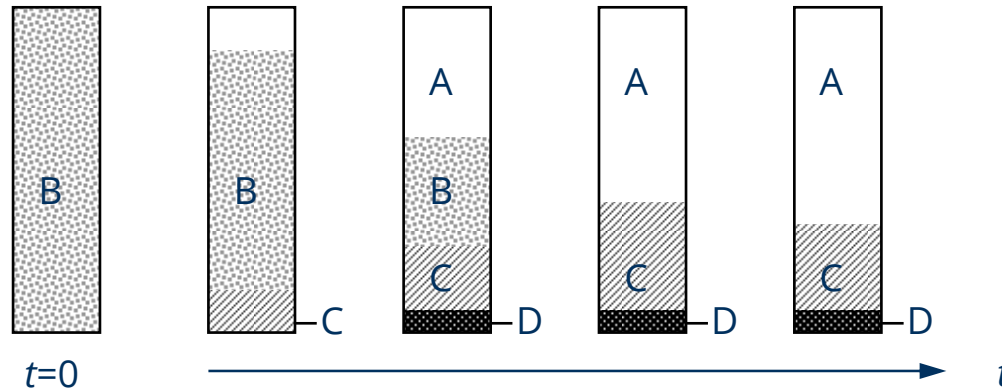
# Zonensedimentation durch Flockung

- Flockung
  - = Agglomeration suspendierter Partikel
  - erfolgt wenn elektrostatischer Abstoßung zwischen den Partikeln aufgehoben
  - z.B. durch Zugabe mehrwertiger Salze oder polymerer Flockungsmittel
- Sedimentation geflockter Suspensionen:
  - Flocken (Agglomerate) immobilisieren die Porenflüssigkeit → effektive Zunahme des Volumenanteils der dispersen Phase
  - Flocken bilden hochporöse und z.T. kompressible Sedimente



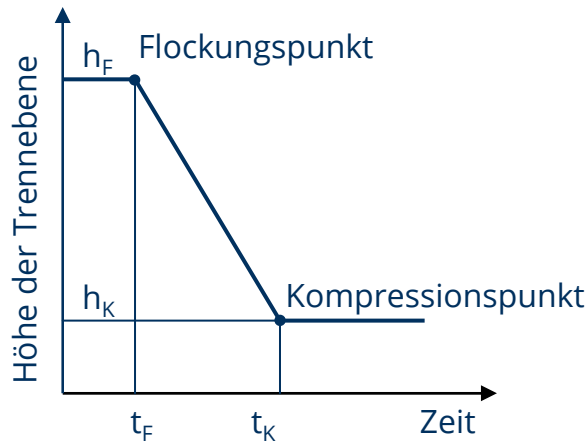
# Experimentelle Bewertung der Zonensedimentation

## Versuche im Standzylinder (Zugabe von Flockungsmittel)

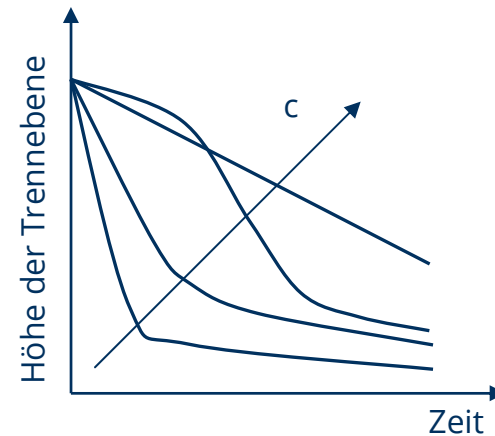


- A Klarflüssigkeit
- B Sedimentationszone
- C Kompressionszone
- D verdichtetes Sediment

## idealer Zeitverlauf der Entmischung



## reale Zeitverläufe



# 4. Sedimentation

– *Sedimentationsapparate und -maschinen* –

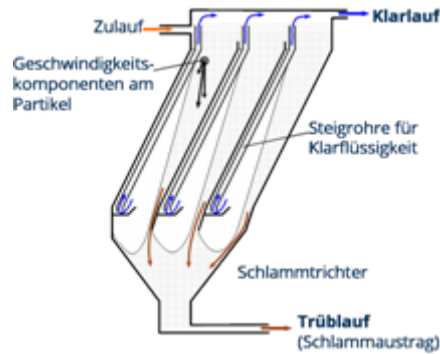
# Sedimentationsapparate und -maschinen

## Überblick

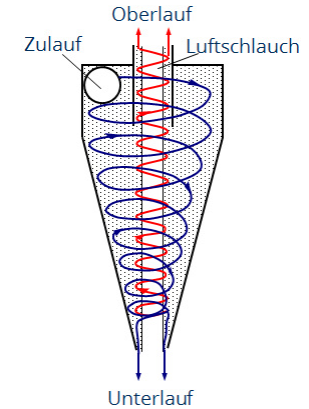
### Längsbecken



### Schräglärer



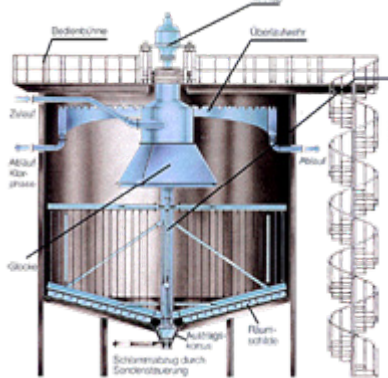
### Hydrozyklone



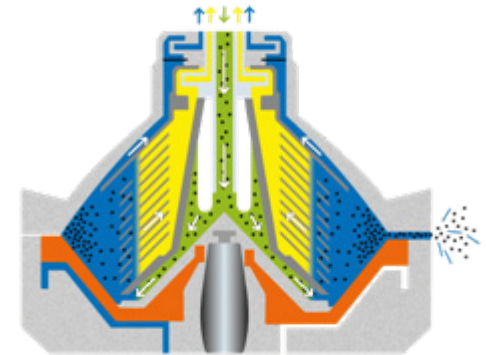
### Rundbecken, flach



### Rundbecken, hoch

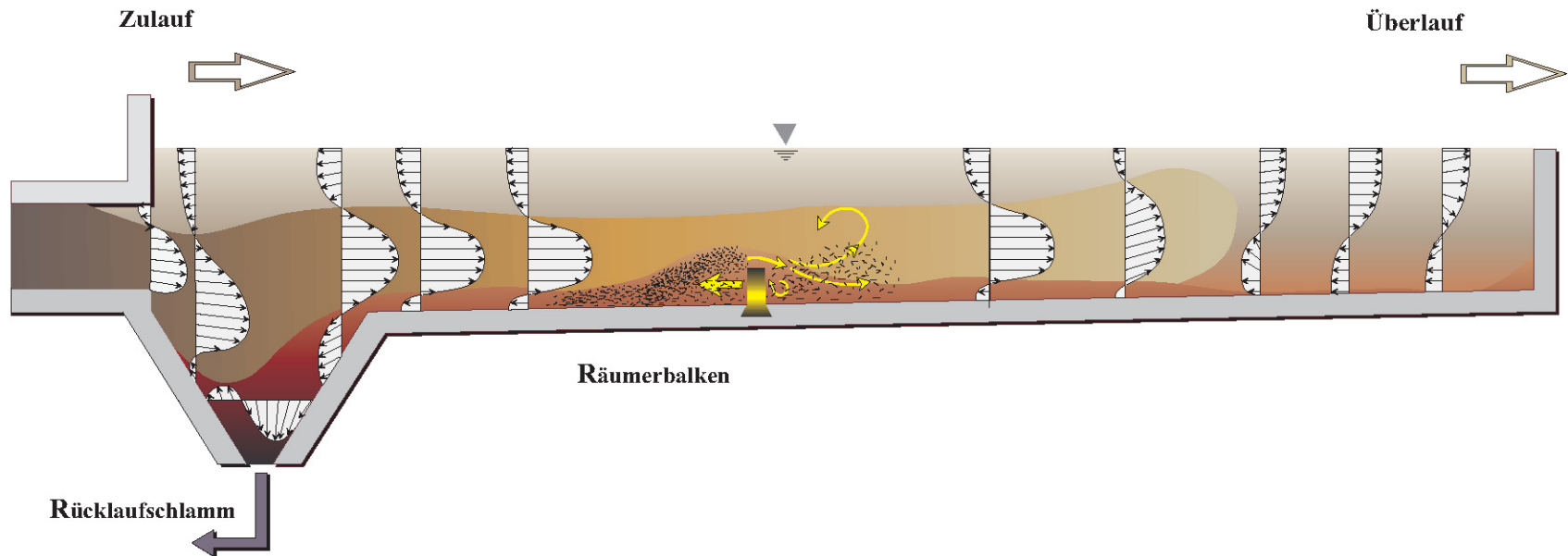


### Zentrifugen



# Längsbecken

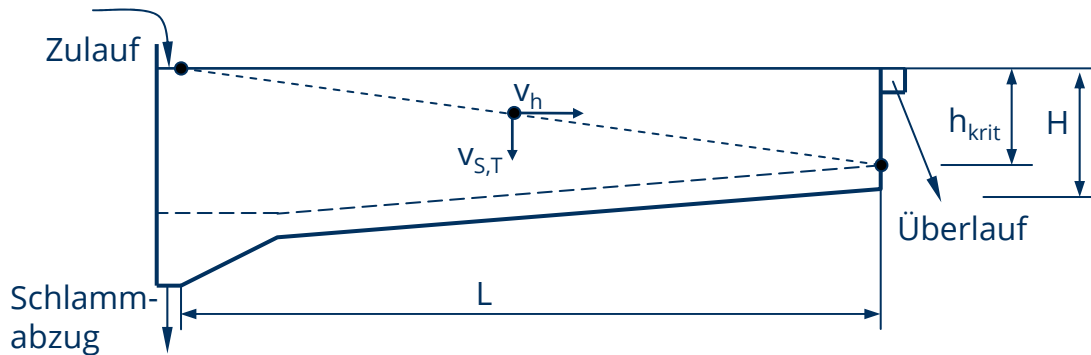
- Prinzip:
  - horizontale Durchströmung eines Kanals mit geringer Fließgeschwindigkeit
  - Absetzen oder Aufrahmen der Partikel zeitgleich zu horizontalem Transport
- Bauform: längliche Rechteckfläche (wenige Meter bis weit über 100 m)



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

# Auslegung von Klärbecken als Querstromklassierer

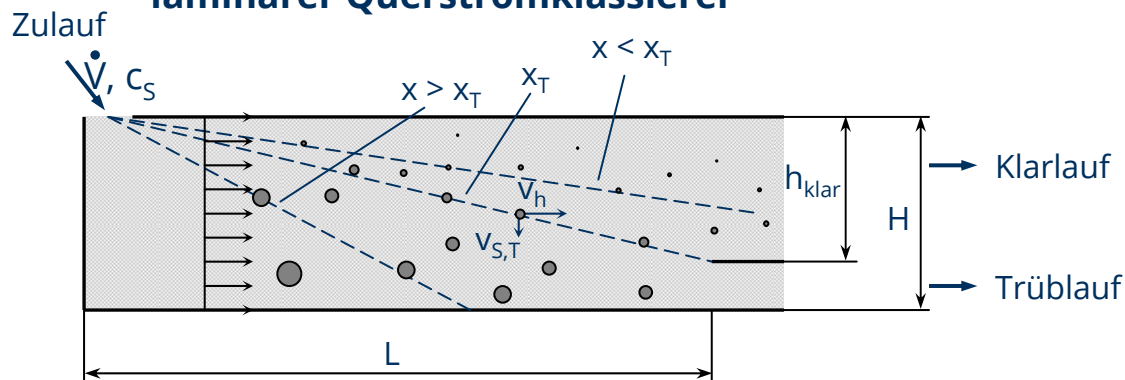
## Konzept der Trennteilchengröße $x_T$



$$\frac{h_{\text{krit}}}{v_{S,T}} = \frac{L}{v_h}$$

$$v_{S,T} = v_S(x_T)$$

## laminarer Querstromklassierer



$$v_h = \frac{\dot{V}}{H \cdot B} \quad h_{\text{krit}} = h_{\text{klar}}$$

$$\frac{h_{\text{klar}}}{v_{S,T}} = \frac{L \cdot H \cdot B}{\dot{V}}$$

$$v_{S,T} = \frac{\dot{V}}{L \cdot B} \cdot \frac{h_{\text{klar}}}{H} = \frac{\dot{V}}{A_{\text{Klar}}} \cdot \frac{h_{\text{klar}}}{H}$$

# Gesamtabscheidegrad eines Sedimentationsbeckens

- Abscheideverhalten eines Sedimentationsbeckens
  - Apparatparameter: Klärfläche  $A_{\text{klär}}$  und relative krit. Höhe  $h_{\text{klär}}/H$
  - Prozessparameter: Volumenstrom  $\dot{V}$
  - Sinkgeschw. der Trennteilchen:  $v_{S,T}$   
und Trennteilchengröße:  $x_T$

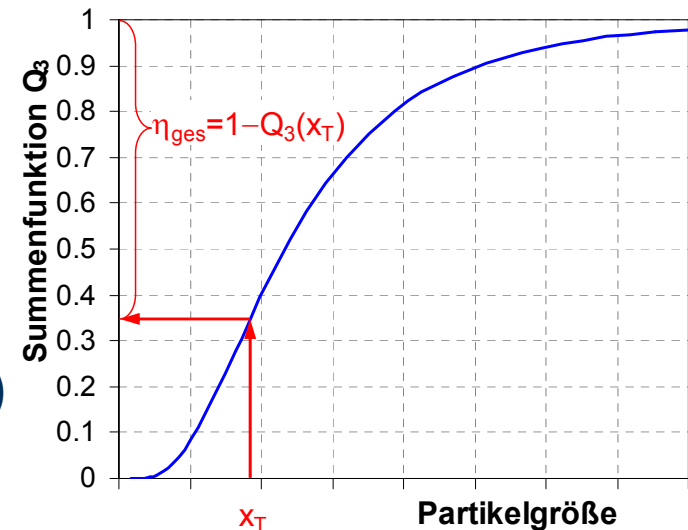
- Gesamtabscheidegrad

$$\eta_{\text{ges}} = \frac{\text{abgeschiedene Partikel}}{\text{aufgegebene Partikel}} = \frac{c_{S,\text{trüb}} \cdot \dot{V}_{\text{trüb}}}{c_{S,\text{zu}} \cdot \dot{V}_{\text{zu}}}$$

- laminare QS-Klassierung

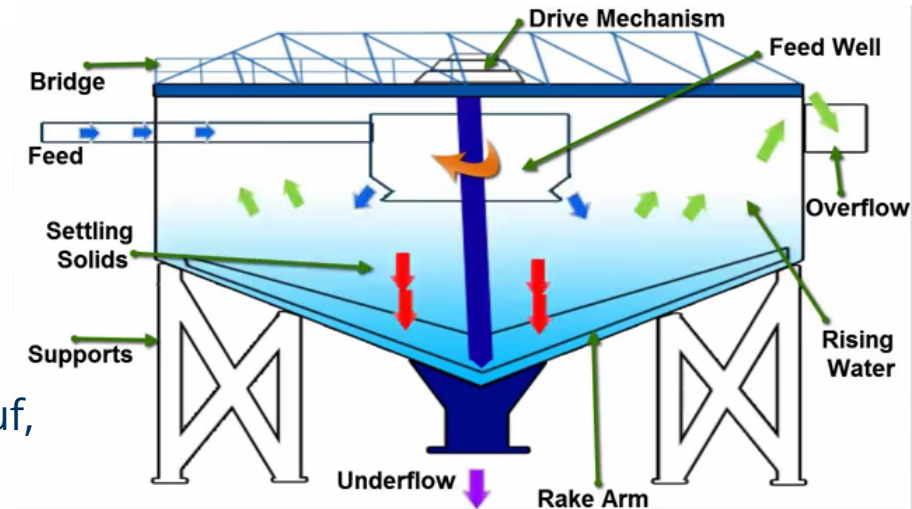
$$\eta_{\text{ges}} = \frac{m_S(x > x_T)}{m_{S,\text{ges}}} = \frac{m_{S,\text{ges}} - m_S(x \leq x_T)}{m_{S,\text{ges}}} = 1 - Q_3(x_T)$$

- einfache grafische Ermittlung



# Rundbecken - Prinzip

- Prinzip:
  - zentrale Aufnahme des Abwassers
  - Verteilung des Volumenstroms auf großen Querschnitt
    - langsame Fließgeschwindigkeiten
  - Entmischung
    - partikelfreier Überstand in Überlauf,
    - Partikel ins Sediment

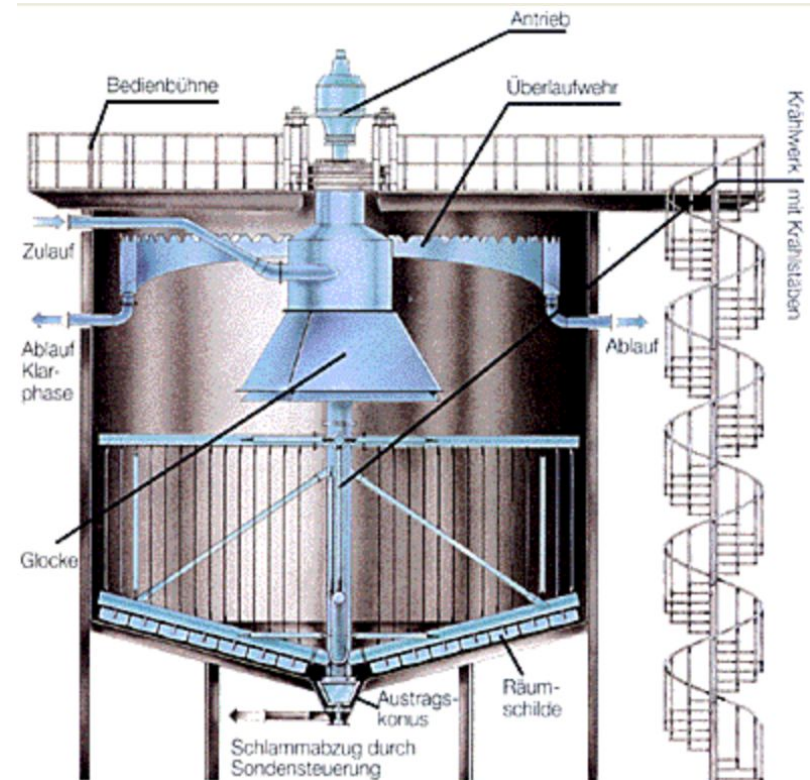


<https://gfycat.com/accomplishedconsideratedodo> (2020)

- flache Bauformen
  - flache Rundbecken mit Durchmessern bis zu 200 m
  - Verdichtung und Beförderung des Sedimentes mit Hilfe von Krählwerken

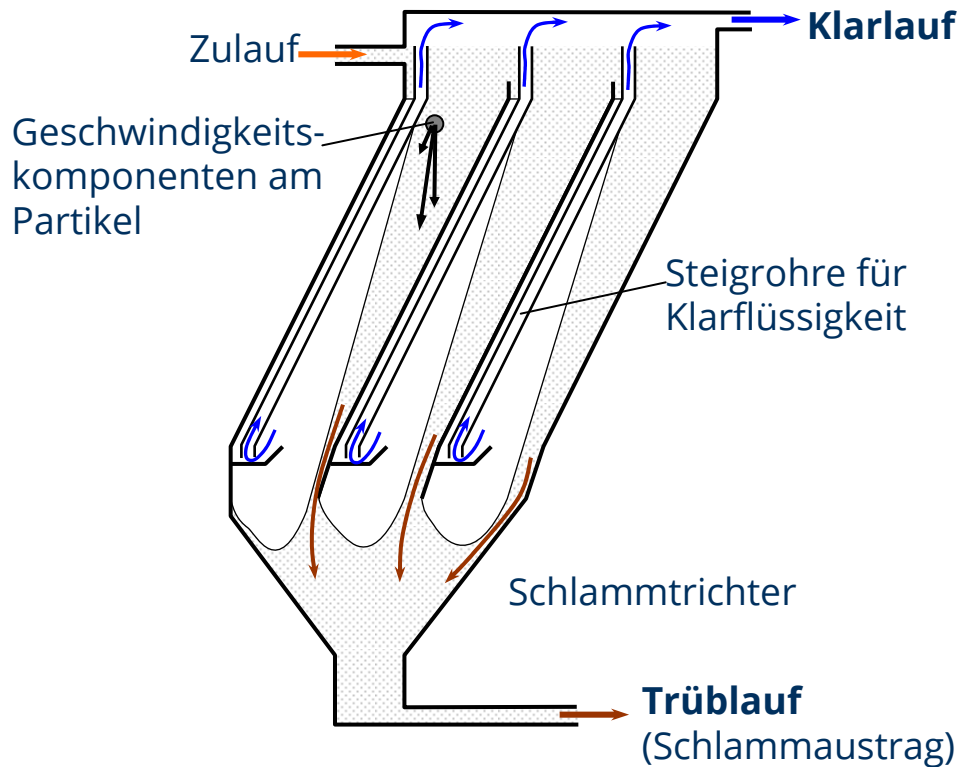


# Rundbecken – hohe Bauformen



- hohe Bauformen: insbesondere bei Zonensedimentation von geflockten Suspensionen mit hohen Sedimentporositäten

# Schrägklärer



Fabricius Pro Terra GmbH (2004)

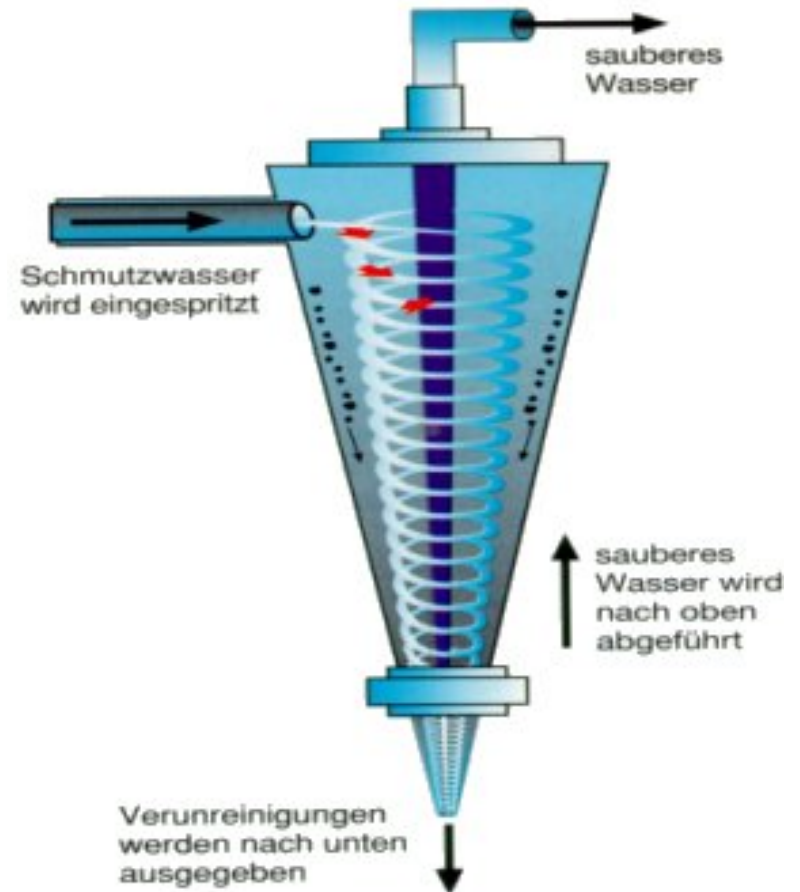
- große Klärfläche durch „Stapeln“ der Absetzbecken
- erhöhte Absetzgeschwindigkeit  
weil Rückströmung der verdrängten Flüssigkeit schräg zur Partikelbewegung
- Betrieb in Gleichstromführung (Beispiel) oder Gegenstromführung

# Hydrozyklon

- spiralförmige Strömung  
→ Zentrifugalkräften  
→ Sedimentation zur Wand (Feststoff)  
bzw. zum inneren Luftschlauch (Blasen)
- häufig Zusammenschaltung baugleicher Hydrozyklone für hohe Durchsätze



[www.zyklomat.de/de/zentrifugalabscheider.jpg](http://www.zyklomat.de/de/zentrifugalabscheider.jpg) (2020)



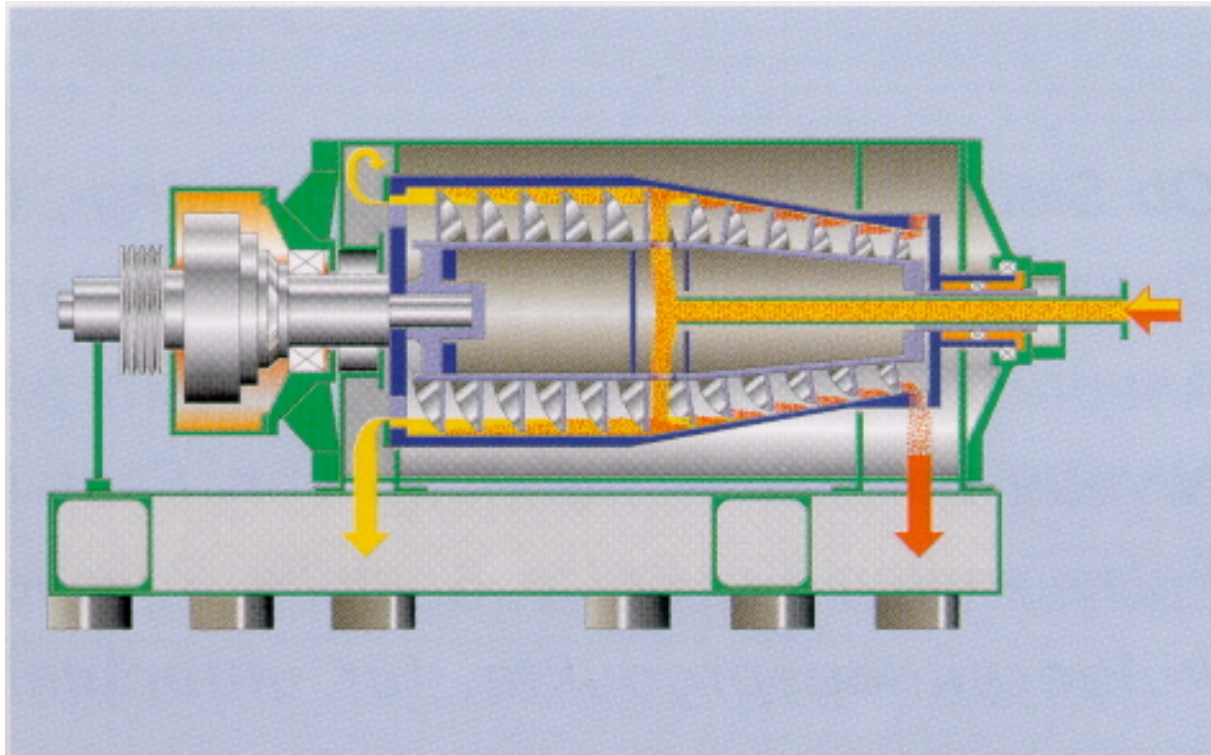
# Zentrifugen

- Zentrifugen = Sedimentations**maschinen**
- Prinzip:
  - erzwungene Rotationsbewegung  
→ Zentrifugalkräften
  - Zentrifugalbeschleunigung  $\gg$  Fallbeschleunigung

$$a_Z = \omega^2 \cdot r_{\text{Rotor}} = Z \cdot g \quad Z = \text{Beschleunigungsvielfaches / Schleuderzahl}$$

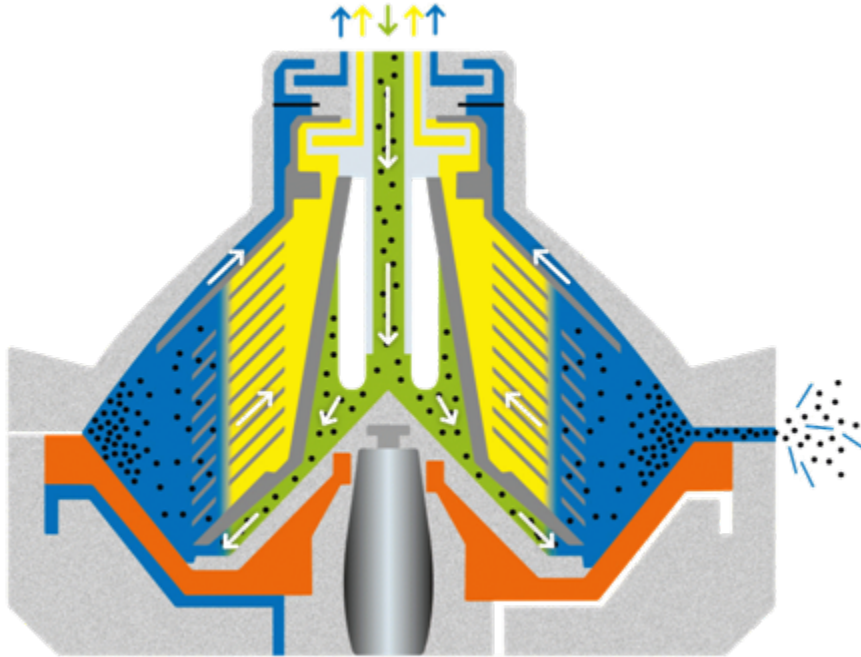
- vielfältige Bauformen
- Vorteile:
  - schnelles Absetzen von feinen Partikeln
  - kleine „Klärfläche“
- Nachteile:
  - hohe Energiekosten
  - hohe mechan. Belastung der Bauteile

# Dekanterzentrifuge

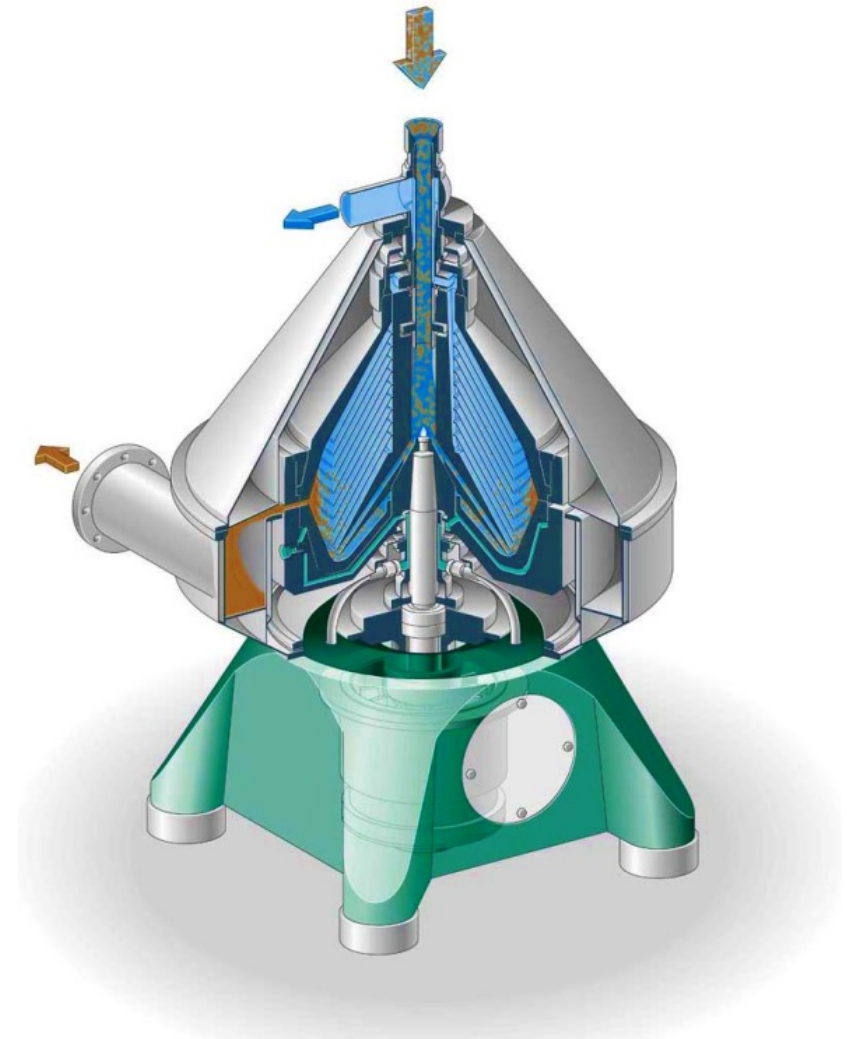


SIEBTECHNIK GmbH, Mülheim a.d. Ruhr, WB253.4/01.2001RE

# Tellerseparator

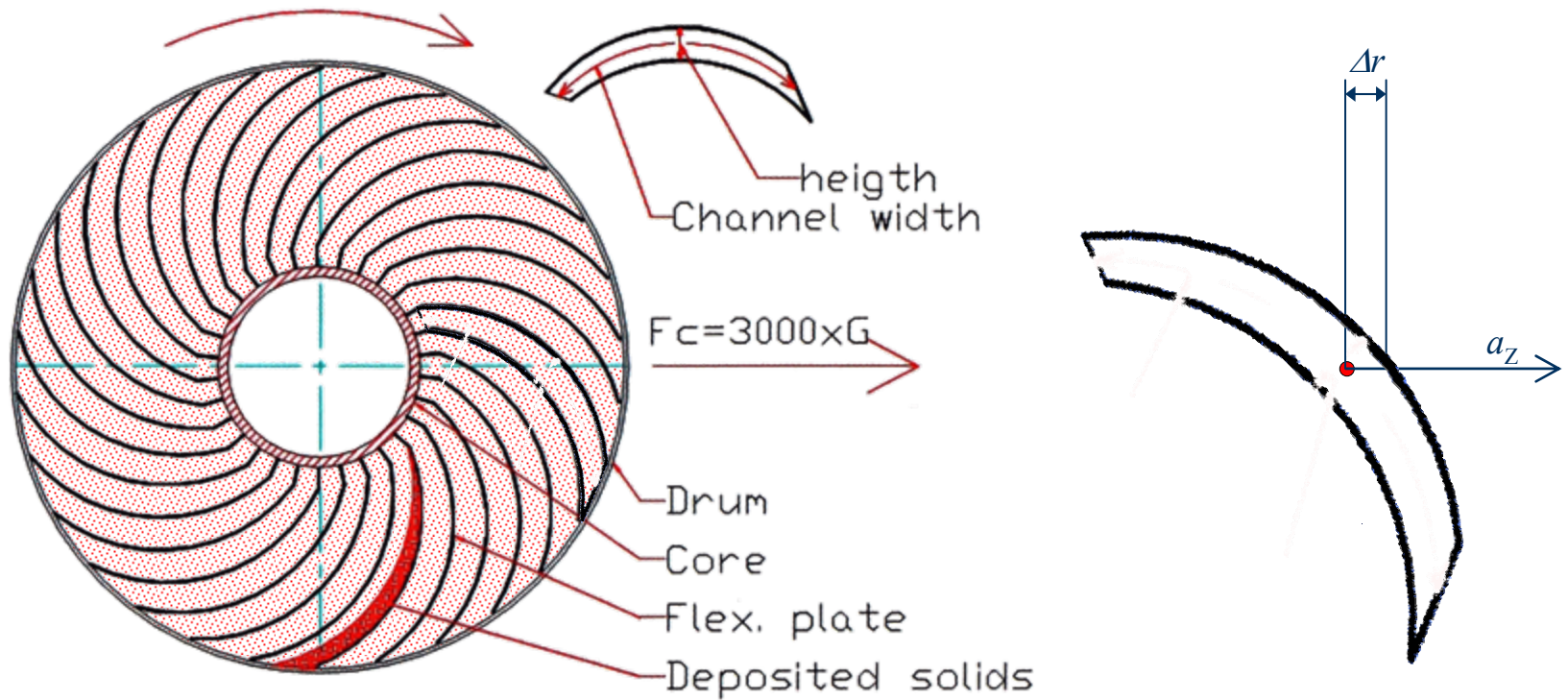


<https://www.centrimax.com/files/images/illustration/centrimax-separator.jpg> (2019)



[http://www.pitt-gmbh.de/englisch/images/zt\\_separator.jpg](http://www.pitt-gmbh.de/englisch/images/zt_separator.jpg) (2019)

# Spiralplattenzentrifuge



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

# 4. Sedimentation

– *Literaturverweise* –

# Literatur zum Thema Sedimentation

- M. Stieß: *Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1*; Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, **2009**; [doi:10.1007/978-3-540-32552-9](https://doi.org/10.1007/978-3-540-32552-9)  
→ Abschn. 4.1 & 4.2 (Grundlagen)
- M. Sommerfeld: Bewegung fester Partikel in Gasen und Flüssigkeiten. In: VDI e.V. (Hrsg.), *VDI-Wärmeatlas*, 11. Aufl., Kap. L3.1; Springer-Verlag Berlin Heidelberg **2013**; [doi:10.1007/978-3-642-19981-3\\_88](https://doi.org/10.1007/978-3-642-19981-3_88) (Grundlagen)
- H. Schubert (Hrsg.): *Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik, Bd. 1 und 2*; Wiley-VCH, Weinheim, **2003**; [doi:10.1002/3527603352](https://doi.org/10.1002/3527603352)  
→ Bd. 1 Abschn. 3.1 (Grundlagen), Bd. 2 Abschn. 7.4.1 (Praxis)
- M. Stieß: *Mechanische Verfahrenstechnik Bd. 2*. Springer, Berlin, **1997**;  
[doi:10.1007/978-3-662-08599-8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-08599-8)  
→ Abschn. 8.3 und 8.5 (Praxis)
- M. Zogg: *Einführung in die Mechanische Verfahrenstechnik*. Teubner, Stuttgart, **1993**.  
→ Abschn. 4.2 (Grundlagen und Praxis)
- J. F. Richardson, J. H. Harker, J. R. Backhurst. *Particle Technology and Separation Processes*. In series: *Coulson and Richardson's Chemical Engineering, vol. 6*, 4<sup>th</sup> ed.; Butterworth-Heinemann, Oxford, **2002**;  
→ chap. 5, pp. 237-290. (etwas Grundlagen und Praxis)