

Abschlussbericht

Entwicklung eines integralen Modells zur Vorhersage von Partikelablagerungen in verfahrenstechnischen Strömungen

Dr. tekn. Holger Grosshans

holger.grosshans@ptb.de

Arbeitsgruppe „Analyse & Simulation im Explosionsschutz“ (3.51)

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

1. Motivation

Während des Transports von Pulvern in der verfahrenstechnischen Industrie bilden sich häufig Ablagerungen in Rohrleitungen oder an Gehäusewänden aus. Die hierfür verantwortlichen Adhäsionskräfte sind in vielen Fällen auf die triboelektrische Aufladung der Partikel und der Anlagenbauteile zurückzuführen. Daher beeinträchtigen die einhergehenden Querschnittsverengungen nicht nur die Funktionalität des Systems, sondern stellen durch die lokale Akkumulation elektrostatischer Energie zudem eine Gefahrenquelle im Sinne des Explosionsschutz dar. Allerdings haben Partikelablagerungen aufgrund elektrostatischer Kräfte nicht nur negative Auswirkungen, sondern werden in bestimmten industriellen Anwendungen ausgenutzt. Hierzu zählen z.B. die Elektrofotographie, die Adhäsion von medizinischen Partikeln in der Pharmazie und das elektrostatische Pulverlackieren.

Das Verständnis, der diesem Prozess zugrunde liegenden Mechanismen wird jedoch durch das komplexe Zusammenwirken unterschiedlicher Wissenschaftsdisziplinen erschwert. Hierzu zählen im Speziellen die *Strömungsmechanik* (turbulente Strömung der Förderluft), die *Elektrostatik* (triboelektrische Partikel- und Bauteilaufladung) und die *Grenzflächenwissenschaft* (Adhäsion). Bestimmte Teilprozesse, wie z.B. die triboelektrische Partikelaufladung und die Ablagerungsbildung, wurden bereits isoliert experimentell untersucht. Ein integraler Ansatz, der den kompletten Prozess betrachtet, ist jedoch bis heute nicht verfügbar.

Daher war die Zielsetzung der Forschungsarbeit die Entwicklung eines integralen numerischen Modells zur Vorhersage von Partikelablagerungen während des pneumatischen Transports von Pulvern. Dieses Modell stellt den bisher fehlenden Baustein zur theoretischen Berechnung von Partikelablagerungen in pneumatischen Transportsystemen dar.

Die beantragten Fördermittel wurden zur Unterstützung von drei Studenten/-innen eingesetzt, durch welche das Projekt unter wissenschaftlicher Leitung des Antragstellers bearbeitet wurde. Innerhalb des geförderten Projekts entstanden Veröffentlichungen in internationalen Fachzeitschriften [1–5], Tagungsbänden [6–12] sowie Abschlussarbeiten [13–15]. Diese Arbeiten werden im folgenden zusammenfassend dargestellt.

2. Experimentelle Arbeiten

Die Validierung durch Vergleich mit experimentellen Messungen stellt einen wesentlichen Bestandteil der numerischen Modellentwicklung dar. Hierfür wurden zwei verschiedene Aufbauten herangezogen. Bei dem Ersten handelt es sich um eine neue Anlage, die im Rahmen einer studentischen Arbeit [15] an der PTB aufgebaut wurde. Eine Besonderheit stellt hierbei die Verwendung von transparenten Transportrohren dar, die eine detaillierte optische Analyse der zeitlichen und räumlichen Ablagerungsbildung ermöglichen. Mittels dieser Anlage wurde eine Vielzahl von Transportbedingungen und Materialien untersucht. Zum Beispiel zeigt Abb. 1 die Ablagerungsgeschwindigkeit, d.h. die minimale Reynoldszahl der Förderströmung bei der Partikel beobachtet wurden, die an Oberflächen anhaften.

Die zweite Anlage befindet sich am Centre of Turbulence Research an der Stanford University (US), mit welcher innerhalb dieses Projekts kooperiert wurde. Die bereitgestellten experimentell Ergebnisse wurden zur Validierung der Strömungssimulationen verwendet [1, 4].

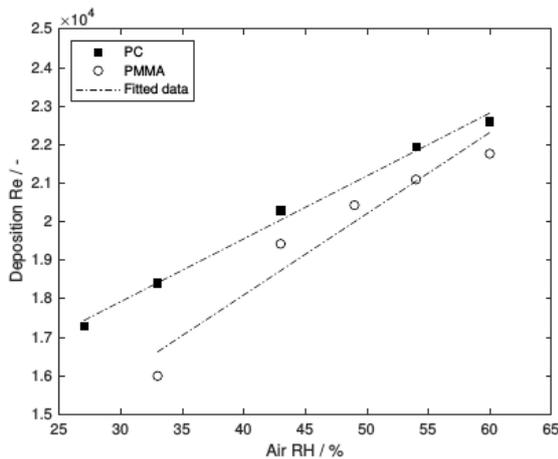


Abb. 1: Experimentelle Bestimmung der Ablagerungsgeschwindigkeit abhängig von der Luftfeuchte und dem Material des Transportrohrs [15].

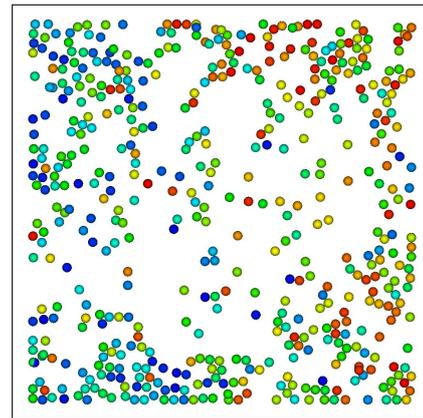


Abb. 2: Ablagerung unter Einfluss von Kontakt-, Gravitations-, Trägheits- und van der Waals Kräften, berechnet mit dem neuen Algorithmus [11].

3. Numerische Arbeiten

Innerhalb des Projekts wurden umfangreiche numerische Modellentwicklungen und Simulationen durchgeführt. Hierbei wurde zuerst der Einfluss elektrostatischer Kräfte auf das Strömungsverhalten von Pulvern berechnet [1, 4, 5]. Die Untersuchung ergab einen starken Einfluss, im Besonderen im wandnahen Bereich in welchem die genaue Partikeldynamik die Aufladung der Partikel durch Wandkontakte bestimmt. Anschließend wurde ein neuer numerischer Algorithmus für die Berechnungen der Trajektorien geladener Partikel während deren Interaktion erstellt [14]. Des Weiteren wurde ein komplexer Ansatz zur exakten Simulation der Bildung von Ablagerungen entwickelt (Abb. 2). Dies ist besonders herausfordernd, da hier gleichzeitig elektrostatische, aerodynamische, van der Waals, Gravitations- und statisch überbestimmte Kontaktkräfte wirken. Durch den effizienten Algorithmus wird dieses gekoppelte System schnell und akkurat numerisch gelöst.

Letztendlich führten die innerhalb des Projekts durchgeführten numerischen Entwicklungen zum Computerprogramm *paFiX* (particle flow simulation in explosion protection). Mithilfe dessen lassen sich die Dynamik von Partikelströmungen unter dem Einfluss elektrostatischer Kräfte in verfahrenstechnischen Anlagen vorhersagen. Dies erste Version dieses Programms wurde im März 2019 auf der Homepage der Arbeitsgruppe (www.ptb.de/cms/asep) der Allgemeinheit frei zur Verfügung gestellt. Dadurch lässt sich durch in der chemischen und verfahrenstechnischen Industrie in einfacher, schneller und kostengünstiger Weise z.B. die Auswirkung der Geometrieänderung eines Rohrleitungssystems auf die zu erwartenden Ablagerungen beurteilen. Diese Ergebnisse können verwendet werden, um die Auslegung einer Anlage zu optimieren. Außerdem bietet *paFiX* eine hervorragende Grundlage für die zukünftige Forschung auf dem Gebiet der Auswirkung elektrostatischer Aufladung auf Pulverströmungen. Daher wird das Tool aktiv weiterentwickelt und die Veröffentlichung weiterer Versionen ist geplant.

4. Fazit

Im Rahmen des geförderten Projekts entstand durch einen interdisziplinären Ansatz ein neuer numerischer Löser, der die Untersuchung der Physik elektrostatisch aufgeladener Partikelströmungen ermöglicht. Mithilfe dieses Löasers können in Zukunft Fragestellungen bezüglich der Gründe für Partikelablagerungen und deren Ausmaß untersucht werden. Auf Grundlage der Arbeiten, die in diesem Vorhaben erzielt wurden, wird zudem aktuell ein DFG-Antrag vorbereitet. Ich danke der Max-Buchner Forschungsförderung für die Unterstützung der wissenschaftlichen Arbeiten.

5. Veröffentlichungen, die im Rahmen dieses Projekts entstanden sind

- [1] H. Grosshans, L. Villafañe, A. Banko, and M. V. Papalexandris. Influence of electrostatic charges on the particle concentration in wall-bounded turbulent flows. In *8th World Congress on Particle Technology*. Orlando, FL, USA, April 2018.
- [2] E. Klahn and H. Grosshans. An accurate and efficient algorithm to model the agglomeration of macroscopic particles. *submitted*, 2019.
- [3] C. Bissinger and H. Grosshans. A new computational algorithm for the interaction between electrically charged particles. *submitted*, 2019.
- [4] H. Grosshans, L. Villafañe, A. Banko, and M. V. Papalexandris. Case study on the influence of electrostatic charges on particle concentration in turbulent duct flows. *Powder Technol.*, in press, 2018.
- [5] H. Grosshans. Modulation of particle dynamics in dilute duct flows by electrostatic charges. *Phys. Fluids*, 30(8):083303, 2018.
- [6] H. Grosshans. Modulation of particle-laden flows by electrostatic charges. In *12th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions*. Kansas City, MO, USA, September 2018.
- [7] C. Bissinger and H. Grosshans. Computation of the interaction of electrically charged particles. In *APS Meeting Abstracts*. November 2018.
- [8] H. Grosshans and M. V. Papalexandris. Influence of electrostatic charges and solid-mass loading on particle dynamics in duct flows. In *APS Meeting Abstracts*. November 2018.
- [9] L. Ceresiat, H. Grosshans, and M. V. Papalexandris. The role of particle properties on powder electrification during pneumatic transport. In *APS Meeting Abstracts*. November 2018.
- [10] H. Grosshans, N. Susanti, and M. V. Papalexandris. Experimental evaluation of deposit formation during powder transport. In *APS Meeting Abstracts*. November 2019.
- [11] E. Klahn and H. Grosshans. Modeling the agglomeration of electrostatically charged particles. In *Electrostatics 2019*. Manchester, UK, April 2019.
- [12] H. Grosshans. Modeling the agglomeration of electrostatically charged particles. In *BAM-PTB Kolloquium 2019*. Braunschweig, Germany, May 2019.
- [13] Holger Grosshans. *Simulation of Turbulent Particle-laden Flows and their Electrostatic Charging*. Habilitation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, submitted.
- [14] C. Bissinger. *Modeling the Interaction Between Charged Particles*. Bachelor's thesis, Leibniz Universität Hannover, 2018.
- [15] N. Susanti. *Development of an Experimental Test-rig to Evaluate Deposit Formation During Powder Transport*. Master's thesis, OVGU Magdeburg, 2019.