

Strömungssimulation am IKE

S. Becker, R. Demuth, T. Giese, S. Heiken, J. Niemann, D. Saptoadi, E. Laurien
Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE)
Abteilung Thermofluidodynamik

Die Simulation von Strömungen ist für die ingenieurmäßige Auslegung und die Sicherheitsanalyse von Energiesystemen, z.B. Kraftwerke, kern- oder klimatechnische Anlagen, von hoher Bedeutung. Die wachsende Relevanz des Forschungsgebietes Strömungssimulation in der Energietechnik wurde am Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE) zum Anlaß genommen, die Abteilung Thermofluidodynamik zu gründen. Sie befaßt sich in Lehre und Forschung seit dem Sommer 1996 unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. E. Laurien mit der numerischen Simulation von Strömungen mit Wärmetransport und Turbulenz. Unter anderem werden Simulationen zweiphasiger Strömungen von z.B. Wasserdampf-Wasser oder Luft-Wasser durchgeführt. Von großer Bedeutung sind hierbei Phasenaustauschvorgänge durch Schmelzen, Sieden und Kondensation, welche neben der numerischen Simulation von Blasenströmungen ein wichtiges Forschungsgebiet am IKE darstellen.

Lehre

Um den Studenten der Studiengänge Maschinenwesen und Energie- und Anlagentechnik einen Einblick in die numerische Berechnung von Strömungen zu geben, wurde von der Abteilung Thermofluidodynamik des IKE die Vorlesung „*Einführung in die Numerische Strömungssimulation*“ mit dazugehörigen Gruppenübungen zu Beginn des Wintersemesters 1998/99 erstmalig angeboten. In der Vorlesung erhalten die Studenten eine Einführung in die Anwendung und in die zugrundeliegenden Annahmen und Voraussetzungen der numerischen Strömungssimulation. Die Übungen begleiten die Vorlesung und ermöglichen es dem Studenten interaktiv selber Strömungssimulationen anhand einfacher Beispiele wie z.B. der freien Konvektionsströmung in einem seitlich beheiztem Behälter mit moderner in der Industrie weit verbreiteter Simulationssoftware wie CFX-4 von AEA Technology unter Anleitung und Betreuung der wissenschaftlichen Assistenten der Abteilung durchzuführen.

Themen sind

- laminare und turbulente freie Behälterströmung,
- Einfluß der Rechengitter auf das numerische Ergebnis (Gittervariation),

- Programmierung eines einfachen Finite-Differenzen und Finite-Volumen-Programms zur Lösung der Poissongleichung,
- Parallelisierung,
- Visualisierung anhand verschiedener Beispiele,
- laminarer und turbulenter Freistrahler,
- dreidimensionale Strömungen am Beispiel der Strömung in einem 90° Rohrkrümmer mit Ablösung und Sekundärströmung und
- Einblicke in die industrielle Anwendung durch Dr. P. Dittrich von der DaimlerChrysler-Forschung.

In den Übungen werden alle wesentlichen Arbeitsschritte der numerischen Strömungssimulation wie Gittergenerierung, Berechnung und Auswertung interaktiv mit den Studenten durchgeführt. Neben einer Betrachtung der Grundlagen der numerischen Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen werden Finite Differenzen- und Finite Volumen-Verfahren vorgestellt. Stabilitäts- und Konvergenzprobleme von CFD-Codes werden besprochen und durch die anschließenden Übungen vom Teilnehmer als reale Probleme erfahren.

Dem Bereich Netzgenerierung als ersten und in der Praxis oftmals aufwendigsten Arbeitsschritt einer strömungsmechanischen Analyse widmet sich eine Übung, in der in den weitverbreiteten Netzgenerator ICEM eingeführt wird.

Anhand der Simulation von Naturkonvektionsvorgängen in Behältern mit dem Analysepaket CFX-4 kann der Student im Rahmen einer einfachen Aufgabenstellung selbständig unter Betreuung der zuständigen wissenschaftlichen Assistenten Strömungssimulationen durchführen und auswerten. Dabei wird anhand einer konkreten Aufgabe deutlich gemacht, welche Probleme auftreten können und Tips zur Lösung gegeben. Daneben wird der Einfluß des numerischen Rechengitters auf die Lösung untersucht. Ein Vergleich der laminaren zur turbulenten freien Konvektionsströmung führt dann die Auswirkungen der Turbulenz klar vor Augen und wird detailliert diskutiert.

Die Übungen zum Teilbereich Auswertung von Simulationsrechnungen sollen den Teilnehmern vermitteln, welche Komplexität einfache Strömungsprobleme besitzen können. Nach der Einführung in das Visualisierungssystem AVS sollen erste praktische Erfahrungen mit der Visualisierung strömungsmechanischer Daten gesammelt werden.

Die Berechnung der Strömung durch einen Rohrkrümmer mit CFX-4 (siehe Abb. 1) ist ein Beispiel für eine praktisch relevante dreidimensionale Problemstellung. Das Auftreten von Sekundärströmungen und Ablösungen in dieser Übung weist auf das Ziel der Strömungssimulation hin, zur Optimierung von Bauteilen und Prozessen beizutragen.

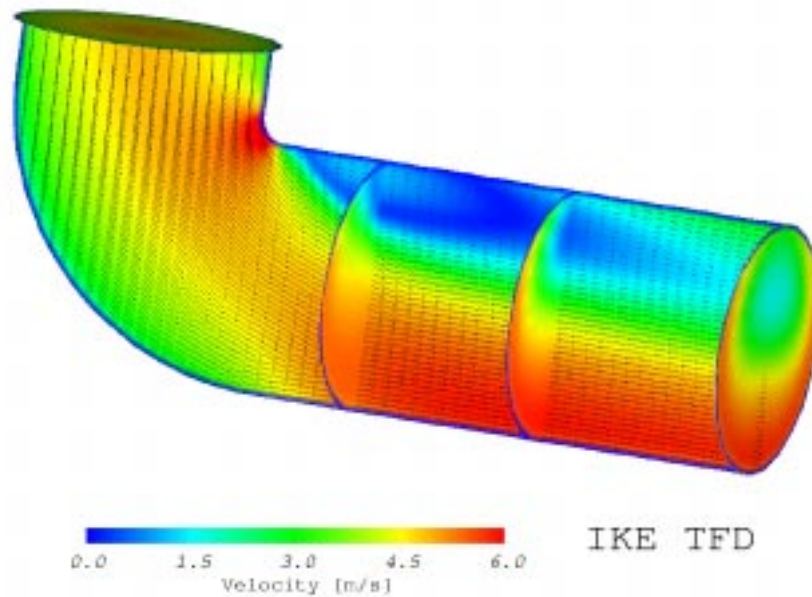


Abbildung 1 : Beispiel aus den Übungen – 90°-Rohrkrümmer

Der durch die endliche Leistung der Computer gesetzten Grenze bei der Rechenzeit und des Hauptspeicherbedarfes wird durch eine kurze Einführung in das Thema Parallelisierung von Programmen Rechnung getragen. Danach haben die Teilnehmer der Vorlesung die Möglichkeit, an einem Beispielpogramm erste Erfahrungen mit einem Parallelrechner am Rechenzentrum zu sammeln.

Die abschließende Übung von Dr. P. Dittrich aus der DaimlerChrysler Forschung zeigt dem Studenten die Möglichkeiten, Probleme und Grenzen der numerischen Strömungssimulation in der tagtäglichen industriellen Praxis auf. Er erfährt dort von vielen Möglichkeiten zur Lösung verschiedener bei der Berechnung auftretender Probleme.

Diese Vorlesungs- und Übungsreihe wird auch im Sommersemester angeboten. Die Termine werden vor Beginn durch Aushang und auch im Vorlesungsverzeichnis rechtzeitig bekanntgegeben. Die Übungen werden im CIP-Pool des IKE stattfinden. Die Zeitplanung der einzelnen Termine sind mit den Themen in der Tabelle 1 unten zusammengefaßt. Die Vorlesungs- und Übungsunterlagen sind zusammen mit weiteren Informationen auf der Homepage der Abteilung

http://www.ike.uni-stuttgart.de/~www_tfd/tfdhome.html

unter Vorlesungen zu finden.

Nr.	Datum	Name der Vorlesung	Übung	Betreuer
1.	21. April	Vorgehensweise und Grundgleichungen der Strömungssimulation	Einführung in den CIP-Pool des Institutes und des SERVUS-Clusters am RUS	Heiken
2	28. April	Diskretisierung partieller Differentialgleichungen	Numerische Berechnung der laminaren freien Konvektionsströmung mit CFX	Becker
3	5. Mai	Netzgenerierung	Gittergenerierung mit ICEM	Khalifa
4	12. Mai	Numerische Ungenauigkeiten und Fehler	Untersuchung der Gitterabhängigkeit am Beispiel der freien Konvektionsströmung mit CFX	Becker
5	19. Mai	Visualisierung	Visualisierung mit AVS	Heiken
6	26. Mai	Finite – Differenzenverfahren	Programmierung eines FORTRAN-Programmes auf Basis finiter Differenzen	Niemann
7	2. Juni	Numerische Eigenschaften und Verbesserungen	Einbau und Test von Programmweiterungen	Niemann
8	9. Juni	Methode der finiten Volumina	Programmierung eines FORTRAN-Programms nach der Finiten-Volumen-Methode	Demuth
9	16. Juni	Höchstleistungsrechnen	Parallelisierung	Demuth
10	23. Juni	Turbulenz	Numerische Berechnung der turbulenten freien Konvektionsströmung mit CFX	Becker
11	30. Juni	3D- Strömungen	Numerische Simulation der dreidimensionalen Strömung in einem 90°-Rohrkrümmer mit CFX	Giese
12	7. Juli	Numerische Strömungssimulation in der industriellen Praxis	Einblicke in die industrielle Anwendung der Numerischen Strömungssimulation	Dr. Dittrich

Tabelle 1 : Termine der Vorlesungen und Übungen zur *Einführung in die Numerische Strömungssimulation*

Eine weitergehende Vorlesung zum Thema Strömungssimulation bietet Prof. Laurien unter dem Titel „*Methoden der Numerischen Strömungssimulation*“ an; Nähere Informationen hierzu sind auf der oben angeführten Homepage der Abteilung vorhanden.

Forschungsschwerpunkte und Projekte :

Entstehung von Turbulenz in einer Grenzschichtströmung

(R. Demuth, Tel. 685-2105, demuth@ike.uni-stuttgart.de;

S. Heiken, Tel. 685-2105, heiken@ike.uni-stuttgart.de)

Grundlagenforschung wird am IKE auf dem Gebiet der Turbulenzentstehung betrieben. Eine Arbeitsgruppe befaßt sich hier mit der direkten numerischen Simulation (DNS) einer bestimmten Art des laminar-turbulenten Übergangs von Strömungen, der sogenannten Bypass-Transition.

Bei bestimmten technischen Strömungen, wie z.B. in Turbomaschinen, sind die für das Stabilitätsproblem verantwortlichen Störungen innerhalb des Fluids so groß, daß es sofort und ohne ein Auftreten der schon bekannten Instabilitäten (z.B. Tollmien-Schlichting Wellen) zur Ausbildung kleiner turbulenter Gebiete kommt. Diese werden als Turbulenzflecken bezeichnet. Solche nichtlinearen Vorgänge erfordern eine genau physikalische und mathematische Modellierung des Problems.

Ziel der Forschung ist es, die für das Entstehen und die frühe Entwicklung der Turbulenzflecken entscheidenden Parameter zu bestimmen und deren Einfluß zu erfassen. Zur Lösung der Navier-Stokes Gleichungen wird ein für solche Problemstellungen bereits erfolgreich erprobte Kombination aus einem Spektralverfahren und Finiten Differenzen eingesetzt. Der Programmcode wurde für Höchstleistungsrechner mit Vektorprozessoren entwickelt. Eine neue Programmversion zur Untersuchung weiterer Modellannahmen wird in konzeptioneller und erfreulich guter Zusammenarbeit mit der Parallelrechnergruppe des HLRS für Massivparallelrechner ausgelegt.

Die Visualisierung der Simulationsdaten wird mit Hilfe von schneller interaktiver Farbgraphik mit dem Programmpaket AVS/Express der Firma Advanced Visual Systems Inc. durchgeführt. Es werden u.a. Standardmodule für Isoflächen und Isolinien (vgl. Abb. 2) zur Darstellung wichtiger Strömungsgrößen eingesetzt.

Um eine gute Vergleichbarkeit der entstehenden Strömungsstruktur mit experimentellen Visualisierungsmethoden zu erreichen, werden seit einiger Zeit auch sogenannte Teilchenbahnbilder erzeugt. Hier werden für mehrere tausend Partikel im Rechengbiet nach einer wählbaren Anzahl von Zeitschritten die aktuellen Positionen bestimmt und im Bild dargestellt (vgl. Abb. 3).

Als Ergebnis des Projektes ist geplant, Vorschläge zur Modellierung der Bypass-Transition zu machen. Diese Ergebnisse sollen dann in die Weiterentwicklung entsprechender Strömungscodes für die industrielle Anwendung einfließen.

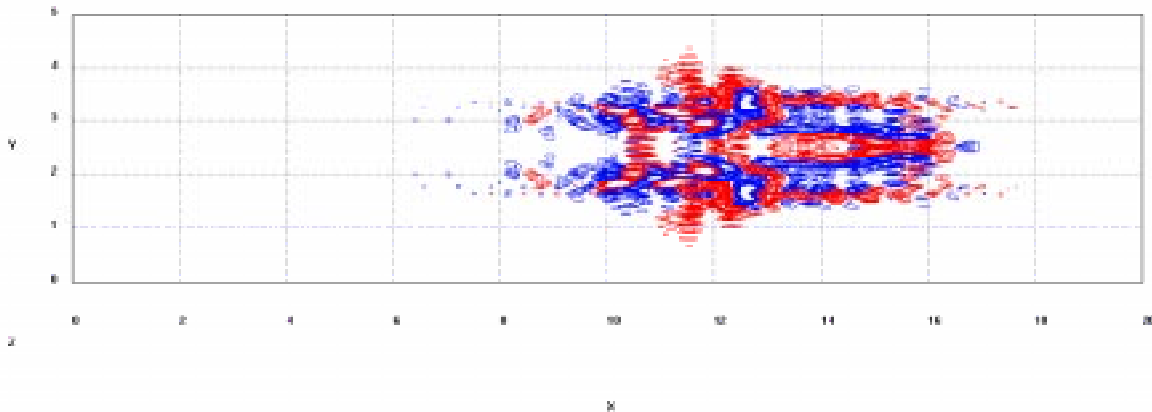


Abbildung 2 : Isolinien Darstellung der Wandnormalengeschwindigkeit bei der Entstehung von Turbulenz

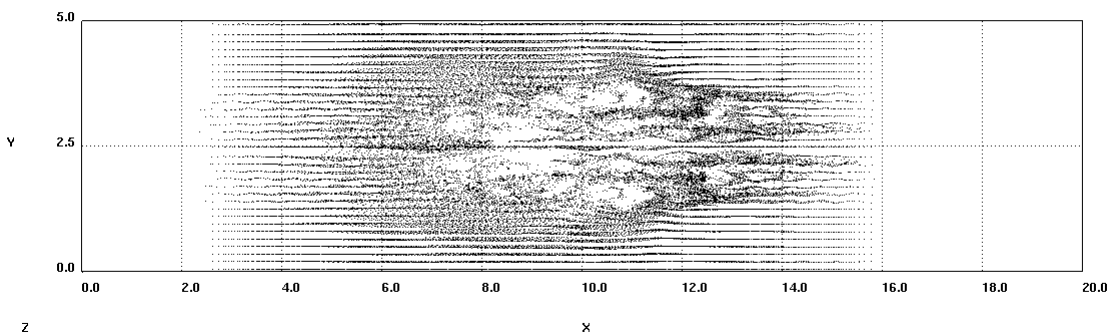


Abbildung 3 : Teilchenbahndarstellung eines „Turbulenzflecks“

Direkte Numerische Simulation von einzelnen Blasen (J. Niemann, Tel. 685-2105, niemann@ike.uni-stuttgart.de)

Im Rahmen des Forschungsprojekts "Direkte Numerische Simulation von Einzelblasen" wird am IKE ein Zweiphasen-Strömungscode entwickelt. Ziel ist es, eine Einzelblase und die sie umgebenden Grenzschichten fein aufzulösen und mit einem parallelen und effizienten Lösungsalgorithmus zu berechnen. Das Programm soll dazu benutzt werden, numerische Experimente durchzuführen. Diese dienen u.a. zur Bestimmung von Parametern (z. B. die Endaufstiegs- geschwindigkeit, Abb. 5) für Systemcodes, in denen z.B. eine komplette Reaktorströmung simuliert wird. Schritt für Schritt sollen in den Zweiphasencode Modelle zur Beschreibung von Grenzflächen, Oberflächenkräfte, Wärmeübertragung und Phasenübergang implementiert werden. Das Programm soll in der Lage sein, alle möglichen und in der Praxis beobachteten physikalischen Vorgänge wie starke Deformation, Aufbrechen und Vereinigung von Oberflächen exakt vorauszusagen. Dies ist nicht selbstverständlich, da die

Mehrzahl existierender Codes dies entweder inhärent nicht zulassen oder unzureichend bzw. falsch beschreiben. Da diese Effekte stark von der dreidimensionalen Oberflächenstruktur der Blase abhängen, muß auf 3D-Gittern mit sehr hohen Auflösungen (ab 128 Volumina in jede Dimension aufwärts) gerechnet werden. Dies ist nur durch massive Parallelisierung möglich. Zur Zeit wird daran gearbeitet, die für eine Zweiphasenströmung notwendigen Erweiterungen in einen mit MPI parallelisierten Mehrgitterlöser für einphasige Large-Eddy-Simulationen zu implementieren. Dabei besteht prinzipiell die Möglichkeit, später ohne weitere Programmänderungen Turbulenz auch für größere Probleme zu simulieren, z. B. Blase-Blase-Wechselwirkung oder das Verhalten von Blasenagglomerationen.

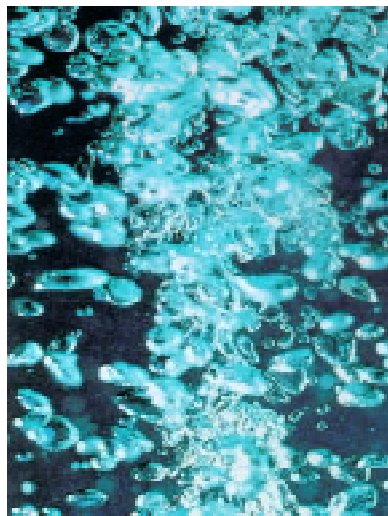


Abbildung 4: Blasen in freiem Aufstieg

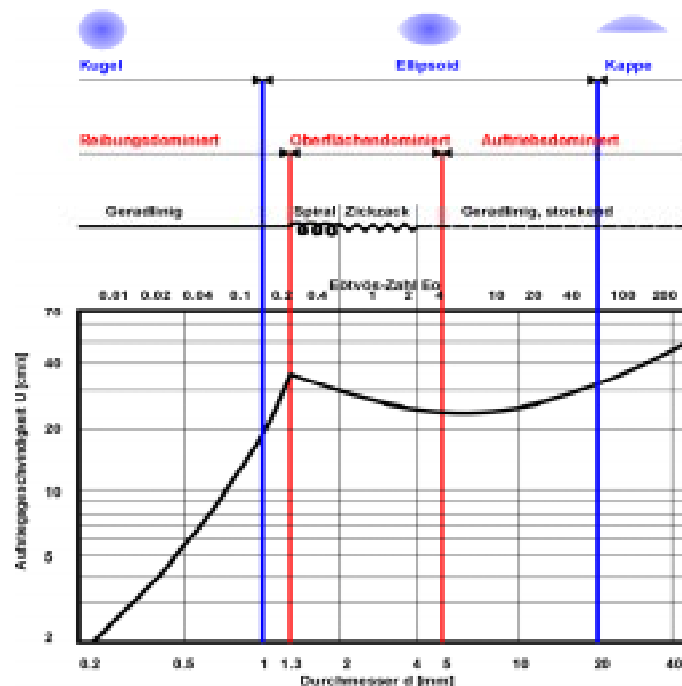


Abbildung 5: (End-) Aufstiegsgeschwindigkeit U von Blasen in Abhängigkeit vom Blasendurchmesser d

Entwicklung eines vereinfachten Modells zur Simulation von Blasenströmungen

(D. Saptoadi, Tel. 685-2492, saptoadi@ike.uni-stuttgart.de)

Die Berechnung von Blasenströmungen stellt ein häufig auftauchendes Problem in technischen Anwendungen dar. Um eine Zweiphasenströmung vollständig zu beschreiben, benötigt man sowohl für die flüssige als auch für die gasförmige Phase einen vollständigen Satz von Navier-Stokes-Gleichungen. Im allgemeinen ist die Lösung eines Systems von mindestens zehn Differentialgleichungen notwendig, was eine große Rechenkapazität erfordert.

Deshalb besteht ein Bedarf nach einem vereinfachten Modell, das die Ansprüche der Ingenieure in der Praxis berücksichtigt. Ein solches Modell wird zur Zeit am Institut entwickelt. Es basiert auf der Annahme, daß nicht alle die Gasphase beschreibenden Differentialgleichungen zur Problemlösung notwendig sind, sondern daß der Einfluß der Blasen auf die Strömung durch Modellgleichungen beschrieben werden kann. Diese Modellgleichungen beschreiben die Wechselwirkungen zwischen den Phasen im Hinblick auf Impuls-, Massen- und Energieaustausch. Daher reicht zur Berechnung des Strömungsproblems, wie in Abbildung 6 unten dargestellt, die numerische Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen der flüssigen Phase zusammen mit den Gleichungen des vereinfachten Modells aus.

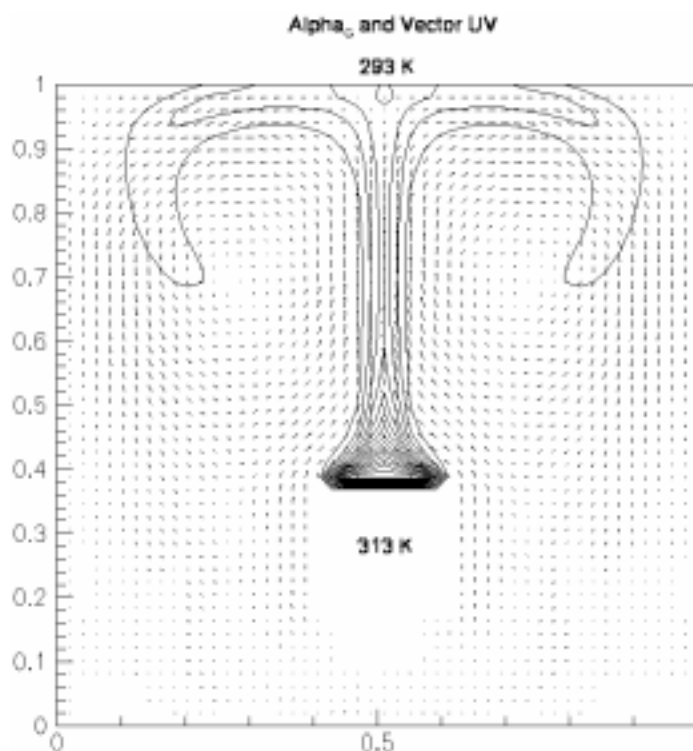


Abbildung 6 : Volumetrischer Dampfanteil α_G (Isolinien) und Geschwindigkeitsvektoren

Simulation von Mehrphasenströmungen in Rohrleitungssystemen

(T. Giese, Tel. 685-2128, giese@ike.uni-stuttgart.de)

Ein bedeutender Teil energietechnischer Anwendungen basiert auf dem Transport von Gasen und Flüssigkeiten in Rohrleitungen. Treten mehrere Aggregatzustände aufgrund des Druck- und Temperaturniveaus gemeinsam auf, ändert sich das Verhalten der Strömung gegenüber dem einphasigen Fall grundlegend. Die Erforschung der mit diesem Themenbereich zusammenhängenden Fragen stehen im Mittelpunkt eines Forschungsprojektes am IKE. Das Ziel ist es, die Berechnungsqualität von Strömungen in Rohrleitungen zu verbessern und dabei besonders auf Phänomene, die für den Betrieb von Kraftwerken von sicherheitstechnischer Bedeutung sind, einzugehen. Als Werkzeuge werden sowohl eindimensionale Systemcodes als auch die dreidimensionale Strömungssimulation auf Basis der Navier-Stokes-Gleichungen eingesetzt.

Als Beispiel für die Strömungsphänomene, die in diesem Zusammenhang untersucht werden, sei die Änderung der Verteilung von Dampfblasen in einer Rohrströmung genannt. Aufgrund des Gravitationsfeldes der Erde ändert sich das Verhalten von Dampfblasen in einer flüssigen Umgebung stark. In der Abbildung 7 ist die Änderung der Verteilung des Dampfes in einer Rohrströmung wegen der Wechselwirkungen zwischen Fluid und Blase dargestellt.

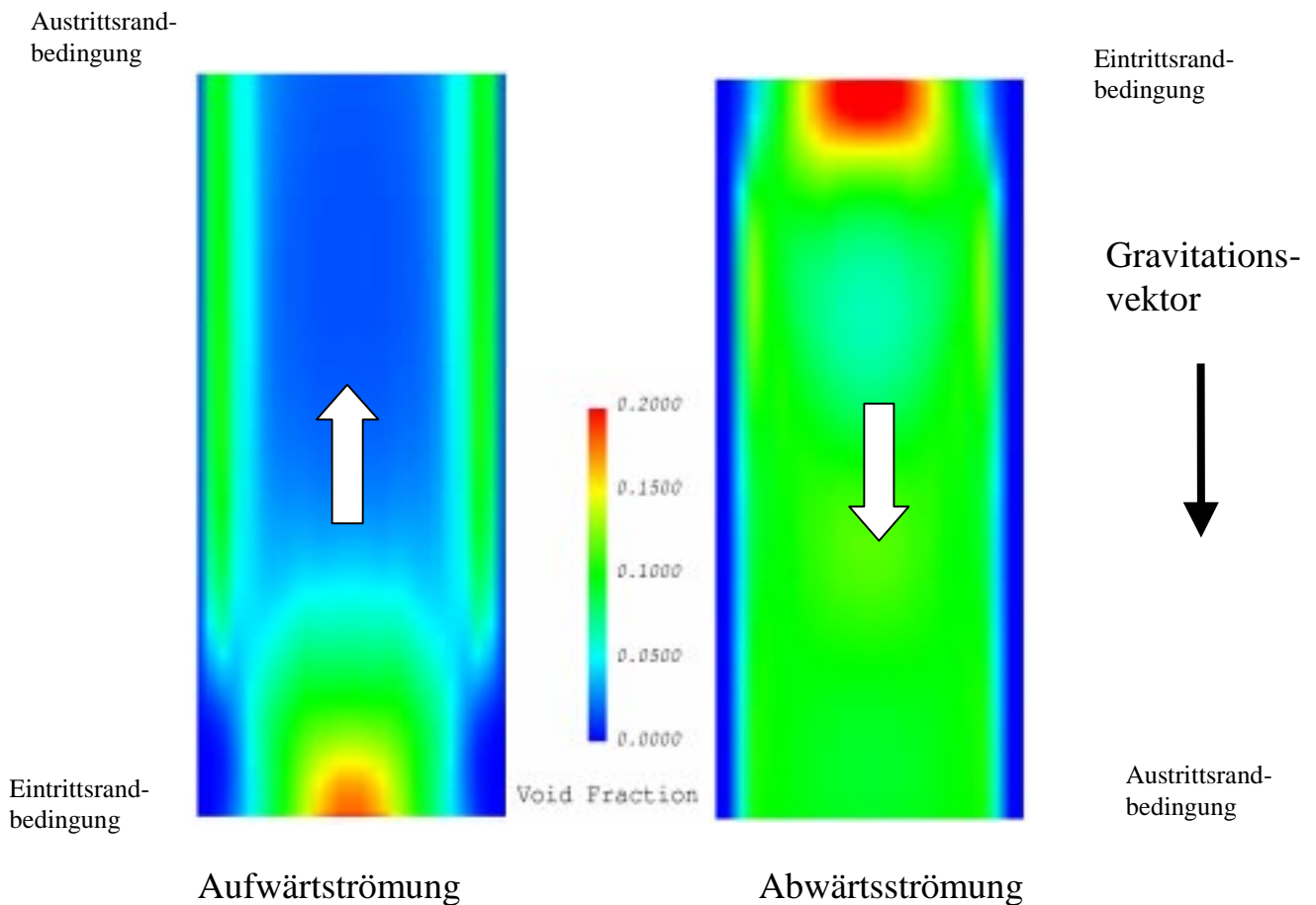


Abbildung 7: Blasenverteilung in Rohrleitungen

Im linken Bild streben die in der Mittelachse des Rohres eingebrachten Blasen zu den Wänden des mit dem Programm CFX simulierten Rohres und sammeln sich dort an. In diesem Fall handelt es sich um eine Aufwärtsströmung im Schwerfeld der Erde, d.h. die Blasen besitzen eine höhere Geschwindigkeit als das sie umgebende Wasser. Im anderen, rechts dargestellten Fall, verteilen sich Blasen im Mittelabschnitt des Rohres. Bei sonst gleicher Randbedingung wurde lediglich die Orientierung des Rohres im Schwerfeld der Erde geändert.

Freie Konvektionsströmungen

(S. Becker, Tel. 685-3999, becker@ike.uni-stuttgart.de)

Als Teil des mittlerweile abgeschlossenen Projektes „Analyse von Naturkonvektionsvorgängen zur passiven Wärmeabfuhr“ wurden verschiedene CFD-Codes auf ihre Möglichkeiten zur Simulation zweiphasiger Strömungen mit Phasenübergang durch Sieden oder Kondensation getestet. Dabei hat sich CFX-4 als einer der besseren Codes erwiesen. Simuliert wurde die turbulente einphasige freie Konvektionströmung in einem seitlich beheizten Behälter bei einer Rayleigh-Zahl Ra von 10^{10} . Diese ist im Vergleich zu einer laminaren Strömung mit $Ra=10^5$ für den Betrag der Geschwindigkeit in den beiden Abbildungen unten dargestellt.

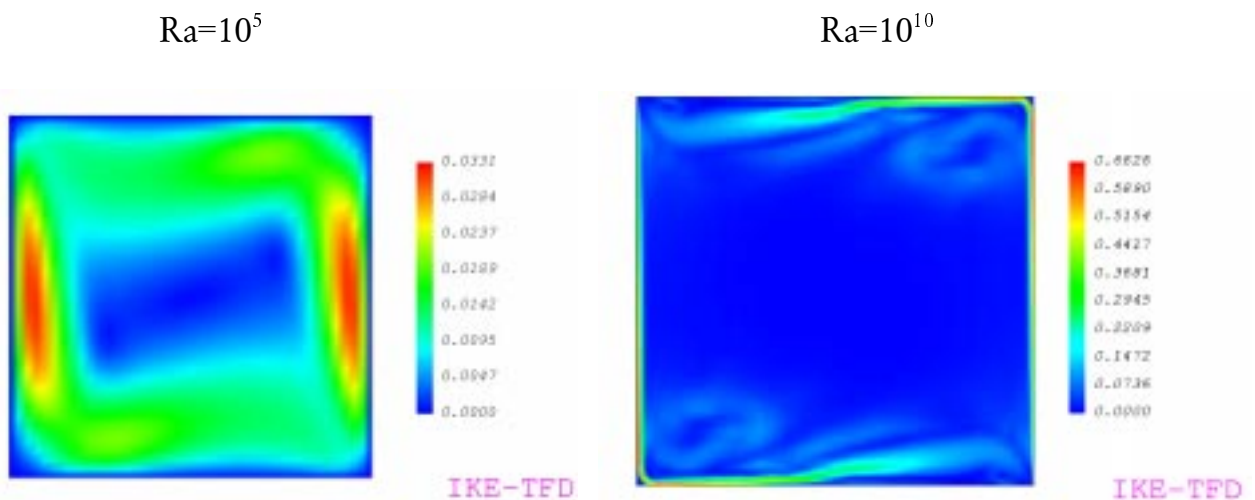


Abbildung 8 : Freie Konvektionsströmung in einem seitlich beheizten Behälter bei unterschiedlichen Rayleighzahlen (links : laminar, $Ra=10^5$; rechts : turbulent $Ra=10^{10}$)

Andere Arbeiten beschäftigen sich gegenwärtig mit der Berechnung der freien Konvektionsströmung in von unten beheizten Fluidschichten, die sog. Rayleigh-Bénard-Konvektion, im vollständig turbulenten Zustand. Dazu wurde die Strömung dreidimensional hoch aufgelöst und transient zeitgenau mit CFX-4 auf den Workstations des SERVUS-Clusters berechnet. Die Rechenzeit betrug bei 1

GB Hauptspeicher etwa 50 h. Beispiele für den zeitlichen Ablauf sind in Abbildung 9 unten gegeben. Man erkennt dabei den vollständig instationären und dreidimensionalen Charakter der Strömung.

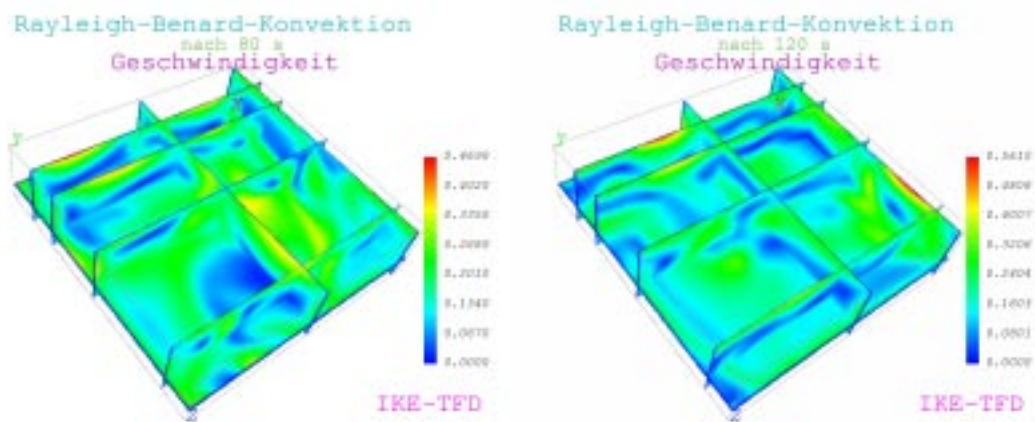


Abbildung 9 : Rayleigh-Bénard-Konvektion in einem geschlossenen Behälter bei $Ra=10^9$

Weitere Untersuchungen beschäftigen sich mit der numerischen Simulation von Siedevorgängen mit CFX-4. Dabei wird vor allem der Wärmeübergang in passiven Sicherheitsystemen neuartiger Reaktorkonzepte untersucht. Weitere wichtige Aspekte sind die Betrachtung kondensierender Strömungen und die Weiterentwicklung von Siedemodellen auf der Basis des mechanistischen Modells von CFX-4.

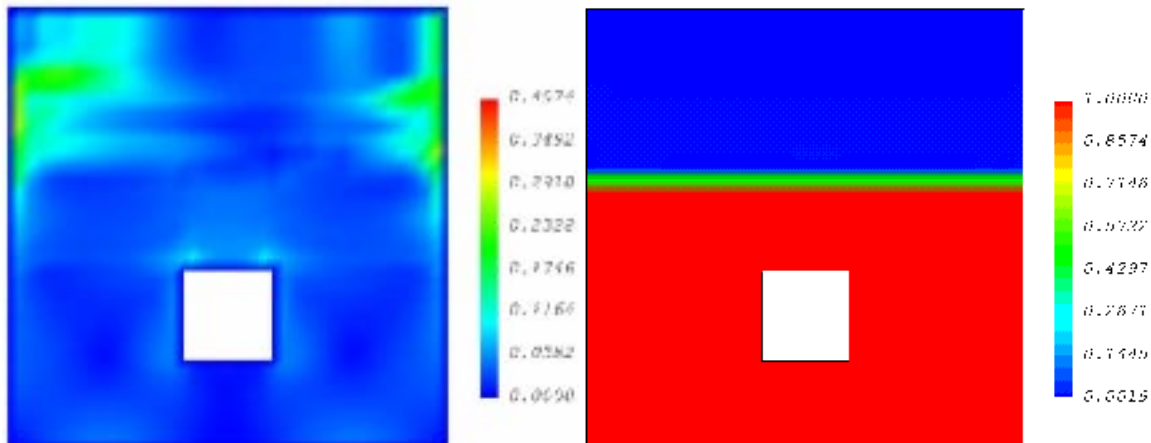


Abbildung 10 : Betrag der Geschwindigkeit (links) und der Volumenanteil von Wasser (rechts) nach 10 s

Bei Interesse und Rückfragen wenden Sie sich bitte an :

Prof. Dr.-Ing. E. Laurien, Tel. 685-2415
E-Mail : Laurien@ike.uni-stuttgart.de

oder an die verantwortlichen wissenschaftlichen Assistenten.