verhält sich die Wirbelschicht wie eine **siedende Flüssigkeit.** Der Druckverlust Δp bleibt konstant. Das Volumen der Wirbelschicht nimmt durch Vergrößerung der Kornzwischenräume allmählich zu. Es bilden sich Gasblasen, die zur Oberfläche hochsteigen.

Bei einer bestimmten Grenzgeschwindigkeit ist das Zwischenraumvolumen der Wirbelschicht so groß geworden, dass sich die Wirbelschicht zu einer **Flugstaubwolke** auflöst und die Austragung der Feststoffteilchen beginnt. Die zugehörige Geschwindigkeit nennt man **Austragsgeschwindigkeit** w_A, sie entspricht der Sinkgeschwindigkeit der Teilchen unter Schwerkraftwirkung.

Beim Erreichen der Austragsgeschwindigkeit geht der Wirbelschichtzustand in den Flugstaubzustand über.

7.2 Berechnung der Wirbelschichtzustandsgrößen

Der **Wirbelschichtzustand** existiert im Bereich zwischen Lockerungsgeschwindigkeit w_L und Austragsgeschwindigkeit w_A. In diesem Bereich ist Δp konstant, und das Volumen bzw. die Dicke der Wirbelschicht nimmt in wachsender Auflockerung zu. Kennzeichnend für die Auflockerung ist das relative Zwischenraumvolumen ε, Porosität genannt. Zur Auslegung eines Wirbelschichterzeugers müssen die Größen Δp, w_L und w_A und ε berechnet werden

Den **Druckverlust** Δp berechnet man aus dem Kräftegleichgewicht zwischen Strömungskraft, Gewichtskraft und Auftrieb. Es ergibt sich folgende Formel:

$$\Delta p = h_0 \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot \Delta\varrho \cdot g = h\,(1 - \varepsilon) \cdot \Delta\varrho \cdot g$$

Hierin ist: Δp Druckverlust in bar, h_0 Höhe des Festbetts, h Höhe der Wirbelschicht in m, ε_0 Festbett-Porosität in m³/m³, ε Porosität der Wirbelschicht in m³/m³, $\Delta\varrho = \varrho_T - \varrho$ Dichtedifferenz zwischen Feststoff- und Gasdichte in kg/m³, g Fallbeschleunigung in m/s².

Für die **Porosität** (relatives Zwischenraumvolumen) gelten die Formeln:

$$\varepsilon_0 = \frac{V_F - V_T}{V_F} \cdot 100\%$$

$$\varepsilon = \frac{V_w - V_T}{V_w} \cdot 100\%$$

Hierin ist: V_F Festbettvolumen, V_T Volumen aller Feststoffteilchen, V_w Wirbelschichtvolumen.

Bei einer **Schüttung** aus kugelförmigen Teilchen mit gas- oder luftgefüllten Zwischenräumen ist die Porosität:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{\varrho_{Sch}}{\varrho_T} \approx 0{,}4$$

Hierin ist: ϱ_{Sch} Schüttdichte in kg/m³, ϱ_T Teilchendichte in kg/m³.

Nach der Druckverlustbeziehung sind Festbetthöhe h_0 und Wirbelschichthöhe h durch die Porosität verknüpft.

$$h = h_0 \cdot \frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon}$$

Die **Porosität der Wirbelschicht** liegt zwischen den Grenzwerten 0,4 (Festbett) und 1. Nach *Weinspach* gibt es zur Berechnung der Porosität folgende **Kenngrößenbeziehungen:**

$$\varepsilon = 2{,}23 \left(\frac{Re}{Ar}\right)^{1/4} \quad \text{für } Re = 10^{-2} \cdots 20$$

$$Re = \frac{w \cdot x_T}{\nu} \qquad Ar = \frac{x_T^3}{\nu^2} \cdot \frac{\Delta\varrho}{\varrho} \cdot g$$

Hierin ist: w Strömungsgeschwindigkeit in m/s, x_T Teilchengröße in m, ν kinematische Zähigkeit in m²/s, $\Delta\varrho = \varrho_T - \varrho$ Dichtedifferenz in kg/m³, g Fallbeschleunigung in m/s², Ar Archimedeszahl, Re Reynoldszahl.

Die **Lockerungsgeschwindigkeit** gilt stets für das **leere Rohr** vor dem Anströmboden. Zur Berechnung der Lockerungsgeschwindigkeit gibt es

Beispiel 7.1

In einem Wirbelschichtapparat mit Kreisquerschnitt wird Silikagel mit Heißluft bei 150 °C getrocknet. Der mittlere Korndurchmesser beträgt x_T = 1 mm. Es sollen $\dot{m}$ = 2,5 t/h verarbeitet werden. Die Verweilzeit der Teilchen muss t_m = 10 min betragen. Der Heißluft-Volumenstrom beträgt $\dot{V}_L$ = 4300 m³/h. Gegeben sind ferner: Schüttdichte ϱ_{Sch} = 650 kg/m³; Teilchendichte ϱ_T = 1100 kg/m³; kinematische Zähigkeit der Luft bei 150 °C; v = 2,9 10^{-5} m²/s; Dichte der Luft bei 150 °C ϱ_L = 0,834 kg/m³.

Zu berechnen sind:

1. Lockerungsgeschwindigkeit w_L
2. Durchmesser D des Apparats für eine Betriebsgeschwindigkeit $w = 2{,}5 \cdot w_L$
3. Höhe des Fließbetts im Betriebszustand h
4. Druckverlust Δp
5. Austragsgeschwindigkeit w_A

Lösung

1. Lockerungsgeschwindigkeit w_L

$$Ar = \frac{x_T^3 \cdot \Delta\varrho \cdot g}{v^2 \cdot \varrho_L} =$$

$$= \frac{10^{-9}\ \text{m}^3 \cdot 1099\ \text{kg/m}^3 \cdot 9{,}81\ \text{m/s}^2}{8{,}41 \cdot 10^{-10}\text{m}^4/\text{s}^2 \cdot 0{,}834\ \text{kg/m}^3}$$

$$Ar = 15\,373$$

$$Re_L = \frac{Ar}{1400 + 5{,}22 \cdot \sqrt{Ar}} =$$

$$= \frac{15\,385}{1400 + 5{,}22 \cdot \sqrt{15\,385}}$$

$$Re_L = 7{,}510\ ((2x))$$

$$w_L = \frac{Re_L \cdot v}{x_T} = \frac{7{,}510\,((2x)) \cdot 2{,}9 \cdot 10^{-5}\ \text{m}^2/\text{s}}{0{,}001\ \text{m}}$$

$$w_L = 0{,}218\ \text{m/s}$$

2. Fließbettdurchmesser D
   Betriebsgeschwindigkeit
   $w = 2{,}5 \cdot w_L = 2{,}5 \cdot 0{,}218$ m/s = 0,545 m/s

   Fließbettquerschnitt:

$$A = \frac{\dot{V}_L}{w} = \frac{4300\ \text{m}^3/\text{h}}{3600\ \text{s/h} \cdot 0{,}545\ \text{m/s}}$$

$$A = 2{,}19\ \text{m}^2; \quad D = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 2{,}19\ \text{m}^2}{\pi}} = 1{,}670\ \text{m}$$

3. Höhe des Fließbetts im Betriebszustand

Die Höhe des Festbetts h_0 ergibt sich aus dem Feststoffdurchsatz $\dot{m}$ und der Verweilzeit t_m.

$$h_0 = \frac{\dot{m} \cdot t_m}{A \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot \varrho_T}$$

Dieser Ausdruck wird in die Formel für h eingesetzt:

$$h = h_0 \cdot \frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon} = \frac{\dot{m} \cdot t_m}{A \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot \varrho_T} \cdot \frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon}$$

$$h = \frac{\dot{m} \cdot t_m}{A \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \varrho_T}$$

Die Porosität ε des Fließbetts im Betriebszustand erhalten wir aus:

$$\varepsilon = 2{,}23 \cdot \left(\frac{Re}{Ar}\right)^{1/4} = 2{,}23 \cdot \left(\frac{2{,}5 \cdot Re_L}{Ar}\right)^{1/4}$$

$$\varepsilon = 2{,}23\left(\frac{18{,}77}{15\,373}\right)^{1/4} = 0{,}56$$

$$h = \frac{2500\ \text{kg/h} \cdot 10\ \text{min}}{60\ \text{min/h} \cdot 2{,}19\ \text{m}^2 \cdot 0{,}58 \cdot 1100\ \text{kg/m}^3}$$

$$h = 0{,}298\ \text{m}$$
$$h = 298\ \text{mm}$$

4. Druckverlust im Fließbett

   $\Delta p = h \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \Delta\varrho \cdot g;$

   $\Delta p = 0{,}393\ \text{m} \cdot 0{,}44 \cdot 1099\ \text{kg/m}^3 \cdot 9{,}81\ \text{m/s}^2$

   $\Delta p = 1864\ ((2x))\ \text{N/m}^2 = 18{,}64\ ((2x))\ \text{mbar}$

5. Austragsgeschwindigkeit w_A

Diese Geschwindigkeit wird zur Kontrolle berechnet, sie muss beträchtlich über der Betriebsgeschwindigkeit liegen.

$$w_A = \sqrt{\frac{4 \cdot x_T \cdot \varrho_T \cdot g}{3 \cdot \varrho_L}}$$

$$w_A = \sqrt{\frac{4 \cdot 0{,}001\ \text{m} \cdot 1100\ \text{kg/m}^3 \cdot 9{,}81\ \text{m/s}^2}{3 \cdot 0{,}834\ \text{kg/m}^3}}$$

$$w_A = 4{,}15\ \text{m/s}$$

w_A ist fast um eine Zehnerpotenz größer als w = 0,545 m/s.