

# Modellbildung und Computersimulation mehrdimensionaler Gas-Feststoff-Strömungen unterschiedlicher Konzentration\*

Thomas Frank, Klaus-Peter Schade, Dieter Petrak\*\*

## 1 Problemstellung

Die Berechnung geometrisch und strukturell unterschiedlicher Gas-Feststoff-Strömungen auf der Basis der Kontinuitäts- und Impulserhaltungsgleichungen ist insbesondere für die in der Praxis häufig vorkommenden Apparateströmungen mit hoher Feststoffbeladung ein erstrebenswertes Ziel. Neben der Berücksichtigung der insgesamt auf ein Teilchen wirkenden Kräfte und der Stoßvorgänge Teilchen/Teilchen bzw. Teilchen/Apparatewand ist bei hoher Feststoffbeladung die Phasenwechselwirkung in die Phasendifferentialgleichungen einzuführen.

Das Ziel der Arbeit war, als ersten Schritt hierzu die Modellierung und Berechnung einer Gas-Feststoff-Strömung mit geringer Beladung in einem horizontalen Kanal bei Vernachlässigung der Phasenwechselwirkung vorzunehmen. Parallel wurden experimentelle Untersuchungen an einem horizontalen Staubkanal und einer Prallapparatur geplant. Zur Bestimmung von Teilchengeschwindigkeiten und -stromdichten waren spezifische faseroptische Meßtechniken auf der Basis der Ortsfilteranemometrie vorgesehen.

Abbildung 1: Mathematische Modellierung der Partikelbewegung und der Wandrauigkeit

\*Vortrag von D. Petrak auf dem Jahrestreffen des GVC-Fachausschusses Mehrphasenströmungen, 21. bis 22. Februar 1991 in Bremen.

\*\*Dipl.-Math. Th. Frank, Dipl.-Ing. K.-P. Schade und Dr. sc. D. Petrak, Institut für Mechanik, Reichenhainer Straße 88, 9010 Chemnitz.

## 2 Mathematische Modellierung

Für die numerische Simulation der feststoffbeladenen Gasströmung im horizontalen Kanal wurde das Lagrange- oder auch Trajektorien-Modell verwendet, nach dem die disperse Phase als eine Menge von Einzelteilchen aufgefaßt wird. Unter Hinzunahme vereinfachenderer Annahmen gewinnt man aus einer Kräftebilanz der am Einzelteilchen angreifenden Volumen- und Oberflächenkräfte die Bewegungsgleichungen (vgl. Abb. 1) :

$$\vec{F}_T = \vec{F}_W + \vec{F}_M + \vec{F}_G \quad (1)$$

Hierbei wurden die Trägheitskraft  $\vec{F}_T$ , die Widerstandskraft  $\vec{F}_W$ , die Magnuskraft  $\vec{F}_M$  und die Schwerkraft  $\vec{F}_G$  berücksichtigt. Sind die einzelnen Kraftterme einer quantitativen mathematischen Beschreibung zugänglich und die Kraftbeiwerte auf experimentellem oder analytischem Wege bestimmt, so ist die Bewegungsgleichung für das Einzelteilchen (??) numerisch integrierbar und man erhält die Teilchengeschwindigkeiten und den Teilchenort in Abhängigkeit von der Zeit.

Abbildung 2: Schematische Darstellung des horizontalen Staubkanals

Bewegt sich ein Teilchen in einem horizontalen Kanal, so kommt es unter dem Einfluß der Schwerkraft zwangsläufig zum Stoß des Teilchens mit der Kanalwand. Da eine Beschreibung des Partikel-Wand-Stoßes als Gleit- bzw. Haftstoß einer kugelförmigen Partikel mit einer ebenen Wand nach Sawatzki [2] nicht zu einer physikalisch adäquaten Beschreibung der Partikelbewegung führt, wurde in der vorliegenden Arbeit ein Partikel-Wand-Stoßalgorithmus verwendet, der es gestattet, die Rauigkeit der Kanalwände in die numerische Behandlung des Partikel-Wand-Stoßes einzubeziehen. Dabei wird die rauhe Kanalwand durch einen Polygonzug wiedergegeben

(vergl. Abb. 1), dessen Parameter ( $s_n, z_n$ ) aus experimentell bestimmbar Rauigkeitskenngrößen des Wandmaterials ableitbar sind. Die für den Stoß einer kugelförmigen Partikel mit dieser rauhen Wand benötigten materialabhängigen Stoßverlust- und Gleitreibungszahlen wurden experimentell an einer Prallapparatur bestimmt.

### 3 Vergleichende experimentelle Untersuchungen

Zur Verifikation des in der Arbeit dargestellten, zweidimensionalen Wandrauhigkeitsmodells wurden numerische Simulationen für den horizontalen, pneumatischen Transport von sechs Feststofffraktionen bei drei verschiedenen Transportgeschwindigkeiten durchgeführt. Zum Vergleich wurden mittels einer speziellen Sondenmeßtechnik, die auf dem Meßprinzip der faseroptischen Ortsfilteranemometrie basiert, Messungen der vertikalen Partikelgeschwindigkeitsverteilungen in einem horizontalen Staubkanal mit einem quadratischen Querschnitt der Meßstrecke von  $55 \times 55 \text{ mm}^2$  vorgenommen (vergl. Abb. 2).

Abbildung 3: Profile der mittleren Feststoffgeschwindigkeiten für  $d_P = 225 \mu\text{m}$

Es wurde festgestellt, daß schon sehr geringe Rauigkeitswerte der begrenzenden Kanalwände einen qualitativen Einfluß auf das Bewegungsverhalten der Partikeln haben. In Abb. 3 sind die vertikalen Profile der Partikelgeschwindigkeiten für eine Feststofffraktion von Glasballoons mit einem Durchmesser von  $d_P = 225 \mu\text{m}$  für drei verschiedene maximale Fluidgeschwindigkeiten aufgetragen. Die Meßwerte dieser drei Versuche sind durch die mit (---○---○---) markierten Kurven wiedergegeben, während die berechneten mittleren Partikelgeschwindigkeiten durch die Regressionspolynome (—) dargestellt werden. Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Meßwerten ergab für die betrachteten Feststofffraktionen bei den drei verschiedenen Fluidgeschwindigkeiten eine gute qualitative und quantitative Übereinstimmung. Der Einfluß von

lokalen Maxima der Partikelkonzentration und der Einfluß einer nichtsphärischen Partikelform auf die Profile der mittleren Partikelgeschwindigkeiten wird in der Arbeit diskutiert.

Weiterhin wurden experimentelle und numerische Untersuchungen zur Mindesttransportgeschwindigkeit beim horizontalen, pneumatischen Transport für die betrachteten Feststofffraktionen durchgeführt. Auch hier konnte eine gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit dem Experiment festgestellt werden.

### 4 Ausblick

Für Feststoffbeladungen  $< 0.1$  ist mit Hilfe des vorgelegten mathematischen Modells die für ingenieurtechnische Aufgaben befriedigende Berechnung einer Gas-Feststoff-Apparateströmung möglich. Voraussetzung sind die Kenntnis der Fluidgeschwindigkeit, der Stoßparameter und der Wandrauhigkeit sowie Teilchengrößen über ca.  $50 \mu\text{m}$ . Für höhere Feststoffbeladungen ist nach einem Vorschlag von Crowe [1] das "Particle-Source-In Cell" (PSI-Cell) Modell anzuwenden, nach dem für jedes finite Bilanzgebiet die Masse- und Impulsaustauschterme der Teilchen berücksichtigt werden. Für zwei- und dreidimensionale Zweiphasenströmungen ist bis zum Erzielen einer konvergenten Lösung ein erheblicher Rechenaufwand erforderlich.

### 5 Literatur

- [1] Crowe C.T., Sharma M.P., Stock D.E. : The Particle-Source-In Cell (PSI-Cell) Model for Gas-Droplet Flows. Trans. of ASME, J. Fluids Eng. (1977), Vol. 99, pp.325-332.
- [2] Sawatzki O. : Über den Einfluß der Rotation und der Wandstöße auf die Flugbahnen kugliger Teilchen im Luftstrom. Diss. (1961), Universität Karlsruhe, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik.