

Aufgabe Partikelbewegung-8

Im Rahmen seiner Diplomarbeit untersuchte Göhler (2008) die Abscheidecharakteristik eines selbst konstruierten Impaktors ($d_{\text{Düse}} = 2 \text{ mm}$). Die gemessenen fraktionellen Abscheidegrade und die daraus gemittelte Trennfunktion sind im unteren Diagramm dargestellt. Die gemittelte Kurve besitzt eine

Mediantrenngrenze von $\sqrt{\text{Stk}_{50}} = 0.48$.

a) Welcher Luftvolumenstrom ($\rho_l = 1.2 \text{ kg/m}^3$, $\eta_l = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$) ist erforderlich, um mit dem Impaktor unter atmosphärischen Bedingungen eine Trennteilchengröße von $10 \mu\text{m}$ zu erreichen? Die Schlupfkorrektur nach Cunningham dürfen Sie zunächst vernachlässigen.

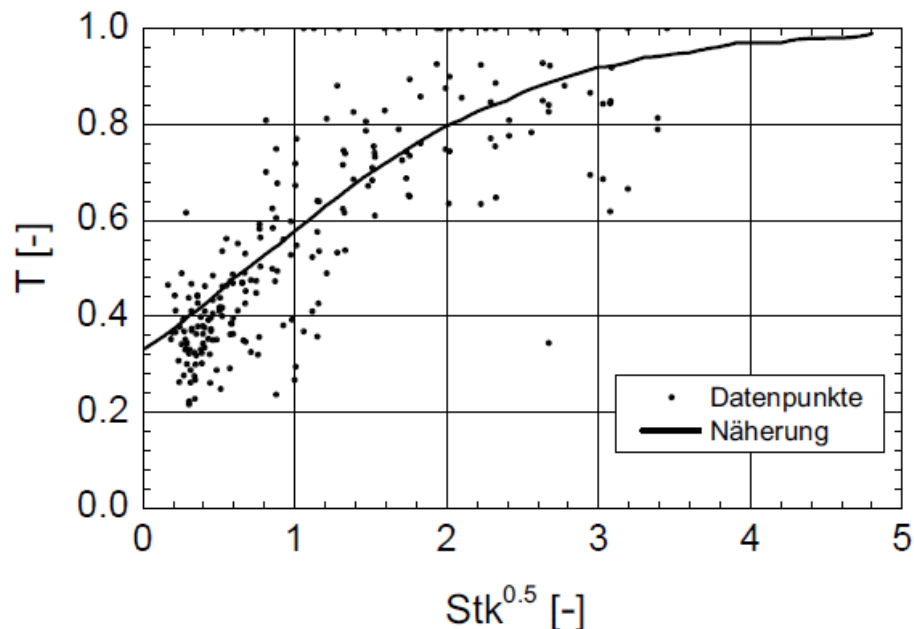
b) Wie groß ist unter diesen Bedingungen der Bremsweg für $10 \mu\text{m}$ große Teilchen?

c) Berechnen Sie für die Lösung in a) die initiale Partikel-Reynoldszahl der Trennteilchengröße die Reynoldszahl der Gasströmung in der Düse! und Bewerten Sie, ob die Annahme schleichender Strömung in Teilaufgabe b) gerechtfertigt war!

d) Berechnen Sie für die Knudsen-Zahlen für $10 \mu\text{m}$ und $2.5 \mu\text{m}$ große Partikel ($\lambda_m = 66 \text{ nm}$) und prüfen Sie die Notwendigkeit einer Cunningham-Korrektur!

e) Welcher Luftvolumenstrom wird benötigt, damit im Impaktor 80% der Aerosolpartikel mit einer Größe von $2.5 \mu\text{m}$ abgeschieden werden?

Hinweis: Bei Trägheitsabscheidern für Aerosole bezieht sich die Partikelgröße auf die Annahme einer Partikeldichte von 1 g/cm^3 ("Einheitsdichte") und die Vorstellung kugeligier Teilchen. Diesen Äquivalentdurchmesser bezeichnet man auch als *aerodynamischen Durchmesser*.



Quelle:

D. Göhler, *Charakterisierung der Partikelfreisetzung bei der Handhabung von Pulvern*. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Inst. für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik, 2008.

Aufgabe Partikelbewegung-8

Definition: $\mu\text{m} := 10^{-6} \text{ m}$ $\text{nm} := 10^{-9} \text{ m}$ $\text{ms} := 10^{-3} \text{ s}$

Vorgegebene Werte:

Luft: $\rho_L := 1.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ $\eta_L := 0.000018 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ $\lambda_m := 66 \text{ nm}$

Tröpfchen: $\rho_P := 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ $x_1 := 10 \mu\text{m}$ $x_2 := 2.5 \mu\text{m}$

Impaktor: $d_{\text{Düse}} := 2 \text{ mm}$ $\text{Stk}_{50} := 0.48^2$

Lösung:

1. Luftvolumenstrom für Trennteilchengröße von 10 μm

Stokes-Zahl der Düse:
 (ohne Cunningham-Korrektur) $\text{Stk} = \frac{2 \cdot u_{P,0} \cdot \rho_P \cdot a^2}{9 \cdot \eta_L \cdot R_D} = \frac{u_{P,0} \cdot \rho_P \cdot x^2}{9 \cdot \eta_L \cdot d_D}$ mit $u_{P,0} = u_D$

charakt. Düsen-Stokes-Zahl: $\text{Stk}_{50} = \frac{u_D \cdot \rho_P \cdot x^2}{9 \cdot \eta_L \cdot d_D}$

benötigte Geschwindigkeit: $u_D := \frac{9 \cdot \eta_L \cdot d_{\text{Düse}}}{\rho_P \cdot x^2} \cdot \text{Stk}_{50}$

$$u_D = 0.75 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Luftvolumenstrom: $\text{VS}_g := \frac{\pi}{4} \cdot d_{\text{Düse}}^2 \cdot u_D$

$$\text{VS}_g = 0.14 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

2. Bremsweg für 10 μm -Partikel

Bremsweg für 10 μm : $l_{\text{st}} := \text{Stk}_{50} \cdot \frac{d_{\text{Düse}}}{2}$

$$l_{\text{st}} = 0.23 \text{ mm}$$

3. Reynoldszahlen für Gasströmung und Partikelbewegung in der Düse

Re-Zahl der Gasströmung: $\text{Re}_D := \frac{\rho_L \cdot u_D \cdot d_{\text{Düse}}}{\eta_L}$

$$\text{Re}_D = 100$$

Die Reynoldszahl der Gasströmung liegt im laminaren Bereich (<2300).

Re-Zahl der Trennpartikel: $\text{Re}_P := \frac{\rho_L \cdot u_D \cdot x_1}{\eta_L}$

$$\text{Re}_P = 0.5$$

Die Partikel-Reynoldszahl für x_T liegt im Stokes-Bereiches. Die üblichen Berechnungsgleichungen für Bremsweg etc. gelten.

Ar-Zahl der Trennpartikel:
 (nur als halbe Alternative)

$$Ar_P := \frac{g \cdot (\rho_P - \rho_L) \cdot \rho_L \cdot x_1^3}{\eta_L^2}$$

$Ar_P = 0.036$

Die Ar-Zahl ist hier eigentlich irrelevant, weil sie sich auf sedimentierende Partikel bezieht. Sie sollte dennoch im Stokes-Bereich liegen.

4. Knudsen-Zahl und Cunningham-Korrektur

Knudsen-Zahlen

Knudsen-Zahl für 10 µm:

$$Kn_{10\mu m} := \frac{2 \cdot \lambda_m}{x_1}$$

$Kn_{10\mu m} = 0.013$

Knudsen-Zahl für 2.5 µm:

$$Kn_{2.5\mu m} := \frac{2 \cdot \lambda_m}{x_2}$$

$Kn_{2.5\mu m} = 0.053$

Die Knudsen-Zahlen liegen deutlich unter 1. Eine Cunningham-Korrektur scheint überflüssig. Doch rechnen wir lieber nach.

informativ - Cunningham für 2.5 µm

einfache Cunningham-Korr.:

$$C_{C2.5\mu m} := 1 + 1.65 \cdot Kn_{2.5\mu m}$$

$C_{C2.5\mu m} = 1.087$

kompl. Cunningham-Korr.

$$C_{C2.5\mu m} := 1 + Kn_{2.5\mu m} \cdot \left(1.257 + 0.4 \cdot e^{-\frac{1.1}{Kn_{2.5\mu m}}} \right)$$

$C_{C2.5\mu m} = 1.066$

Für 2.5 µm beträgt die Cunningham-Korrektur ca. 8%. Das ist gerade so vernachlässigbar.

5. Luftvolumenstrom für Trennteilchengröße T(2.5µm) = 80%

Ablesen aus Diagramm Stk_{80} : $\sqrt{Stk_{80}} = 2$

Stokes-Zahl f. T=80%: $Stk_{80} := 4$

Rechnung ohne Cunningham-Korrektur

charakt. Düsen-Stokes-Zahl:

$$Stk_{80} = \frac{u_D \cdot \rho_P \cdot x^2 \cdot T_{80}}{9 \cdot \eta_L \cdot d_D}$$

benötigte Geschwindigkeit:

$$u_{D2} := \frac{9 \cdot \eta_L \cdot d_{Düse}}{\rho_P \cdot x^2} \cdot Stk_{80}$$

$u_{D2} = 207.4 \frac{m}{s}$

Luftvolumenstrom:

$$VS_{g2} := \frac{\pi}{4} \cdot d_{Düse}^2 \cdot u_{D2}$$

$VS_{g2} = 39.09 \frac{L}{min}$

Rechnung mit Cunningham-Korrektur

charakt. Düsen-Stokes-Zahl:
$$\text{Stk}_{80} = \frac{u_{D2} \cdot \rho_{P,x} \cdot T_{80}^2}{9 \cdot \eta_L \cdot d_D} \cdot C_C(x, T_{80})$$

benötigte Geschwindigkeit:
$$u_{D2} := \frac{9 \cdot \eta_L \cdot d_{Düse}}{\rho_{P,x} \cdot 2^2 \cdot C_C(2.5\mu\text{m})} \cdot \text{Stk}_{80}$$

$$u_{D2} = 194.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Luftvolumenstrom:
$$V_{S_{g2}} := \frac{\pi}{4} \cdot d_{Düse}^2 \cdot u_{D2}$$

$$V_{S_{g2}} = 36.65 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

informativ - Reynoldszahl:
$$\text{Re}_{D2} := \frac{\rho_L \cdot u_{D2} \cdot d_{Düse}}{\eta_L}$$

$$\text{Re}_{D2} = 25927$$

Kommentar: Die berechneten Gasgeschwindigkeiten sind sehr hoch und korrespondieren mit einer turbulenten Düsenströmung. In der Praxis gälte es zu prüfen, ob die dafür erforderlichen Düsendrücke mit den gegebenen Mitteln erreicht werden können. Bei sehr hohen Druckverlusten wäre zudem die Annahme einer inkompressiblen Strömung zu hinterfragen. Ein deutliches Absenken der 80%-Trennteilchengröße unter 2,5 µm wird wegen ihres quadratischen Einflusses auf die Gasgeschwindigkeit auf erhebliche technische Probleme stoßen.

Beachten Sie ferner, dass in dem untersuchten Szenarium von $T(2,5\mu\text{m})=80\%$ die Trennteilchengröße

des Impaktors bei ungefähr $2.5 \mu\text{m} \cdot \frac{\sqrt{\text{Stk}_{50}}}{\sqrt{\text{Stk}_{80}}} = 2.5 \mu\text{m} \cdot \frac{0.48}{2} = 0.6 \mu\text{m}$ läge (die Abschätzung ignoriert die

Cunningham-Korrektur). Wir lernen aus dem Beispiel, dass die Trägheitsabscheidung für Trennteilchengrößen $<1\mu\text{m}$ an die Grenzen ihrer Realisierbarkeit stößt.