

## 32.22 INNOVATIVE SYSTEME

### 32.22.02 Passive Nachwärmeabfuhr

#### I. Turbulenzmodellentwicklung und ingenieurtechnische Anwendung

(G. Grötzbach, T. Ammann, B. Dorr, I. Hiltner, S. Hofmann, M. Kampczyk, Y. Kimhi, Ch. Seiter, M. Wörner, IRS; M. Alef, A. Hennemuth, HDI)

#### Abstract:

The FLUTAN code is used for analyzing the decay heat removal in new reactor concepts. The turbulence models applied in FLUTAN are improved by the development of the TURBIT code. TURBIT serves for a numerical simulation of turbulent channel flow.

## Rechenprogramm FLUTAN für thermofluiddynamische Anwendungen

Für die Analyse der Nachwärmeabfuhr in neu konzipierten Reaktorsystemen wird im Forschungszentrum das Rechenprogramm FLUTAN eingesetzt. Ebenso wird es für die detaillierte Analyse verschiedener Modellexperimente zu diesem und anderen Themenbereichen herangezogen. Das Programm ist eine bezüglich seiner Numerik, der physikalischen Modelle und der Vektorisierung weiterentwickelte Version von COMMIX-2. Letzteres wurde in Kooperation von KfK und ANL entwickelt. Für Anwendungen auf reine Naturkonvektion muß das Programm bezüglich der physikalischen Modelle, insbesondere der Turbulenzmodelle, und bezüglich der Effizienz der verwendeten numerischen Methoden verbessert werden. Schließlich soll es auch vorbereitet werden für den Einsatz auf einfache Zweiphasenströmungen, wie sie z.B. bei der Sumpfkühlung für neue Druckwasserreaktorkonzepte analysiert werden müssen.

Die in den Vorjahren durch Personalabgänge weitgehend stagnierende Weiterentwicklung von FLUTAN wurde durch die Bildung einer neuen Arbeitsgruppe im IRS neu belebt. In dieser Gruppe werden nicht nur die folgenden Entwicklungen betrieben, sondern auch die Arbeiten aller Arbeitsgruppen beim Forschungszentrum, die an oder mit FLUTAN arbeiten, diskutiert, koordiniert, Lösungen für akute Probleme erarbeitet und Programmversionen mit Erweiterungen für spezielle Aufgaben bereitgestellt.

Einen Schwerpunkt bilden z. Zt. die Arbeiten zur Verbesserung und Erweiterung der numerischen Grundlagen des Programms. Es wurde ein Konzept zur Realisierung von lokalen Gitterverfeinerungsmethoden erarbeitet, das die Vorteile von adaptiven Verfahren mit denen von Gebietszerlegungsverfahren kombiniert. Die Realisierung des Konzeptes ist angelaufen; bei der Realisierung in den Poisson-Gleichungslösern besteht eine enge Kooperation mit HDI und der University of

Virginia. Im Rahmen dieser Kooperationen laufen auch erste Vorbereitungen in diesen Programmteilen für den zukünftigen Einsatz von FLUTAN auf Parallelrechnern.

Die früher bereits in weiten Teilen des Rechenprogramms bereitgestellten räumlichen Differenzenverfahren zweiter Ordnung, QUICK und LECUSSO, wurden in die Transportgleichungen der Turbulenzmodelle eingebracht. Nachrechnungen von Experimenten mit schwach turbulenter Strömung in einem einfachen Modell eines Oberplenums, siehe Abb. 1, ergeben Verbesserungen durch diese Erweiterung bei räumlich schlecht diskretisierten kleinräumigen Strukturen. Das LECUSSO-Verfahren wird zusammen mit der University of Virginia mit der nodalen Methode verglichen. Nach ersten Ergebnissen haben die aus der Neutronenphysik stammenden Methoden Vorteile in der Genauigkeit. Ihre grundsätzliche Eignung für die Verwendung mit Turbulenzmodellen, die Transportgleichungen benutzen, wird noch untersucht.

Das weite Spektrum der möglichen Anwendungen von FLUTAN verursacht im Einzelfall Schwierigkeiten mit der Konvergenz oder Effizienz der verwendeten Poisson-Gleichungslöser. Daraus resultiert die Forderung, für unterschiedliche Anwendungen auch unterschiedliche Poisson-Gleichungslöser verwenden zu können. Deshalb wurde zu den bereits im Programm verfügbaren Lösern der früher von HDI für BACCHUS entwickelte, auf dem Gauß-Verfahren basierende direkte Löser implementiert, der für alle Geometrien einsetzbar ist und sich als sehr genau und robust erwiesen hat. Die methodische Erweiterung der Behandlung der Druckrandbedingungen an Ausströmrändern schließlich ermöglicht eine physikalisch sinnvolle Behandlung dieser Ränder und damit auch die Beschreibung von Strömungsgebieten mit mehr als einer Ausströmöffnung.

Die Arbeiten an den Turbulenzmodellen erfolgen in enger Zusammenarbeit mit dem IATF. Unter anderem mit Ergebnissen aus den numerischen Turbulenzsimulationen mit TURBIT werden neue Modellansätze bezüglich ihrer Tauglichkeit für Naturkonvektion analysiert, Koeffizienten berechnet und Modellverbesserungen erarbeitet (siehe dort).

Die Prüfung und Aufarbeitung des in FLUTAN verfügbaren Modells für homogene Zweiphasenströmung wurde begonnen. Die ersten programmtechnischen Probleme in der programmierten Umsetzung des Modells konnten identifiziert werden. Die vektorisierte Stoffdatenbibliothik für Wasser wurde überprüft und für Zweiphasenströmung einsetzbar gemacht.

Um FLUTAN auch auf neueren Höchstleistungsrechnern benutzen zu können, wurde das Programm zunächst auf einer Workstation an das Betriebssystem UNIX angepaßt und dann an der S600 der Universität Karlsruhe erfolgreich implementiert. Es zeigte sich, daß Teams des Forschungszentrums dort zur Zeit aus verschiedenen Gründen kaum aufwendige Produktionsläufe durchführen können. Dennoch ist diese Umstellung ein wichtiger Schritt, denn auch Parallelrechner, auf denen FLUTAN in absehbarer Zeit eingesetzt werden soll, benutzen UNIX. Die grafischen Analysemöglichkeiten von FLUTAN wurden durch Anbinden der im INR entwickelten und bereitgestellten standardisierten Schnittstelle VISART wesentlich erweitert. Damit ist der Zugang zu den interaktiven grafischen Analysemöglichkeiten mit AVS und zu den Verfilmungsmöglichkeiten bei HDI möglich.

### **Numerische Simulation turbulenter Naturkonvektion**

Die Arbeiten am Rechenprogramm TURBIT zur numerischen Simulation von Turbulenz in Kanalströmungen dienen dazu, die im Rechenprogramm FLUTAN verwendeten Turbulenzmodelle auf eine breitere Basis zu stellen. Insbesondere soll mit Hilfe der Ergebnisse aus numerischen Simulationen der Anwendungsbereich von Turbulenzmodellen auf Naturkonvektion in verschiedenen Fluiden überprüft und durch methodische Maßnahmen erweitert werden, und es soll eine Detailabstimmung der Koeffizienten der Turbulenzmodelle vorgenommen werden.

Die mit TURBIT mit der direkten Simulationsmethode, bei der alle Skalen von Geschwindigkeit und Temperaturfeld durch das Maschennetz aufgelöst werden, zuvor bereitgestellte Datenbasis für Rayleigh-Bénard-Konvektion in Natrium und Luft bei niedrigen Turbulenzgraden wurde weiter analysiert. Ein Beispiel ist die Erhaltungsgleichung der turbulenten Temperaturfluktuationen, die in Rechenprogrammen, die auf statistischen Turbulenzmodellen basieren, in modellierter Form gelöst wird. Mit Hilfe der Auswertung aller Terme der exakten Gleichung konnte eine Bilanz aufgestellt werden, die Aussagen über die relative Bedeutung der einzelnen Terme ermöglicht. Des Weiteren wurden für Schließungsterme dieser Gleichung übliche Modellansätze untersucht und Modellkoeffizienten bestimmt. Ein Ergebnis ist, daß für die Modellierung des Senkenterms mittels eines charakteristischen Zeitverhältnisses  $R$  der Fluktuation von Geschwindigkeits- und Temperaturfeld,  $R$  für flüssige Metalle wesentlich kleinere Werte annimmt als für konventionelle Fluide.

In Übereinstimmung mit diesem Ergebnis konnte mit dem gerade wesentlich erweiterten Turbulenzmodell in FLUTAN, siehe IATF-Beitrag, bei der Nachrechnung

eines Experiments eines beheizten Natrium-Freistrahls eine gute Übereinstimmung erzielt werden, wenn der vorzugebende Wert von  $R$  deutlich gegenüber dem Standardwert herabgesetzt wurde. Ziel der weiteren Arbeiten ist die Entwicklung eines verbesserten Modells, das gleichzeitig den molekularen Stoffeigenschaften des Fluides Rechnung trägt und auch die für auftriebsbehaftete Strömungen charakteristische Anisotropie der Turbulenz berücksichtigt.

Die methodische Erweiterung von TURBIT um neue Modelle, die in Grobstruktursimulationen von turbulenter Naturkonvektion bei höheren Rayleigh-Zahlen benötigt werden, wurde abgeschlossen. Es sind jetzt geeignete Feinstrukturmodelle, die die durch das Maschennetz nicht aufgelösten kleinskaligen turbulenten Austauschvorgänge beschreiben, ebenso verfügbar wie für Naturkonvektion geeignete Wandbedingungen.

Bei der Nachrechnung der Konvektion in einem horizontalen Plattenkanal konnte mit dem erweiterten Rechenprogramm sowohl für den Fall instabiler als auch stabiler thermischer Schichtung für verschiedene Fluide eine gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Experiment erreicht werden, siehe Abb. 2. In diesen Simulationen wurde lediglich für das Geschwindigkeitsfeld eine Grobstruktursimulation mit den neuen Modellen durchgeführt, das Temperaturfeld konnte dagegen direkt simuliert werden. Durch Anwendung der erweiterten Programmversion auf Rayleigh-Bénard-Konvektion in flüssigem Natrium wurde eine Datenbasis für mittlere und hohe Turbulenzgrade bereitgestellt, die selbst den mit Experimenten bisher abgedeckten Bereich wesentlich zu höheren Rayleigh-Zahlen erweitert, Abb. 2.

Neben den statistischen Analysewerkzeugen wurden insbesondere die interaktiven grafischen Analysewerkzeuge zur Interpretation der numerischen Ergebnisse weiterentwickelt. So stehen nun innerhalb der kommerziellen, auf einer Grafikworkstation implementierten Visualisierungssoftware AVS Module zur Verfügung, die speziell für die Auswertung von TURBIT-Ergebnissen im IRS entwickelt wurden. Diese ermöglichen z.B. die Auswertung der lokalen, momentanen Verteilung beliebiger Korrelationen zweiter und dritter Ordnung. Damit bietet sich die Möglichkeit, die Auswirkung makroskopischer Ereignisse im Strömungsfeld auf Korrelationen, die in statistischen Turbulenzmodellen zu modellieren sind, detailliert zu untersuchen. Die hieraus gewonnenen Kenntnisse werden in die Entwicklung neuer, verbesserter Schließungsansätze einfließen.

TURBIT war bisher nur auf Großrechnern einsatzfähig, die unter dem Betriebssystem MVS oder VSPI arbeiten. Als Vorbereitung auf die im Forschungszentrum

anstehende Umstellung von MVS auf UNIX wurde TURBIT auf dem Vektorrechner der Universität Karlsruhe implementiert, der unter dem Betriebssystem UNIX arbeitet. Erste kleinere Testrechnungen wurden durchgeführt. Die Machbarkeit aufwendiger Simulationen auf diesem Rechner, an dem für das Forschungszentrum nur sehr begrenzte Ressourcen verfügbar sind, wird derzeit erprobt.

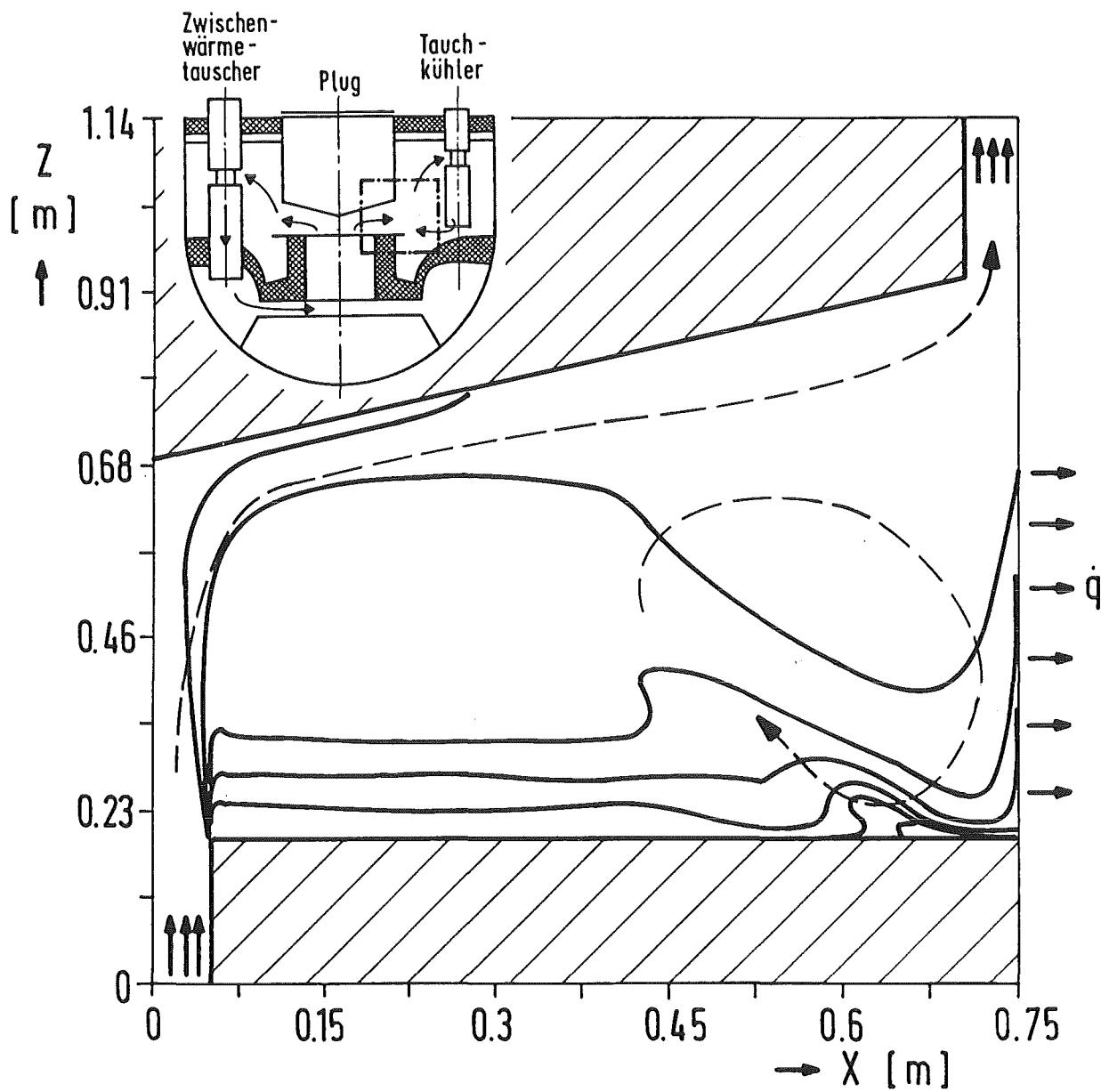


Abb. 1: Mit FLUTAN berechnete thermische Schichtung (Isothermen für von unten nach oben aufsteigende Temperatur) im unteren Bereich eines langsam durchströmten Modells für ein Oberplenum. Die seitliche Kühlung simuliert die Tauchkühler.

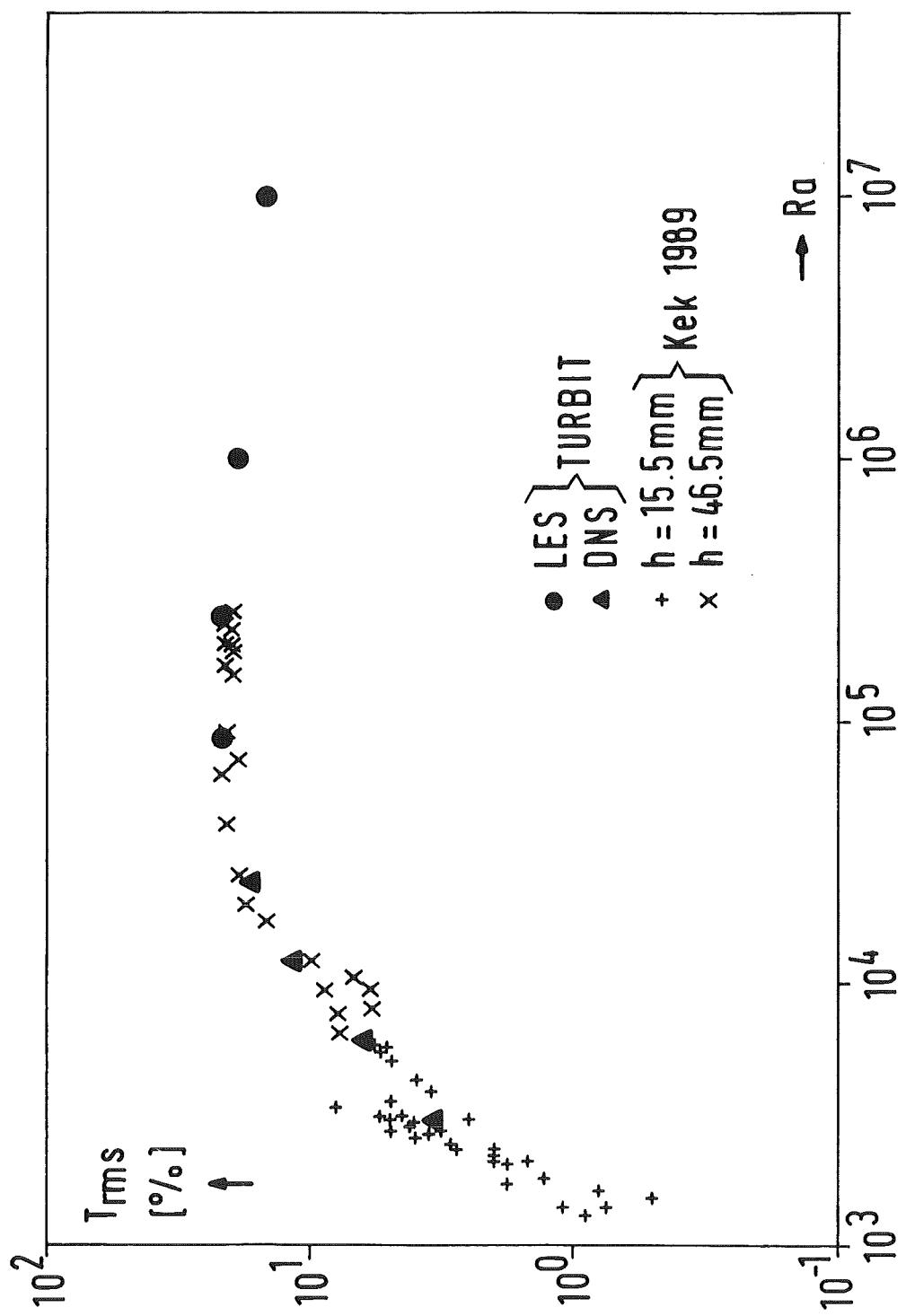


Abb. 2: Überprüfung der aus numerischen Simulationen von Rayleigh-Bénard-Konvektion mit TURBIT ermittelten Temperaturschwankungswerten in Natrium an Experimenten von Kek und Ausdehnung mittels Grobstruktursimulation auf den voll turbulenten Wärmetransportbereich bei hohen Rayleigh-Zahlen.

## Veröffentlichungen

Grötzbach, G.:

Turbulente Transportprozesse in horizontalen Konvektionsschichten bei kleinen und mittleren Prandtl-Zahlen analysiert mittels direkter numerischer Simulation. Seminarbeitrag beim Orientierungsseminar des Inst. für Mechanik, Arbeitsgruppe Dynamik der Fluide, TH Darmstadt, im Mathematischen Forschungsinstitut, Oberwolfach. 21. - 26. Februar 1994.

Wörner, M.:

Analyse der Trägheitskonvektion in horizontalen Natriumschichten mit der Methode der direkten numerischen Simulation.

Seminar am Inst. für Strömungslehre und Strömungsmaschinen, Universität Karlsruhe, 20. Oktober 1994.

Grötzbach, G., Wörner, M.:

Flow mechanisms and heat transfer in Rayleigh-Bénard convection at small Prandtl numbers

Proceedings of the first ERCOFTAC Workshop on Direct and Large Eddy Simulation, Kluwer Academic Press, Dordrecht, The Netherlands, Ed. P. Voke, L. Kleiser, J.-P. Chollet, 1994, pp. 387 - 397

Grötzbach, G.:

Direct numerical and large eddy simulation of turbulent heat transfer

Invited keynote lecture,

International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer,

August 9 - 12, 1994; Lisbon, Portugal; Vol. 1, pp. I.L.3.1 - I.L.3.15.

Wörner, M., Grötzbach, G.:

Analysis of thermal variance equation for natural convection of air and sodium

International Symposium on turbulence, Heat and Mass Transfer,

August 9 - 12, 1994; Lisbon, Portugal; Vol. 1, pp. 9.3.1 - 9.3.6.

Wörner, M.:

Direkte Simulation turbulenter Rayleigh-Bénard Konvektion in flüssigem Natrium

Dissertation, University of Karlsruhe,

KfK 5228, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1994.

Grötzbach, G. Wörner, M.:

Numerische Simulation der turbulenten Naturkonvektion in horizontalen Fluidschichten.

KfK-Nachrichten, Vol. 26, 4/94, 1994, pp. 263-272.

## Berichte

Ammann, T.:

Auswahl einer Strategie zur lokalen Gitterverfeinerung in FLUTAN.

Unveröffentlichter Bericht

Ammann, T.:

Änderungsvorschlag zur Diskretisierung des diffusiven Terms auf nicht-äquidistanten Gittern in FLUTAN

Unveröffentlichter Bericht

Kimhi, Y., Grötzbach, G.:

Implementation of second-order finite difference schemes in the k- $\epsilon$ s model of the computer code FLUTAN

Unveröffentlichter Bericht