

Simulation strömungsinduzierter Segregationsprozesse von Suspensionen hoher Partikeldichte

Sabrina Wick

Motivation

Aus der Vielzahl verfügbarer numerischer Methoden zur Beschreibung partikelbeladener Strömungen wurden in dieser Arbeit das Suspension Balance Model (SBM) und die Multiphase Particle-In-Cell (MP-PIC) Methode ausgewählt. Beide Ansätze verfolgen unterschiedliche Modellierungskonzepte und weisen spezifische Vor- und Nachteile hinsichtlich Genauigkeit, Rechenaufwand und Anwendbarkeit auf. Der **Pulverspritzguss (PIM)** ist eine Schlüsseltechnologie zur Herstellung komplexer Bauteile aus Metall- und Keramikpulvern. Trotz seiner Vorteile birgt der Prozess Herausforderungen, die ohne Simulation oft zu kostspieligen Fehlern führen. Ein zentrales Problem ist die Entmischung (Segregation) der homogenen Pulver-Fließmittel-Suspension. Diese kann während des Spritzgießens oder bei Standzeiten auftreten und führt direkt zu Qualitätsmängeln im fertigen Bauteil. Ein präzises Verständnis und die Vorhersage solcher Segregationsprozesse sind entscheidend, um die Bauteilqualität signifikant zu verbessern und den Bedarf an kostenintensiven Tests zu minimieren. Die eingesetzte Simulationsmethode muss bei Reynolds-Zahlen kleiner 0,1 insbesondere die scherinduzierte Migration (Partikel bewegen sich in Gebiete niedriger Gradienten der Schergeschwindigkeit) abbilden. Bei höheren Reynolds-Zahlen im laminaren Bereich ist die Abbildung von Segregation durch Gewichtskraft und Massenträgheit erforderlich. Besonderes Augenmerk liegt auf der Eignung der Methoden für hochkonzentrierte Suspensionen mit Millionen bis Milliarden Partikeln im Mikrometerbereich, bei denen Kopplungen aus Strömungs- und Partikelsimulation aufgrund des hohen Rechenaufwands an ihre Grenzen stoßen.

Methoden

Beim **Suspension Balance Model (SBM)** werden die Navier-Stokes-Gleichungen für die Suspension gelöst [1]. Diese werden durch eine zusätzliche Massenbilanz der Partikelphase ergänzt. Die Kopplung der Gleichungen erfolgt über die Strömungsgeschwindigkeit der Suspension sowie die Dichte und Viskosität, die vom Phasenanteil abhängen. Der Volumenanteil der Partikelphase wird dabei durch empirische Modelle abgebildet, die Position einzelner Partikel wird nicht explizit berechnet. Bei der **Multiphase Particle-In-Cell (MP-PIC)** Methode werden Partikelpakete diskret verfolgt, während die umgebende Flüssigkeitsphase auf einem festen Gitter gelöst wird [2]. Die Phasen werden gekoppelt, indem die Volumenanteile pro Zelle berücksichtigt und die Fluidaten an der Position der Partikel interpoliert werden. Kollisionen zwischen den Partikeln oder Partikelpaketen werden nicht direkt simuliert; stattdessen werden deren Auswirkungen durch empirische Modelle beschrieben. Dies ermöglicht es, Partikel zu Partikelpaketen zusammenzufassen und so die Rechenzeit erheblich zu reduzieren. Die MP-PIC-Methode wird besonders oft für die Simulation von Auftrieb und Sedimentation einer großen Anzahl von Partikeln in Gasströmungen eingesetzt.

Ergebnisse

Sowohl das SBM als auch die MP-PIC Methode sind in der Lage, die Sedimentation von Partikeln, die durch Dichteunterschiede verursacht wird, zu modellieren.

Ein entscheidender Unterschied zwischen den Methoden liegt in der Abbildung der **scherinduzierten Migration**. Mit den aktuellen SBM-Modellen kann die scherinduzierte Migration in Couette-, Platten- und Rohrströmungen gut abgebildet werden. Im untersuchten Fall konnte eine Abweichung von unter 6 % zwischen Messung und Simulation des SBM in einem geraden, durchströmten Rohr festgestellt werden. Die hier ausgewählte MP-PIC Methode hingegen konnte die scherinduzierte Migration nicht nachbilden.

Hinsichtlich der Berücksichtigung der **Massenträgheit** unterscheiden sich die Modelle ebenfalls: Der Einfluss der Massenträgheit wird bei der MP-PIC Methode berücksichtigt, was sich beispielsweise in der Anreicherung von Partikeln in einem mehrfach gebogenen Rohr zeigt. Dieser Einfluss kommt beim SBM jedoch nicht zum Tragen.

Ein wesentlicher Faktor für die praktische Anwendbarkeit der Modelle ist der Rechenaufwand. Der Rechenaufwand des SBM ist unabhängig von der Anzahl der Partikel. Im Gegensatz dazu steigt der Rechenaufwand bei der MP-PIC Methode nahezu quadratisch mit der Partikelanzahl an, was sie für den Pulverspritzgussprozess als zu rechenaufwändig erscheinen lässt.

Fazit

Die Kopplung zweier Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) Solver ist aufgrund des Rechenaufwands für den Pulverspritzgussprozess ungeeignet. Die Multiphase Particle-in-Cell (MP-PIC) Methode kann Segregation durch Massenträgheit plausibel abbilden, ist jedoch für den Pulverspritzguss zu rechenaufwändig. Das Suspension Balance Model (SBM) hingegen erweist sich als die vielversprechendste Methode: es überzeugt, unabhängig von der Partikelanzahl, durch den geringen Rechenaufwand und bildet scherinduzierte Effekte mit hoher Genauigkeit (unter 6 % Abweichung) ab. Allerdings kann der Einfluss der Massenträgheit nicht berücksichtigt werden, was den Anwendungsbereich auf Suspensionen mit Reynolds-Zahlen kleiner eins beschränkt.

Referenzen

- [1] P. R. Nott und J. F. Brady, „Pressure-driven flow of suspensions: simulation and theory“, Journal of Fluid Mechanics, Bd. 275, S. 157–199, Sep. 1994, doi: 10.1017/S0022112094002326.
- [2] M. J. Andrews und P. J. O'Rourke, „The multiphase particle-in-cell (MP-PIC) method for dense particulate flows“, International Journal of Multiphase Flow, Bd. 22, Nr. 2, S. 379–402, Apr. 1996, doi: 10.1016/0301-9322(95)00072-0.
- [3] S. Oh, Y.-q. Song, D. I. Garagash, B. Lecampion und J. Desroches, „Pressure-Driven Suspension Flow near Jamming“, Physical Review Letters, Jg. 114, Nr. 8, S. 088 301, Feb. 2015.
- [4] S. Wick, „Simulation strömungsinduzierter Segregationsprozesse von Suspensionen hoher Partikeldichte“, Masterthesis, Hochschule Offenburg, Offenburg, 2025.

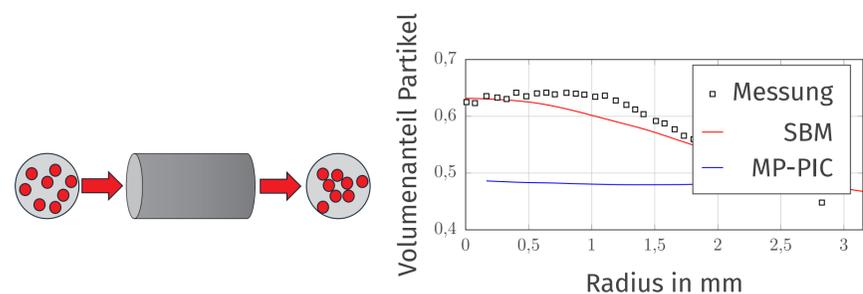


Abbildung 1: Vergleich der Partikelverteilung zwischen Messergebnissen [3] und Simulationsergebnisse mit dem SBM eines geraden, durchströmten Rohrs. Beim SBM ist die scherinduzierte Migration im Rohr zu erkennen. Die Konzentration der Partikel nimmt mit zunehmenden Radius ab.

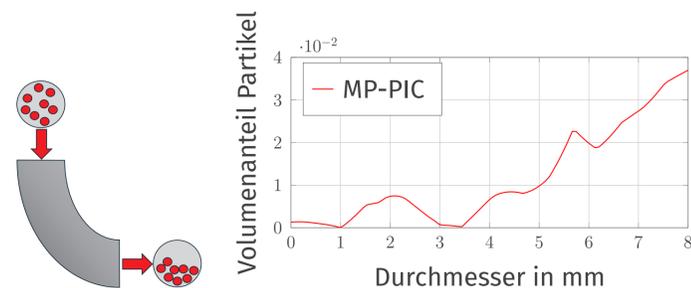


Abbildung 2: Anreicherung der Partikel an der Außenseite des Rohrbogens durch Massenträgheit in einem mehrfach gebogenen Rohr für Simulationen mit der MP-PIC Methode. [4]