Institut für Strömungslehre
und Strömungsmaschinen
Universität (TH) Karlsruhe

Postfach 6980 · Kaiserstraße 12 · D-76128 Karlsruhe 1

Lehrstuhl für Strömungslehre
Professor Dr.-Ing. W. Frank

7. März 1994

Telefon: (0721) 608 - 2677
Teletex: 721 166 = UNIKar
Telex: 17 - 721 166
Telefax: (0721) 696727

SEMINARANKÜNDIGUNG

Im Rahmen des Seminars für Strömungslehre und Strömungsmaschinen findet folgender Vortrag statt:

Ort: Oberer Hörsaal, Altes Maschinenbaugebäude (Geb.Nr. 10.91, 2.OG)

Termin: Donnerstag, 5. Mai 1994 um 16.15 Uhr

Es spricht Herr

Dr.-Ing. M. Wörner,
Institut für Reaktorsicherheit, Kernforschungszentrum Karlsruhe

über das Thema

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

Inhalt:

Die Rayleigh-Bénard-Konvektion in Fluiden sehr kleiner Prandtl-Zahl ist bisher experimentell kaum untersucht. Insbesondere fehlen zuverlässige Aussagen über die Mechanismen, die die Konvektion dominieren, und über die auftretenden Strukturen. Ein attraktives theoretisches Werkzeug zur Erweiterung der existierenden Wissensbasis ist die Methode der direkten numerischen Simulation.
In dem Vortrag wird zunächst eine Einführung in die direkte Simulationsmethode gegeben. Die besonderen Anforderungen des physikalischen Anwendungsfalls an das numerische Verfahren werden diskutiert. Vorgestellt werden Simulationsergebnisse für Rayleigh-Bénard-Konvektion in flüssigem Natrium (Prandtl-Zahl $Pr = 0.006$) für Rayleigh-Zahlen im Bereich $3000 \leq Ra \leq 24000$. Die Analyse der Daten zeigt, daß die Konvektion wesentlich durch großräumige zweidimensionale Wirbelstrukturen dominiert wird, die wie ein Starrkörper rotieren. Das zeit- und bereichsweise Auftreten dieser sogenannten Trägheitskonvektion innerhalb dreidimensionaler, zeitabhängiger und turbulenter Konvektion wird anhand der physikalischen Erhaltungsgleichungen, die der Simulation zugrundeliegen, anschaulich erklärt.

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

Martin Wörner
Kernforschungszentrum Karlsruhe
Institut für Reaktorsicherheit

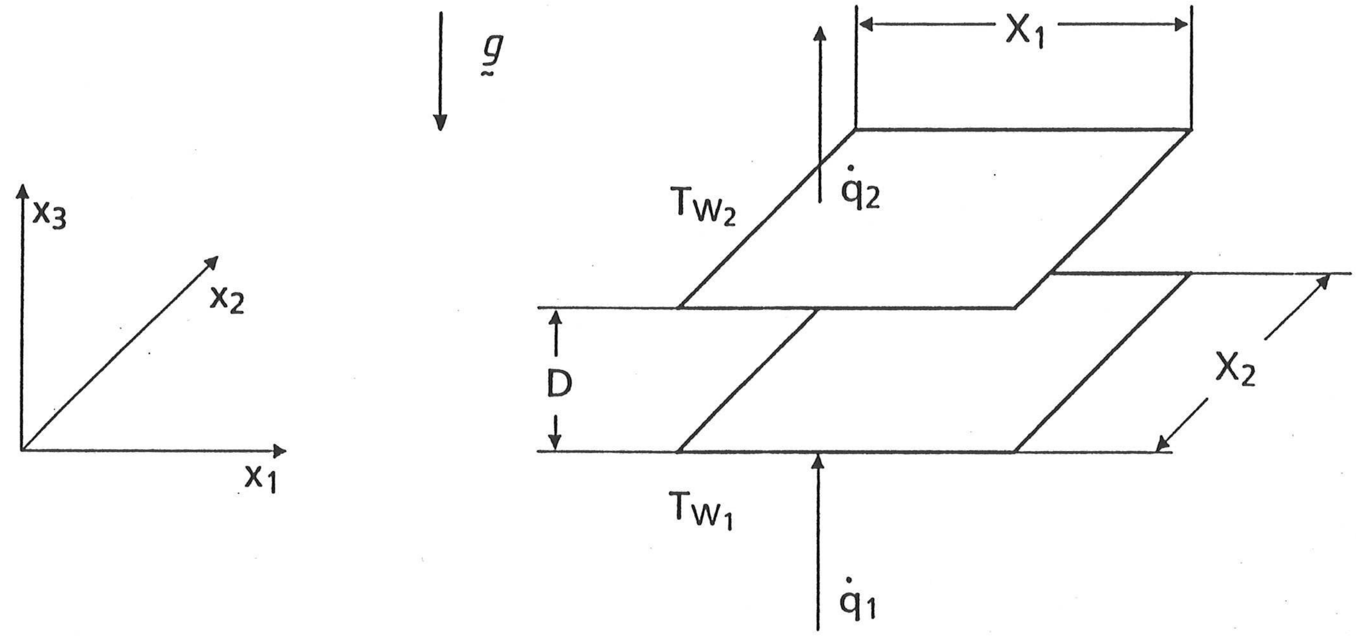
5. Mai 1994

Gliederung

- Einführung
- Physikalisches Problem
  - Rayleigh-Bénard Konvektion
  - Trägheitskonvektion für $Pr << 1$
- Numerische Beschreibung
  - direkte Simulationsmethode
  - Rechenprogramm TURBIT
- Simulationsergebnisse
  - Verifikation
  - Analysen zur Trägheitskonvektion
- Schlußfolgerungen

Rayleigh-Bénard-Konvektion

- Geometrie



- dimensionslose Kennzahlen

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T_w D^3}{\nu \kappa}$$

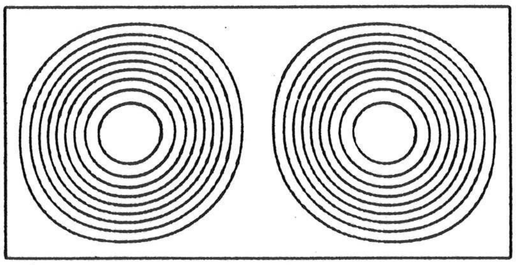
$$Pr = \frac{\nu}{\kappa} \qquad \text{(Natrium: } Pr = 0.006\text{)}$$

$$Gr = \frac{Ra}{Pr}$$

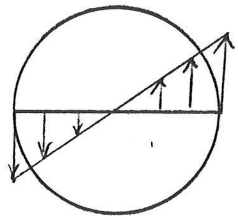
$$Nu = \frac{\dot{q}_{gesamt}}{\dot{q}_{Wärmeleitung}} = f(Ra, Pr)$$

Rayleigh-Bénard-Konvektion in Fluiden sehr kleiner Prandtl-Zahl (Theorie)

- **Clever & Busse 1981**
  - Rechnungen 2d, stationär
  - $Ra = 10\,000$, $Pr = 0.01$, Stromlinien



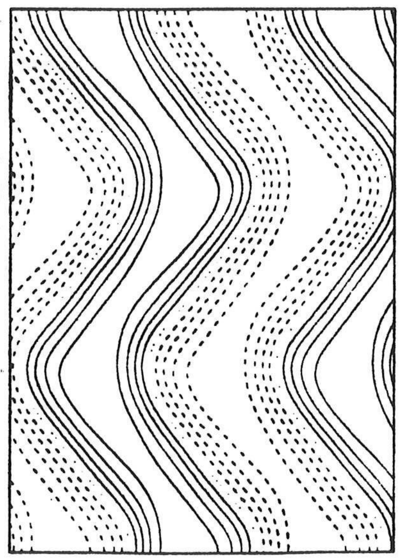
$\downarrow \underset{\sim}{g}$



- **Busse & Clever 1981**
  - Trägheitskonvektion wenn $Ra > Ra_{cII}$
  - Grenzfall $Pr \to 0$: $Ra_{cII} = 7373$

- **Clever & Busse 1990**
  - Rechnungen 3d, zeitabhängig
  - $Ra = 2700$, $Pr = 0.01$

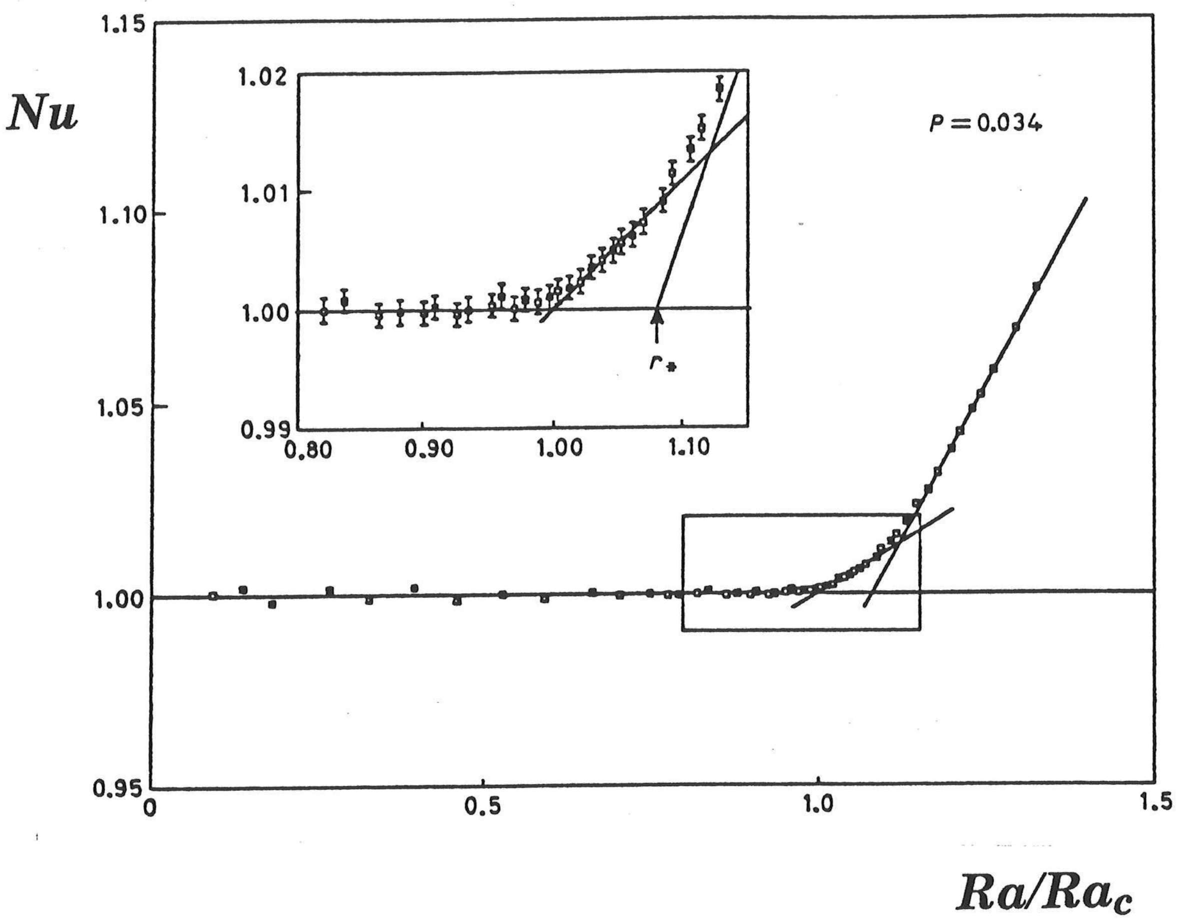
$\otimes \; \underset{\sim}{g}$



Rayleigh-Bénard-Konvektion in Fluiden sehr kleiner Prandtl-Zahl (Experimente)

- Chiffaudel, Fauve, Perrin 1987
  - zwei stationäre Konvektionsformen

    1. viskoser Bereich
    2. Trägheitsbereich $\quad Ra_{cII} \approx 1844$



Methode der direkten numerischen Simulation

- **Erhaltungssätze für Masse, Impuls, Energie**

$$\nabla \vec{u} = 0$$

$$\partial \vec{u} / \partial t + (\vec{u} \nabla) \vec{u} = -\nabla p + \frac{1}{\sqrt{Gr}} \nabla^2 \vec{u} + \left(T_{ref} - T \right) \frac{\vec{g}}{|\vec{g}|}$$

$$\partial T / \partial t + (\vec{u} \nabla) T = \frac{1}{Pr \sqrt{Gr}} \nabla^2 T$$

- 3 d, zeitabhängig
- Auflösung aller Längenmaßstäbe
- keine Modellannahmen und -parameter
- beschränkt auf kleine Turbulenzgrade

Rechenprogramm TURBIT

- **Räumliche Diskretisierung**
  - Finite Volumen Verfahren
  - zentrale Differenzen
  - versetztes Maschennetz

- **Zeitintegration**
  - Impulsgleichung explizit
  - Projektionsmethode von Chorin
  - Energiegleichung halbimplizit

Numerische Simulation

- numerische Vorstudien
  - Einfluß der Größe der Maschenweiten
  - Einfluß der Größe des Rechengebietes

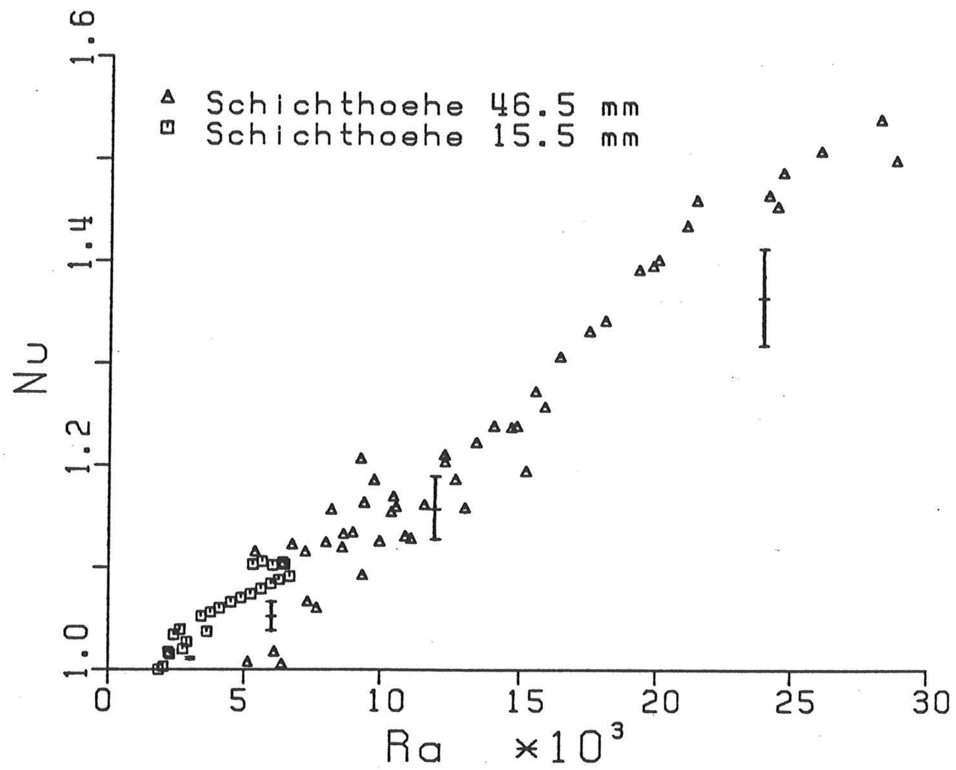
- durchgeführte Simulationen

Pr	Ra	Gr	Maschen-netz	CPU-Zeit
0.006	3 000	$5 \cdot 10^5$	128·128·31	25 h
0.006	6 000	10^6	200·200·31	72 h
0.006	12 000	$2 \cdot 10^6$	250·250·39	55 h
0.006	24 000	$4 \cdot 10^6$	250·250·39	60 h

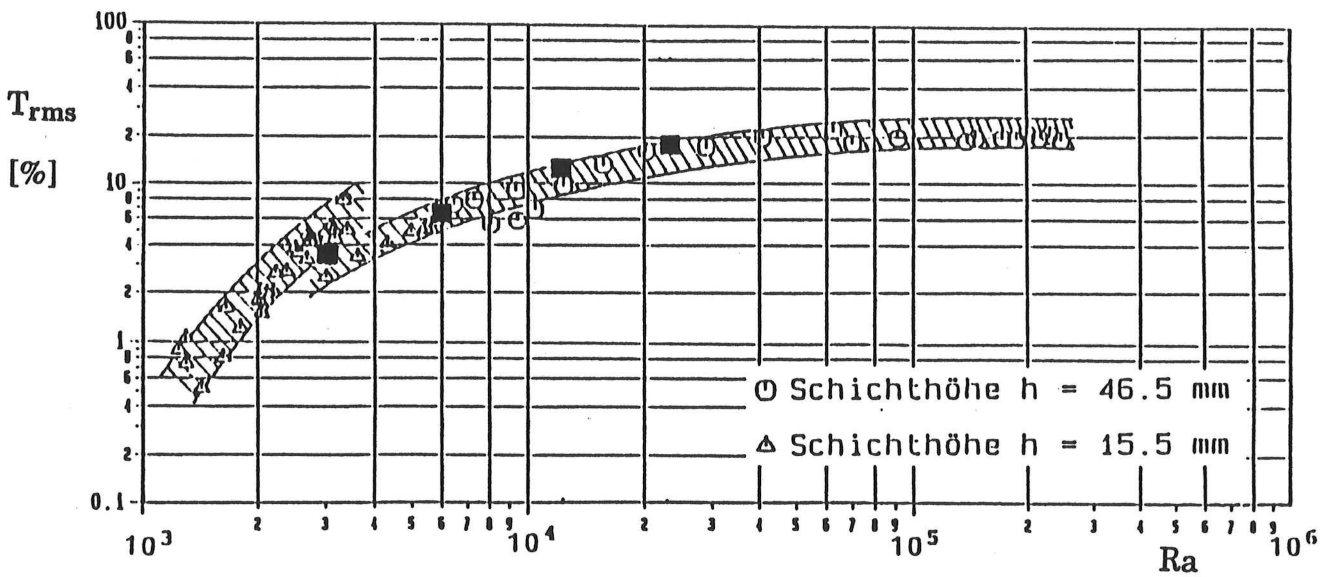
Verifikation

- ## Experimente Kek (1989)

  - ### Nusselt-Zahl

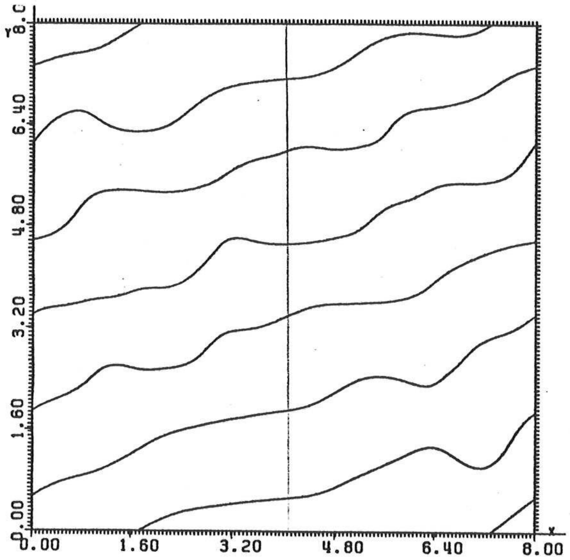


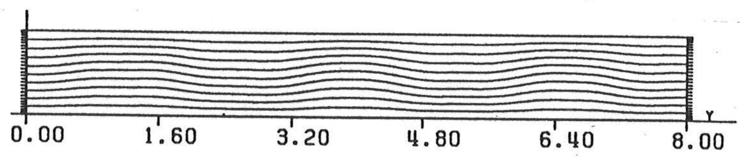
  - ### Streuung der Temperaturfluktuationen



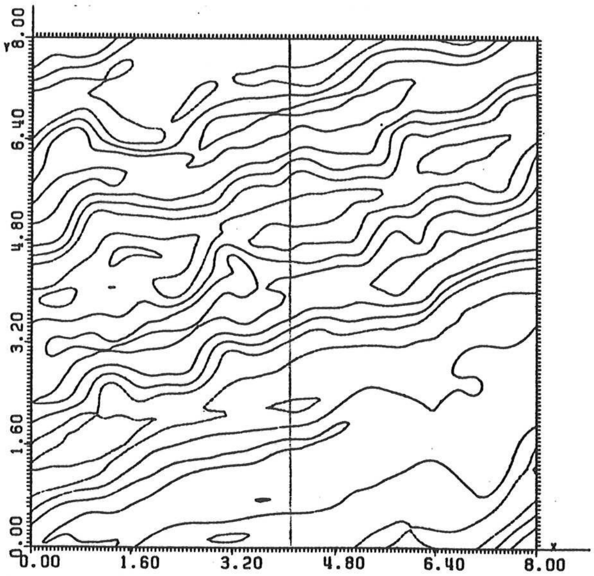
Ergebnisse für $Ra = 3\,000$

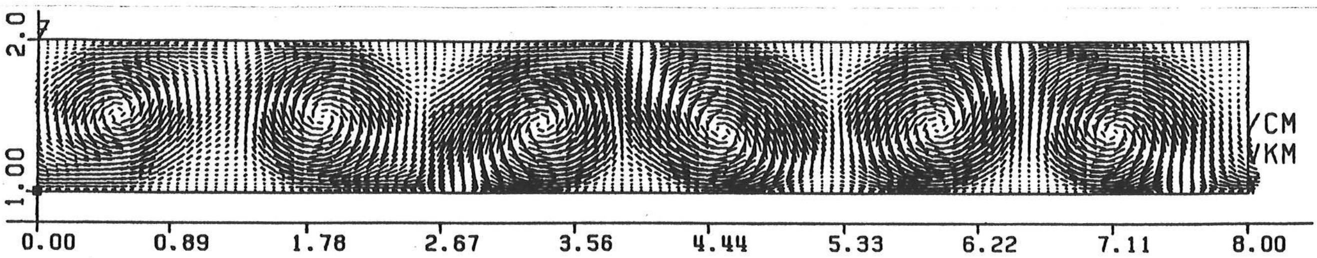
- **Temperaturfeld**



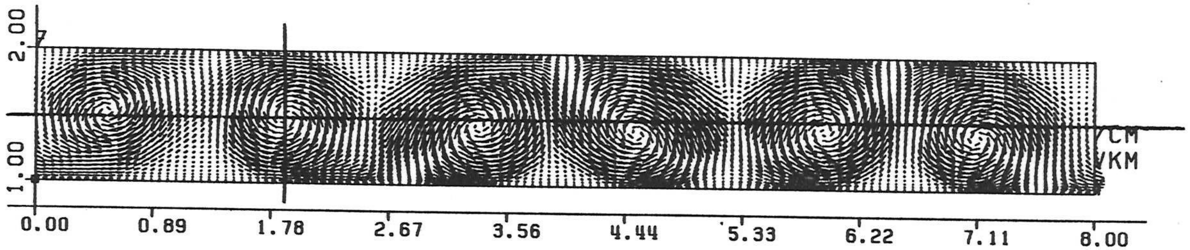


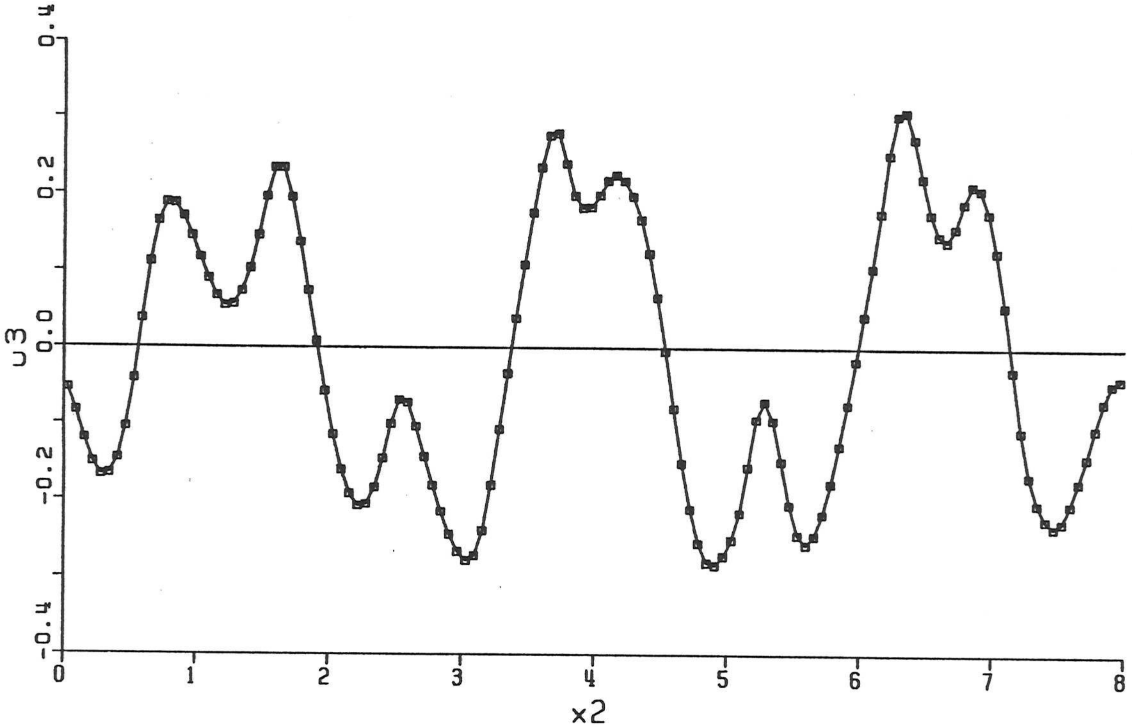
- **Geschwindigkeitsfeld**

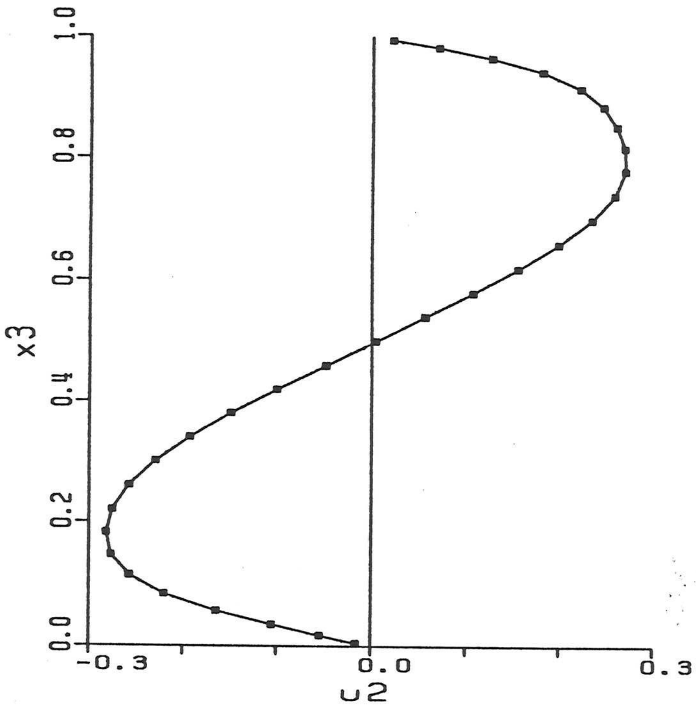


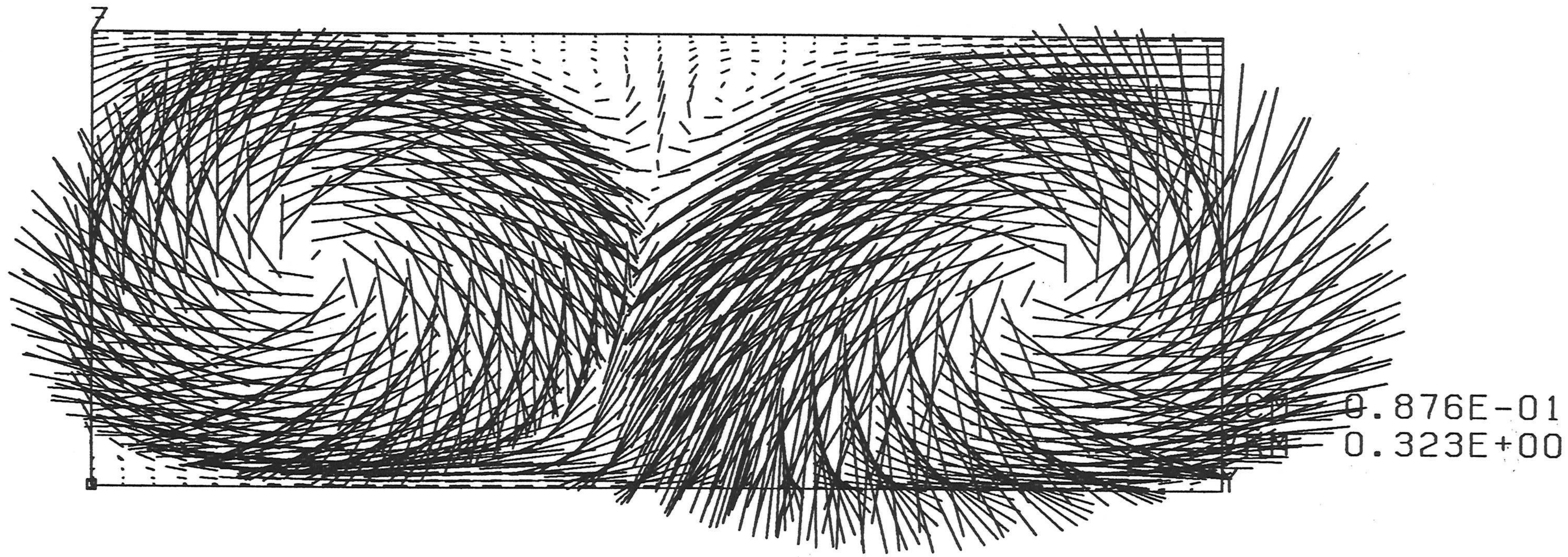


$Ra = 3\,000$


2.00
1.00
0.00
0.89
1.78
2.67
3.56
4.44
5.33
6.22
7.11
8.00
YCM
VKM


u3
0.4
0.2
0.0
-0.2
-0.4
0
1
2
3
4
5
6
7
8
x2

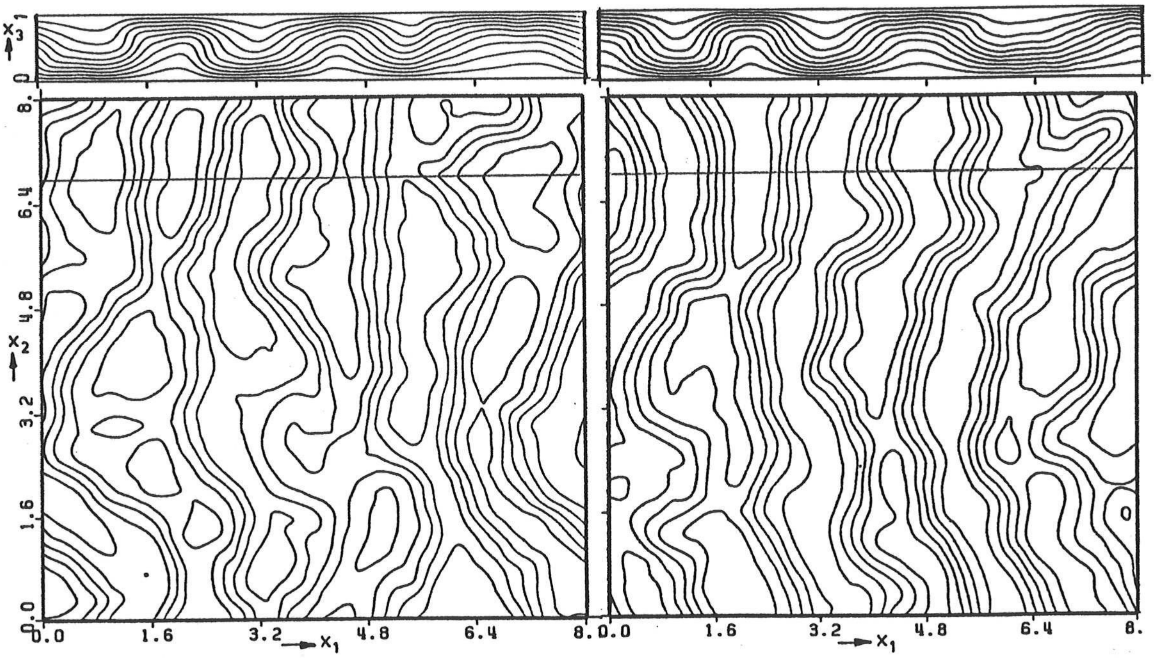

x3
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
-0.3
0.0
0.3
u2



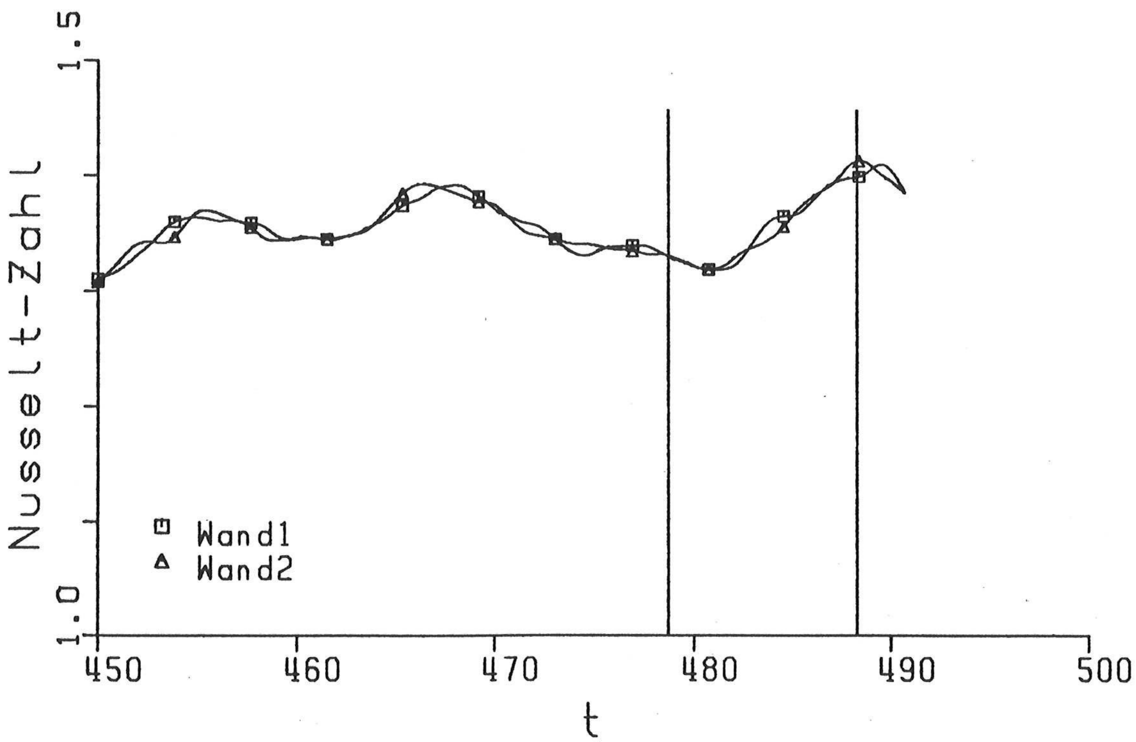
Z
0.876E-01
0.323E+00

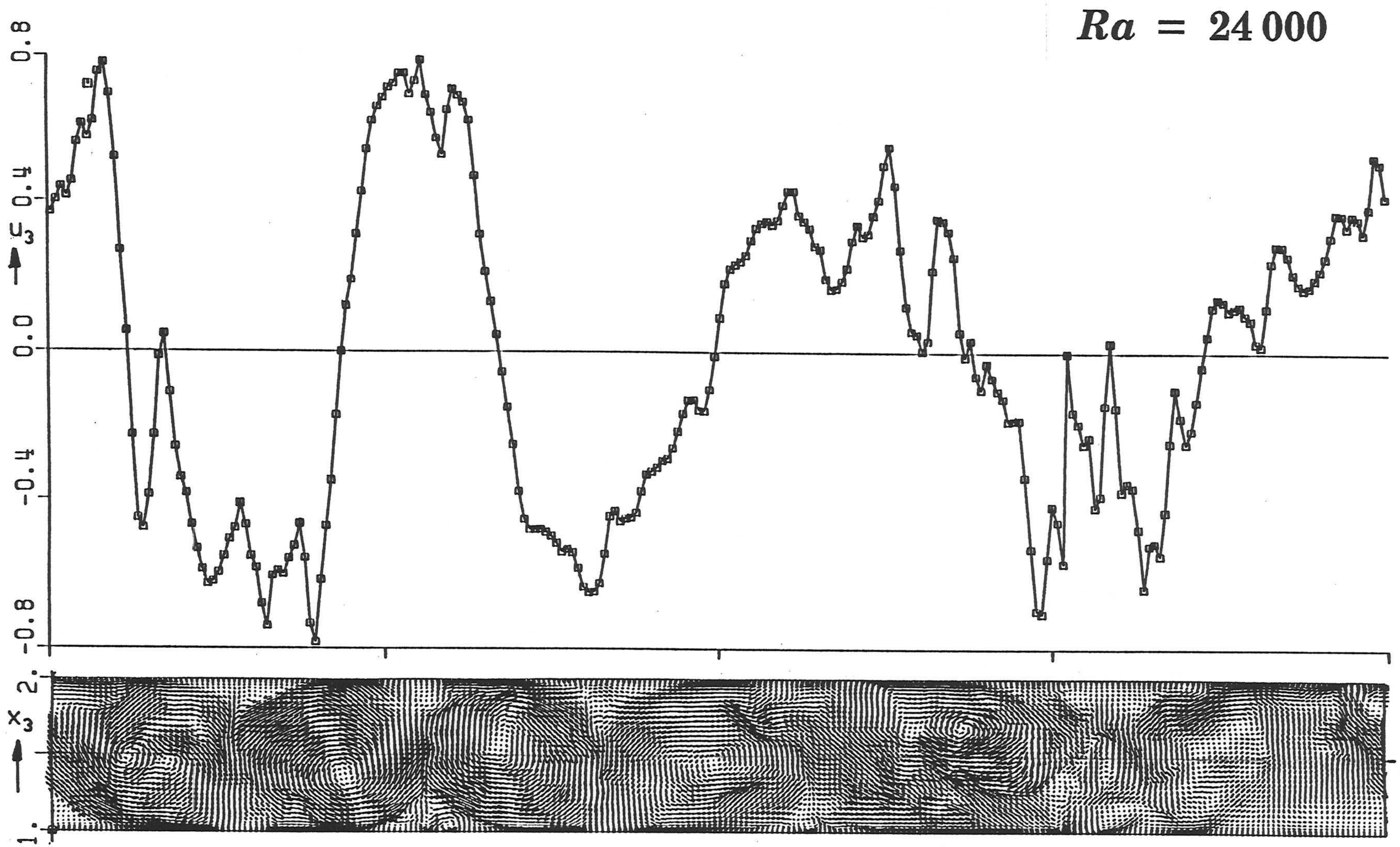
Ergebnisse für $Ra = 24\,000$

- **Temperaturfeld**



- **Nusselt-Zahl**




Ra = 24 000
0.8
0.4
u_3
0.0
-0.4
-0.8
2.
x_3
1.

Mechanismus der Trägheitskonvektion

- in 2d-Bereichen Trägheitskonvektion
- keine Dissipation im Starrkörperbereich der Wirbel
- Rotationsgeschwindigkeit der Wirbel nimmt zu
- Scherinstabilitäten an den Wänden
- Zusammenbruch des geordneten Konvektionsmusters
- dreidimensionales, ungeordnetes, stark verwirbeltes Strömungsfeld
- hohe Dissipationsrate, Relaminarisierung der Strömung
- Ausbildung zweidimensionaler Strukturen

$$\nabla \vec{u} = 0$$

$$\partial \vec{u}/\partial t + (\vec{u}\nabla)\,\vec{u} = -\nabla p + \frac{1}{\sqrt{Gr}}\nabla^2 \vec{u} + \left(T_{ref} - T \right)\frac{\vec{g}}{|\vec{g}|}$$

$$\partial T/\partial t + (\vec{u}\nabla)\,T = \frac{1}{Pr\sqrt{Gr}}\nabla^2 T$$

Schlußfolgerungen

- Rayleigh-Bénard Konvektion in Natrium
  - $Ra = \ \ 3\,000$: Trägheitskonvektion
  - $Ra = 12\,000, 24\,000$:
    aperiodischer Wechsel zwischen 3d und 2d Konvektionsmuster

    2d-Bereiche: Trägheitskonvektion

- Trägheitskonvektion nur für $Pr << 1$

- Warum erst jetzt?
  - großes Aspektverhältnis
  - keine Symmetrieannahmen
  - Wettbewerb zwischen verschiedenen Konvektionsmustern

    "spatio-temporal chaos"