

# Strömungsprobleme der Mechanische Verfahrenstechnik

## *Folien zur Vorlesung*

NUR ZUM PERSÖNLICHEN GEBRAUCH!

PD Dr.-Ing. habil. Frank Babick, 1. April 2021

# 7.4 Wirbelschichten

## - *REH-Diagramm* -

# Zustandsdiagramm nach REH

(L. Reh, *Chem.-Ing. Tech.*, 40 (11):509-515, 1968)

- Partikel-Reynolds-Zahl:

$$Re_p = \frac{\rho_F v_F d^*}{\eta_F}$$

- Archimedes-Zahl:

$$Ar = \frac{g \cdot \Delta\rho \cdot \rho_F \cdot d^{*3}}{\eta_F^2}$$

- Omega-Zahl:

$$\Omega = \frac{\rho_F^2 \cdot v_F^3}{g \cdot \Delta\rho \cdot \eta_F}$$

- Partikel-Froude-Zahl:

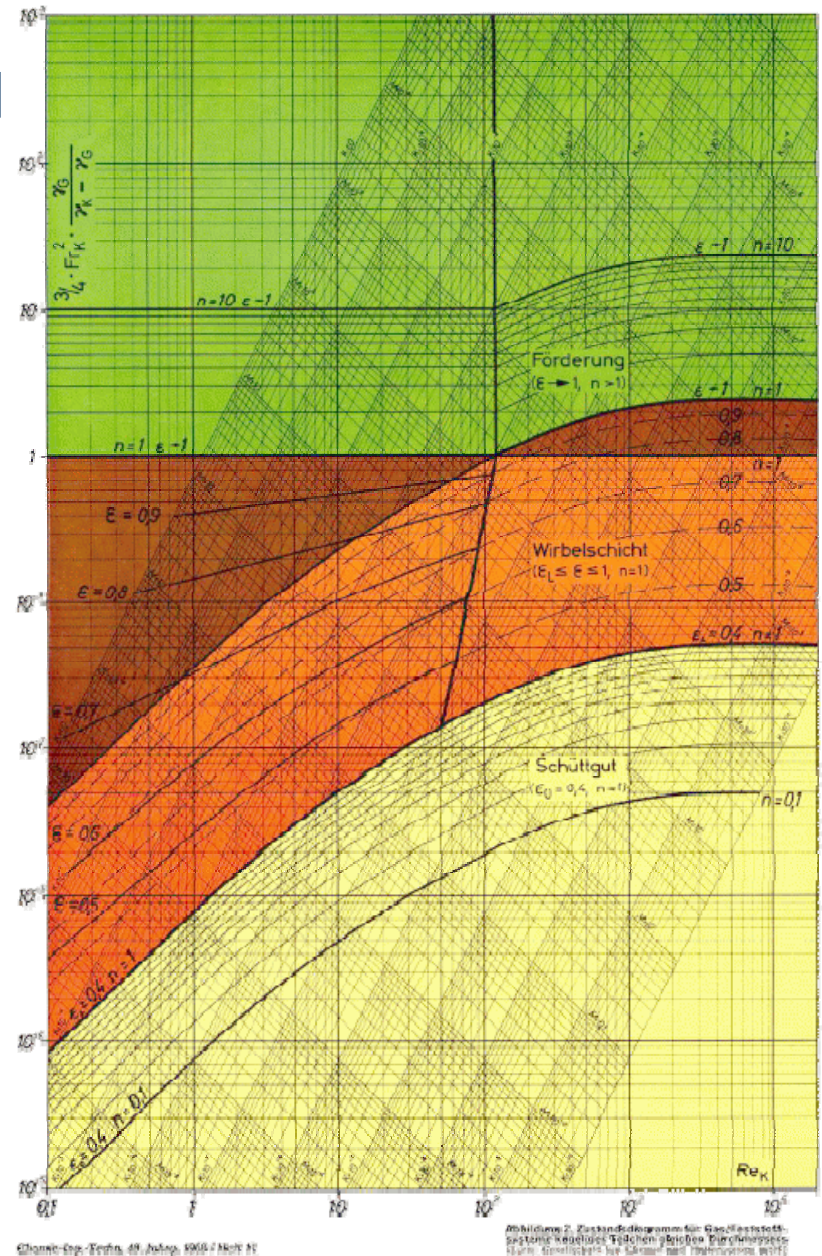
$$Fr^* = \frac{v_F^2}{g \cdot d^*} \cdot \frac{\rho_F}{\Delta\rho} = \frac{Re_p^2}{Ar} = \frac{\Omega}{Re_p}$$

- Wirbelbettporosität:

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_{\text{dispers}}}{V_{\text{WS}}}$$

- Widerstandsbeiwert in der WS ( $F_W = F_G - F_A$ )

$$c_W = \frac{F_W}{A_Q p_{\text{Stau}}} = \frac{g \cdot \Delta\rho \cdot \frac{\pi}{6} d^{*3}}{\frac{\pi}{4} d^{*2} \cdot \frac{1}{2} \rho_F v_F^2} = \frac{4g \cdot d^* \cdot \Delta\rho}{3v_F^2 \cdot \rho_F} = \frac{1}{\frac{3}{4} Fr^*}$$



# Beispiel für Nutzung des REH-Diagramms

## Fluidisierung eines Kunststoffgranulates in Luft

- Bei welcher Anströmgeschwindigkeit setzt die Fluidisierung ein ( $\varepsilon_{WP}=0.40$ )?
  - Granulat ( $800 \text{ kg/m}^3$ ,  $900 \mu\text{m}$ ) in Luft:  $1.2 \text{ kg/m}^3$ ,  $1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

- Vorgaben:

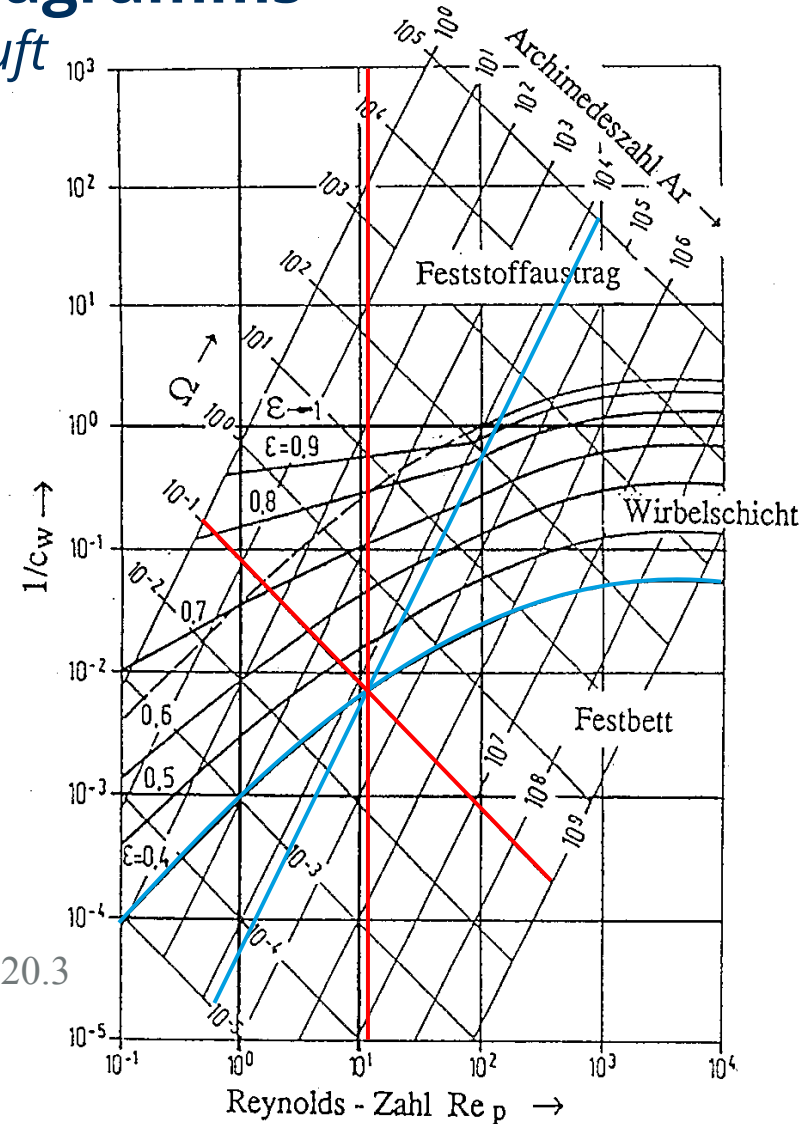
- Archimedes-Z.:  $Ar = \frac{g\Delta\rho\rho_L x^3}{\eta_L^2} = 21151$
- Porosität:  $\varepsilon = 0.4$

- Ablesen:

- $\Omega \approx 0.1 \rightarrow v_{WP} = \sqrt[3]{\frac{g\Delta\rho\eta_L}{\rho_L^2} \cdot 0.1} = 0.21 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
- $Re_p \approx 12 \rightarrow v_{WP} = \frac{\eta_L}{\rho_L x} \cdot 12 = 0.20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

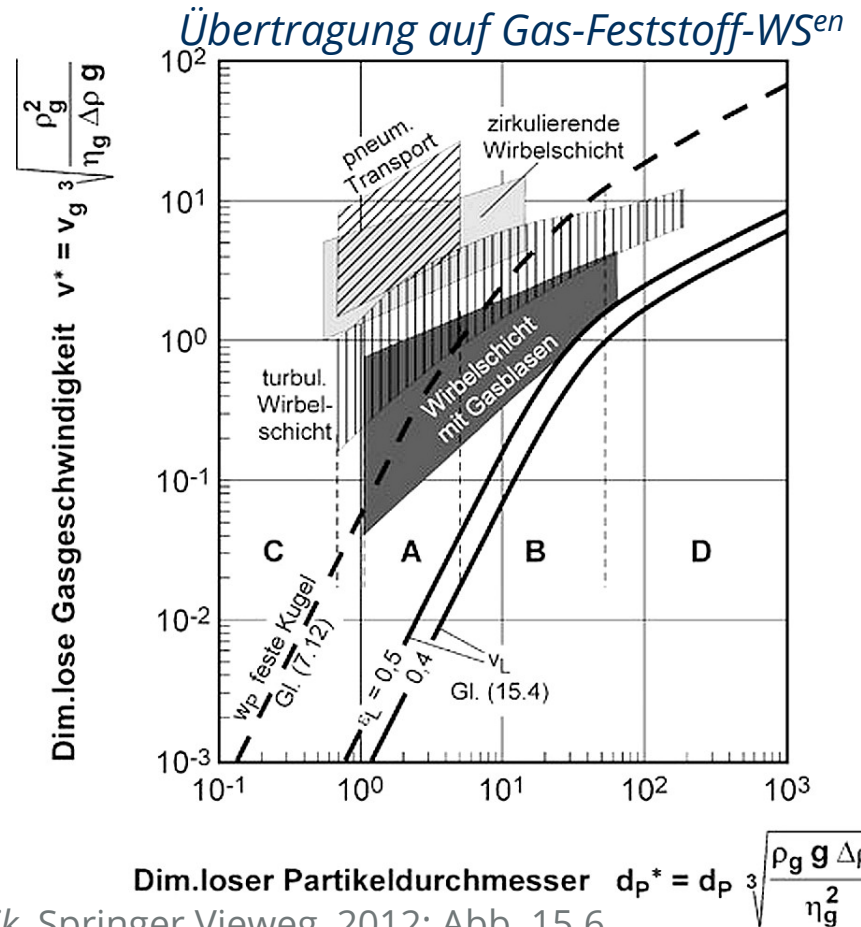
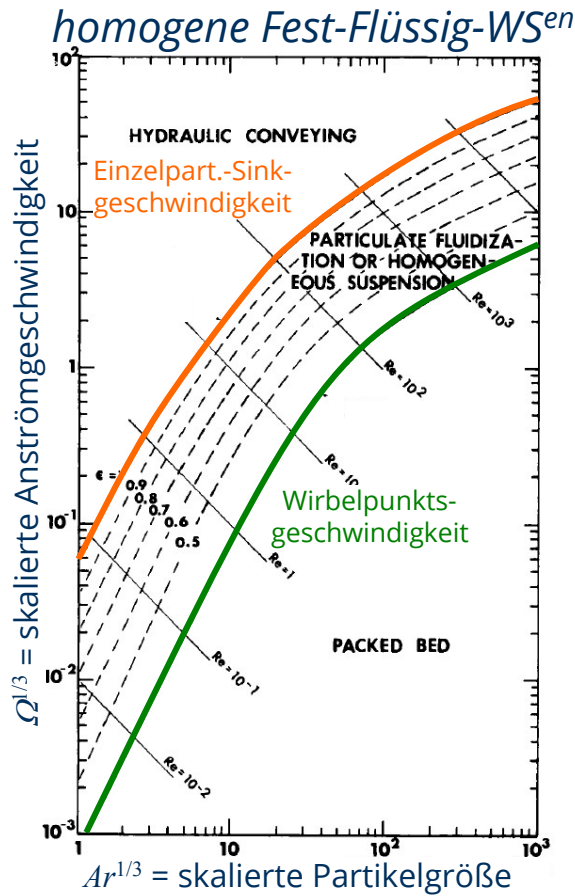
- Berechnung

- Re:  $Re_{Sch,WP}^* = \left( \sqrt{1 + \frac{4K}{C^2} \cdot \frac{\varepsilon_{WP}^3}{(1-\varepsilon_{WP})^2} \cdot Ar} - 1 \right) \cdot \frac{C}{2K} = 20.3$
- WP:  $v_{WP} = \frac{(1-\varepsilon_{WP}) \cdot \eta_L}{\rho_L x} \cdot 20.3 = 0.20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$



# Alternative Zustandsdiagramme

(J. R. Grace, *Canad. J. Chem. Eng.*, 64(3):353-363, 1986)



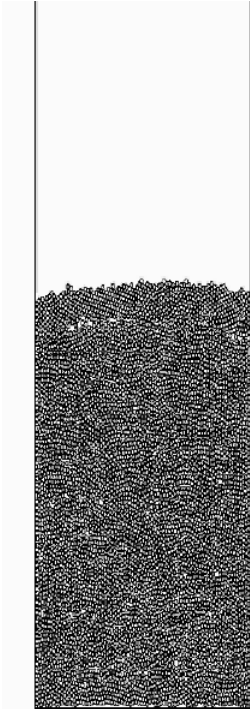
Kraume, *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik*, Springer Vieweg, 2012; Abb. 15.6.

# 7.5 Wirbelschichten

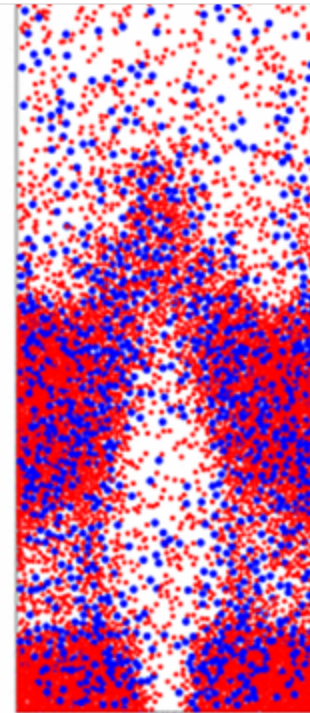
## *- Inhomogene Wirbelschichten -*

# Visualisierte Wirbelschichten: homogen & inhomogen

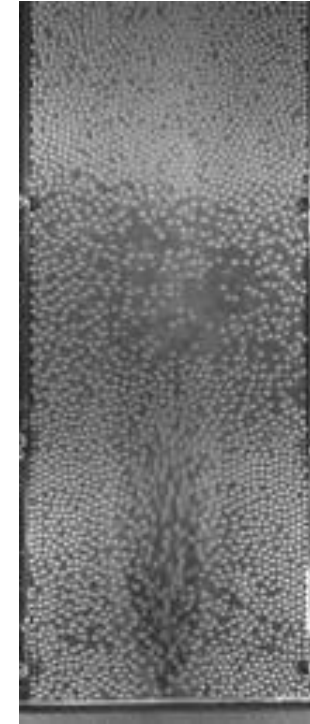
homogen (simuliert)



inhomogen (simuliert)



inhomogen (real)

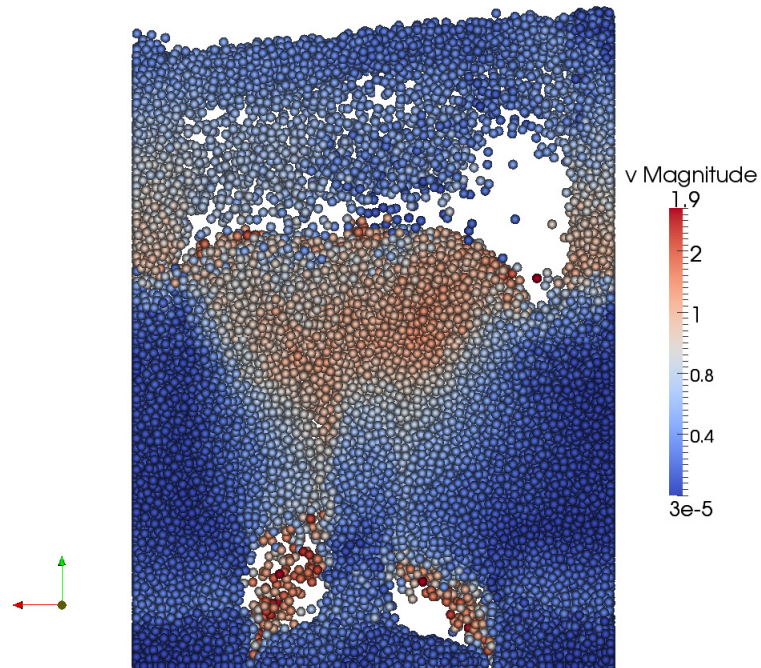


Bildquellen:

Mao Ye; Jeroen Link (University of Twente)

<http://fcre.tnw.utwente.nl/animations.html>

# Visualisierte Wirbelschichten: inhomogen

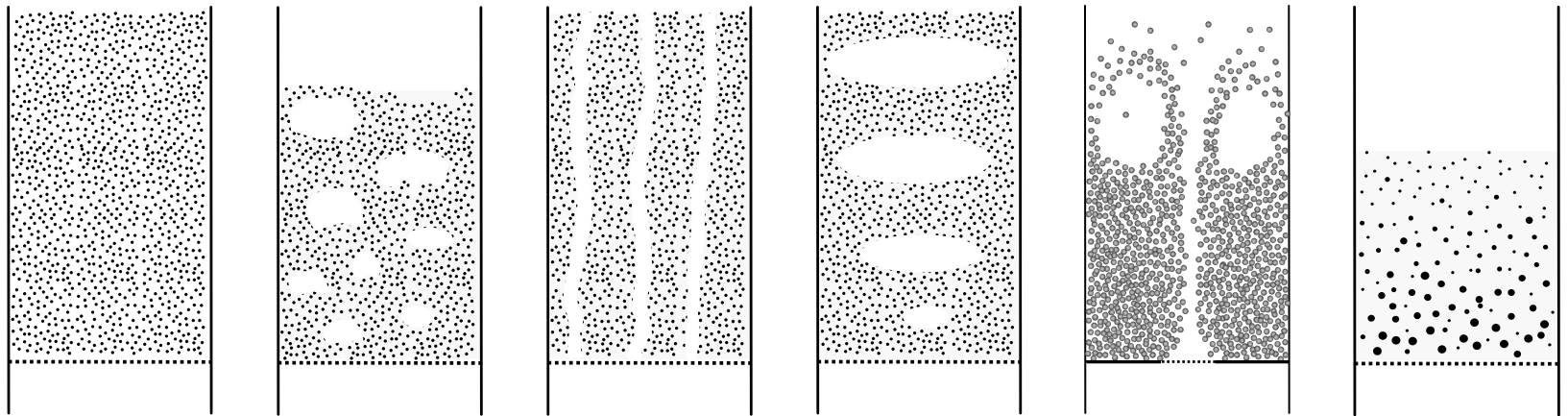


Bildquelle: <http://cfdem.dcs-computing.com/media/CFDEM/doubleSpoutFluidisedBed.avi>

# Homogene und inhomogene Wirbelschichten

homogene WS

Erscheinungsformen inhomogener Wirbelschichten



Blasen bildend

Kanal bildend

stoßend

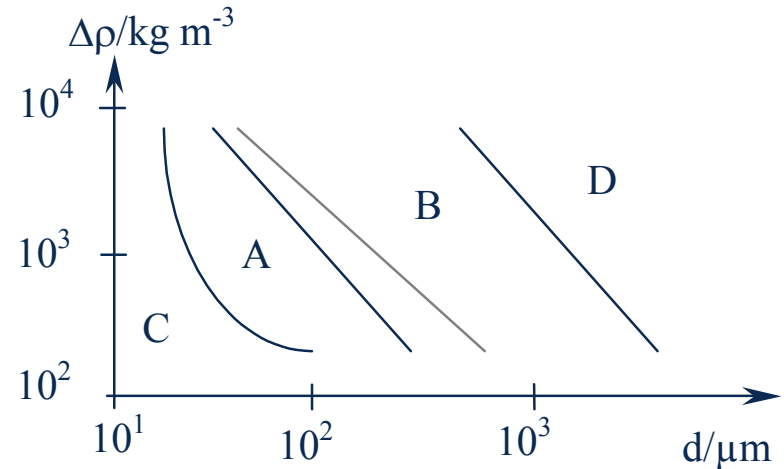
sprudelnd

Entmischung

- homogene Wirbelschicht (gleichmäßige Volumenexpansion und Zufallsmischung)
  - ← geringer Dichteunterschied; enge Verteilung, feine Partikel
- inhomogene Wirbelschicht
  - ← hoher Dichteunterschied; breite Verteilung, grobe Partikel

# WS-Klassifikation nach Geldart

- *A (aeratable)*:
  - leicht kohäsive Pulver
  - homogene WS,  $v_{mB} > v_{WP}$
- *B (bubbly)*:
  - nicht kohäsive Pulver
  - Blasenbildung ab WP,  $v_{mB} = v_{WP}$
- *C (cohesive)*
  - feine, stark kohäsive Pulver
  - i.d.R. Kanalbildung  
→ Hilfsmittel erforderlich
- *D (spouting)*
  - grobe Partikel,
  - beträchtliche Bettbewegung,  $v_{mB} < v_{WP}$



nach:

Geldart, *Powder Technol.*,7:285-292, 1973

$v_{mB}$  = minimale Anströmgeschwindigkeit, bei der Blasenbildung einsetzt

# WS-Klassifikation nach Molerus

- Eine Wirbelschicht ist nur dann homogen,
  - a) wenn der Dichtekontrast gering ist

$$\rho_P / \rho_F < 3$$

- b) und wenn am Wirbelpunkt, die Strömung von Schwerkraft dominiert bleibt

$$Fr_{WP} = \frac{v_{WP}^2}{g \cdot d^*} < 0.13$$

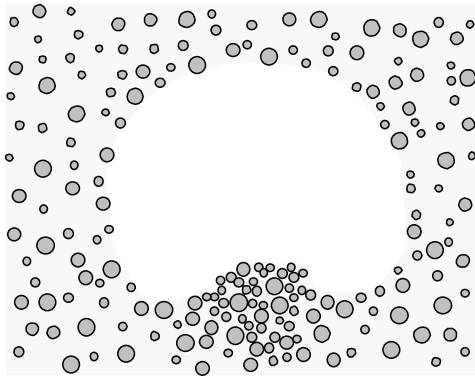
wobei die Kriterien nur für vernachlässigbare Haftkräfte zwischen den Partikeln gelten

# 7.6 Wirbelschichten

## *- Blasenbildenden Wirbelschichten -*

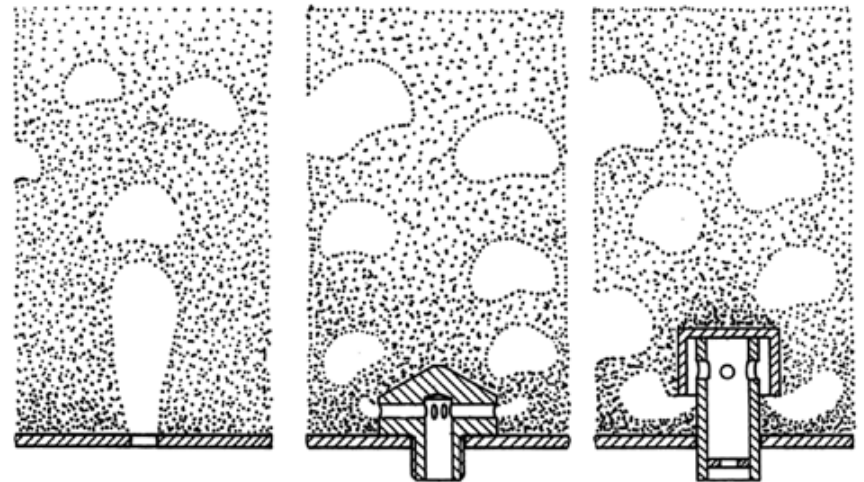
# WS-Blasen: Form und Bildung

Typische Blasengestalt:



WS-Blasen sind partikelfreie Zonen mit geringerer Gasgeschwindigkeit  
→ Ansammlung sedimentierender Partikel am Blasenboden

Düseneinfluss auf Blasenbildung:

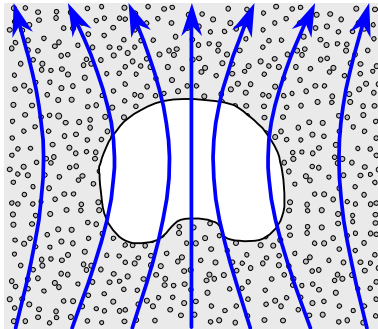


Bauart und Anzahl der Düsen beeinflussen initiale Blasengröße und Blasenverteilung in der Wirbelschicht

# Stoff- und Wärmeaustausch in WS-Blasen

## langsame Blase

$$u_B \ll u_0$$

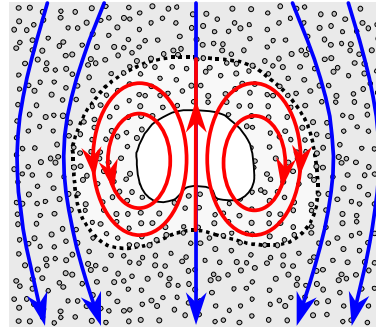


Blase wird *durchströmt*

günstig für Wärme-  
und Stoffaustausch

## schnelle Blase

$$u_B \gtrsim u_0$$

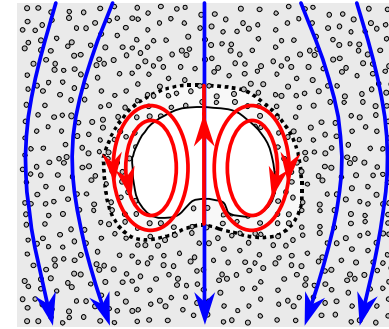


Zirkulationsströmung mit  
großem Wirkradius

(sehr) günstig für Wärme-  
und Stoffaustausch

## sehr schnelle Blase

$$u_B \gg u_0$$



Zirkulationsströmung mit  
minimalem Wirkradius,  
*by-passing*,

eher ungünstig für Wärme-  
und Stoffaustausch

# Blasengröße und Blasenauftiegs-geschwindigkeit

- Blasendurchmesser  $d_B$ 
  - Blasen wachsen beim Aufsteigen
  - initiale Blasengröße ist abhängig von der Geometrie des Siebboden bzw. Bauart und Anzahl der Düsen
  - Einflussparameter: Volumenstrom, Überschussgeschwindigkeit ( $\Delta v = v_F - v_{WP}$ )

- Blasen-geschwindigkeit  $u_B$

$$u_B = c_1 \cdot \Delta v + \sqrt{g d_B \cdot \frac{D}{D_{\text{ref}}}} \quad \text{mit } D = \text{Rohrdurchmesser, } D_{\text{ref}} = 0.5\text{m} = \text{empir. Bezugsgröße}$$

- Durchmesser der Zirkulationsströmung  $d_Z$

$$\frac{d_Z}{d_B} = \sqrt[3]{\frac{u_B + 2u_0}{u_B - u_0}} \quad \text{mit } u_0 \approx v_{WP} / \varepsilon_{WP} \text{ Zwischenraumgeschwindigkeit}$$

- Blasen-volumen und WS-Ausdehnung

- in Blasen transportierter Volumenstrom  $\dot{V}_B \approx \Delta v \cdot A$

- gesamtes Blasen-volumen  $V_B = \dot{V}_B \cdot t_{\text{Aufstieg}} = \dot{V}_B \cdot h / u_B$

- Volumen der Wirbelschicht  $V_{WS} \approx V_{WP} + V_B$  bzw.  $h_{WS} A \approx h_{WP} A + h_{WS} A \cdot \Delta v / u_B$

# Anmerkungen zur Wirbelschicht-(In)Homogenität

- Verhalten einer Wirbelschicht (homogen/inhomogen, Art der Inhomogenität) wird primär von den Materialeigenschaften bestimmt ( $PGV, \Delta\rho, \eta$ )
- aber Ausprägung ist z.T. technisch beeinflussbar
  - z.B. über Gestaltung der Siebböden
  - z.B. durch Führungsrohre (Wurster-Rohr)
  - z.B. mit Hilfe bewegter Einbauten bei kohäsiven Gütern
- inhomogene WSen sind nicht a priori besser oder schlechter
- mögliche Vorteile gegenüber homogenen WS:
  - bessere Durchmischung
  - intensiverer Wärme-und Stoffaustausch
- mögliche Nachteile
  - verstärkte Erosion und Abrasion
  - Entmischung → keine Fluidisierung schwerer und sehr gute Fluidisierung leichter Partikel

# 7.7 Wirbelschichten

*- Literaturverweise -*

# Literatur zu den Wirbelschichten

- F. Schubert, (Hrsg.): *Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik, Bd. 1*; Wiley-VCH, Weinheim, **2003**; [doi:10.1002/3527603352](https://doi.org/10.1002/3527603352);  
→ Abschn. 3.2.2.
- 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);  
→ Kap. 11.1
- K.-E. Wirth: Strömungsformen und Druckverlust in Wirbelschichten. In: VDI e.V. (Hrsg.), *VDI-Wärmeatlas*, 11. Aufl., **Kap. L3.2**; 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)
- 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**;  
→ chapt. 6
- W.-C. Yang: Bubbling Fluidized Beds. In: W.-C. Yang (ed.), *Handbook of fluidization and fluid-particle systems*, **chapt. 3**; Marcel Dekker, New York, Basel, **2003**;  
[doi:10.1201/9780203912744](https://doi.org/10.1201/9780203912744)