

1 Einleitung und Motivation

Die Strömung von Newtonfluiden in Schüttungen und Filtern ist vielfach untersucht, hingegen gibt es Wissensdefizite bei nicht - newtonschen Fluiden, obgleich deren Filtration in der industriellen Technik häufig vorkommt. Kenntnisse über integrale Größen (Volumenstrom, Druckabfall) sind vorhanden, hingegen sind Geschwindigkeitsverteilungen in Abhängigkeit von der Hohlraumgeometrie und vom Fluidtyp noch kaum untersucht [VOR]. Wechselwirkungen zwischen newtonschen und nicht - newtonschen Fluiden und (porösen) Feststoffen kommen vor zum Beispiel bei der Filtration, in Trickle-Bed- und Festbett-Reaktoren, bei der Sedimentation, beim Andicken von Schlämmen und bei der Erdölförderung.

Partikelschüttungen sind eine verbreitete Form von Festbetten, die z.B. in der chemischen Industrie zahlreich Anwendung finden. Stellvertretend für die vielen Partikelformen werden in dieser Arbeit Kugeln und Zylinder untersucht. Grund dafür ist eine z.B. in [ROT] beschriebene gute Reproduzierbarkeit von Kugelschüttungen und deren hoher Ordnungsgrad an begrenzenden Wänden. Kugelschüttungen, mit einem Rohr-zu-Kugeldurchmesser größer als 8, weisen im Innern eine vollkommen ungeordnete "Struktur" auf. Die Auslegung z.B. von Festbettreaktoren erfolgt oft nach einem "Plug - Flow" Modell [CHH], durch Aufprägen einer konstanten Strömungsgeschwindigkeit über den Strömungsquerschnitt. Bei vielen Anwendungen ist eine differenzierte Modellierung erforderlich. Die Strömungsverteilung des Fluids z.B. in Festbettreaktoren kann signifikant sein für die Temperatur- und Konzentrationsverteilung. Eine möglichst exakte Auslegung erfordert eine detaillierte Kenntnis über das Strömungsverhalten von verschiedenen Fluidtypen in Festbetten. Hochkomplexe Strömungsgebiete in solchen Partikelschüttungen lassen sich nur schwer mit akzeptablem Aufwand ermitteln. Ein Beispiel ist das Vermessen von transparenten, brechungsindexangepassten Systemen mittels Laser Doppler Anemometrie (LDA) in [ROT].

Auf der experimentellen Seite hat sich in den letzten Jahren die Magnetische Resonanz Tomographie (MRT) als Bildgebungs- und Messverfahren etabliert. Die MR-Technik erlaubt die nichtinvasive, berührungslose Bestimmung von komplexen Geometrien und die Messung von Strömungsfeldern in solchen Geometrien unabhängig von den optischen Eigenschaften des strömenden Mediums. Damit bietet die MRT - Messtechnik neue Möglichkeiten, z.B. um Fortschritte bei der Modellierung von Wärme- und Stofftransportprozessen in Festbettreaktoren zu erzielen. Dazu ist eine detaillierte Kenntnis der Strömungsverteilung

erforderlich, die aufgrund der komplexen Geometrie theoretisch nicht exakt abgeleitet werden kann.

Ein Ziel dieser Arbeit ist es, die noch junge Messmethode der Kernspinresonanz auf technische Fragestellungen anzuwenden. Bisher hat sich die MRT -Technik insbesondere bei Bildgebungssystemen in der Medizin etabliert. In der industriellen Technik ist das Abbilden von Geometrien oft nicht das primäre Ziel der Messung, sondern nur ein Zwischenergebnis bei der Lösung komplexer Fragestellungen.

Ziel ist der Vergleich der Fließvorgänge in ein und derselben Hohlraumgeometrie (mittels zerstörungsfrei arbeitender MRT - Methode) bei Newtonfluiden, viskoelastischen (strukturviskosen) Fluiden und Fluide mit Fließgrenze durch verschiedene "Modellpackungen", wie monodisperse und bimodale Glaskugelschüttungen verschiedener Abmessungen, ein Bündel paralleler Rohre, querangeströmte Zylinder in einem quadratischen Kanal und in Serie geschaltete Lochplatten.

Um die mittels MRT - Messtechnik ermittelten Strömungsvorgänge in diesen zum Teil komplexen Geometrien deuten zu können, werden in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Prof. Durst an der Universität Erlangen vergleichende Simulationen durchgeführt. Die Fluidmechanik der Strömung von Newtonfluiden durch Partikelsysteme hat in den letzten Jahrzehnten entscheidende Anstöße zur Entwicklung leistungsstarker numerischer Methoden gegeben. Ein noch junges Verfahren ist die Lattice Boltzmann-Methode (LBM). Dieses Verfahren ist in der Lage, die Strömung sowohl in numerisch generierten Packungen, als auch in komplexeren mittels MRT gemessenen Packungen zu simulieren.

2 Eigenschaften nicht - newtonscher Fluide

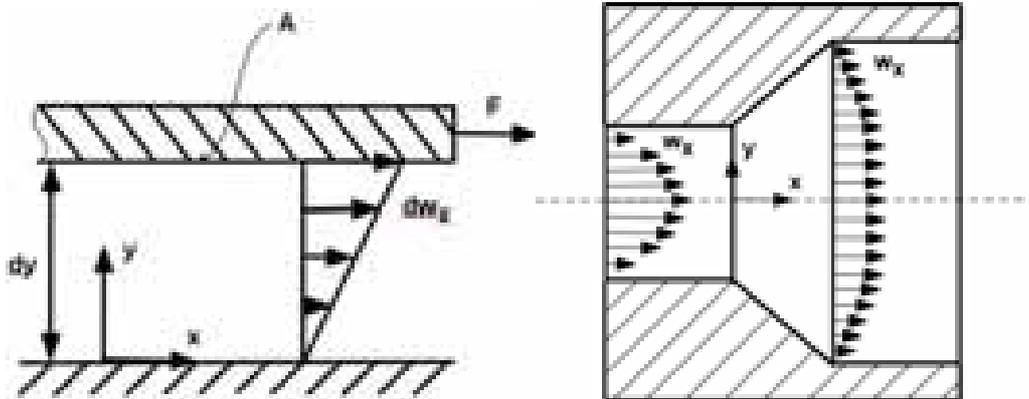


Abb. 2.1: Links: Ebene Scherströmung zwischen zwei Platten. Rechts: Äquibiaxiale Dehnung entlang der Achse in einer Düse mit Kreisquerschnitt.

Die kurze, aber vielleicht für diese Arbeit zweckmäßige Darstellung der Eigenschaften nicht-newtonscher Flüssigkeiten und Fluide folgt zum Teil der Beschreibung in [CHH].

Wird eine dünne Fluidschicht zwischen zwei parallelen Platten, die sich im Abstand dy befinden, geschert, z.B. durch das Bewegen der oberen Platte mit konstanter Geschwindigkeit dw_x , hervorgerufen durch eine konstante Scherkraft F , so wird diese durch eine innere Widerstandskraft im Fluid ausgeglichen, aufgrund seiner Viskosität. Für ein Newtonfluid in stationärer Strömung ist die Schubspannung ϑ_{xy} proportional zur Scherrate ρ_{xy} :

$$F / A = \vartheta_{xy} = \xi (dw_x / dy) = \xi \rho_{xy} \quad (2.1)$$

Die Proportionalitätskonstante ξ , eine Materialgröße, ist bekannt als Scherviskosität. Für ein Newtonfluid ist die Viskosität per Definition unabhängig von der Scherrate. Die Darstellung der Schubspannung in Abhängigkeit der Scherrate in einem Diagramm wird als Fließkurve bezeichnet. Für ein Newtonfluid ergibt sich eine Ursprungsgerade (Abb. 2.2). Beispiele für Newtonfluide sind: Öle, Honig, Wasser, Zuckerlösung.

Nicht - newtonsche Fluide

Die nachfolgenden Betrachtungen beschränken sich zunächst auf eine reine Scherströmung. Eine Substanz wird als nicht - newtonsch bezeichnet, wenn die Fließkurve nichtlinear ist oder nicht durch den Ursprung verläuft. Die Viskosität hängt von der Scherrate oder der Schubspannung ab, die sich im Fluid ausbildet. Nicht - newtonsche Fluide können in drei Klassen eingeteilt werden: