

Strömungsprobleme der Mechanische Verfahrenstechnik

Folien zur Vorlesung

NUR ZUM PERSÖNLICHEN GEBRAUCH!

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

7. Wirbelschichten

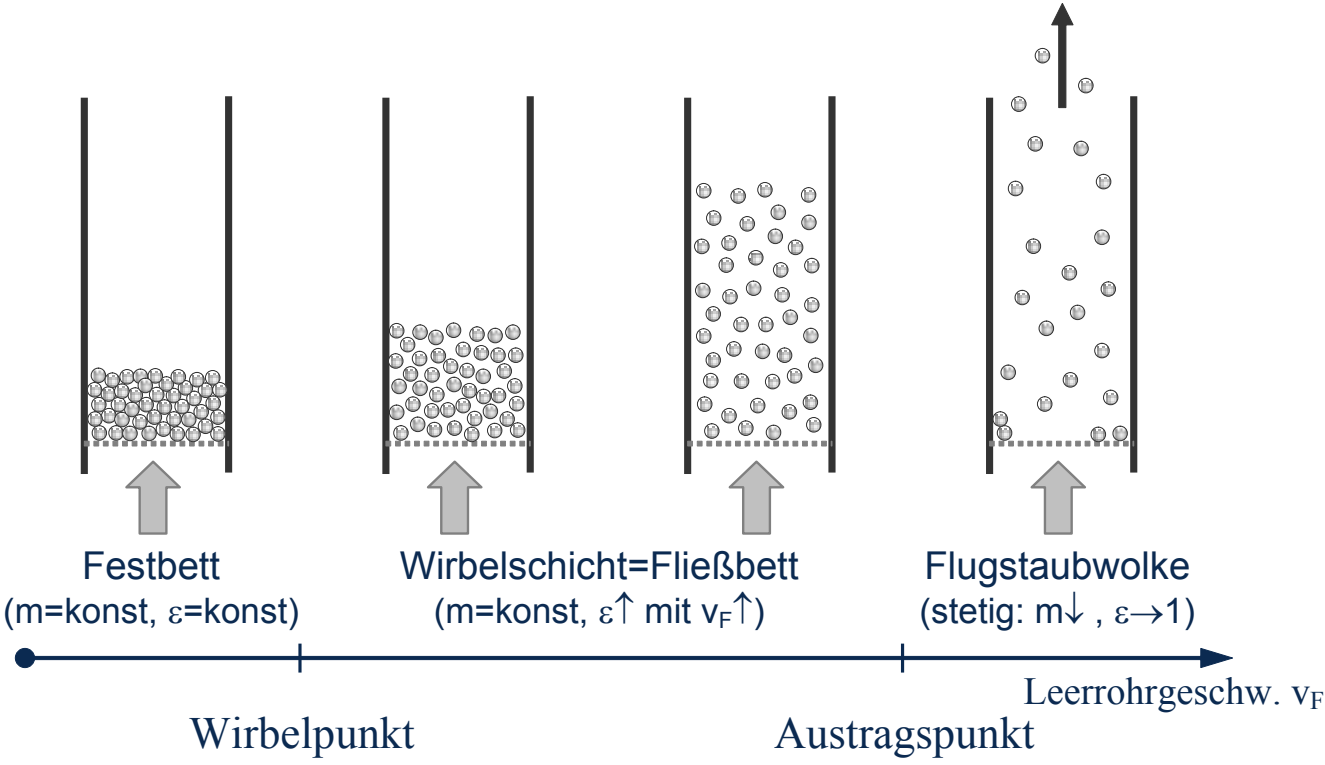
Lernziele zu Kapitel 7

- Wissen:
 - Unterscheidung homogene & inhomogene Wirbelschicht
 - technische Anwendungen der Wirbelschicht
- Fähigkeiten:
 - Berechnung von Wirbel- und Austragspunkt
 - Analytische Abschätzung der Wirbelschichtparameter
 - Nutzung von Zustandsdiagrammen zur Wirbelschicht
 - Vorhersage des Wirbelschichtverhaltens

7.1 Wirbelschichten

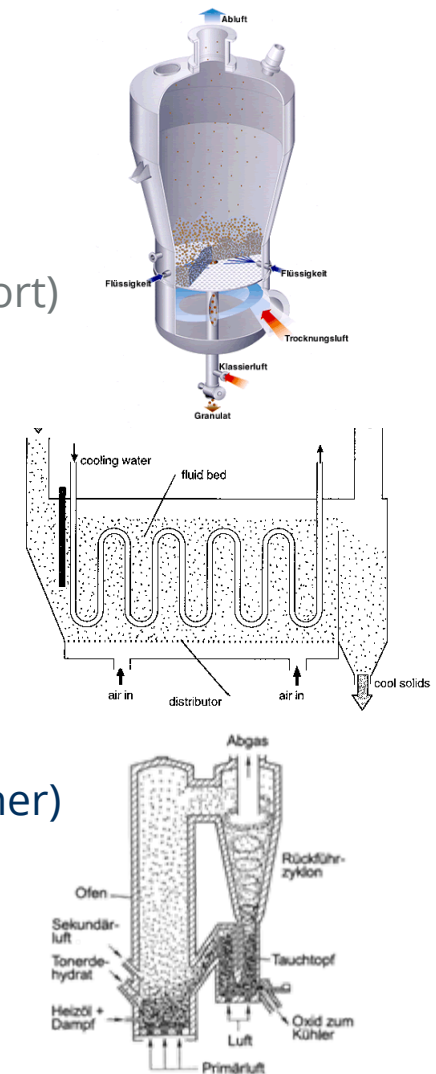
- Einführung -

Durchströmte Schüttungen



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

7.2 Wirbelschichten

- Technische Anwendungen -

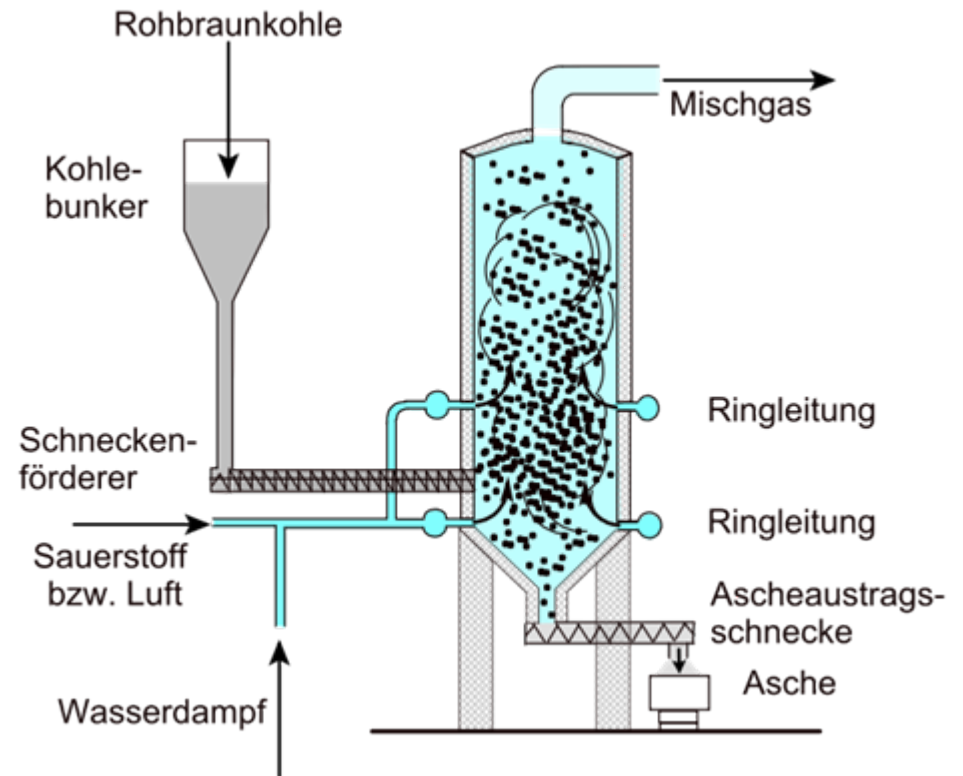
Anwendungen von Wirbelschichten

- 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

Winklergenerator zur Kohlevergasung

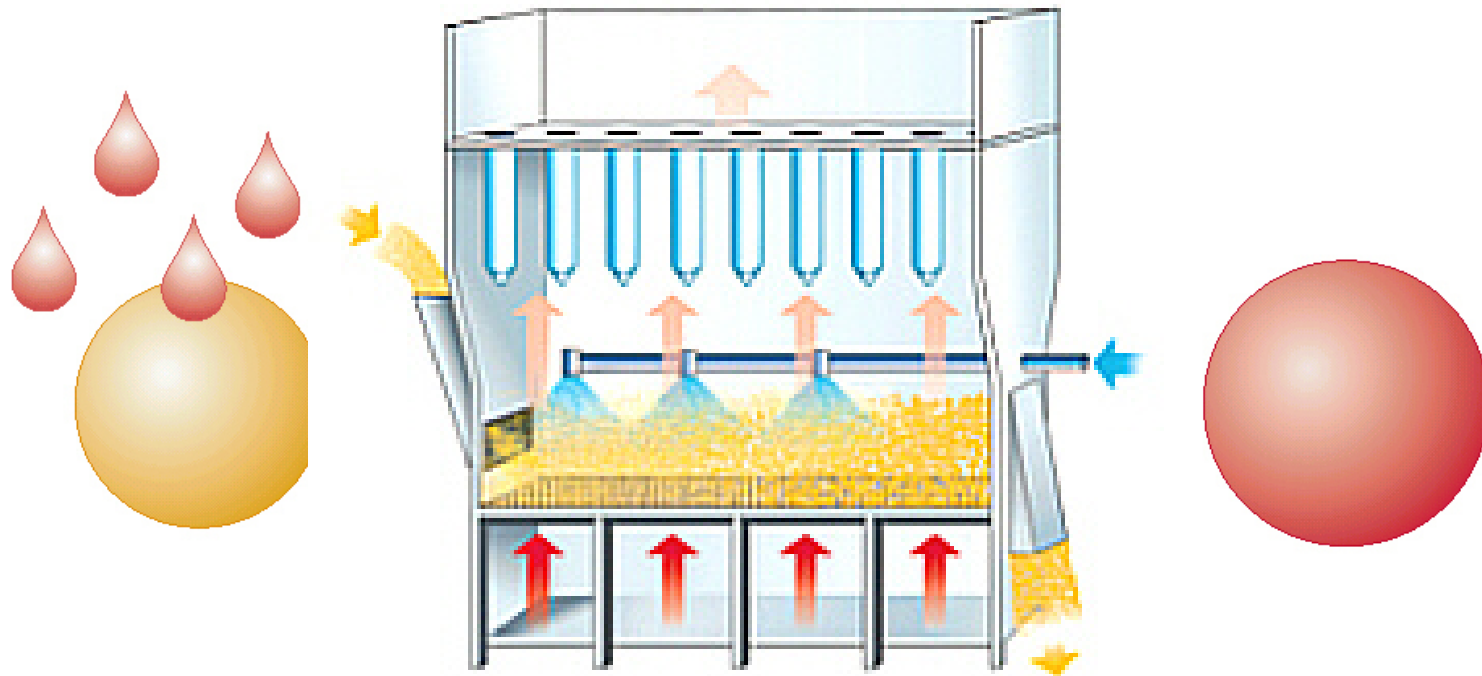
- erste technische Anwendung der Wirbelschicht (1926)
- Ziel:
Gewinnung von Synthesegas (H_2+CO) aus Braunkohle
- Reaktion:
$$C + O_2 + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2 + CO + CH_4$$

(Mischgas)



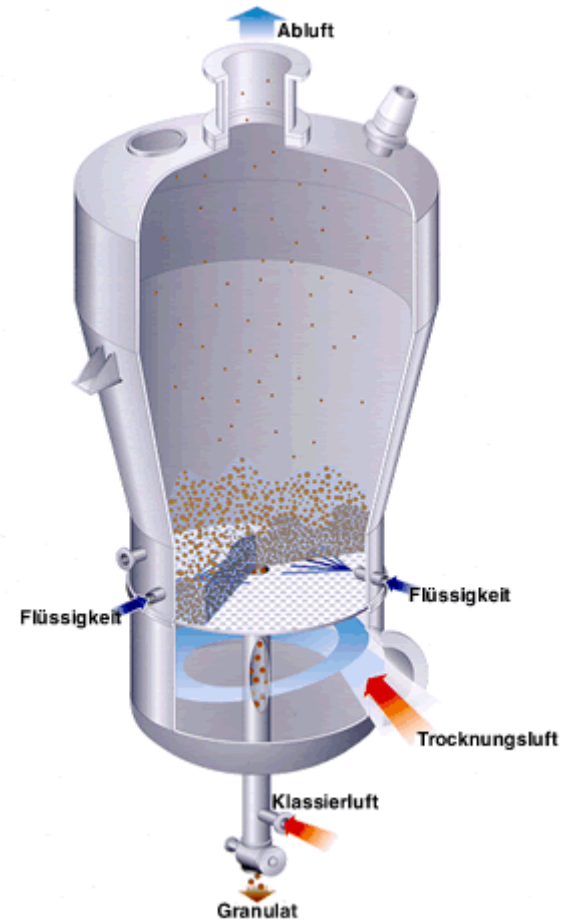
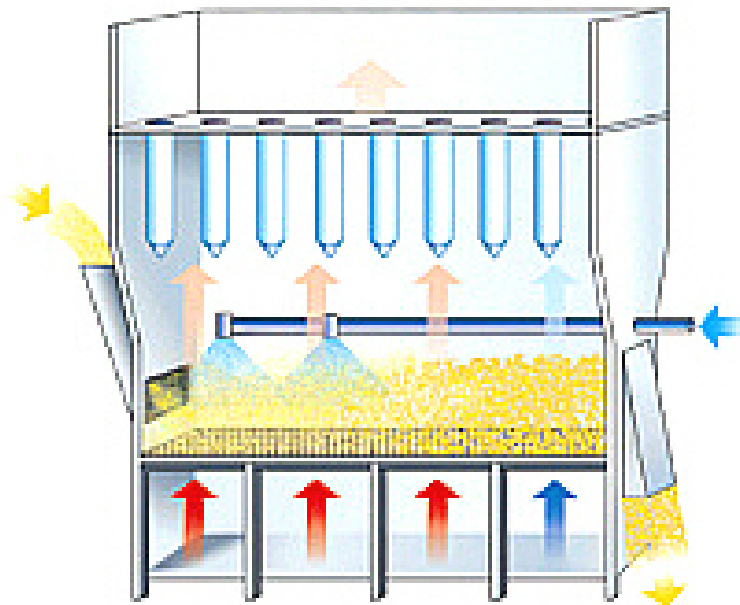
Bildquelle: commons.wikimedia.org/wiki, CC Roland Mattern

Wirbelschicht - Beschichtung



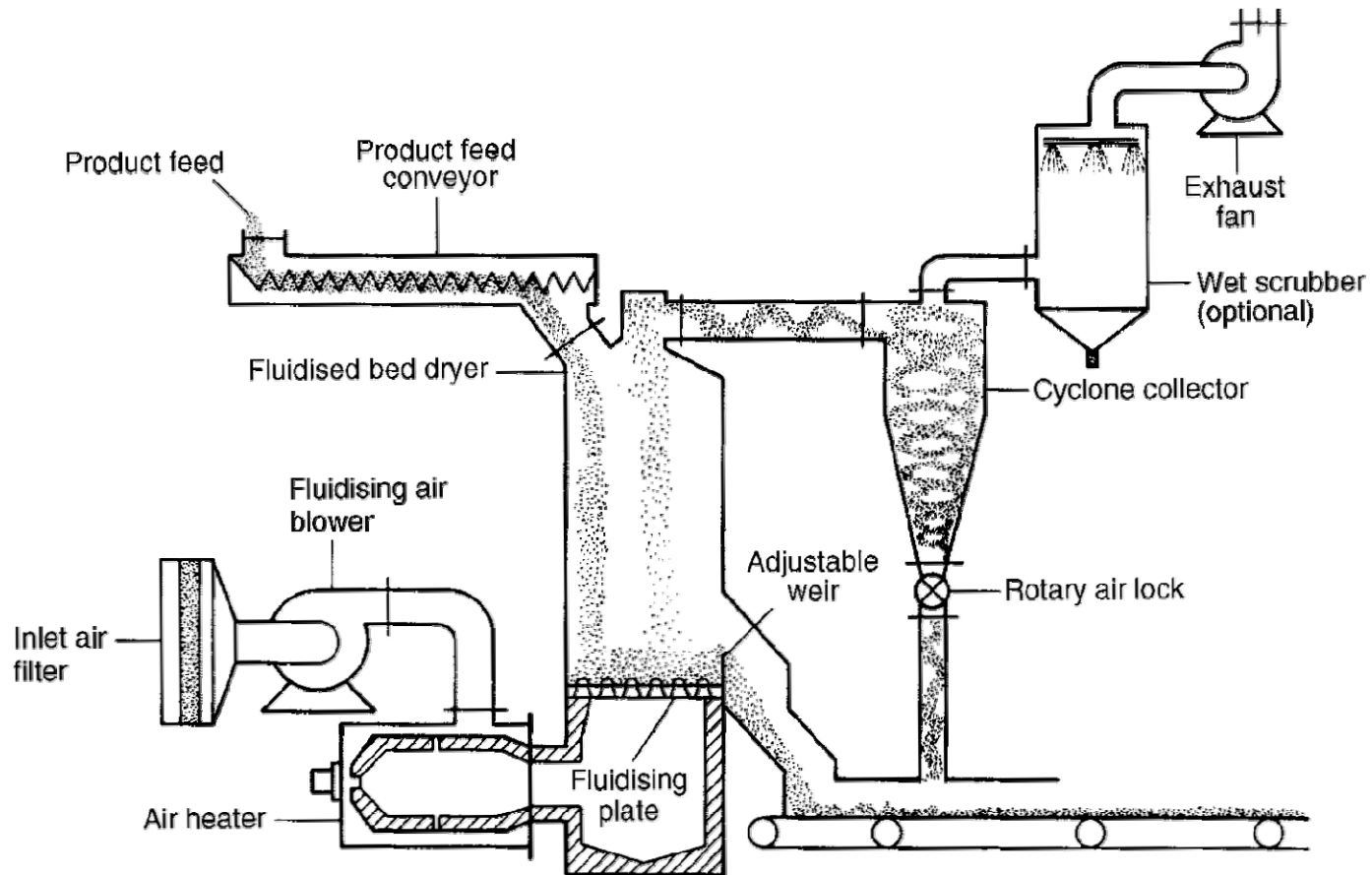
Bildquelle: *Kontinuierliche Wirbelschichtprozesse*. Glatt® Ingenieurtechnik GmbH, 2002.

Wirbelschicht - Agglomeration



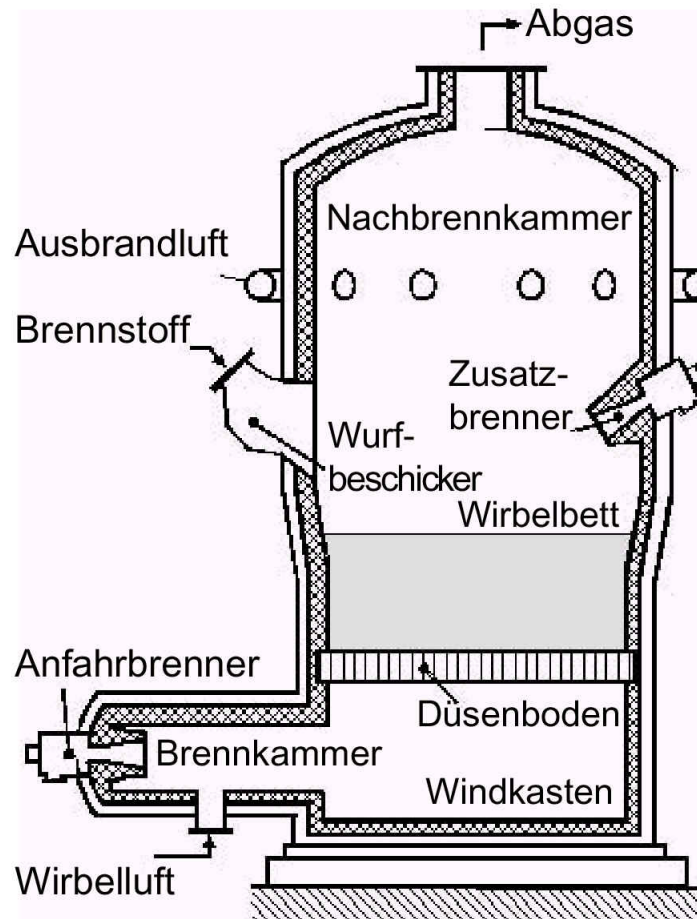
Bildquelle: *Kontinuierliche Wirbelschichtprozesse*. Glatt® Ingenieurtechnik GmbH, 2002.

Wirbelschichttrocknung



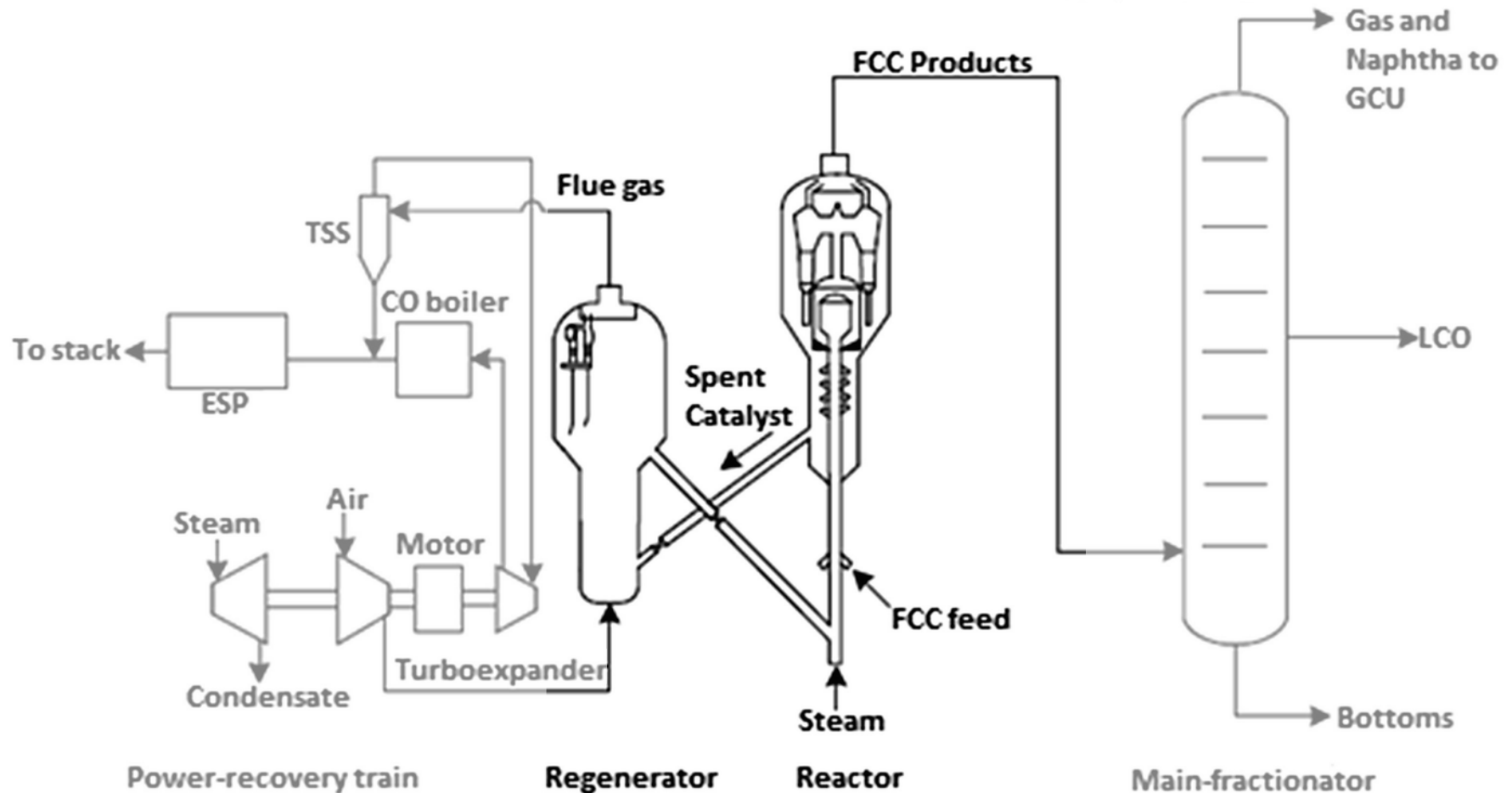
Richardson et al., *Particle Technology and Separation Processes*. Butterworth-Heinemann, 2002; S. 947

Wirbelschichtfeuerung (von Biomasse)



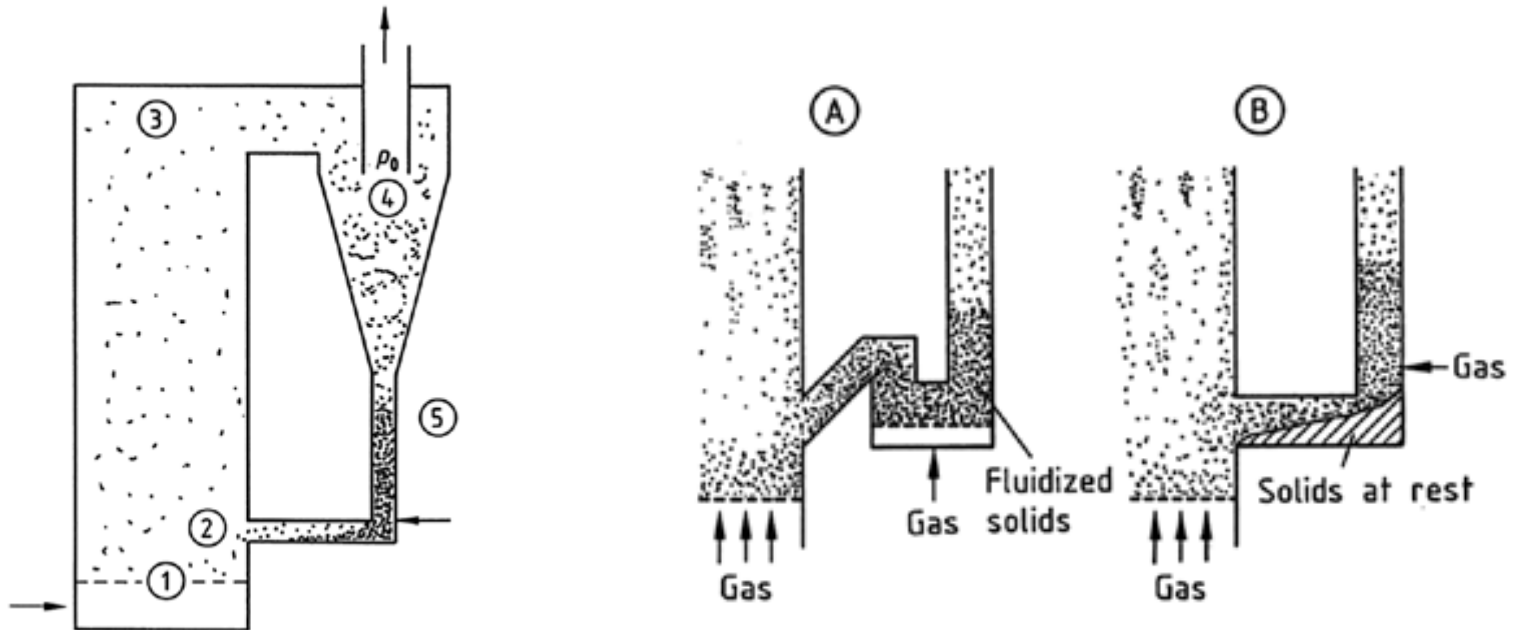
Bildquelle: *Basiswissen Biomasse. Stationäre Wirbelschichtfeuerung.* Biomasse Info-Zentrum, 2001.

Fluid Catalytic Cracking (FCC)



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

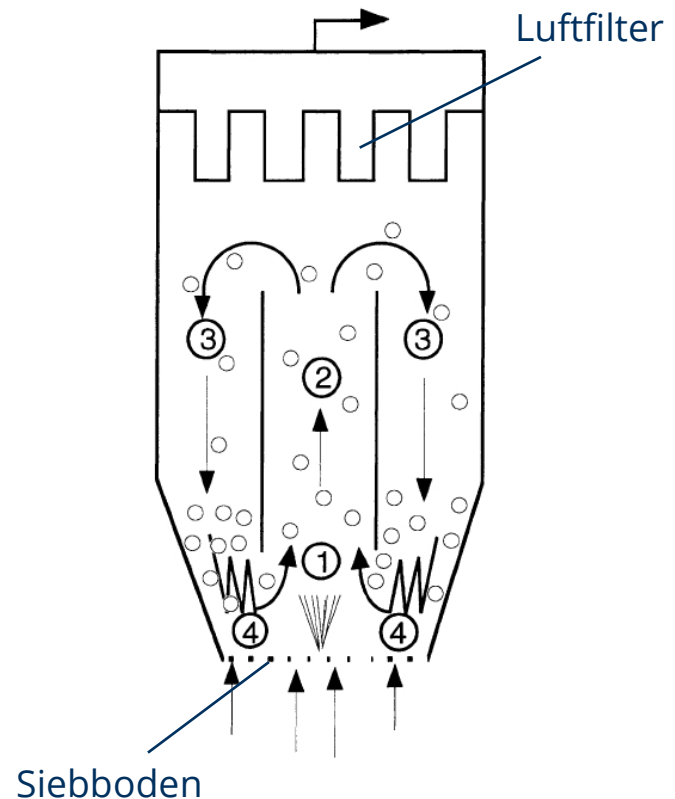
Zirkulierende Wirbelschicht für Gaskatalyse



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

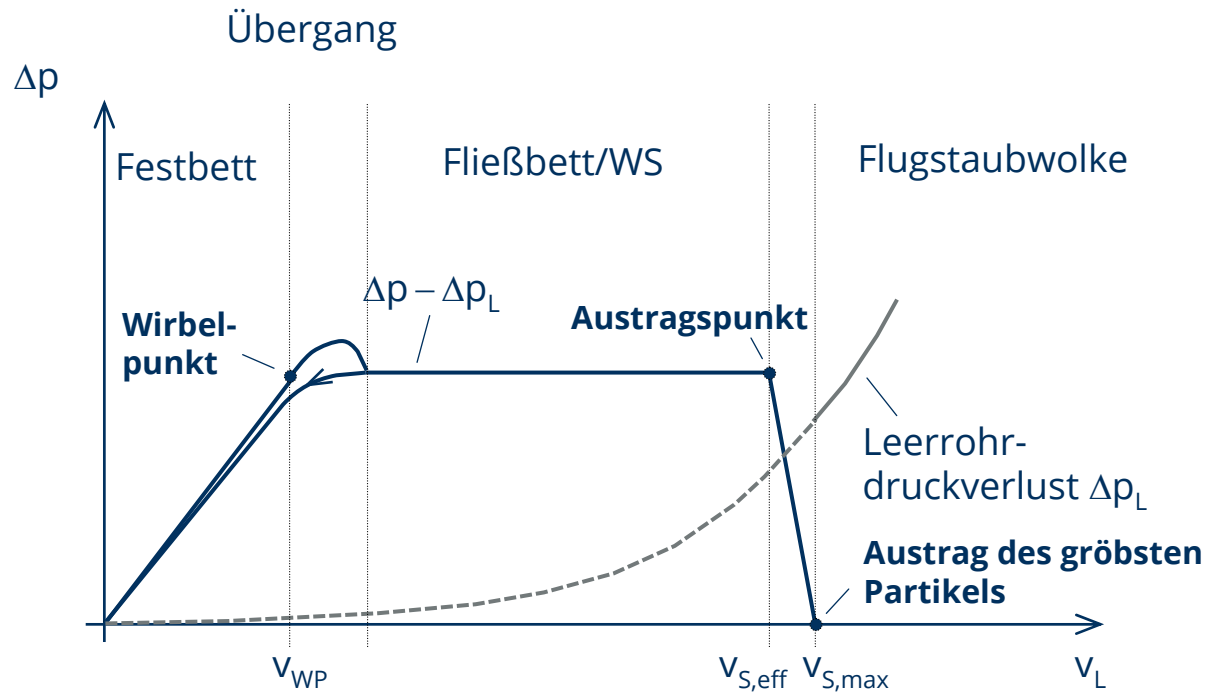


Bildquelle: Teunou & Poncelet, *J. Food Eng.*, 53:325-340, 2002.

7.3 Wirbelschichten

- *Berechnungsgrundlagen* -

Wirbelschicht – Druckverlustdiagramm



- Druckverlustdiagramm:
= Partikel bedingter Druckverlust vs. Leerrohrgeschwindigkeit

Wirbelschicht – Ziele der Berechnung

- Was wollen wir wissen?

- Wirbelpunkt
- Austragspunkt
- Druckverlust
- Ausdehnung

- Was können wir schon berechnen?

- Druckverlust in Schüttungen

- Carman-Kozeny: $\Delta p/h = K' \cdot (1 - \varepsilon)^2 / \varepsilon^3 \cdot S_V^2 \cdot \eta_F \cdot v_F$ bzw. $\xi = \frac{36 \cdot K'}{Re_{Sch}^*}$

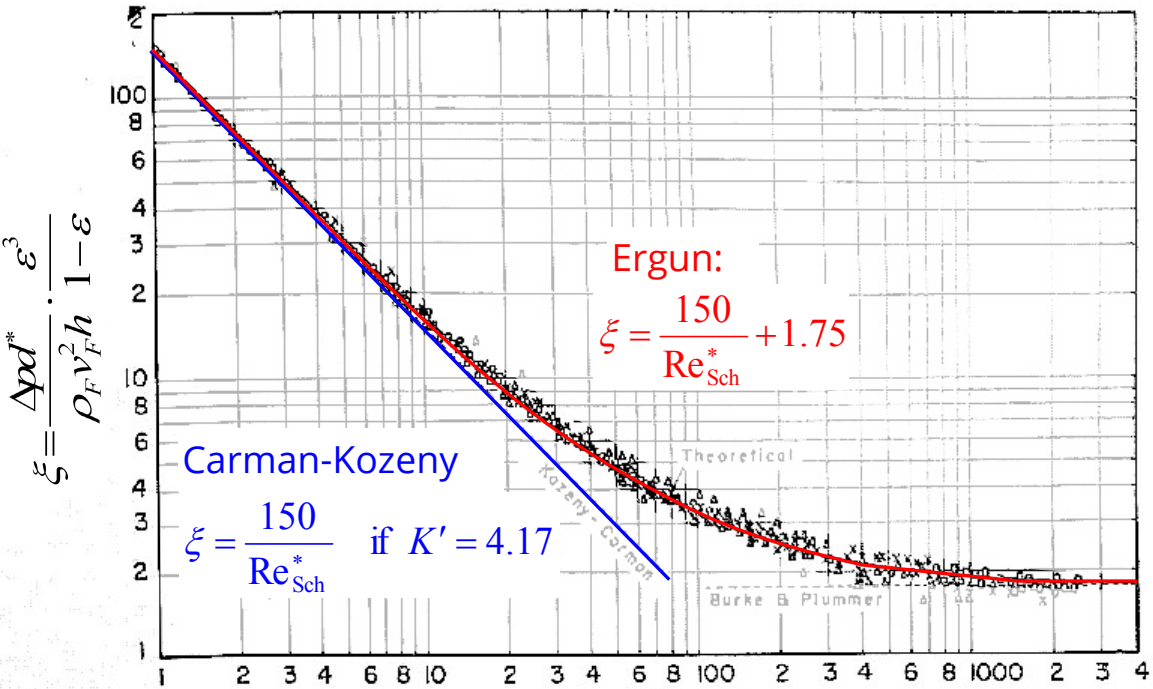
- Ergun: $\xi = \frac{C}{Re_{Sch}^*} + K$

- Gewicht und Auftrieb einer Schüttung
- Sinkgeschwindigkeit einzelner Partikel
- Sinkgeschwindigkeit von Partikelkollektiven

- Richardson-Zaki $v_{S,eff} = (1 - \varphi_V)^n \cdot v_{S,P}$ bzw. $v_{S,eff} = \varepsilon^n \cdot v_{S,P}$

- Massen- und Volumenbilanzen

ERGUN-Gleichung



$$Re_{Sch}^* = \frac{\rho_F v_F d^*}{(1-\epsilon)\eta_F}$$

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

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