

Tim Neumann

Mehrphasige Durchströmung heterogener kompressibler poröser Medien

Abstract

The influencing factors and the properties of multiphase flow processes in porous media and disperse beds are investigated for high flow velocities, i.e. for an inertial dominated flow. Therefore the processes are first analysed with different disperse model systems, in which various properties of the porous matrix are varied, and then this knowledge is transferred to real porous media.

As important characteristics the mean diameter of the particles, the wettability of the surface and the porosity are changed. The used fluids are water and air. As model systems beds of glass spheres and polystyrene particles are investigated. As examples for real porous media beds of soil and of lignite are used. In addition porous membranes represented by diffusion layers of direct methanol fuel cells are tested.

With the use of the capillary model the properties of simple porous media can be deduced theoretically. In contrast to this for common systems it is generally necessary to use empirical functions like Darcy's law or the Ergun-Forchheimer-equation to model the transport of momentum because of the geometric complexity.

In case of a single phase flow the results show a dependence of the characteristic values permeability and passability on the mean diameter of the particles, the porosity, the tortuosity and the geometry of the pores' expansion for compressible as well as non-deformable disperse systems.

The existence of various fluidal phases in multiphase flow is balanced with the introduction of the relative permeability and relative passability. These depend on the distribution and proportion of the different fluid phases, the surface tension and the ratio of the fluids' densities. The description of the phase distribution is deduced from investigations on the capillary properties. An additional pressure loss is caused by differences in the fluids' velocity and the resulting shear forces at the interface. This leads to the introduction of an interaction force in the momentum equation.

For the evaluation of the multiphase flow a numerical algorithm is developed which solves the equation of momentum and conservation for both fluids in one step. The results show in the range of low permeability an increasing resistance of the liquid phase because of increasing capillary forces. This leads on the one hand to a lower mobility of the water. On the other hand small pores blocked by liquid have to be released by an additional energy input as the increased pressure loss. In heterogeneous media the flow resistance and the ratio of wettable to non-wettable surface are direct dependent on one another.

The comparison with the results of real porous media shows a general validity of the found concepts even for these systems. However, in case of the colloidal media lignite empirical functions are indispensable. Because of the hydrophobisation in case of the fuel cell membrane different flow resistances for the liquid and the gaseous phases are created, by which the mobility of the fluids is influenced directly. This makes it necessary to define the saturation in two stages. Doing so it becomes possible to describe the processes also within this media quite well with the confirmed model functions.

Zusammenfassung

Mehrphasenströmungen durch poröse Medien sind in der Verfahrens- und Energietechnik Grundlage einer Vielzahl technischer Anwendungen. Die dabei auftretenden Vorgänge sind komplex und so kommt es bereits bei einer isothermen zweiphasigen Durchströmung zu einem Zusammenwirken mehrerer, sich gegenseitig beeinflussender Effekte.

Bislang konzentrierten sich die Untersuchungen auf einphasige Strömungsvorgänge, die wesentlich durch Reibungskräfte dominiert sind. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Einflüsse mehrphasiger Durchströmungsprozesse in kapillarporösen Materialien und dispersen Haufwerken bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten untersucht.

Dazu werden zunächst anhand verschiedener Schüttgüter, bei denen sich gezielt einzelne Eigenschaften der porösen Matrix variieren lassen, die Modellvorstellungen analysiert, um anschließend die erzielten Erkenntnisse auf reale poröse Medien zu übertragen.

Als Parameter dienen der mittlere Partikeldurchmesser, die Benetzbarkeit der Oberfläche sowie die Porosität. Die Strömungsmedien bei den experimentellen Untersuchungen sind Luft und Wasser. Stellvertretend für reale Schüttgüter kommen Erdboden und Braunkohle zum Einsatz, für heterogene poröse Medien Membrane von Direkt-Methanol-Brennstoffzellen.

Mit Hilfe des Kapillarmodells lassen sich für geordnete poröse Medien die Haufwerkeigenschaften annähernd theoretisch ableiten. Aufgrund der geometrischen Komplexität muss jedoch häufig auf empirische Ansätze, wie das Darcy-Gesetz und die Ergun-Forchheimer-Gleichung, zur Modellierung des Impulstransportes zurückgegriffen werden.

Im Fall der einphasigen Durchströmung wird gezeigt, dass die Haufwerkskenngrößen Permeabilität und Passabilität sowohl bei kompressiblen als auch bei nicht deformierbaren Haufwerken Funktionen des mittleren Partikeldurchmessers, der Porosität sowie der Tortuosität und der Geometrie der Porenerweiterungen sind.

Dem Vorhandensein zusätzlicher fluider Phasen bei mehrphasigen Prozessen wird durch Einführung der relativen Permeabilitäten und relativen Passabilitäten Rechnung getragen, die zum einen von der Verteilung der fluider Phasen im Haufwerk, zum anderen von den Oberflächenspannungen und den Verhältnissen der fluider Dichten abhängen. Ein zusätzlicher Druckverlust wird durch die z.T. sehr großen Unterschiede der Strömungsgeschwindigkeiten und die daraus resultierenden Schubkräfte an den Phasengrenzflächen hervorgerufen. Diesem wird durch Einführung einer Wechselwirkungskraft Rechnung getragen. Zur Beschreibung der Phasenverteilung sind Untersuchungen der kapillaren Eigenschaften durchgeführt worden.

Für die Auswertung der mehrphasigen Untersuchungen ist ein numerischer Algorithmus entwickelt worden, der die Impulsbilanzen und die Erhaltungsgleichungen der fluider Phasen gemeinsam löst. Die Untersuchungen belegen, dass für niedrige Permeabilitäten der Widerstand der flüssigen Phase bedingt durch die zunehmenden Kapillarkräfte steigt. Dies hat zum einen eine geringere Beweglichkeit des Wassers zur Folge. Zum anderen bedeutet dies, dass kleine mit Flüssigkeit blockierte Poren erst durch einen zusätzlichen Energieeintrag in Form eines erhöhten Druckabfalls wieder freigegeben werden müssen. In heterogenen Medien sind der Strömungswiderstand und Anteil benetzbarer zu nichtbenetzbarer Oberflächen direkt von einander abhängig.

Der Vergleich mit den realen porösen Medien zeigt, dass die Modellvorstellungen grundsätzlich auch für diese Gültigkeit besitzen. Zur Beschreibung kolloidaler Stoffe wie der Braunkohle sind jedoch empirische Ansätze unerlässlich. Bei den Brennstoffzellenmembranen wird deutlich, dass sich der komplexe Aufbau durch eine Reduzierung des gesamten Prozesses auf einzelne Teilbereiche, in diesem Fall die abschnittsweise Definition der Sättigung, mit den Modellansätzen recht gut beschreiben lässt. So bedingt eine Hydrophobisierung unterschiedliche Strömungswiderstände der flüssigen und gasförmigen Phase, wodurch die Mobilitäten der fluider Medien gezielt beeinflusst werden können.