

Folien zur Lehrveranstaltung

**Grundlagen der Mechanischen
Verfahrenstechnik**

– nur zum persönlichen Gebrauch –

PD Dr.-Ing. habil. Frank Babick
Dr.-Ing. Benno Wessely

Dresden, Frühjahr 2025

6. Durchströmte und fluidisierte Schüttungen

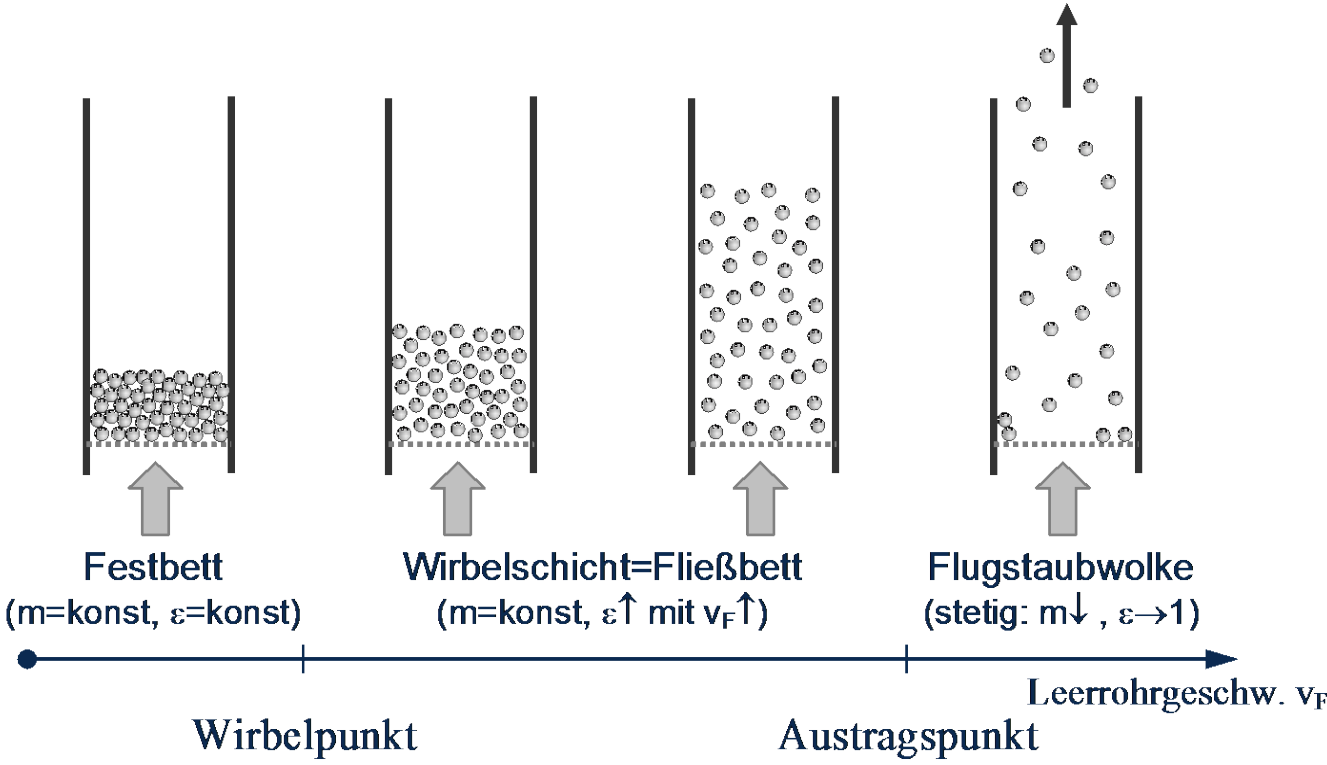
Lernziele zu Kapitel 6

- Wissen:
 - Unterscheidung zwischen Festbett, Fließbett und Flugstaubwolke
 - beispielhafte Nutzung von Festbetten und Wirbelschichten für Stoffwandlungsprozesse
 - Vor- und Nachteile der Nutzung von gepackten (festen) und fluidisierten Schüttungen
 - Erscheinungsformen inhomogener Wirbelschichten
 - Förderzustände beim pneumatischen Transport
- Fähigkeiten:
 - Berechnung des Druckverlustes für durchströmte Partikelschichten
 - Berechnung der Wirbelpunktsgeschwindigkeit
 - Nutzung des Reh-Diagramms zur Ermittlung des Betriebspunktes von Wirbelschichten

6. Durchströmte und fluidisierte Schüttungen

– Überblick –

Durchströme und fluidisierte Schüttungen



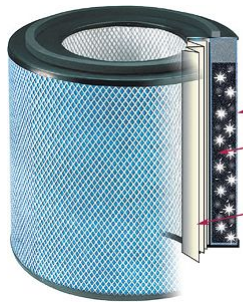
6. Durchströmte und fluidisierte Schüttungen

– *Durchströmung von Festbetten* –

Durchströmte Festbetten

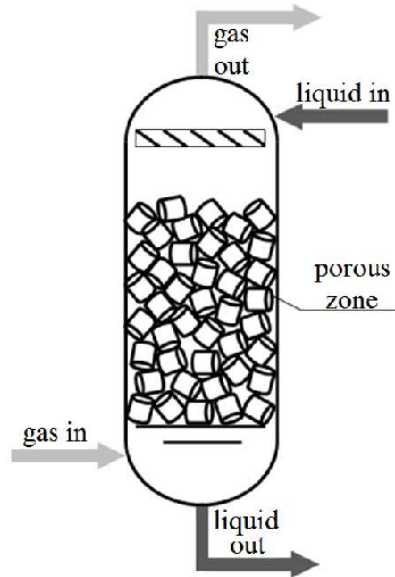


„Kies“filter für Swimmingpools

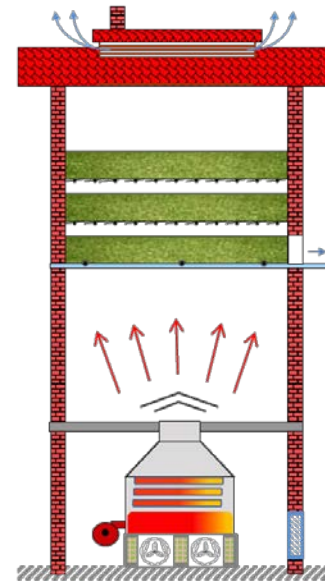


HEPA-Filter

- 3** Layers of Revolutionary Filtration
1. PermaFilt Large Dust Filter.
 2. 15 lb. of Superblend Adsorbent to Remove VOC's, formaldehyde, ammonia, etc.
 3. HEPA Filter Media to remove sub-micron particles and allergens



Füllkörperkolonnen zur Absorption



Trocknung von Hopfen



Extraktion von Feststoffen

Druckverlust in porösen Medien

- empirischer Ansatz nach Darcy (1856)

- Druckverlust:
$$\Delta p = \frac{1}{k_D} \cdot \eta_F \cdot v_F \cdot h \quad \text{mit} \quad v_F = \dot{V}/A$$

- k_D = Permeabilität, $1/k_D = r$ = höhenspez. Widerstand
- Gültigkeit auf laminare / zähe Durchströmung begrenzt
- keine Aussagen zum Einfluss der Schüttungseigenschaften

- Kapillarströmung („einzelne Pore“)

- Hagen-Poiseuille-Gleichung:
$$\Delta p = \frac{128}{\pi d_{\text{Kap}}^4} \cdot \eta_F \cdot \dot{V} \cdot L_{\text{Kap}} = \frac{32}{d_{\text{Kap}}^2} \cdot \eta_F \cdot v_{\text{Kap}} \cdot L_{\text{Kap}}$$

- für kreisförmigen Querschnitt und laminare Strömung

- Behandlung von Partikelschüttungen

- hydraulischer Durchmesser:
$$d_h = \frac{4 \cdot \varepsilon}{1 - \varepsilon} \cdot \frac{1}{S_V}$$

- Porengeschwindigkeit:
$$v_{\text{Pore}} = v_F / \varepsilon$$

- vernetzte, irreguläre Poren → Korrekturfaktor
- parallele Poren → Gesamtdruckverlust = Druckverlust an Einzelpore

Druckverlust in porösen Medien

- laminare Strömungsverhältnisse

- laminar \leftarrow *niedrige Geschwindigkeit, kleine Poren, hohe Viskosität*
- Carman-Kozeny-Gleichung

- übliche Schreibweise: $\Delta p/h = K' \cdot (1 - \varepsilon)^2 / \varepsilon^3 \cdot S_V^2 \cdot \eta_F \cdot v_F$ mit: $K' = 3.6 \dots 5.5$

- dimensionslos $\xi = \frac{36 \cdot K'}{Re_{Sch}^*}$

mit: $\xi = \frac{\Delta p d^*}{\rho_F v_F^2 h} \cdot \frac{\varepsilon^3}{1 - \varepsilon}$ $Re_{Sch}^* = \frac{\rho_F v_F d^*}{(1 - \varepsilon) \eta_F}$ $d^* = \frac{6}{S_V}$

- allg. Ansatz $\Delta p/h = f(\varepsilon) \cdot S_V^2 \cdot \eta_F \cdot v_F$

- z.B. Rumpf (1971) $f(\varepsilon) = 4 \cdot (1 - \varepsilon) / \varepsilon^{4.55}$

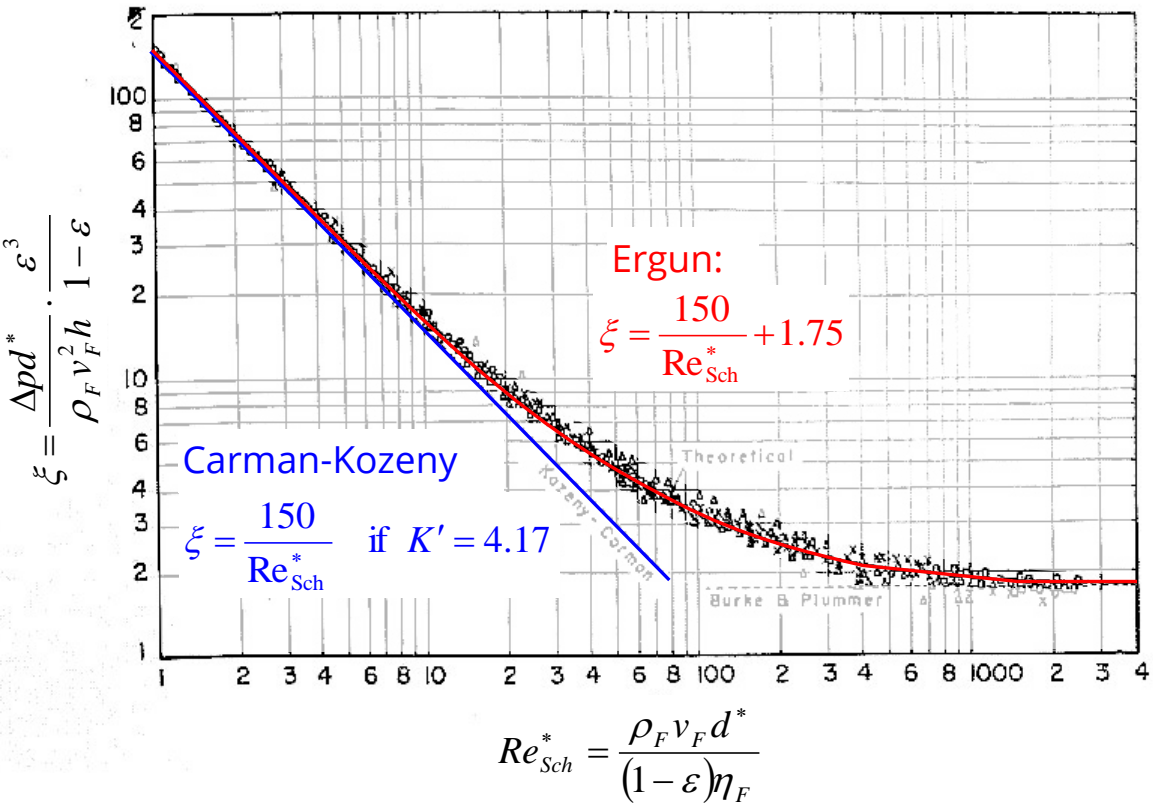
- beliebige Strömungsverhältnisse

- bei hohen Reynoldszahlen resultiert Druckverlust aus Fluidträchtigkeit

- Grundform $\Delta p/h = k_1 \cdot \eta_F \cdot v_F + k_2 \cdot \rho_F \cdot v_F^2$

- z.B. Ergun (1952): $\xi = \frac{C}{Re_{Sch}^*} + K$ mit: $C = 150$ $K = 1.75$

ERGUN-Gleichung



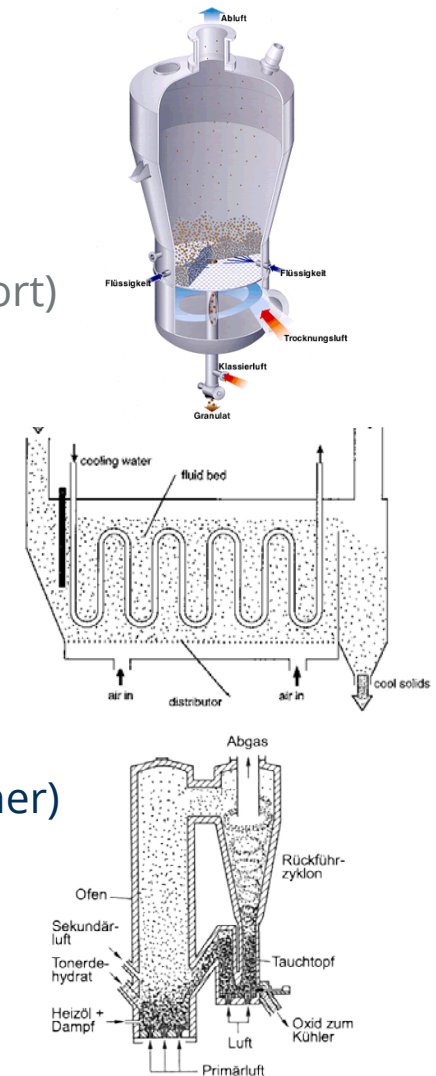
S. Ergun, Fluid flow through packed columns. *Chem. Eng. Prog.*, 48(2):89-94, **1952**.

6. Durchströmte und fluidisierte Schüttungen

– *Wirbelschichtpraxis* –

Technische Umsetzung von Wirbelschichten

- Gestaltung der Fließzone
 - vertikale Ausrichtung (oft diskontinuierlich)
 - horizontale Ausrichtung (für kontinuierlichen Materialtransport)
 - oft Querschnittserweiterung nach oben
- weitere Anlagenteile
 - Gebläse oder Pumpe
 - Siebboden, ev. mit Düsen
 - Förderer und Dosierer für Partikeleintrag
 - Abscheider für Partikel (Zyklon) und Abrieb (Filter)
 - Führungsrohre (Wurster-Rohr)
 - anwendungsspezifische Installationen (Einspritzdüsen, Brenner)
- Prozessführung
 - stationär oder instationär
 - zirkulierend, d.h. Rückführung ausgetragener Partikel



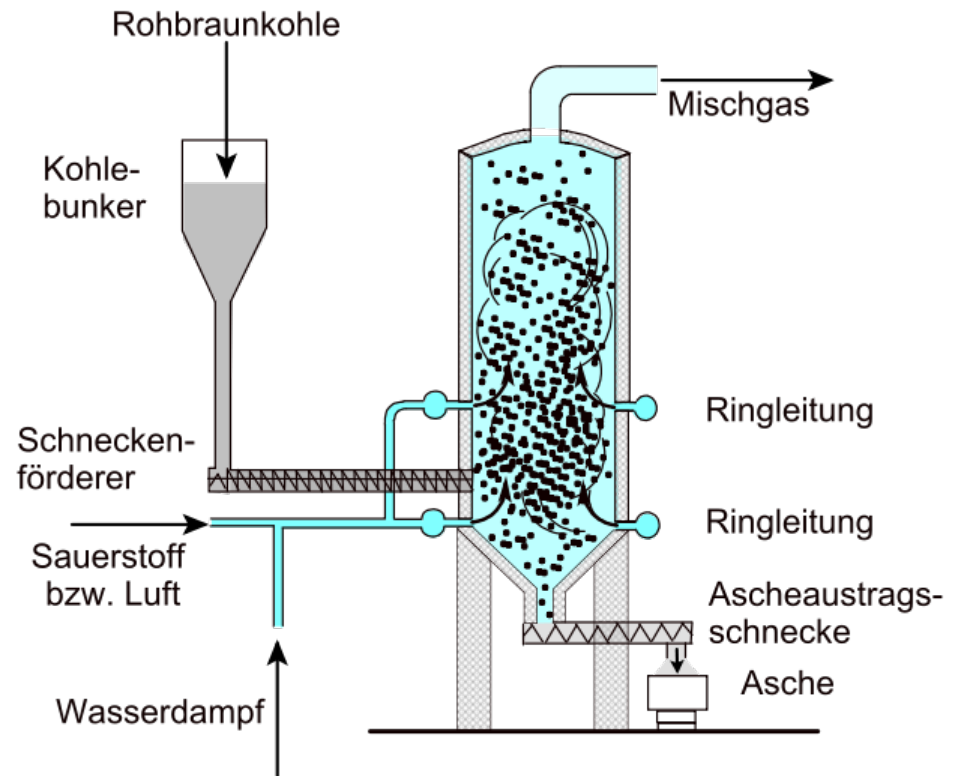
Vor- und Nachteile von Wirbelschichten

- Grundsätzliche Eigenschaften:
 - fluidähnliches Bettverhalten
 - Schüttung „schwebt“ → Kräftegleichgewicht zw. Gewicht und Strömungskräften
 - stetige Durchmischung und hohe Relativgeschwindigkeiten
- Vorteile
 - günstige Bedingungen für Wärme- und Stoffaustausch
 - kontinuierliche Betriebsweise und Kreislaufbetrieb möglich
 - „Rühren“ bei kohäsiven Schüttungen
 - geringer konstruktiver Aufwand
 - gute Regelbarkeit (falls keine Rückführung)
- Nachteile
 - Abrieb an Apparatewand und Einbauten
 - Partikelerosion → Staubentwicklung
 - Abscheideeinrichtung für Partikel und Staub erforderlich
 - unterschiedliche Verweilzeiten bei kontinuierlichem Betrieb
 - Sintergefahr bei hohen Temperaturen

Winklergenerator zur Kohlevergasung

- erste technische Anwendung der Wirbelschicht (1926)
- Ziel: Gewinnung von Synthesegas (H_2+CO) aus Braunkohle
- Reaktion:
$$C + O_2 + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2 + CO + CH_4$$

(Mischgas)

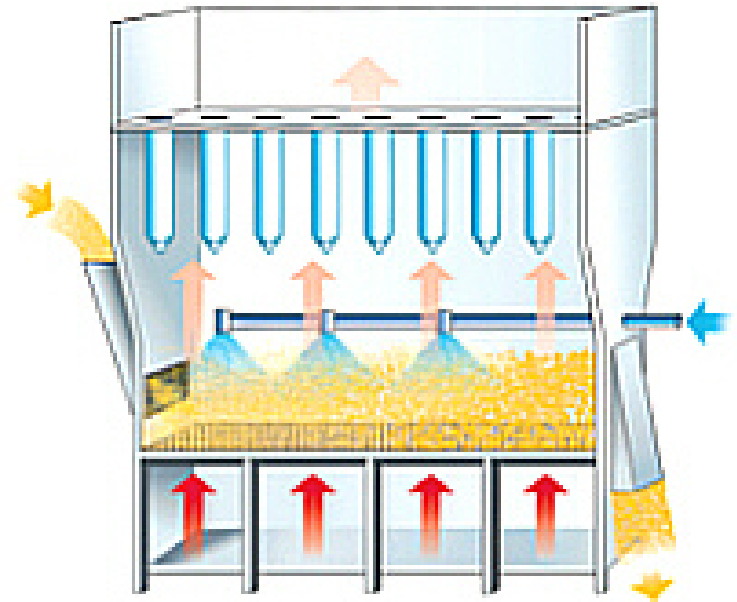
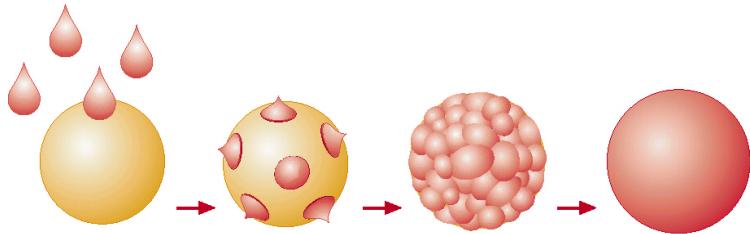


Bildquelle: commons.wikimedia.org/wiki, CC Roland Mattern

Anwendungen von Wirbelschichten

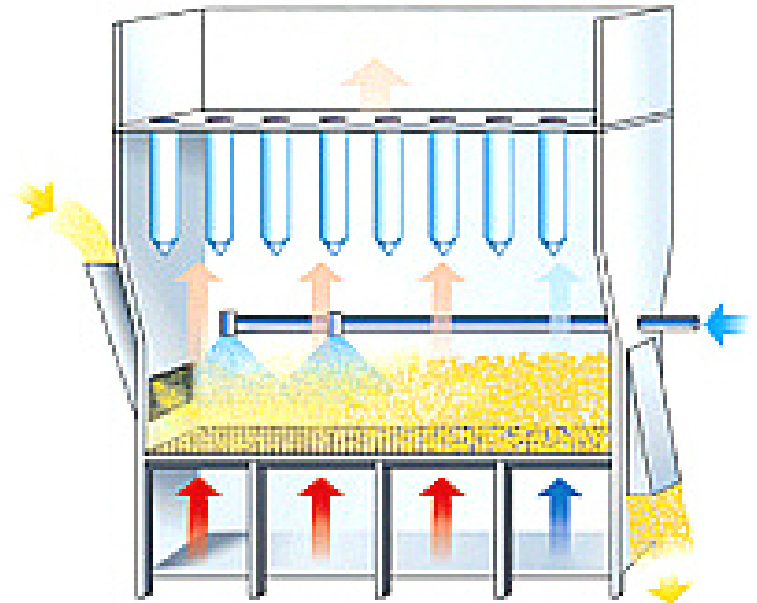
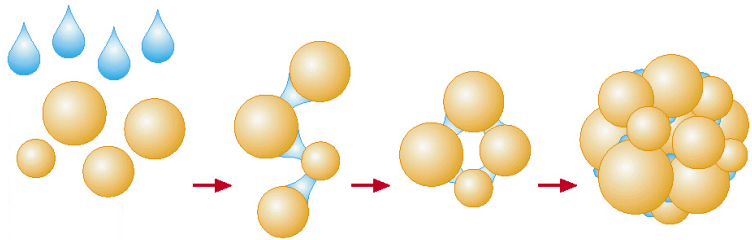
- erste großtechnische Nutzung:
 - [Kohlevergasung \(Winkler-Generator 1926\)](#)
- chemische oder thermische Stoffwandlung von partikulären Materialien
 - Verbrennung, z.B. Biomasse
 - Röstung
 - Pyrolyse, z.B. Müll
 - Trocknung von Pulvern, z.B. Braunkohle
 - Sprühtrocknung, z.B. Klärschlamm, Polymersuspensionen, Milch
 - Kühlung
- mechanische Grundoperationen
 - Granulation (Sprühagglomeration)
 - Beschichtung (*coating*), z.B. Wirkstoffkapseln, Kaffeebohnen
- Fluidisierung von Katalysatorpartikeln
 - katalytische Gasreaktionen, z.B. Fluid-Catalytic-Cracken – 450 ... 550 °C

Wirbelschicht - Beschichtung



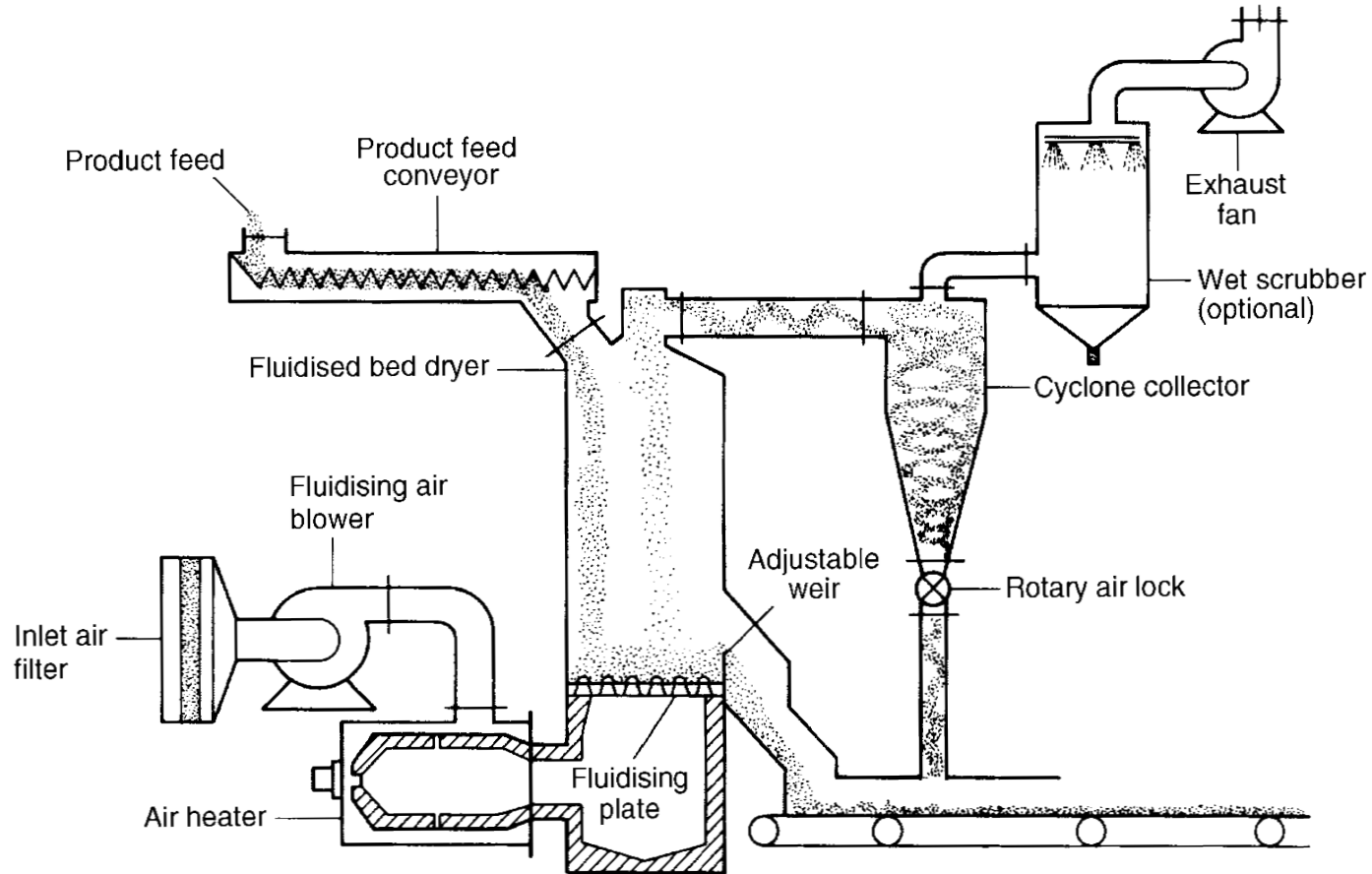
Bildquelle: *Kontinuierliche Wirbelschichtprozesse*. Glatt® Ingenieurtechnik GmbH, 2002.

Wirbelschicht - Agglomeration



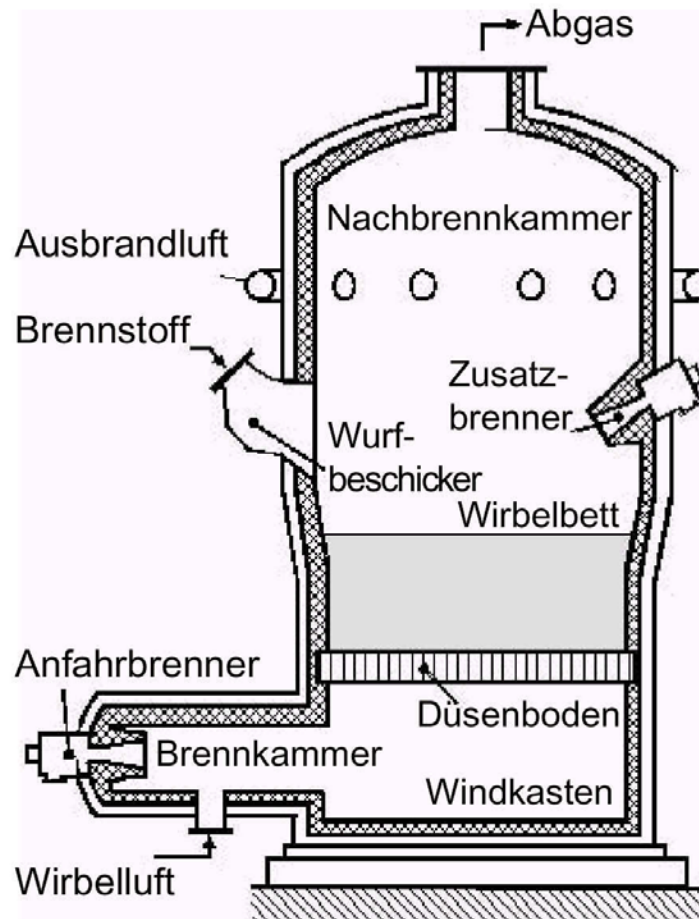
Bildquelle: *Kontinuierliche Wirbelschichtprozesse*. Glatt® Ingenieurtechnik GmbH, 2002.

Wirbelschichttrocknung



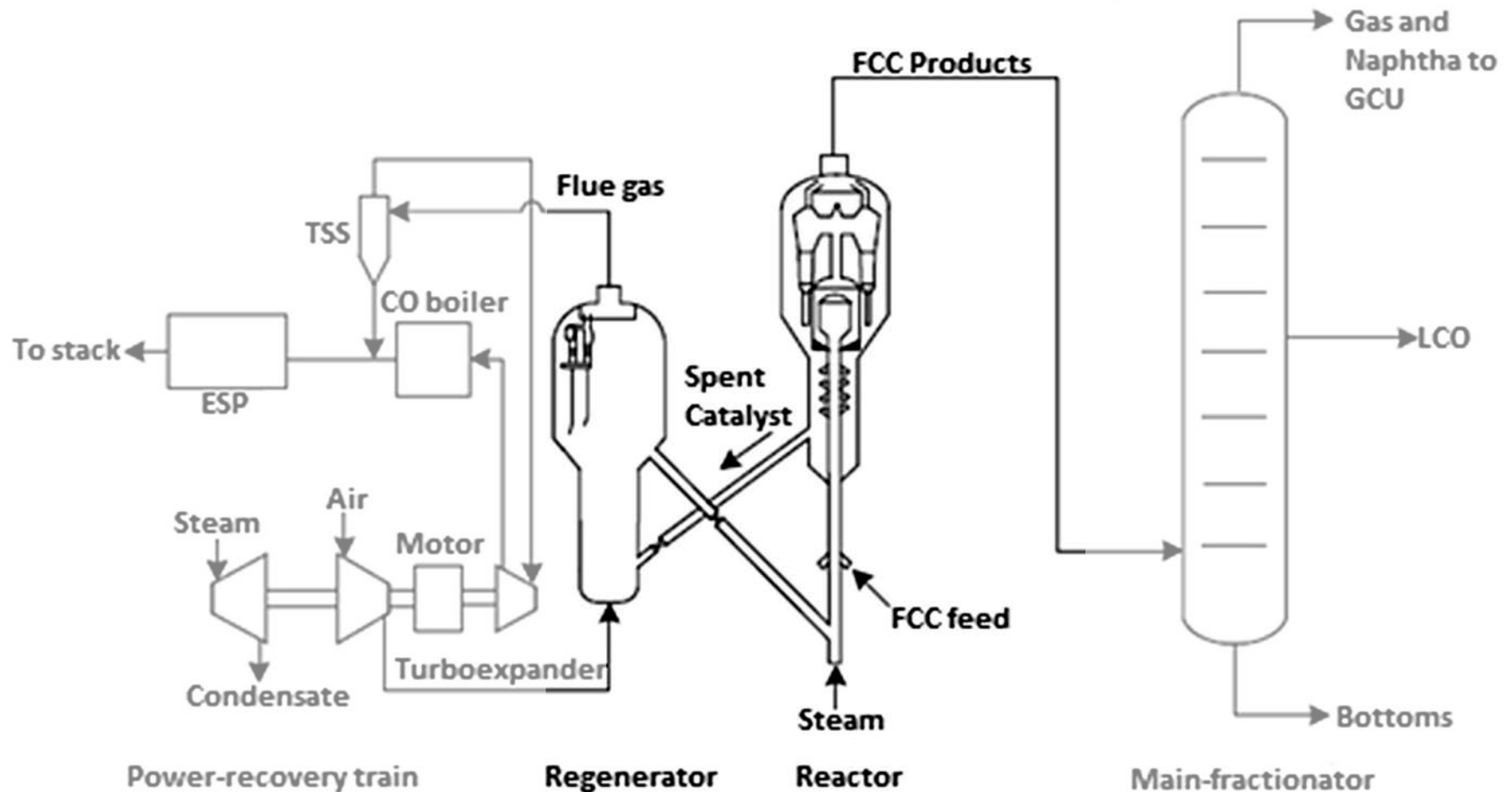
Richardson et al., *Particle Technology and Separation Processes*. Butterworth-Heinemann, 2002; S. 947

Wirbelschichtfeuerung (von Biomasse)



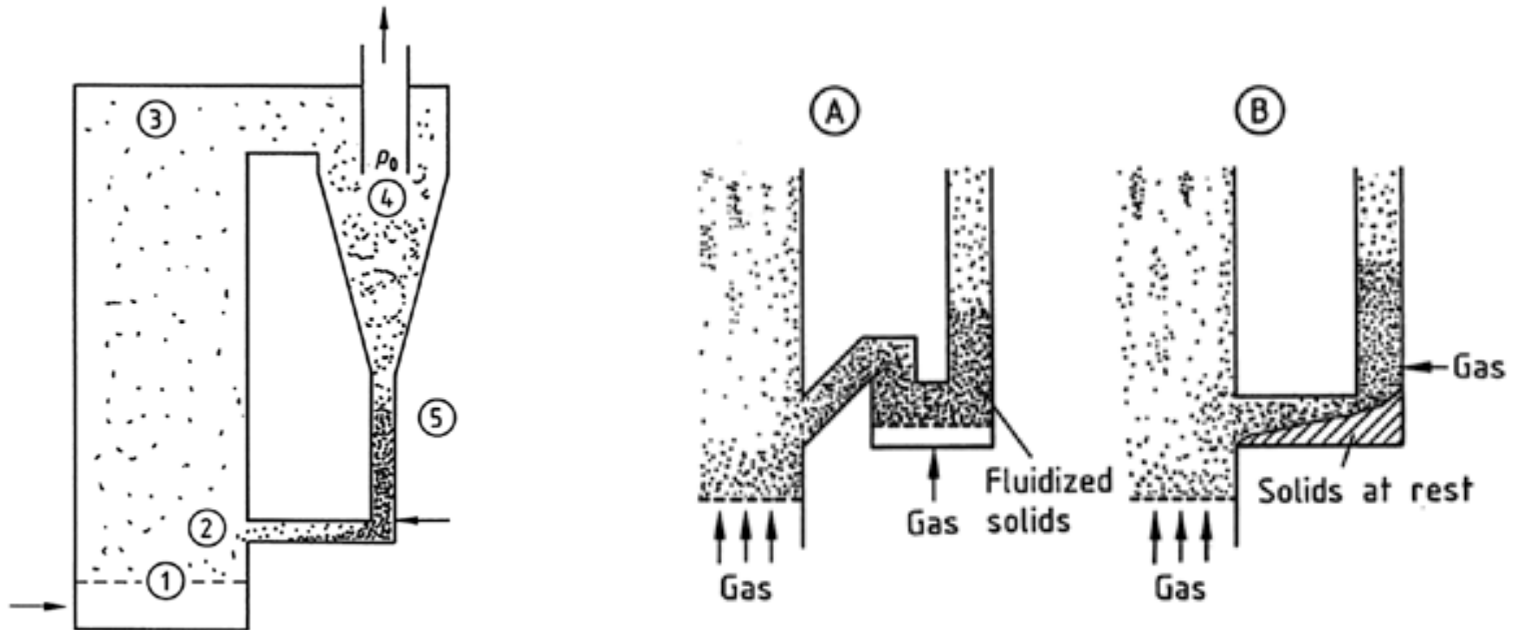
Bildquelle: *Basiswissen Biomasse. Stationäre Wirbelschichtfeuerung.* Biomasse Info-Zentrum, 2001.

Fluid Catalytic Cracking (FCC)



Pant et al. (eds.), *Catalysis for clean energy and environmental sustainability*, Springer, 2021; S. 72

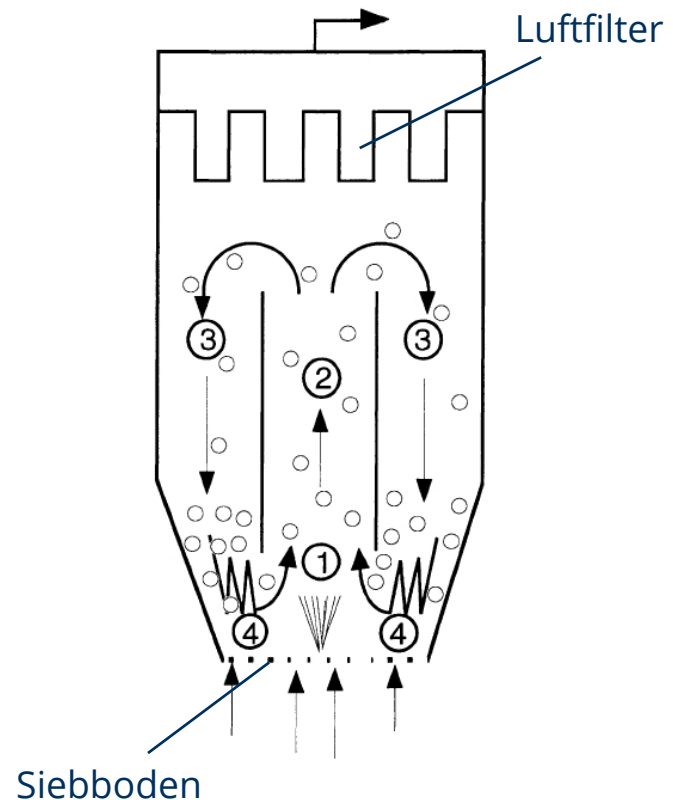
Zirkulierende Wirbelschicht für Gaskatalyse



Bildquelle: *Ullmann's Encyclopaedia of Industrial Chemistry*, 7th ed. Wiley-VCH, 2004.

Zirkulierende WS im Wurster-Rohr

- Anwendung z.B. für Beschichtung von Arzneimitteln (Verkapseln)
- Zonen:
 - (1) aktive Zone (z.B. Beschichtung durch Einsprühen eines Heißwachses)
 - (2) obere Wirbelbettzone
 - (3) Entspannungszone
 - (4) untere Wirbelbettzone



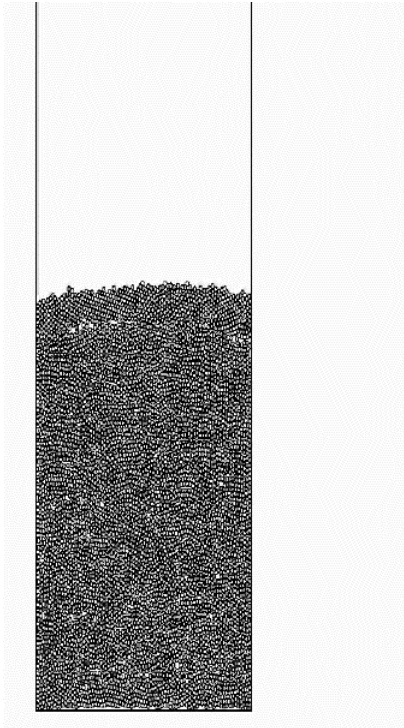
Bildquelle: Teunou & Poncelet, *J. Food Eng.*, 53:325-340, 2002.

6. Durchströmte und fluidisierte Schüttungen

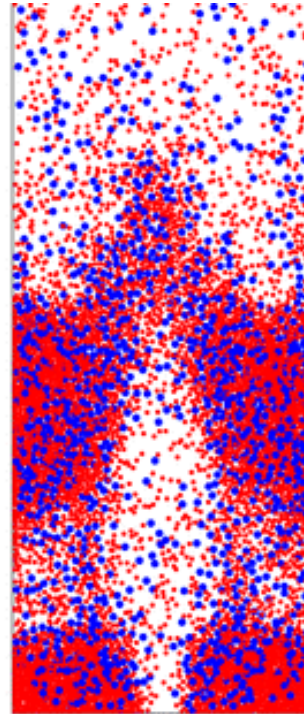
– Erscheinungsformen von Wirbelschichten –

Visualisierte Wirbelschichten: homogen & inhomogen

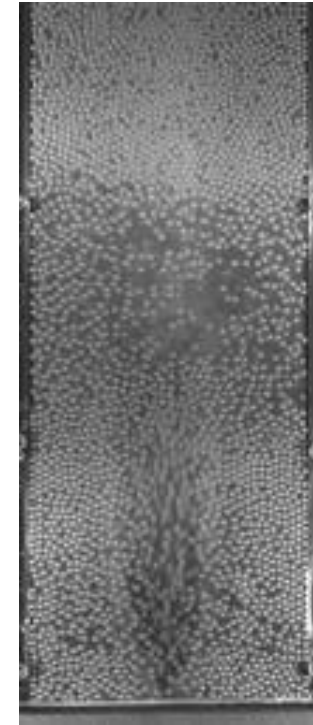
homogen (simuliert)



inhomogen (simuliert)



inhomogen (real)



Bildquellen:

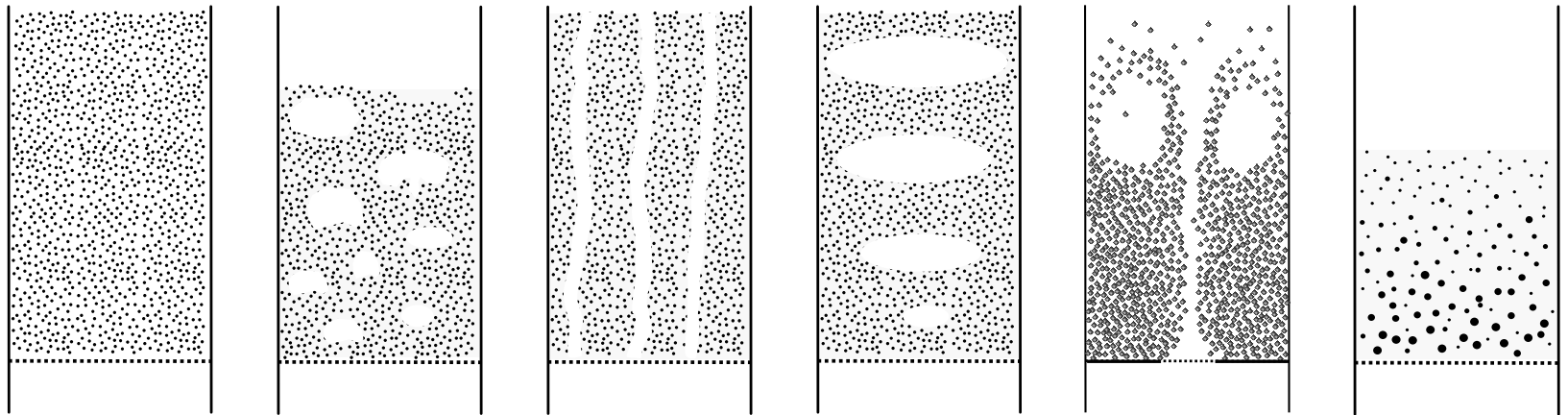
Mao Ye; Jeroen Link (University of Twente)

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

Homogene und inhomogene Wirbelschichten

homogene WS

Erscheinungsformen inhomogener Wirbelschichten



Blasen bildend

Kanal bildend

stoßend

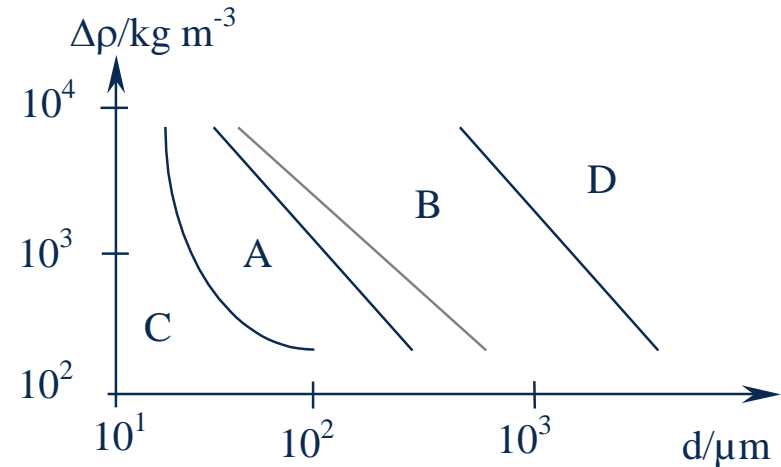
sprudelnd

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

$$\rho_P / \rho_F < 3$$

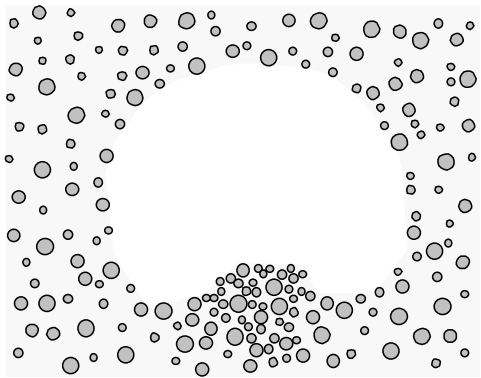
- b) und wenn am Wirbelpunkt, die Strömung von Schwerkraft dominiert bleibt

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

wobei die Kriterien nur für vernachlässigbare Haftkräfte zwischen den Partikeln gelten

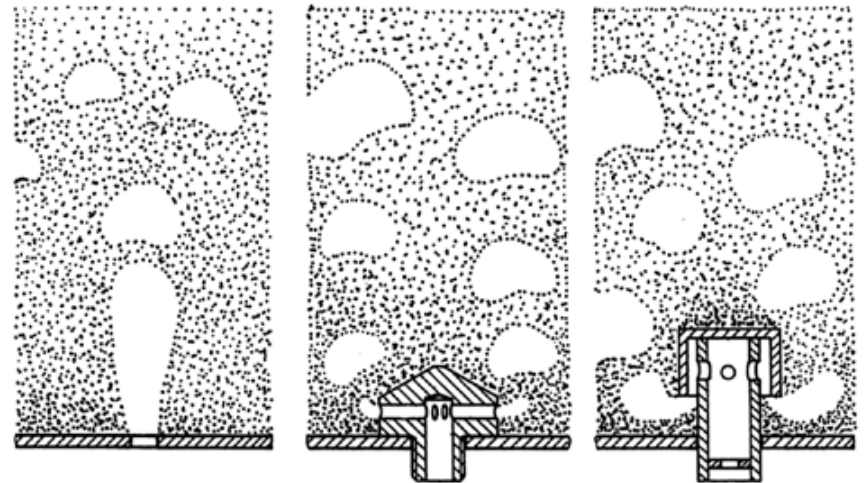
WS-Blasen: Form und Bildung

Typische Blasengestalt:



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

Düseneinfluss auf Blasenbildung:

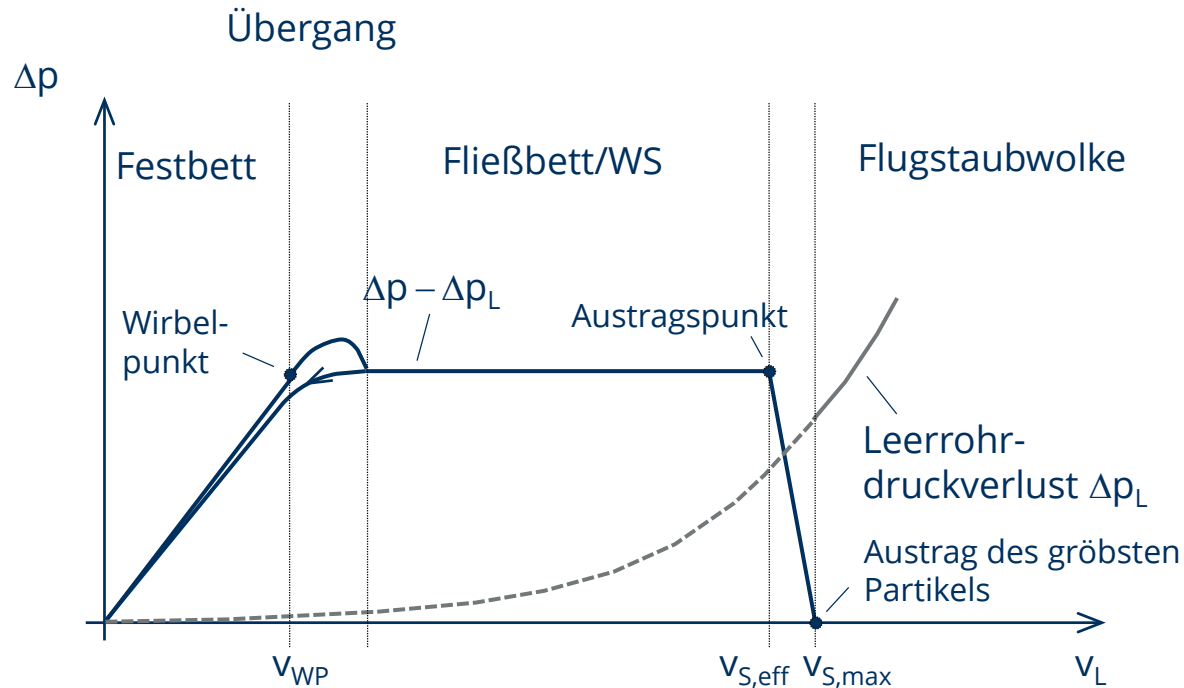


Bauart und Anzahl der Düsen beeinflussen initiale Blasengröße und Blasenverteilung in der Wirbelschicht

6. Durchströmte und fluidisierte Schüttungen

– *Wirbelschichtberechnung* –

Wirbelschicht – Druckverlustdiagramm



- Druckverlustdiagramm:
= Partikel bedingter Druckverlust vs. Leerrohrgeschwindigkeit

Berechnungsgleichungen zur Wirbelschicht

- Druckverlust der WS: $\Delta p_{WS} = (1 - \varepsilon) \cdot g \cdot h \cdot (\rho_P - \rho_F)$
- Druckverlust im Festbett: $\xi = \frac{C}{Re_{Sch}^*} + K$ (z.B. nach Ergun: $C=150, K=1.75$)

wobei: $Re_{Sch}^* = \frac{\rho_F v_F d^*}{(1 - \varepsilon) \eta_F}$ $\xi = \frac{\Delta p \cdot d^*}{\rho_F (v_F / \varepsilon)^2 h_{Sch}} \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}$ $d^* = \frac{6}{S_V} = \Psi \cdot d_{ST}$

- Wirbelpunkt: $Re_{Sch,WP}^* = \sqrt{\left(\frac{C}{2 \cdot K}\right)^2 + \frac{1}{K} \cdot \frac{\varepsilon_{WP}^3}{(1 - \varepsilon_{WP})^2} \cdot Ar} - \frac{C}{2 \cdot K}$

- Ausdehnung homogener WS

- nach Richardson & Zaki gilt für Schwarm sedimentation & WS: $v_{S,eff} / v_{S,P} = \varepsilon^n$

- daraus folgt: $\frac{h(v_F)}{h_{WP}} = \frac{1 - \varepsilon_{WP}}{1 - \varepsilon(v_F)} = \frac{1 - \varepsilon_{WP}}{1 - (v_F / v_{S,P})^{1/n}}$ $n = \text{funct.}(Re)$

Approximation der R-Z-Daten mit $\frac{n_{Stokes} - n}{n - n_{Newton}} = 0.175 \cdot Re_P^{0.75}$ bzw. $n = \frac{4.65 + 0.418 \cdot Re_P^{0.75}}{1 + 0.175 \cdot Re_P^{0.75}}$

falls $v_S \sim x^y$ dann gilt nach Maude & Withmore $n = 1.55 \cdot (y + 1)$ bzw. $n = 4.65 / (2 - A)$

6. Durchströmte und fluidisierte Schüttungen

– Zustandsdiagramme von Wirbelschichten –

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:

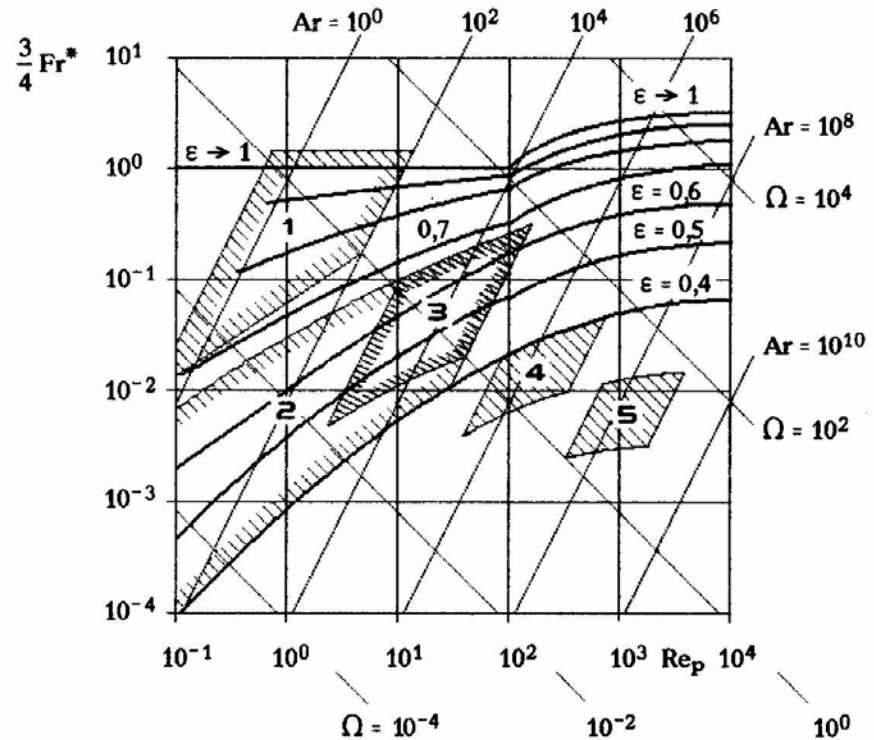
$$Fr^* = \frac{v_F^2}{g \cdot d^*} \cdot \frac{\rho_F}{\Delta\rho} = \frac{Re_P^2}{Ar} = \frac{\Omega}{Re_P}$$

- Wirbelbettporosität:

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

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

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



- | | | | |
|----------|--------------------------------------------|----------|--------------------|
| 1 | Zirkulierende Wirbelschicht | 4 | Moving bed |
| 2 | niedrig expandierte Wirbelschichten | 5 | Schachtofen |
| 3 | Wirbelschichtrostung | | |

Beispiel für Nutzung des REH-Diagramms

Fluidisierung eines Kunststoffgranulates in Luft

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

- Vorgaben:

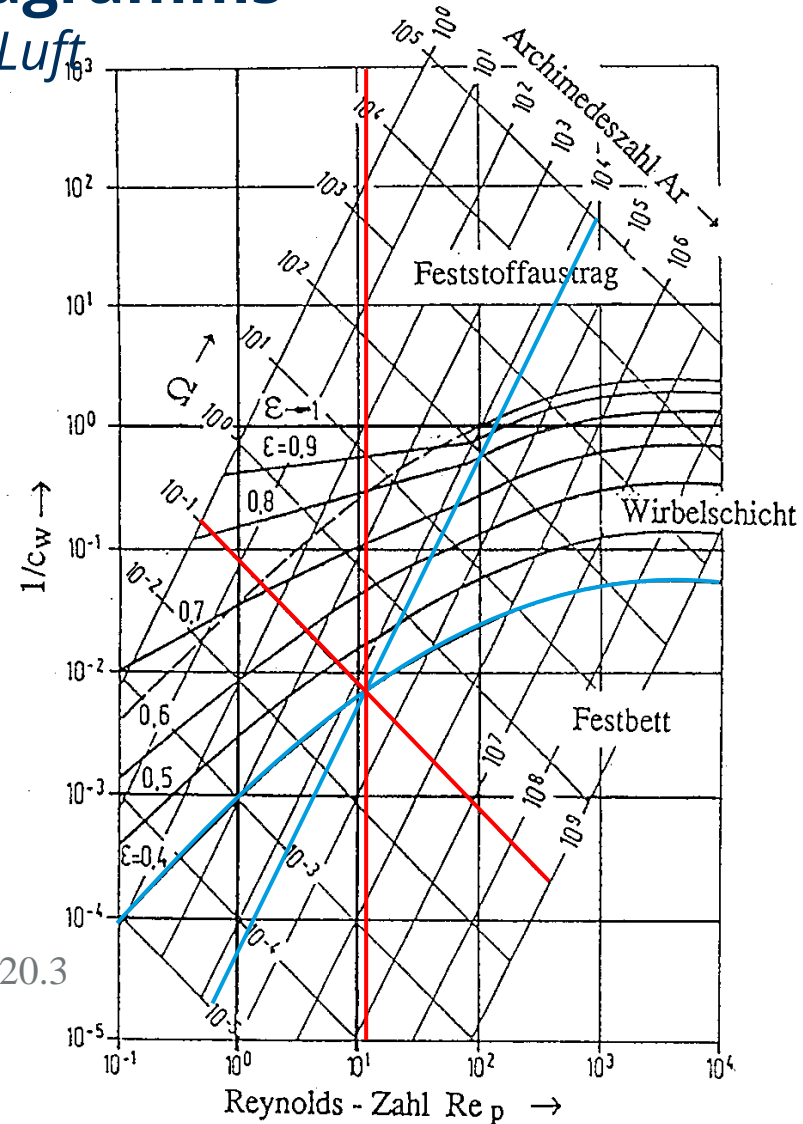
- Archimedes-Z.: $Ar = \frac{g\Delta\rho\rho_L x^3}{\eta_L^2} = 21151$
- Porosität: $\varepsilon = 0.4$

- Ablesen:

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

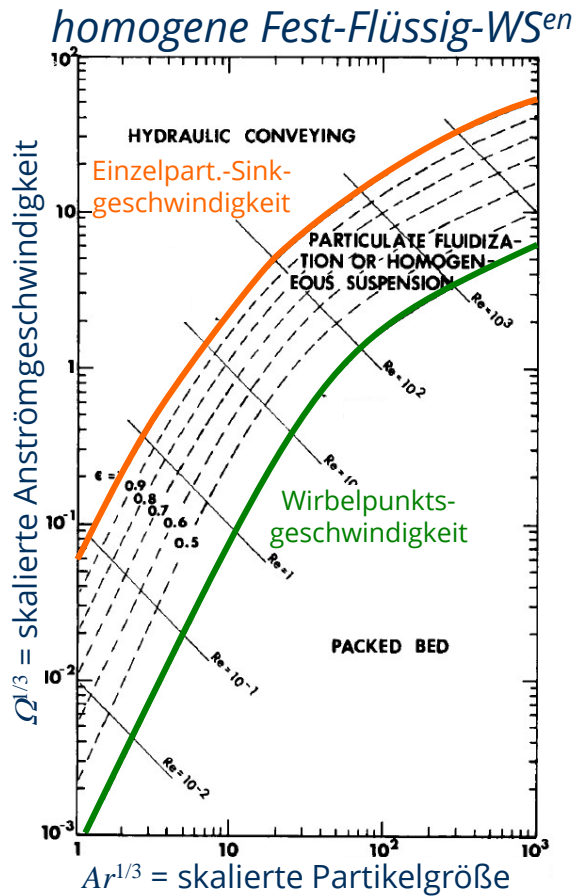
- Berechnung

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

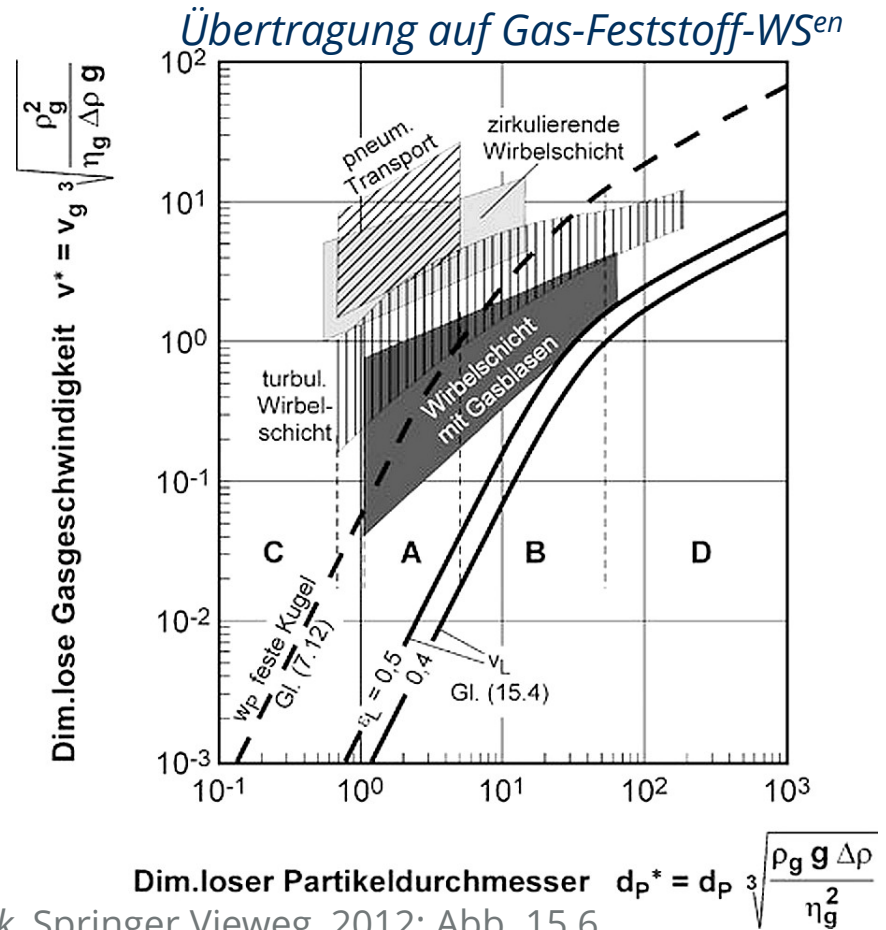


Zustandsdiagramme nach GRACE

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



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



6. Durchströmte und fluidisierte Schüttungen

– *Überblick zum pneumatischen Transport* –

Pneumatischer Transport – Einführung

= kontinuierlicher Transport trockener disperser, rieselfähige Feststoffe in einem Gasstrom

- Förderbedingung:

- vertikaler Transport: $v_F > v_S$

- Anwendungen:

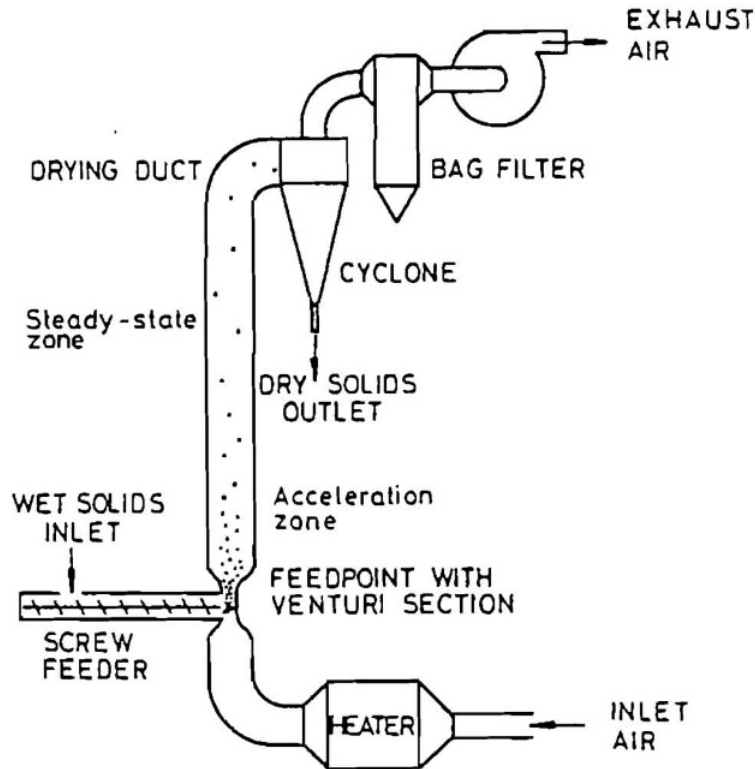
- Partikelgrößen: 50 μm ... 10 mm
- Fördergeschw.: 0.1 m/s ... 50 m/s
- Gutbeladung: $\mu = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_L} = 0,1 \dots 150 \frac{\text{kg Gut}}{\text{kg Luft}}$
- z. B. Waschpulver, Salze, Getreide, Hülsenfrüchte, Nüsse, Düngemittel, Zement, Sand, Ruß, Pigmente, Tabletten, ...

- kombinierbar mit Wärme- und Stoffaustauschprozessen

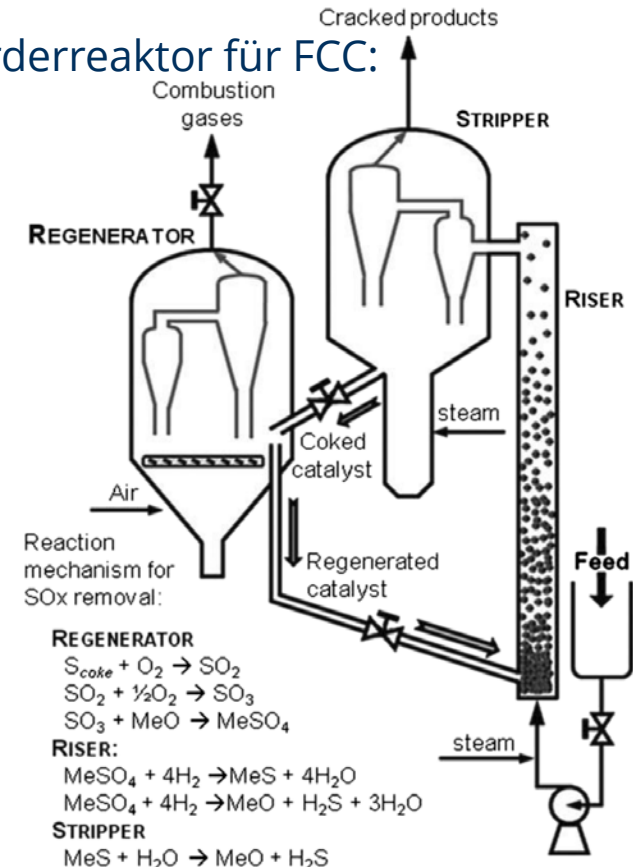
- wie Kühlen oder Trocknen des Fördergutes
- chemische Reaktionen (Flugstromvergaser, FCC im Förderstrom)

Pneumatischer Transport mit Stoffwandlung

Pneumatische Trocknung:



Förderreaktor für FCC:



Kemp et al., *Drying Technol.*, 12(1-2):279-297, 1994; doi: 10.1080/07373939408959957

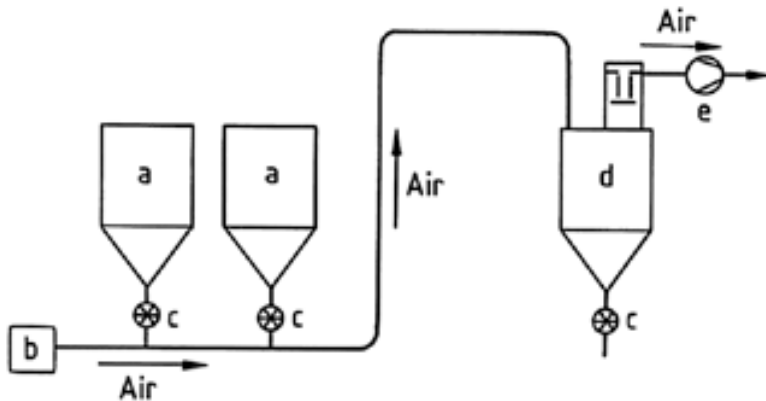
Chaillot et al., *Waste Biomass Valorization*, 28:24375-24405, 2021; doi: 10.1007/s11356-020-08498-6

Pneumatischer Transport – Vor+Nachteile

- Vorteile:
 - einfache, flexible, leicht automatisierbare Anlagen
 - Produktweiterbehandlung
 - Schutzgasförderung
 - Vermeidung von Kontamination (Hygiene)
 - Einkapselung von Staub (Arbeitsschutz)
- Nachteile:
 - erhöhter Investitionsbedarf (z.B. gegenüber Bandförderanlagen)
 - hoher spezifischer Energiebedarf
 - ggf. Partikelerosion
 - ggf. Apparateverschleiß

Pneumatische Förderanlagen

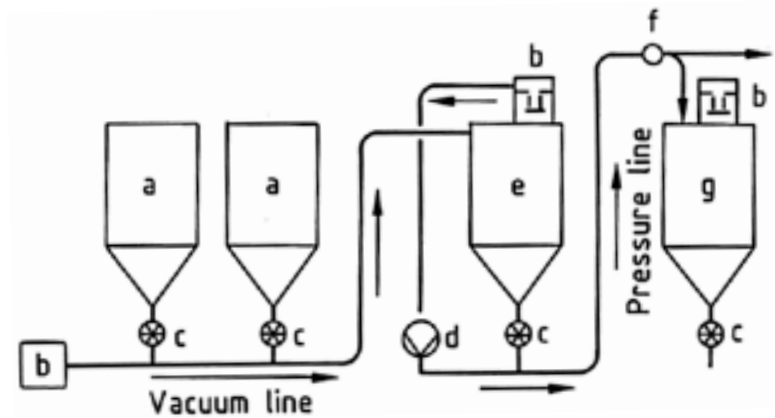
Saugförderung:



pneumatische Saugförderanlage

- mehrere Dosierer, ein Empfangssilo,
- begrenztes $\Delta p \rightarrow$ begrenzte Förderstrecke
- kein Produktverlust

Saug-Druckförderung:



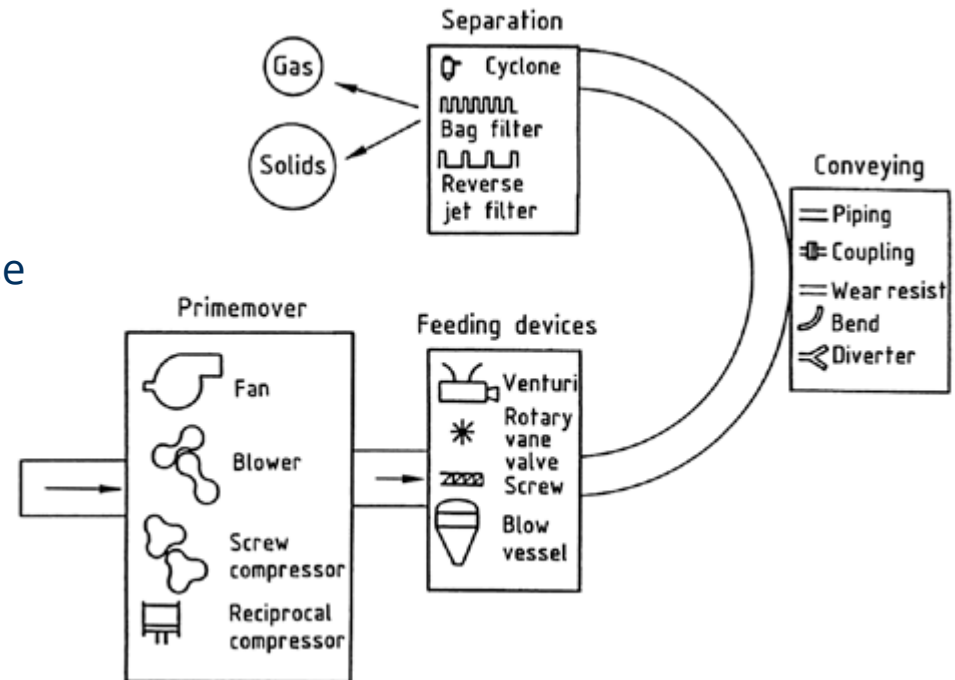
Saug-Druckförderanlage

- mehrere Dosierer, mehrere Empfangssilos
- hohes $\Delta p \rightarrow$ lange Förderstrecke
- kein Produktverlust

Bildquelle: *Ullmann's Encyclopaedia of Industrial Chemistry*. 7th ed. Wiley-VCH, 2004

Komponenten pneumatischer Förderanlagen

- Druckerzeuger
 - Gebläse, Kompressor
 - Vakuumpumpe
- Dosierapparate
 - Druckkessel
 - Förderschnecke, Zellschleuse
- Leitungen
 - Rohrleitungen, Schläuche
 - Krümmer, Verteiler
- Abtrennung
 - Aerozyklon
- Entstaubung
 - Beutelfilter



6. Durchströmte und fluidisierte Schüttungen

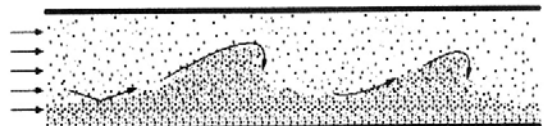
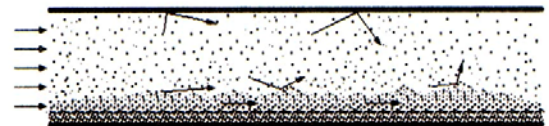
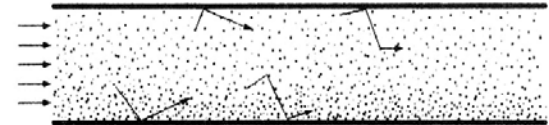
– *Förderzustände beim pneumatischen Transport* –

Einteilung der Förderzustände

- Unterscheidung nach Transportrichtung
 - Horizontalförderung
 - Vertikalförderung
- nach Bewegung der Partikel
 - Dünnstromförderung: individueller Transport aller Partikel in Gasphase
 - Dichtstromförderung: zumindest teilweise kollektiver Transport als Düne, Ballen etc.
- nach Verteilung der Partikel über Rohrquerschnitt:
 - abhängig von Leerrohrgeschwindigkeit v_F und Gutbeladung μ
→ s. nächste Folien

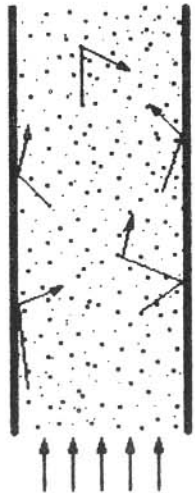
Pneumatische Förderzustände

- Flugförderung
 - Partikel gleichmäßig über Querschnitt verteilt
 - $v_F = 20 \dots 40 \text{ m/s}$, $\mu = 0.1 \dots 10$, $\varepsilon \geq 98\%$
 - stabile Förderung, über große Strecken, relativ niedrige Δp
- Strähnenförderung
 - neben Flugförderung bewegte Strähnen an Rohrwand
 - $v_F = 20 \dots 30 \text{ m/s}$, $\mu = 10 \dots 50$
 - z.T. Strähnenförderung mit ruhender Ablagerung
- Ballen- und Dünenförderung
 - langsam bewegte Haufen (*Ballen*) bis hin zu Dünen mit hohem Anteil unbewegter Partikel
 - $v_F = (0.1)1 \dots 25 \text{ m/s}$, $\mu = 20 \dots 50$
 - instabil \rightarrow Wechsel der Förderzustände o. Verstopfung möglich
- Pfropfenförderung
 - abschnittsweise Verstopfung \rightarrow *Pfropfen*
 - $v_F = 1 \dots 5 \text{ m/s}$, $\mu = 30 \dots 150$
 - Wandreibung des Pfropfen überwunden werden
 - Verstopfungsgefahr (insbesondere kohäsive Güter)

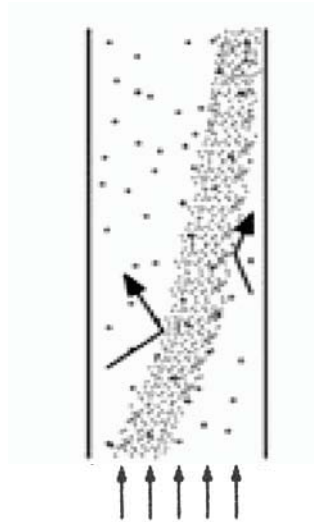


M. Stieß, *Mechanische Verfahrenstechnik 2*, Springer, 1994; S. 364 f.

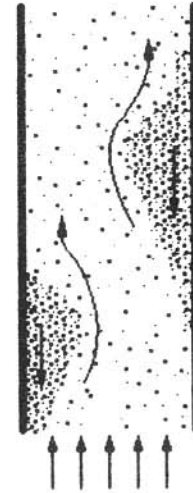
Pneumatische Förderzustände – vertikal



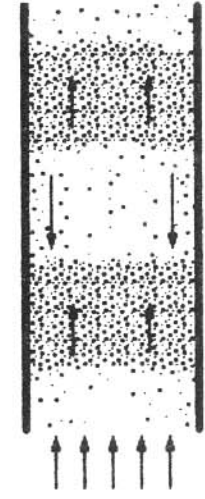
Flugförderung



Strähnenförderung



Ballenförderung



Pfropfenförderung

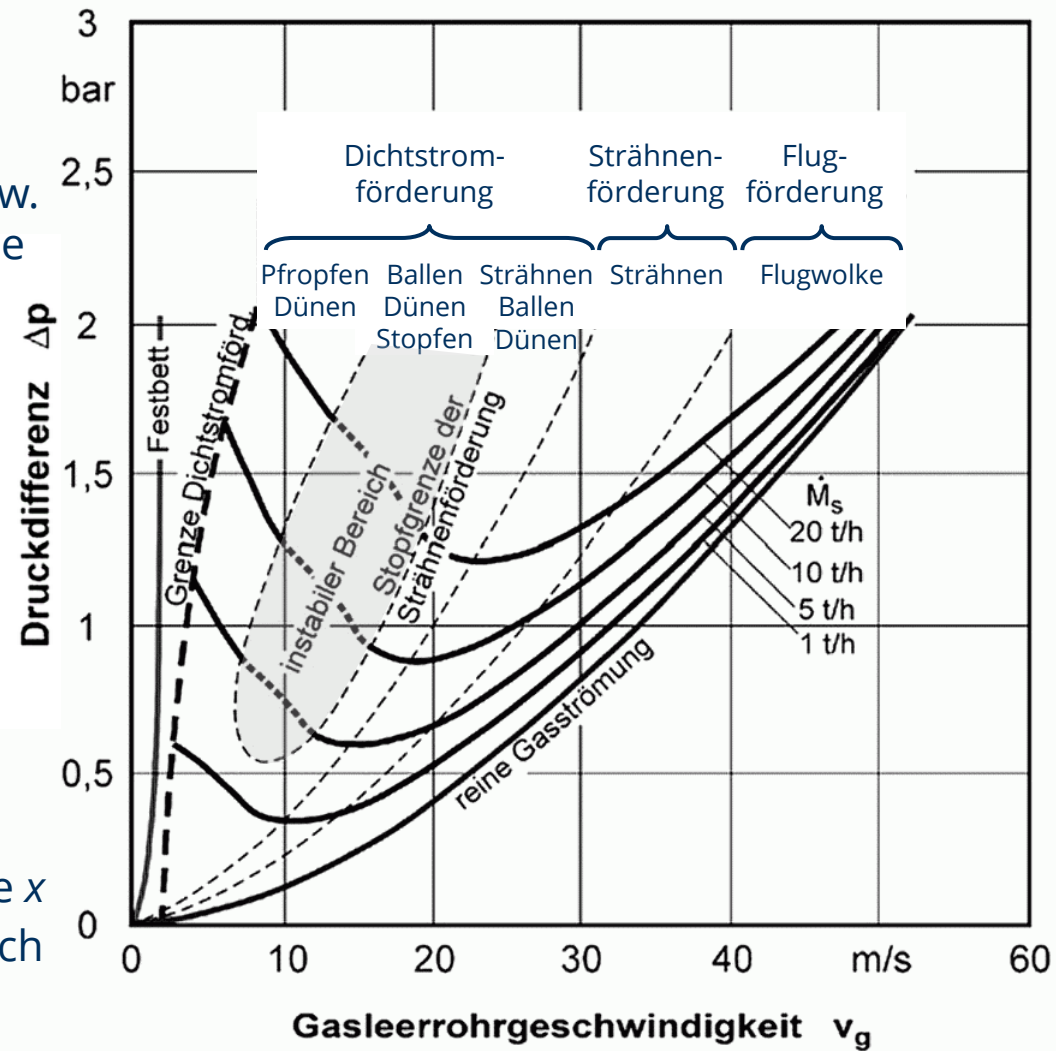
M. Stieß, *Mechanische Verfahrenstechnik 2*; Springer, **1994**; S. 365.

M. Kraume, *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik*, Springer, **2012**; S. 510

H.-J. Herrmann: <http://www.icp.uni-stuttgart.de/movies/>

Zustandsdiagramm pneumatischer Förderung

- Darstellung
 - Druckverlust vs. Leerrohrgeschw. für gegebene Gutmassenströme
- Aussagen:
 - Δp steigt mit Gutstrom (\dot{M}_s)
 - Kurve $\Delta p(v_F)$ mit Minimum
 - $v_F < v_{F,min}$:
 $v_F \downarrow \rightarrow$ mehr Ablagerung $\rightarrow \Delta p \uparrow$
 - $v_F > v_{F,min}$:
 $v_F \uparrow \rightarrow$ mehr Turbulenz $\rightarrow \Delta p \uparrow$
 - instabiler Bereich für kleine v_F
 \rightarrow Stopfgrenze
- Praxis:
 - Bereiche abh. von Partikelgröße x
 - kleine x : breiter instabiler Bereich



M. Kraume, *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik*; Springer, 2012; S. 509.

Einordnung und Vergleich der Förderzustände

- je höher μ , desto günstiger spezifischer Luftverbrauch, aber desto höher Verstopfungsgefahr
- je niedriger v_F , desto geringer Partikelabrieb und Apparateverschleiß, d.h.
 - Flugförderung → abriebfeste Materialien (z.B. Salz, Mehl)
 - druckempfindliche Materialien (z.B. Granulate, beschichtete Partikel) → Pfropfenförderung (1...5 m/s, $\mu = 30...150$) oder vibrationsgestützte Dünenförderung mit sehr niedrigem v_F (0.1...1 m/s, $\mu = 30...50$)
- maximaler Leistungsverbrauch ($\Delta p_v \cdot \dot{V}$) bei Flugförderung und Verstopfung
- Leistungsminimum für Dichtstromförderung → Maßnahmen zur Stabilisierung dieser Strömungszustände
- Vertikalförderung:
 - in vielen ähnlich wie Horizontalförderung
 - geringeres $v_{F,Stopf}$ und geringeres Δp als Horizontalförderung
- Materialeinfluss (Größe, Form, Dichte)
 - auf Bereichsgrenzen und Ausprägung (Düne, Ballen, etc.)
 - auf Wandreibung und Verstopfungsgefahr (kritisch: feine Partikel < 350 μ m)

6. Durchströmte und fluidisierte Schüttungen

– Pfropfenförderung –

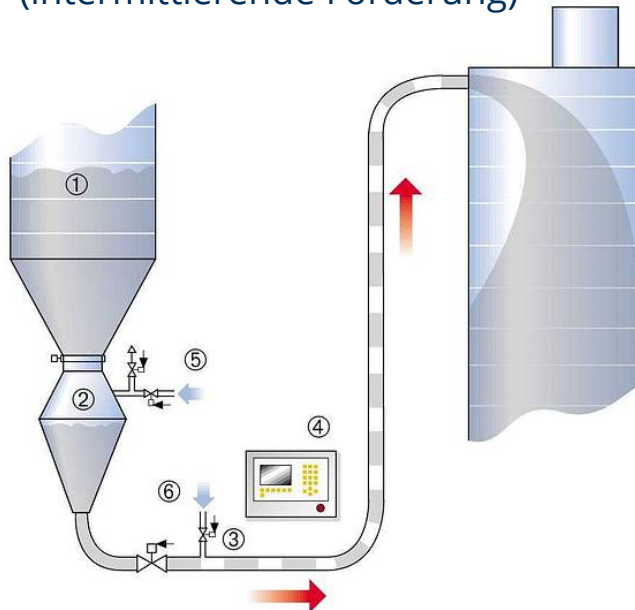
Anwendung der Pfpfenförderung

- Produktspektrum:
 - rieselfähige Pulver, grobkörnige Güter und Granulate (z.B. Milchpulver, Kunststoffpellets, Sprühgranulate)
 - für druckempfindliche Produkte (z.B. Instantgetränke-Granulate)
 - möglichst nicht komprimierbar
- Vergleich mit Flugförderung:

Vorteile	Nachteile
schonend für Fördergut	höherer Druckverlust
geringerer Verschleiß der Rohrwände und Krümmer	Gefahr der Stopfenbildung → entsprechende Einbauten und Druckreserve
geringerer Förderluftvolumenstrom	höhere Investitionskosten
kleinere Entstaubungsanlagen	stabile Pfpfen nur über relativ kurze Strecken erreichbar
Entmischung des Fördergutes (partiell) vermeidbar	Auslegung erfordert umfangreiche Materialkennzeichnung
Reduzierung des Geräuschpegels	

Realisierung von Pfropfenförderung

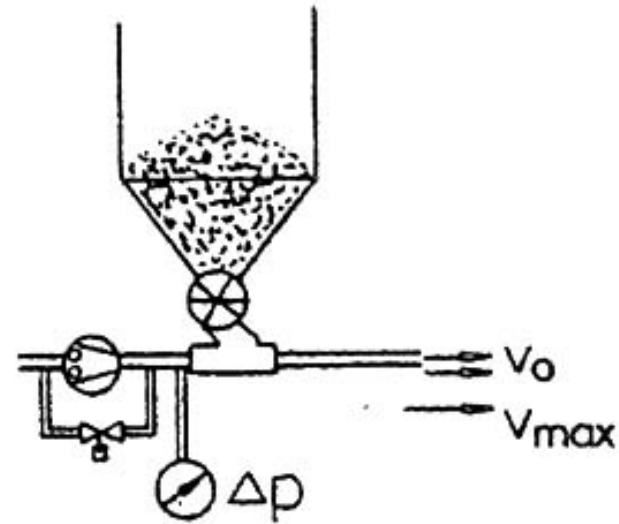
Impulsverfahren:
(intermittierende Förderung)



- stetig ausströmende Schüttgutsäule
- Propfenbildung durch Luftimpulse
- Nachteil: ständig wiederkehrende Beschleunigung aller in der Leitung befindlichen Pfropfen

Fa. Gericke: *Prospekt Nr. 622*

Takt-Schub-Förderung:



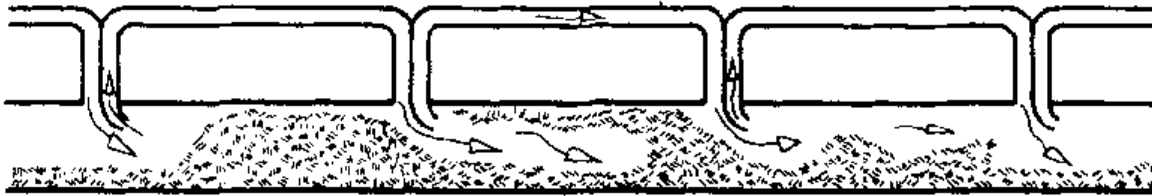
- stetig ständig durchströmt Förderleitung
- intervallweise Zuführung der Schüttgutsäule aus dem Aufgabebehälter → kurze Pfropfen
- sehr gut geeignet für kurze Förderstrecken

W. Krambrock, *Verfahrenstechnik*, 12 (4):191-201, 1978.

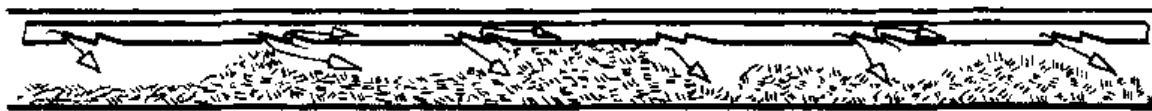
Stopfenauflösung mit Hilfe von Umgehungsluft

(d.h. kein Bedarf nach einer zusätzlichen Druckluftversorgung)

Umgehung von Stopfen durch externe, periodische Bypassleitungen



Umgehung von Stopfen durch interne Rohrleitungen

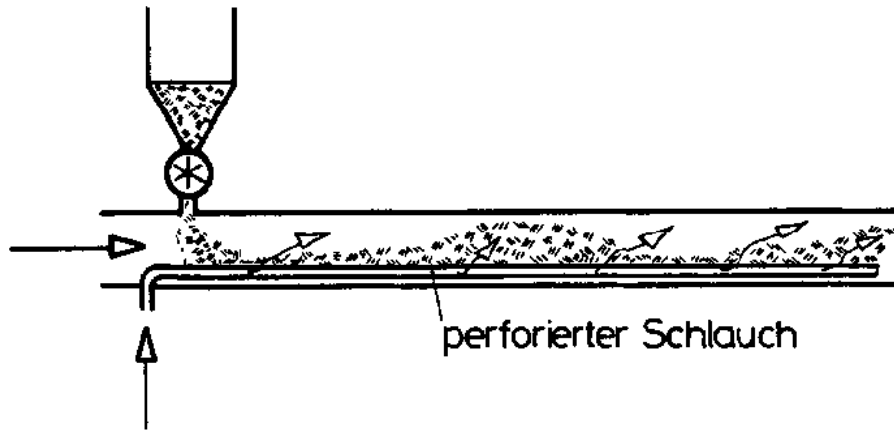


Bildquelle: W. Krambrock, *Chemie Ingenieur Technik*, 54(9):793-803, 1982.

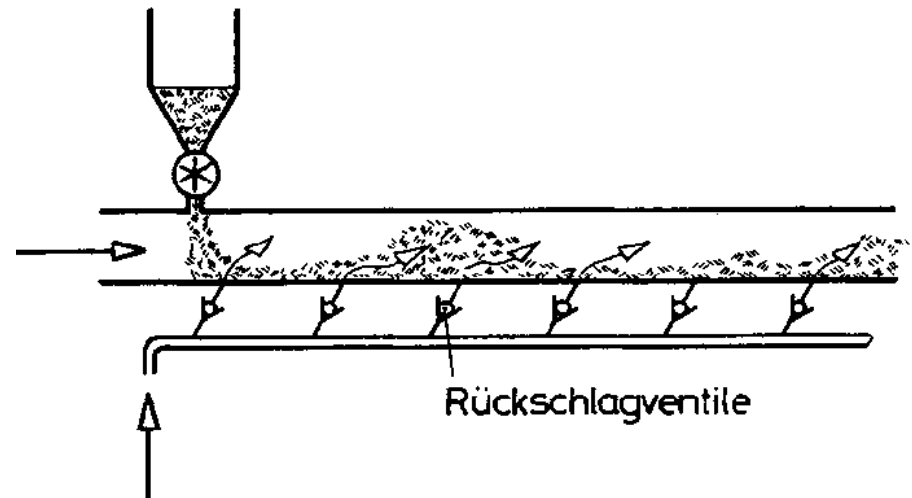
Stopfenauflösung mit Hilfe von Zusatzluft

(d.h. mit zusätzlichem Luftreservoir oder Kompressor)

Einblasen der Zusatzluft über perforierte Schläuche

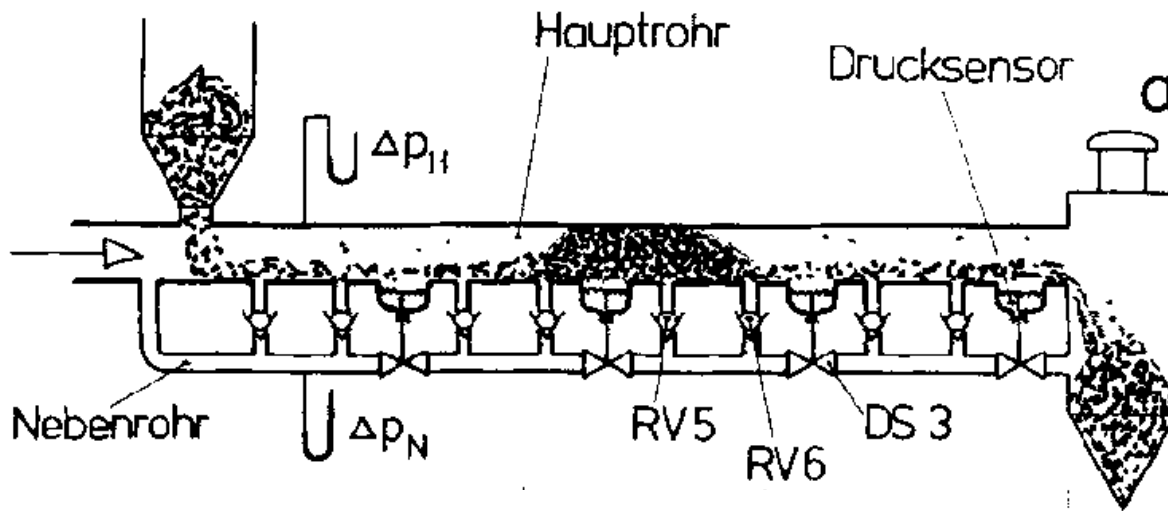


Einblasen der Zusatzluft über Rückschlagventile an festen Stellen



Bildquelle: W. Krambrock, *Chemie Ingenieur Technik*, 54(9):793-803, 1982.

Apparativer Aufwand für Zusatzluft



Bildquelle: W. Krambrock, *Chemie Ingenieur Technik*, 54(9):793-803, 1982.

6. Durchströmte und fluidisierte Schüttungen

– Literaturhinweise –

Literatur zu Kapitel 6

Festbettdurchströmung:

- M. Stieß: *Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1*. Springer, **2009**; [doi:10.1007/978/3-540-32552-9](https://doi.org/10.1007/978/3-540-32552-9)
→ Kap. 4.5
- 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. 3.2.1

Wirbelschicht:

- 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. 3.2.2

pneumatischer Transport:

- 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. 11.2
- M. Kraume, *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik. Grundlagen und apparative Umsetzungen*; 3. Auflage. Springer Vieweg, **2020**; [doi:10.1007/978-3-662-60012-2](https://doi.org/10.1007/978-3-662-60012-2);
→ Kap. 16