

Aufgabe 2-2 (trockene Schüttungen)

Massimo kauft ein Päckchen vakuumverpackten espressopulvers (250 g Espresso, quaderförmiger Verpackung: 79 mm x 45 mm x 135 mm). Zu Hause füllt er das Pulver in eine zylindrische Kaffeedose (\varnothing 80 mm, $H_{\text{Dose}} = 120$ mm). Er nutzt dafür einen Löffel, wodurch das gepresste Pulver aufgelockert wird und das Dosenvolumen zunächst nicht ausreicht, um das gesamte espressopulver aufzunehmen. Mit wenig Aufwand verdichtet er das Pulver in der Dose und füllt sie dann bis zum Rand auf. Später am Nachmittag bereitet er sich Espresso zu. Zu diesem Zweck gibt er 22 g Pulver auf einen Siebträger (\varnothing 50 mm) und verdichtet es, so dass die Schütthöhe 20 mm beträgt.

Die gemahlene Kaffeepartikel besitzen eine innere Porosität von 20% und eine Sphärizität von 80%; die Dichte des reinen Feststoffs beträgt 1400 kg/m^3 . Das Pulver ist breit verteilt mit einem Sauterdurchmesser von $60 \mu\text{m}$.

- Berechnen Sie die effektive Partikeldichte für das trockene Pulver!
- Ermitteln Sie die Schüttdichte und (äußere) Porosität des espressopulvers in der Vakuumverpackung!
- Wie lässt sich eine trockene Schüttung mechanisch verdichten?
- Wie hoch ist Porosität des espressopulvers in der Dose?
- Berechnen Sie die Porosität und den hydraulischen Durchmesser des verdichteten Pulvers auf dem Siebträger!

Definition: $\mu\text{m} := 10^{-6} \text{ m}$ $\text{ml} := 1 \text{ cm}^3$

Vorgegebene Werte:

gemahlene Kaffeepartikel: $\rho_{\text{S}} := 1400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ $\varepsilon_{\text{Part}} := 0.2$

$x_{\text{ST}} := 60 \mu\text{m}$ $\Psi := 0.8$

Verkaufspackung: $L_{\text{VP}} := 79 \text{ mm}$ $B_{\text{VP}} := 45 \text{ mm}$ $H_{\text{VP}} := 135 \text{ mm}$

$m_{\text{VP}} := 250 \text{ gm}$

Kaffeedose: $D_{\text{Dose}} := 80 \text{ mm}$ $H_{\text{Dose}} := 120 \text{ mm}$

Siebträger: $D_{\text{Sieb}} := 50 \text{ mm}$

verdichtetes Pulver: $m_{\text{Sieb}} := 22 \text{ gm}$ $h_{\text{Sieb}} := 20 \text{ mm}$

Lösung:

1. effektive Partikeldichte

mittlere Dichte trock. Partikel: $\rho_{\text{Part}} = (1 - \varepsilon_{\text{Part}}) \cdot \rho_{\text{S}} + \varepsilon_{\text{Part}} \cdot \rho_{\text{Luft}} \approx (1 - \varepsilon_{\text{Part}}) \cdot \rho_{\text{S}}$

$$\rho_{\text{Part}} := (1 - \varepsilon_{\text{Part}}) \cdot \rho_{\text{S}} \quad \rho_{\text{Part}} = 1120 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

2. Porosität und Schüttdichte in Verkaufsverpackung

Schüttdichte (trocken), ca.: $\rho_{\text{Sch}} = \frac{m_{\text{S}}}{V_{\text{Sch}}} = (1 - \varepsilon_{\text{ges}}) \cdot \rho_{\text{S}} = (1 - \varepsilon_{\text{Sch}}) \cdot \rho_{\text{Part}}$

Verpackungsvolumen: $V_{\text{VP}} := L_{\text{VP}} \cdot B_{\text{VP}} \cdot H_{\text{VP}} \quad V_{\text{VP}} = 479.9 \text{ ml}$

Schüttdichte (trocken): $\rho_{\text{Sch.VP}} := \frac{m_{\text{VP}}}{V_{\text{VP}}} \quad \rho_{\text{Sch.VP}} = 520.9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

äußere Porosität in Verpack.: $\varepsilon_{\text{Sch.VP}} := 1 - \frac{\rho_{\text{Sch.VP}}}{\rho_{\text{Part}}} \quad \varepsilon_{\text{Sch.VP}} = 0.535$

Info: Gesamtporosität: $\varepsilon_{\text{ges.VP}} := 1 - (1 - \varepsilon_{\text{Sch.VP}}) \cdot (1 - \varepsilon_{\text{Part}}) \quad \varepsilon_{\text{ges.VP}} = 0.628$

3a. Kaffeedose - Verdichtung

Mechanisches Verdichten zum Beispiel durch Klopf- oder Rüttelbewegung.

3b. Kaffeedose - Porosität

Volumen der Dose: $V_{\text{Dose}} := \frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{Dose}}^2 \cdot H_{\text{Dose}} \quad V_{\text{Dose}} = 603.2 \text{ ml}$

Schüttdichte in Dose: $\rho_{\text{Sch.Dose}} := \frac{m_{\text{VP}}}{V_{\text{Dose}}} \quad \rho_{\text{Sch.Dose}} = 414.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

äußer Porosität in Kaffeedose: $\varepsilon_{\text{Sch.Dose}} := 1 - \frac{\rho_{\text{Sch.Dose}}}{\rho_{\text{Part}}} \quad \varepsilon_{\text{Sch.Dose}} = 0.63$

Info: Gesamtporosität: $\varepsilon_{\text{ges.Dose}} := 1 - (1 - \varepsilon_{\text{Sch.Dose}}) \cdot (1 - \varepsilon_{\text{Part}}) \quad \varepsilon_{\text{ges.Dose}} = 0.704$

4. Siebträger - Schüttdichte, Porosität und hydraulischer Durchmesser

verdichtetes Schüttvolumen: $V_{\text{Sieb}} := \frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{Sieb}}^2 \cdot h_{\text{Sieb}}$ $V_{\text{Sieb}} = 39.27 \text{ ml}$

Schüttdichte auf Siebträger: $\rho_{\text{Sch.Sieb}} := \frac{m_{\text{Sieb}}}{V_{\text{Sieb}}}$ $\rho_{\text{Sch.Sieb}} = 560.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

äuß. Porosität auf Siebträger: $\varepsilon_{\text{Sch.Sieb}} := 1 - \frac{\rho_{\text{Sch.Sieb}}}{\rho_{\text{Part}}}$ $\varepsilon_{\text{Sch.Sieb}} = 0.500$

Info: Gesamtporosität: $\varepsilon_{\text{ges.Sieb}} := 1 - (1 - \varepsilon_{\text{Sch.Sieb}}) \cdot (1 - \varepsilon_{\text{Part}})$ $\varepsilon_{\text{ges.Sieb}} = 0.600$

hydraulischer Durchm.: $d_{\text{hydr}} = \frac{4 \cdot \varepsilon}{1 - \varepsilon} \cdot \frac{1}{S_V}$

Der **hydraulische Durchmesser** bezieht sich auf die **durchströmten Poren**. Eingeschlossene Poren in den Partikeln werden naturgemäß nicht durchströmt. Das gleiche gilt auch für offene Poren, die deutlich feiner als die Partikel sind; in ihnen ruht das Fluid. Für die Kaffeepartikel dürfen wir davon ausgehen, dass die Poren in den Partikeln sehr viel kleiner sind als die Kaffeepartikel selbst. Das heißt, wir berechnen den hydraulischen Durchmesser der verdichteten **Kaffeeschüttung** aus der **äußeren Porosität**.

volumenspez. OF: $S_V := \frac{6}{\Psi \cdot x_{ST}}$ $S_V = 0.125 \frac{\text{m}^2}{\text{cm}^3}$

hydraulischer Durchm.: $d_{\text{hydr}} := \frac{4 \cdot \varepsilon_{\text{Sch.Sieb}}}{1 - \varepsilon_{\text{Sch.Sieb}}} \cdot \frac{1}{S_V}$ $d_{\text{hydr}} = 32.0 \text{ }\mu\text{m}$

Abschließender Hinweis

Ungeachtet von Massimos Trinkgewohnheiten empfiehlt das *Istituto Nazionale Espresso Italiano*, dass für einen einfachen Espresso 7g fein gemahlenes Pulver eines gut gerösteten Kaffees verwendet werden sollen. Dieses wird mit einem Anpressdruck von 0.5 bar auf dem Siebträger verdichtet und schließlich mit ca. 88°C heißem Wasser bei ca. 9 bar durchströmt.