

# Simulation einer instationären Gas-Partikelströmung unter Berücksichtigung von Kollision, Wandstoß und Phasenwechselwirkung

Der Transport oder die Separation von granularen Stoffen wird häufig in einer Gasfeststoff- oder Flüssigfeststoffströmung durchgeführt. Diese Art von Strömung ist auf Grund ihrer breiten Anwendung wichtig für die Verfahrenstechnik. Bei erhöhter Beladungsdichte spricht man auch von Festbettströmungen, die in Reaktoren oder Brennern vorherrschen können.

Die Partikelströmung wird durch das Dichteverhältnis der Phasen  $\gamma = \rho_P/\rho_F$ , durch die Stokeszahl  $St = \tau_P/\tau_F$  und die Beladung bezogen auf das Volumen- oder Massenverhältnis charakterisiert.

Die Kenngrößen definieren, welches Strömungsregime und welche auf die Partikel wirkenden Kräfte relevant sind. Je nach geometrischer Konfiguration hat die Partikel-Wandwechselwirkung erheblichen Einfluß auf die Gesamtströmung. Die Häufigkeit der Partikel-Partikelkollision ist vom Volumenverhältnis abhängig.

Zur Beschreibung einer turbulenten, isothermen Luftströmung niedriger Machzahl werden die Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und skalare Transportgrößen verwendet. Außerdem wird vom Newtonschen Spannungsansatz und dem Standard  $k$ - $\epsilon$ -Modell ausgegangen. Die partiellen Differentialgleichungen können in folgende allgemeine Form gebracht werden,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_F \Phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_F u_j \Phi) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right) = S + S^P,$$

wobei  $\Phi$  für die kartesischen Geschwindigkeitskomponenten  $u_i$   $i = 1 \dots 3$ , für die turbulente kinetische Energie  $k$ , für die Energiedissipation  $\epsilon$  und für die Skalare  $c_i$  steht.

Tabelle 1 zeigt die Variablen und Quellterme für die unterschiedlichen Gleichungen.  $\Gamma$  ist der Transportkoeffizient (Schmidt Zahl),  $S$  der Quellterm der Strömungsvariablen und  $S^P$  der Quellterm infolge der Wechselwirkung mit der Partikelphase,  $\mu$  ist die laminare  $\mu_t$  die turbulente Viskosität,  $\rho_F$  ist die Fluidichte und  $f_1, f_2$  und

Gleichung	$\Phi$	$\Gamma$	$S$	$S^P$
Kontinuität	1	0	0	$\sum_k \frac{\partial m_k^P}{\partial t}$
Impuls	$u_i$	$\mu_{eff}$	$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho_F f_i$	$\sum_k \frac{\partial (m_k^P u_{ki}^P)}{\partial t}$
turb. kin. Energie	$k$	$\frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$P_k - \rho_F \epsilon$	0
Dissipation	$\epsilon$	$\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} (c_{\epsilon_1} P_k - c_{\epsilon_2} \rho_F \epsilon)$	0
Skalar	$c_i$	$\frac{\mu_t}{\sigma_k}$	0	$\sum_k \frac{\partial m_k^P}{\partial t}$

$P_k = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \mu_{eff} = \mu + \mu_t, \mu_t = \rho_F c_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$

$c_\mu = 0.09, c_{\epsilon_1} = 1.44, c_{\epsilon_2} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$

Tabelle 1: Diffusionskoeffizienten und Produktions/Quellterme der Strömungsgleichungen

$f_3$  sind die kartesischen Komponenten der äußeren Kräfte (z.B. Gravitation) pro Masseneinheit.  $m_k^P$  entspricht der Partikelmasse, wobei der Summationsindex  $k$  über alle Partikel pro Zelle läuft.  $u_{ki}^P$  ist die  $i$ -te Geschwindigkeitskomponente vom Partikel  $k$ .

Die disperse Phase wird durch diskrete Partikeltrajektorien dargestellt, wobei jedes Rechenpartikel Stellvertreter für eine dem vorgegebenen Massenstrom entsprechende Anzahl von realen Partikeln mit den selben physikalischen Eigenschaften ist. Die Erhaltungsgleichungen für Impuls und Masse sind in [1] angeführt. Die daraus resultierenden gewöhnlichen Differentialgleichungen werden durch ein Runge-Kutta Verfahren 4. Ordnung mit automatischer Schrittweitensteuerung gelöst.

Die Erhaltungsgleichungen sind nach der Finite-Volumen-Methode diskretisiert. Alle Lösungsvariablen werden im Zellmittelpunkt berechnet. Die diffusiven Terme werden nach dem Zentraldifferenzschema, die konvektiven nach einer Mittelung zwischen Zentraldifferenzen- und Upwindschema berechnet. Die zeitliche Änderung

ist nach einem impliziten Euler Schema diskretisiert.

Die Kollisionsmodellierung wird mit einem stochastischen Stoßmodell, basierend auf einem virtuellen Stoßpartner und einer Stoßwahrscheinlichkeit mit poisson'scher Verteilung, durchgeführt. Die Berechnung der Kollisionsfrequenz erfolgt in Analogie zur kinetischen Gastheorie. Das Wandstoßmodell berücksichtigt Haft- und Gleitreibung und erfordert das Lösen einer Erhaltungsgleichung für die Partikelrotation.

Das Laborexperiment zur Partikelwechselwirkung von [2] enthält zwei unterschiedliche Partikelmassenströme, die auch berechnet wurden. Abbildung 1 zeigt die mittleren Partikelgeschwindigkeiten, die mit den maximalen Werten nahe an der Grenzgeschwindigkeit liegen. Wandstoß und Partikel-Partikelwechselwirkung führen zu einer Agglomeration im Bereich der Rohrerengung und reduzieren gleichzeitig die Fallgeschwindigkeit.

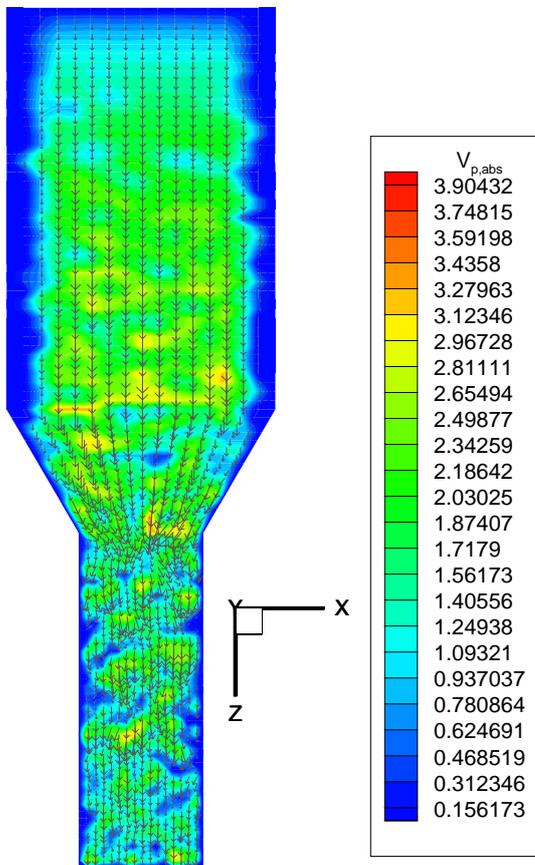


Abbildung 1: Zellgemittelte Partikelgeschwindigkeit in einem konvergenten Kanal

Abbildung 2 zeigt die mittleren Partikelgeschwindigkeiten und Standardabweichungen aus Messung und Rechnung. Die  $v$ -Komponente ist vernachlässigbar. Der Vergleich Messung-Rechnung wurde für zwei weitere Ebenen durchgeführt und wird im Vortrag vorgestellt.

Die Wechselwirkung mit der Gasphase induziert eine vertikale Gasströmung von etwa 0.5 m/s, wobei eine notwendige Modifizierung der Randbedingungen für die inkompressible Gasphase noch durchgeführt werden muß. Unterschiedliche

## Konvergenter Kanal / FOHANNO & OESTERLE

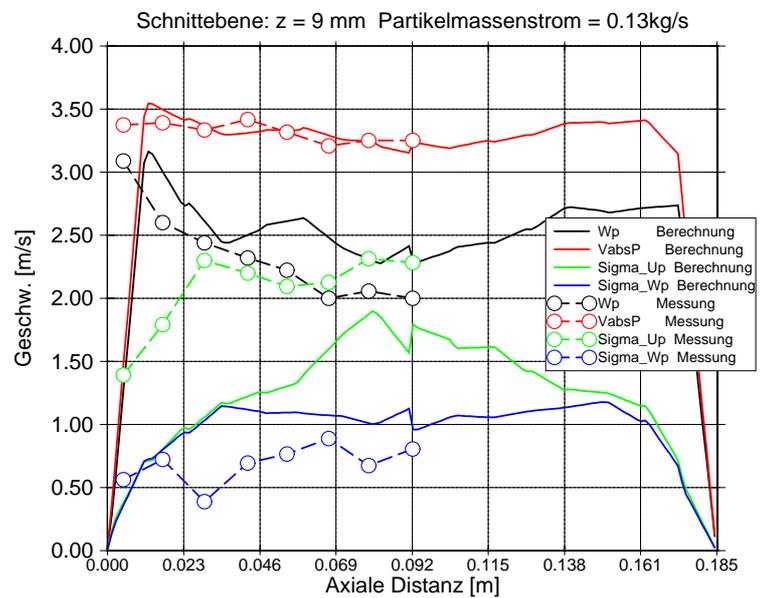


Abbildung 2: Zellgemittelte Partikelgeschw.-Varianzprofile

Kollisionsmodelle, sowie die Stokes-Zahl im Zusammenhang mit der Gasphasenturbulenz werden diskutiert.

## Literatur

- [1] Crowe C.T., Sommerfeld M., Tsuji Y.: Multiphase Flows with Droplets and Particles, CRC Press, 1998.
- [2] Fohanno, S., Oesterle, B.: Analysis of the Effect of Collisions on the Gravitational Motion of Large Particles in a Vertical Duct, Int.J. of Multi Phase Flows, pp. 267-292, Vol26(2) 2000