

ENTWICKLUNG UND VALIDIERUNG VON CFD-MODELLEN FÜR ZWEIPHASENSTRÖMUNGEN

Thomas Frank¹, Dirk Lucas², Horst-Michael Prasser², Eckhard Krepper², Jun-Mei Shi²

¹ Thomas.Frank@ansys.com, ANSYS Germany GmbH, Otterfing

² Forschungszentrum Rossendorf e.V., Institut für Sicherheitsforschung

1. Einleitung

„Computational Fluid Dynamics“-Codes ist der Oberbegriff für Rechenprogramme zur mehrdimensionalen numerischen Strömungssimulation. Sie beruhen auf den strömungsmechanischen Grundgleichungen, partiellen Differentialgleichungen, die bis vor einigen Jahren mit Ausnahme von wenigen Spezialfällen als praktisch unlösbar galten. Mit der heute verfügbaren Rechentechnik und fortgeschrittenen numerischen Methoden können jedoch bereits komplizierte Strömungsfelder, wie sie unter anderem in der Automobil- und Luftfahrtindustrie auftreten, berechnet werden. Der Vorteil: An Stelle empirischer Berechnungsformeln, die immer nur für einen bestimmten Anwendungsfall galten, kann auf ein universelles Rechenmodell zurückgegriffen werden. Dadurch werden aufwendige Experimente eingespart, die früher beispielsweise in Windkanälen durchgeführt werden mussten. Durch Eingabe der geometrischen Daten des zu untersuchenden Objekts kann das CFD-Programm leicht an die Randbedingungen der jeweiligen Aufgabenstellung angepasst werden, ohne dabei immer wieder neue Modellgleichungen entwickeln zu müssen.

Von dem, was bei reinen Gas- oder Flüssigkeitsströmungen schon breite Anwendung findet, ist man im Fall zwei- oder mehrphasiger Strömungen jedoch noch weit entfernt. Wenn, wie beispielsweise in einem Kernreaktor, ein Zweiphasengemisch aus Dampf und Wasser die Brennelemente kühlt, dann müssen zusätzlich die Wechselwirkungen zwischen den beiden beteiligten Phasen beschrieben werden. An den Phasengrenzflächen zwischen beiden Phasen findet ein Austausch von Masse, Impuls und Energie statt. Wie Bild 1 zeigt, ist die Struktur dieser Phasengrenzfläche sehr komplex. Auch bei wachsender Rechenleistung ist es nicht möglich, die rasch veränderliche Gestalt dieser Grenzfläche zu berechnen. Stattdessen wird auf das Zweifluidmodell zurückgegriffen, bei dem angenommen wird, dass an jedem Ort beide Phasen mit einem gewissen Volumenanteil gleichzeitig präsent sind. Wichtige Strukturmerkmale der Phasengrenzfläche werden dann durch Parameter, wie Blasengrößen und Blasenanzahldichten wiedergegeben. Der Schwerpunkt der Forschung liegt auf der Erstellung von Modellgleichungen, die notwendig sind, um die Intensität der Wechselwirkungen an der Phasengrenze in Abhängigkeit von diesen Struktur- und lokalen Strömungsparametern zu berechnen.

Im Rahmen einer Initiative des BMWA zur „Entwicklung und Anwendung von CFD-Programmen für Phänomene im Kühlkreislauf von Leichtwasserreaktoren“ werden Arbeiten zur Ertüchtigung des CFD¹-Codes CFX von ANSYS gemeinsam vom Institut für Sicherheitsforschung des Forschungszentrum Rossendorf (FZR) und dem Codeentwickler, der ANSYS Germany GmbH durchgeführt. Ausgehend von experimentellen Daten, die an der TOPFLOW-Versuchsanlage des FZR mit innovativer, hochauflösender Messtechnik gewonnen werden, erfolgt die Entwicklung neuer Modelle und Konzepte. Diese werden mit vereinfachten Methoden getestet und nach erfolgreichem Test vom Codeentwickler in CFX

¹ CFD – Computational Fluid Dynamics

implementiert. Anschließend erfolgt die gemeinsame Validierung der Modelle an Hand experimenteller Daten.

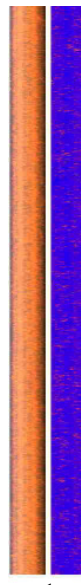
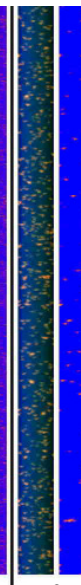
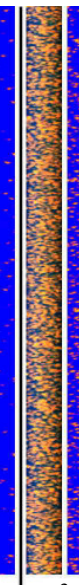
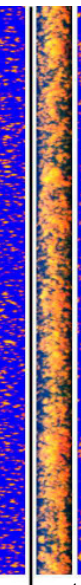
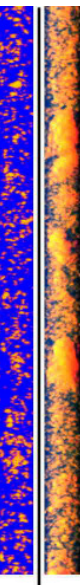
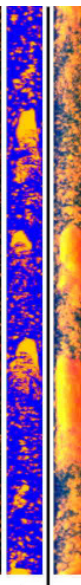
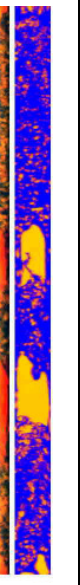
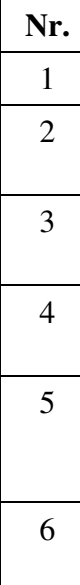
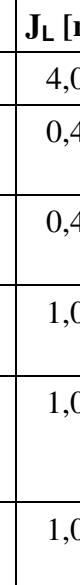

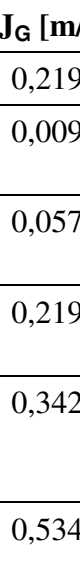
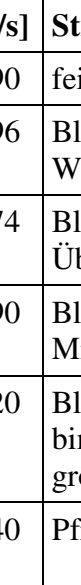
											
1	2	3	4	5	6						
Nr.	J_L [m/s]	J_G [m/s]	Strömungsform								
1	4,047	0,2190	fein dispers								
2	0,405	0,0096	Blasenströmung mit Wandmaximum								
3	0,405	0,0574	Blasenströmung im Übergangsbereich								
4	1,017	0,2190	Blasenströmung mit Mittenmaximum								
5	1,017	0,3420	Blasenströmung mit bimodaler Blasen-größenverteilung								
6	1,017	0,5340	Pfropfenströmung								

Bild 1: Virtuelle Seitenansichten (linke Säulen) und Schnittbilder durch die Mittelebene des Rohrs (rechte Säulen) für verschiedene Blasenströmungen

Dieses Vorgehen soll im Folgenden am Beispiel der Entwicklung von Modellen für adiabate Blasenströmungen demonstriert werden. Ausgangspunkt sind hierbei Experimente für eine aufwärtsgerichtete vertikale Rohrströmung. Für die spezielle Strömung wurden Modelle für den Impulsaustausch zwischen den Phasen sowie für Blasenkoaleszenz und Zerfall getestet. Aus Untersuchungen mit einem stark vereinfachten Modell wurde die Notwendigkeit eines inhomogenen Mehrblasenklassenmodells abgeleitet. Das gemeinsam erarbeitete Konzept wurde dann in ANSYS CFX implementiert. Weiterhin konnten Empfehlungen für die zu verwendenden Modelle für Blaskäfte abgeleitet werden. Die Validierung des CFX-Codes mit diesen Modellen erfolgte zuerst ebenfalls an Hand von Experimenten für die Rohrströmung, anschließend wurde die Geometrieunabhängigkeit der Modelle an Experimenten für ein ausgeprägt dreidimensionales Strömungsfeld überprüft.

2. Impulsaustausch zwischen den Blasen und der Flüssigkeit

Die hier vorgestellten Arbeiten beziehen sich auf den Spezialfall adiabater Blasenströmungen ohne Phasenübergang. In diesem Fall muss lediglich der Impulsaustausch zwischen den Phasen berücksichtigt werden. Dieser kann durch s.g. Blaskräfte, also durch Ansätze für die auf eine Dampfblase wirkenden Kräfte, beschrieben werden. Die Modelle („closure laws“) für diese Blaskräfte dürfen entsprechend der Forderung nach Geometrieunabhängigkeit nur von lokalen Parametern der Strömung, nicht aber von globalen Geometrieparametern abhängen. Die Schwierigkeiten der Modellierung erwachsen daraus, dass diese Blaskräfte nicht nur von den Parametern des Strömungsfelds der Flüssigkeit, sondern auch von der Struktur der Phasengrenzfläche selbst, also der Blasengröße und -form abhängen [1]. Diese Struktur ist äußerst komplex und kann nicht in allen Details im Sinne einer direkten numerischen Simulation modelliert werden [2,3].

Die Entwicklung und Validierung der Modelle für die Blasenkräfte erfolgt auf Grundlage experimenteller Daten, die an der Versuchsanlage TOPFLOW mit dem sogenannten Gittersensor in der benötigten hohen Zeit- und Ortsauflösung zur Verfügung stehen [4]. Die Modellentwicklungen und Validierungen erfolgten bisher am Beispiel der aufwärtsgerichteten Luft/Wasser bzw. Wasser/Wasserdampf-Strömung in vertikalen, zylindrischen Rohren. Diese spezielle Strömung ist durch die klar definierten Randbedingungen gekennzeichnet. Die Zylindergeometrie und die Möglichkeit, die Entwicklung der Strömung über die Rohrlänge beobachten zu können, bieten weitere Vorteile. Quantitative Vergleiche können für ableitbare zeitgemittelte Verteilungen wie z.B. radiale Gasgehaltsprofile oder Blasengrößenverteilungen durchgeführt werden [5,15]. Die Gültigkeit der entwickelten Modelle ist aber nicht auf Rohrströmungen begrenzt.

Die Experimente für eine stationäre Rohrströmung erfolgten für verschiedene Rohrdurchmesser (DN50 und DN200) an der TOPFLOW-Anlage [6]. Die Volumenstromdichten bzw. Leerrohrgeschwindigkeiten für Flüssigkeit und Gas (J_L und J_G) wurden in weiten Bereichen variiert. Es wurden verschiedene radiale Geometrien der Gaseinspeisung und verschiedene Durchmesser der Einspeiseöffnungen untersucht. Die Messungen erfolgten bei unterschiedlichen Abständen zwischen Gaseinspeisung und Messebene. Damit liegt eine äußerst umfangreiche Datenbasis für die Modellierung und Validierung vor.

In den Arbeiten wurden neben Gravitation und Archimedischem Auftrieb die Widerstandskraft (Drag), die virtuelle Massenkraft, die laterale Auftriebskraft (Lift), die Wandkraft und die turbulente Dispersionskraft berücksichtigt. Die Widerstandskraft modelliert die Reibung zwischen den Gasblasen und der Flüssigphase. Zusammen mit der Auftriebskraft bestimmt sie die Aufstiegsgeschwindigkeit der Blasen gegenüber der Flüssigkeitsströmung. Aber auch bei allen anderen Relativbewegungen zwischen den Gasblasen und der Flüssigkeit spielt sie eine Rolle. Die virtuelle Massenkraft berücksichtigt, dass stets ein Teil der die Blase umgebenden Flüssigkeit mitgerissen wird, was eine Korrektur der beschleunigten Masse erfordert. Die laterale Auftriebskraft wirkt quer zur Strömungsrichtung und ist proportional zum Gradienten der Flüssigkeitsgeschwindigkeit:

$$\vec{F}_L = -C_L \rho_l \alpha (\vec{w}_g - \vec{w}_l) \times \text{rot}(\vec{w}_l).$$

In dieser Gleichung bezeichnet C_L den dimensionslosen Lift-Kraft Koeffizienten, für den verschiedene empirische Ansätze in der Literatur zu finden sind, ρ_l ist die Dichte der Flüssigkeit, α der Gasvolumenanteil² und w_g bzw. w_l sind die Geschwindigkeiten der Gas- bzw. Wasserphase. Die Lift-Kraft spiegelt komplexe Wechselwirkungen zwischen der Blase und dem Geschwindigkeitsfeld der Flüssigkeit wieder [7]. Der Koeffizient C_L hängt stark von der Blasengröße ab und ändert nach der Korrelation von Tomiyama [8] für Luft-Wasser Strömungen bei Umgebungsbedingungen bei einem Blasendurchmesser von ca. 5,8 mm sein Vorzeichen. In der aufwärtsgerichteten Rohrströmung wirkt die Lift-Kraft für kleinere Blasen in Richtung Rohrwand, für größere in Richtung Rohrmitte.

Die Wandkraft wirkt hingegen immer in Normalenrichtung von der Wand weg. Sie beschreibt Kraftwirkungen auf Grund von Deformationen der Blasen im wandnahen Scherfeld und auf Grund wandnaher Turbulenz. Mathematische Ansätze für die quantitative Beschreibung der Wandkraft finden sich bei Antal, Tomiyama und Frank [15]. Die turbulente Dispersionskraft bewirkt eine Vergleichmäßigung der räumlichen Verteilung der Blasen. Diese Kraftwirkung kann als eine über den Blasenwiderstand vermittelte Wirkung der turbulenten

² Je nach Referenz wird der Gasvolumenanteil auch häufig mit r_g bezeichnet.

Wirbelbewegung des Fluids auf die Einzelblase verstanden werden. Eine Herleitung eines mathematischen Modells für die turbulente Dispersionskraft findet sich in [12,13].

In der aufwärtsgerichteten Rohrströmung verursachen diese Kräfte radiale Umverteilungen der Blasen und die Herausbildung radialer Gasgehaltprofile, die für bestimmte Blasengrößenverteilungen charakteristisch sind. Sie können für quantitative Vergleiche zwischen Rechnung und Experiment genutzt werden.

Es wurden verschiedene Modelle für die o.g. Blasenkräfte untersucht. Für eine voll entwickelte Strömung resultieren die radialen Gasgehaltsprofile im Wesentlichen aus einem Gleichgewicht von Lift-, Wand- und turbulenter Dispersionskraft. Dieses Gleichgewicht muss in Abhängigkeit von der Blasengröße betrachtet werden. Für diesen Zweck wird die Gasphase in mehrere Blasenklassen unterteilt. Das gesamte radiale Gasgehaltsprofil erhält man aus einer mit der Blasengrößenverteilung gewichteten Summation der Profile für die einzelnen Blasenklassen.

3. Modellbildung, Implementierung und Validierung

Für den Fall der voll entwickelten Strömung erfolgte der Test der Modelle zunächst mit einem vereinfachten 1D-Modell, welches die Parameter nur in radialer Richtung auflöst (azimutale und axiale Abhängigkeiten entfallen bei voll entwickelter Strömung) und eine große Anzahl von Blasenklassen berücksichtigen kann [9]. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Kombination der Korrelationen für die Lift- und die Wandkraft von Tomiyama mit dem FAD-Modell³ für die turbulente Dispersionskraft die experimentellen Ergebnisse am besten wiedergeben [10,12,15]. Die radialen Gasgehaltsprofile werden für einen weiten Bereich von Gas- und Flüssigkeits-Volumenstromdichten in guter Übereinstimmung mit dem Experiment berechnet. Insbesondere wird der Übergang zwischen einem Wandmaximum und einem Maximum in der Rohrmitte richtig vorhergesagt (s. Bild 2).

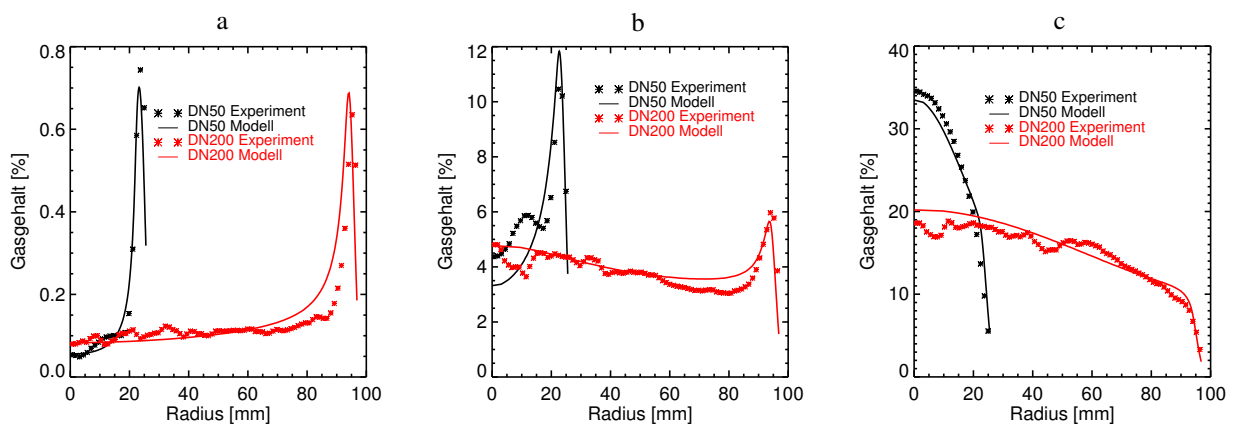


Bild 2: Vergleich gemessener und berechneter Gasgehaltsprofile für verschiedene Volumenstromdichten von Gas und Flüssigkeit (a: $J_L=1\text{m/s}$, $J_G=0,004\text{ m/s}$; b: $J_L=1\text{m/s}$, $J_G=0,057\text{ m/s}$; c: $J_L=0,1\text{m/s}$, $J_G=0,14\text{ m/s}$)

³ FAD – Favre Averaged Drag. Durch Aufteilung der Widerstandskraft in zeitgemittelte Anteile und Schwankungsanteile sowie die Anwendung der s.g. Favre-Averaging-Methode erhält man eine Gleichung für die turbulente Dispersionskraft [12,15].

Die entsprechenden Modelle für die Blasenkräfte wurden nach der Erprobung im 1D-Modell in ANSYS CFX implementiert und gehören seit der Version CFX-5.7 zum Standardumfang des Programms [11,12]. Auf Grundlage der Untersuchungen wurde die Notwendigkeit eines Mehrblasenklassenmodells deutlich, welches auch unterschiedliche Geschwindigkeiten für die einzelnen Blasenklassen zulässt. Ein solches Modell wurde inzwischen entwickelt und steht ab der Programmversion CFX-10 unter dem Begriff „inhomogenes MUSIG-Modell“ allen Nutzern des Programms zur Verfügung.

Bild 3 zeigt Ergebnisse einer Rechnung mit diesem Modell im Vergleich zu experimentellen Daten. Die drei Punktkurven zeigen die berechneten Profile für die 3 berücksichtigten Blasenklassen. Die Summe dieser Kurven liefert das Profil des totalen Gasgehalts (schwarze Kurve). Es stimmt gut mit dem gemessenen Gasgehaltsprofil (rote Dreiecke) überein. Verbleibende Diskrepanzen haben ihre Ursache in der begrenzten Anzahl der berücksichtigten Blasenklassen sowie Abweichungen von der voll entwickelten Strömung durch vereinzelt Koaleszenzen.

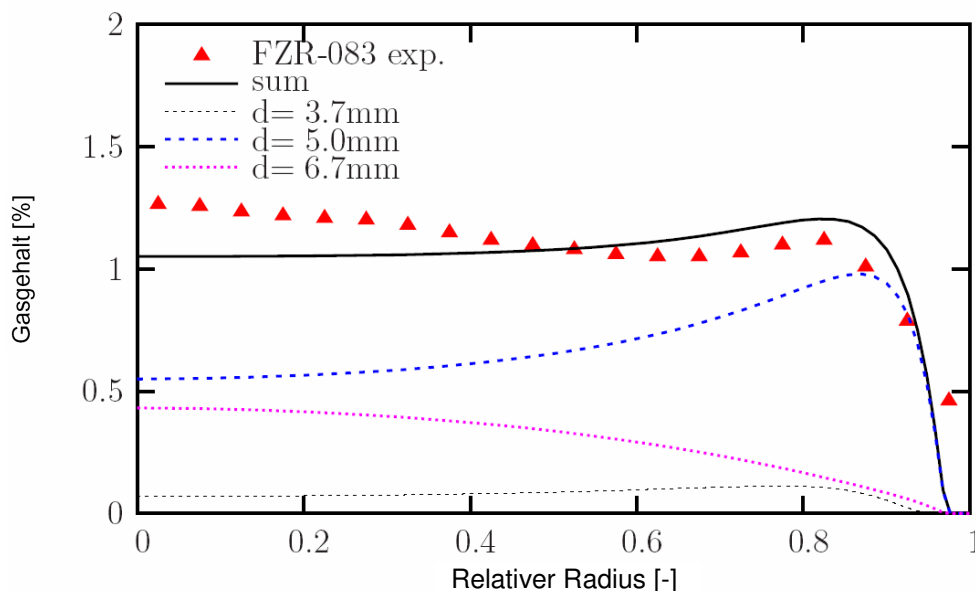


Bild 3: Vergleich eines gemessenen Gasgehaltsprofils (Dreiecke) mit dem Ergebnis einer CFX-Rechnung (schwarze Linie). Die drei Punktkurven zeigen die berechneten differentiellen Profile für die 3 berücksichtigten Blasenklassen. $J_L=1\text{m/s}$, $J_G=0,4\text{ m/s}$.

Als nächster Schritt erfolgte der Übergang zur Untersuchung der sich entlang des Rohrs entwickelnden Strömung. Dabei müssen im Fall einer Mehrphasenströmung mit höherem Gasgehalt auch Blasenkoaleszenz und -zerfall berücksichtigt werden. Bild 4 zeigt als Beispiel Gasgehaltsverteilungen, die unter Berücksichtigung von zwei Blasenklassen mit ANSYS CFX berechnet wurden. Die Gasblasen werden dabei über mehrere Düsen, die gleichmäßig über dem Querschnitt verteilt sind, in die Rohrleitung eingespeist. In Strömungsrichtung sagt CFX eine Umverteilung der Blasen voraus, wobei kleine Blasen zum Rand, große zum Zentrum des Rohrquerschnitts wandern. Diese Rechenergebnisse stimmen gut mit Gasgehaltsprofilen überein, die mittels Gittersensor für die unterschiedlichen Blasengrößenklassen ermittelt wurden.

Die Funktion des inhomogenen MUSIG Modells wird in Bild 5 demonstriert. Eine Rohrströmung wird mit 34 MUSIG-Blasenklassen verteilt auf zwei Geschwindigkeitsfelder

beschrieben. Damit wird die Aufweitung der Blasengrößenverteilung vom Einlass (Bild 5, linkes Bild, blaue Verteilung) zum oberen Rohrende (rote Verteilung) beschrieben. Das ermöglicht die Simulation von Blasenströmungen mit höherem Gasgehalt, in denen das Maximum der Gasgehaltsverteilung im Zentrum zu finden ist (rechts). In diesem Beispiel musste das Koaleszenz- und Fragmentationsmodell noch angepasst werden. Diese Anpassungen gelten jedoch für einen breiteren Bereich der Randbedingungen. An der Verbesserung dieser Modelle wird gearbeitet.

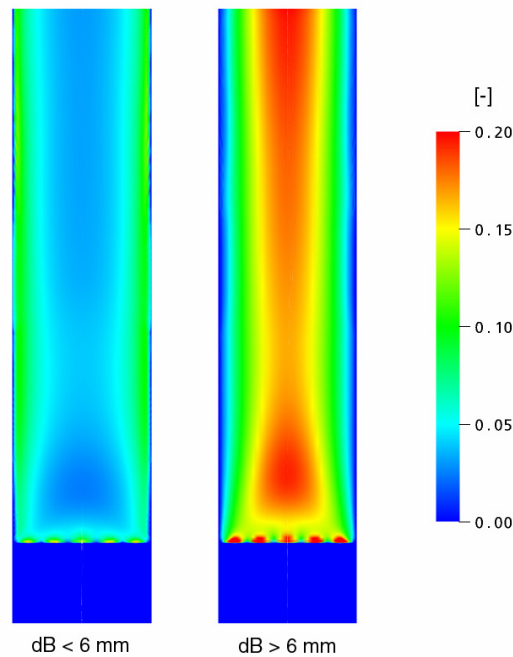


Bild 4: Die quer zur Hauptströmungsrichtung wirkende Auftriebskraft befördert kleine Blasen zum Rand einer aufwärts durchströmten vertikalen Rohrleitung, während größere Blasen zum Zentrum wandern. Das inhomogene MUSIG-Modell, eine gemeinsam mit ANSYS Germany entwickelte neue Komponente von ANSYS CFX, gibt diesen Effekt richtig wieder.

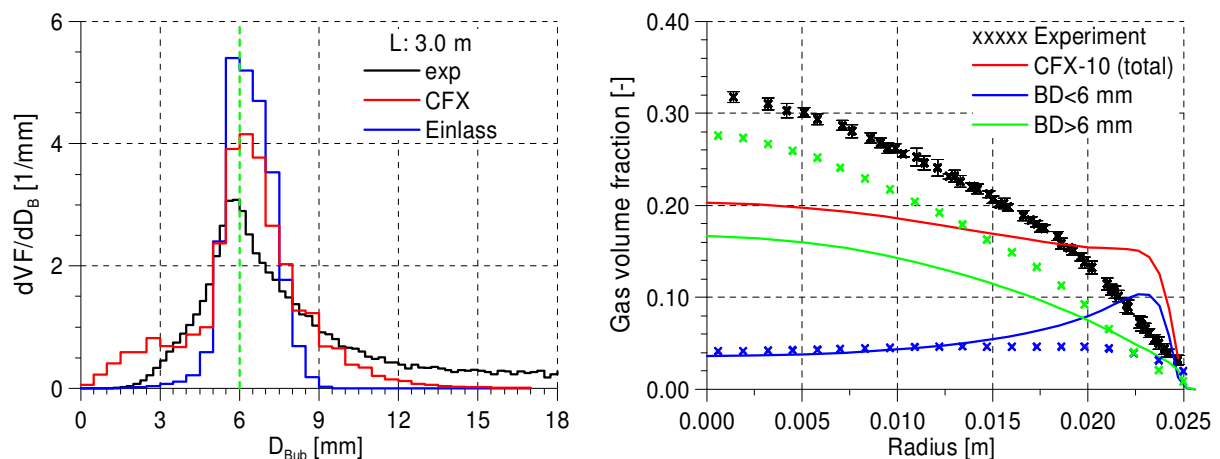


Bild 5: Blasengrößenverteilung (links) und radiale Gasgehaltsverteilung (rechts)

4. Geometrieunabhängigkeit

Die Gültigkeit der entwickelten Modelle ist aber nicht auf Rohrströmungen begrenzt. Vielmehr ist es das Ziel, in dem Zusammenwirken von Experimenten und CFD-Simulationen möglichst allgemeingültige Modelle für derartige Strömungsformen zu entwickeln. Um die Anwendbarkeit der Modelle für die Blasenkräfte auch für komplizierte Strömungsfelder nachzuweisen, wurden Experimente mit einer halbseitigen Versperrung des Rohrquerschnitts durchgeführt. Messungen erfolgten wiederum mit dem Gittersensor, wobei der Abstand zwischen der zur Versperrung benutzen Blende (Bild 6) und dem Sensor variiert wurde. Dadurch kann das dreidimensionale Strömungsfeld in der Umgebung des Hindernisses mit Rechenergebnissen verglichen werden.

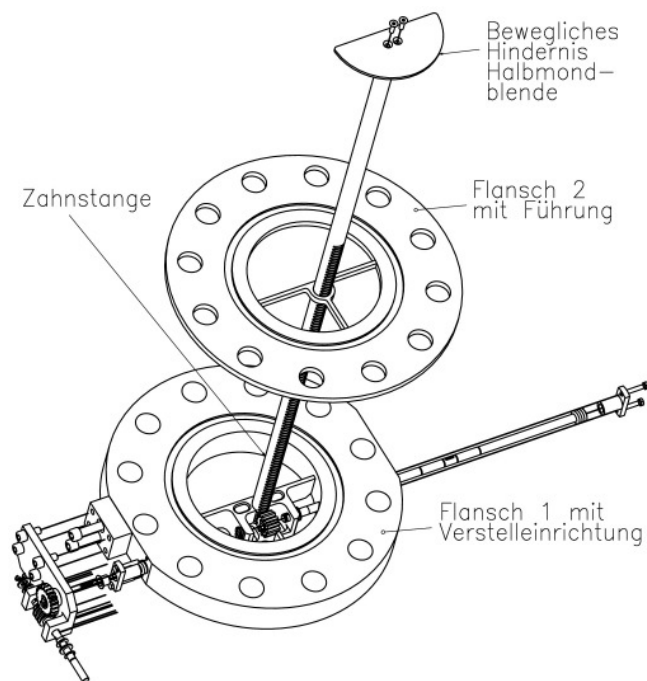


Bild 6: Halbmondblende mit Zahnstangenmechanismus zur Verschiebung innerhalb der vertikalen Testsektion DN200 von TOPFLOW

Noch bevor mit den Experimenten begonnen wurde, ist für eine Kombination der Volumenstromdichten von Gas und Flüssigkeit eine Berechnung der Gasgehaltsverteilung und des Geschwindigkeitsfeldes in der Umgebung der Blende mit ANSYS CFX ausgeführt worden [15,16]. Hierbei wurde das Eulersche Zweifluidmodell genutzt, die Gasphase wurde durch monodisperse Blasen von 4.8 - 5.2 mm Durchmesser angenähert. Die Geometrie eines ca. 3 m langen Abschnitts der Rohrleitung mit der Blende wurde unter Vernachlässigung der übrigen Einbauten (Zahnstange, Antrieb) auf zwei unterschiedlich feinen Gittern aus 119 000 bzw. 473 000 Hexaeder-Elementen abgebildet. Die Gittergenerierung wurde mit ICEM CFD durchgeführt.

Durch die Rechnung wurde hinter der Blende ein großräumiges Rezirkulationsgebiet vorhergesagt, in dem es zu einer starken Anreicherung der Gasphase kommt, wogegen im Stau vor der Blende der Gasgehalt absinkt. Hierzu zeigt Bild 7 auf der linken Seite die mit dem feineren der beiden Gitter berechneten Gasgehalts- und Geschwindigkeitsverteilungen auf einem Längsschnitt der Rohrleitung (Symmetrieebene). Die Schnittebene steht hierbei senkrecht auf der geraden Kante der Halbmondblende. Die theoretisch vorhergesagten

Strukturen wurden durch das Experiment voll bestätigt (Bild 7, rechts). Bisher basierten die Berechnungen auf der Annahme von Blasen einer einheitlichen Größe. In der Realität traten Blasen auf, deren Durchmesser signifikant über dem angenommenen Wert lagen. Diese größeren Gasblasen bildeten sich zu einem großen Teil in dem Rezirkulationsgebiet hinter der Blende, wo hohe lokale Gasgehalte vorherrschen, auf Grund von Blasenkoaleszenz. Damit erklärt sich die Überbewertung des Gasgehalts hinter der Blende in der Rechnung, da größere Blasen auch einem höheren Auftrieb unterliegen und somit eine geringere Verweilzeit in dem Rezirkulationsgebiet hinter der Blende aufweisen. Im nächsten Schritt wird das oben beschriebene inhomogene MUSIG-Modell anhand der Messdaten getestet, was die Genauigkeit der Simulation weiter erhöhen wird.

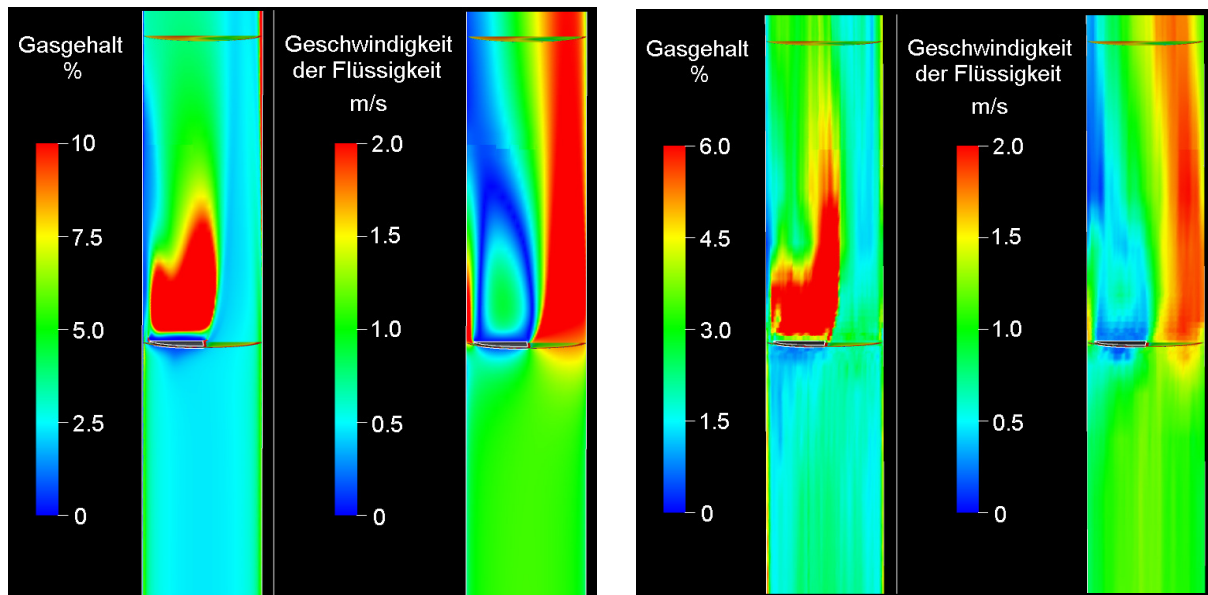


Bild 7: Gasgehalts- und Geschwindigkeitsverteilung auf einem Längsschnitt durch die Teststrecke mit Halbmondblende (Schnitt senkrecht zur geraden Kante der Blende), Luft-Wasser-Test, $J_G = 0.037$ m/s, $J_L = 1$ m/s, **links:** ANSYS CFX Rechnung, **rechts:** Experiment.

5. Zusammenfassung

CFD-Modelle zur Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen den Phasen werden auf der Basis hochaufgelöster experimenteller Daten entwickelt und getestet. Nach erfolgreichen Tests erfolgt die Implementierung der Modelle in den Strömungsmechanikcode ANSYS CFX. Die anschließende Validierung schließt auch den Nachweis der Anwendbarkeit dieser Modelle auf andere, weit komplexere Strömungssituationen ein. Dieses Vorgehen wurde hier am Beispiel von Modellen für adiabate Blasenströmungen erläutert. Weitere Entwicklungen laufen bzgl. Strömungen mit separierten Phasen, z.B. stratifizierten Rohrströmungen/Schwallströmungen oder Strömungssimulationen für den Heißstrang eines Kernreaktors. Für die Zukunft sind Arbeiten zur Verbesserung der Modellierung von Strömungen mit Phasenübergang sowie für hohe Gasgehalte geplant.

Danksagung

Die Arbeiten werden im Rahmen der vom Ministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) geförderten Forschungsprojekte 150 1265 und 150 1271 durchgeführt.

Literatur

- [1] Lucas, D.; Krepper, E.; Prasser, H.-M., Evolution of flow patterns, gas fraction profiles and bubble size distributions in gas-liquid flows in vertical tubes. *Transactions of the Institute of Fluid-Flow Machinery* 112 (2003) 37-46.
- [2] Lucas, D.; Krepper, E.; Prasser, H.-M., Modelling of bubble flow in vertical pipes. The 10th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-10), Seoul, Korea, October 5-9, 2003, paper A00301.
- [3] Krepper, E.; Lucas, D.; Prasser, H.-M., On the modelling of bubbly flow in vertical pipes. *Nuclear Engineering and Design* 235 (2005) 597-611.
- [4] Prasser, H.-M.; Krepper, E.; Lucas, D., Evolution of the two-phase flow in a vertical tube - decomposition of gas fraction profiles according to bubble size classes using wire-mesh sensors. *International Journal of Thermal Sciences* 41 (2002) 17-28.
- [5] Lucas, D.; Krepper, E.; Prasser, H.-M., Experimental and theoretical investigation of bubble break-up and coalescence in bubbly flows. In: *Bubbly flows - Analysis, Modelling and Calculation* by M. Sommerfeld (Editor), Heat and Mass Transfer Series, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2004, pp. 101-115.
- [6] Lucas, D.; Prasser, H.-M., Scaling effects in vertical bubbly pipe flow. 5th International Conference on Multiphase Flow (ICMF'04), Yokohama, Japan, May 30–June 4, 2004, Paper No. 187.
- [7] Lucas, D.; Prasser, H.-M.; Manera, A., Influence of the lift force on the stability of a bubble column. *Chemical Engineering Science* (accepted for publication).
- [8] Tomiyama, A., Struggle with computational bubble dynamics. 3rd International Conference on Multiphase Flow (ICMF'98), Lyon, France, June 8 –12, 1998.
- [9] Lucas, D.; Krepper, E.; Prasser, H.-M., Prediction of radial gas profiles in vertical pipe flow on basis of the bubble size distribution. *International Journal of Thermal Sciences* 40 (2001) 217-225.
- [10] Lucas, D.; Shi, J.-M.; Krepper, E.; Prasser, H.-M., Models for the forces acting on bubbles in comparison with experimental data for vertical pipe flow. 3rd International Symposium on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation, Pisa, Italy, September 22-24, 2004, Paper ha04.
- [11] Shi, J.-M.; Frank, T.; Krepper, E.; Lucas, D.; Rohde, U.; Prasser, H.-M., Implementation and Validation of Non-Drag Interfacial Forces in CFX-5.6. 5th International Conference on Multiphase Flow (ICMF'04), Yokohama, Japan, May 30–June 4, 2004, Paper No. 400.
- [12] Frank Th., Shi J., Burns A.D.: "Validation of Eulerian multiphase flow models for nuclear safety applications", 3rd Int. Symposium on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation, Pisa, Italy, 22-24 September 2004, pp. 1-8.
- [13] Frank Th.: "Progress in the numerical simulation (CFD) of 3-dimensional gas-liquid multiphase flows", 2. NAFEMS CFD-Seminar "Simulation komplexer Strömungsvorgänge (CFD) - Anwendungen und Entwicklungstendenzen", Niedernhausen bei Wiesbaden, Germany, 25.-26. April 2005, pp. 1-18.
- [14] Frank Th., Zwart J.P., Shi J., Krepper E., Lucas D., Rohde U.: "Inhomogeneous MUSIG model - a population balance approach for polydisperse bubbly flows", International Conference "Nuclear Energy for New Europe", NENE-2005, Bled, Slovenia, September 5-8, 2005, pp. 1-13.
- [15] Frank Th.: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben "Entwicklung von CFD-Software zur Simulation mehrdimensionaler Strömungen im Reaktorkühlsystem", Reaktorsicherheitsforschung-Vorhaben-Nr. 150 1271, ANSYS Report TR-06-01, pp. 1-72, 2006.
- [16] Prasser H.-M., Frank Th., Beyer M., Carl H., Pietruske H., Schütz P.: "Gas-liquid flow around an obstacle in a vertical pipe – Experiments and CFD Simulation", Submitted to Jahrestagung Kerntechnik 2006, Eurogress Aachen, Germany, May 16.-18., 2006, pp. 1-6.