

Supercomputer ! ? ? ?

Numerische Simulation zur Analyse turbulenter Konvektion

Referenten: Dr. Grötzbach (IRE)
M. Wörner (IRE)

Mittwoch, 13. Mai 1992, 14.00 Uhr,
Gebäude 421, Raum 413

In dieser Seminarreihe präsentieren Wissenschaftler ihre, ohne Rechneinsatz undenkbaren Arbeiten.

Dargestellt werden sowohl die Zielsetzung und Einbindung der Aufgaben in die jeweilige Abteilung, als auch die Arbeitsweisen und Methoden, mit denen sie Herausforderungen begegnen. Simulations- und Analyseergebnisse werden vorgestellt und der dazu nötige DV-Aufwand (Vektorrechner, Universalrechner, Grafikworkstation, ...) erörtert.

Abschließend wird aus der Sicht des Vortragenden der Sinn oder Unsinn der Anwendung eines Supercomputers für zukünftige Arbeiten und eventuelle Alternativen diskutiert.

Numerische Simulation zur Analyse turbulenter Konvektion

**Günther Grötzbach
Martin Wörner**

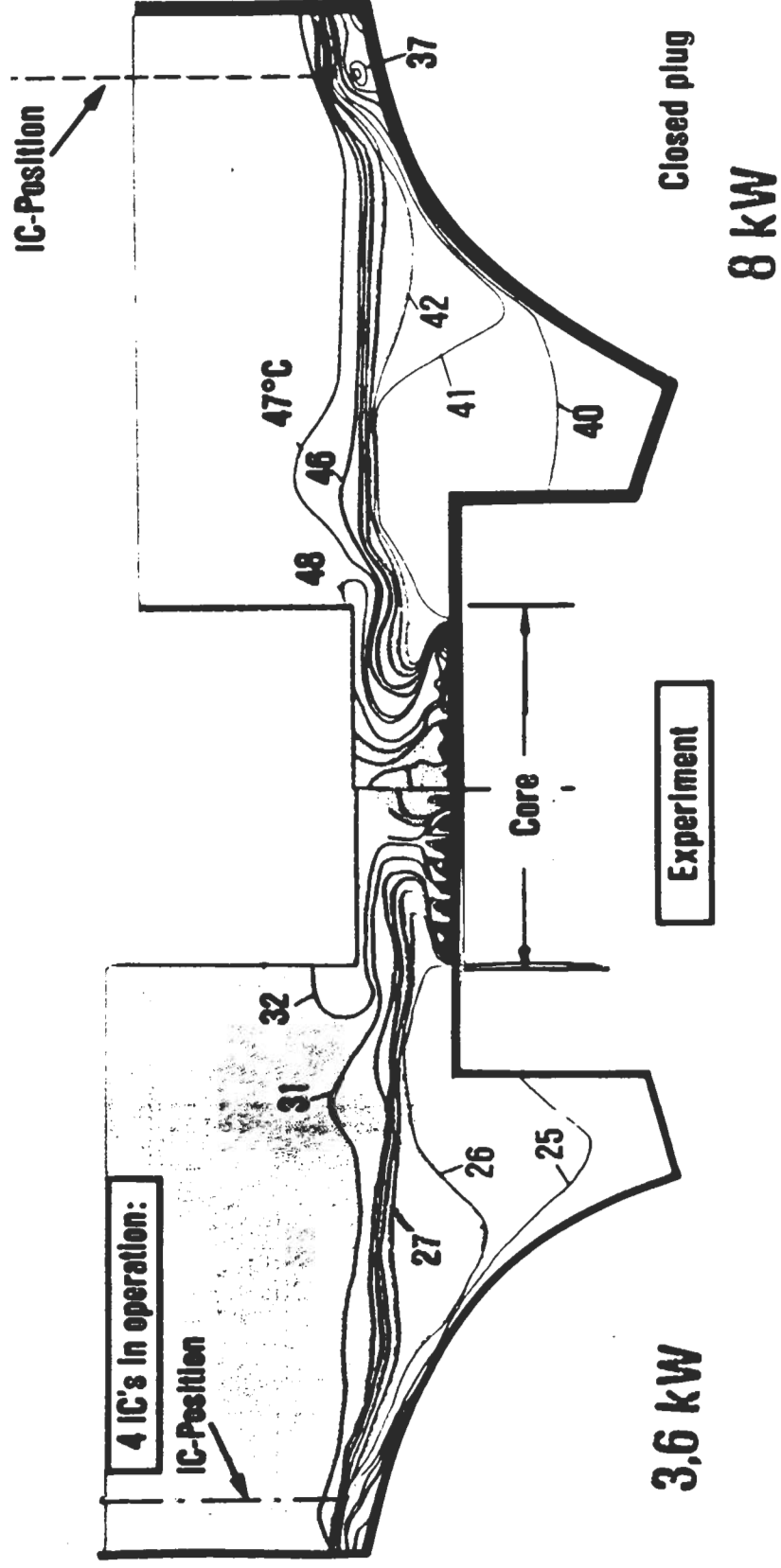
**Kernforschungszentrum Karlsruhe
Institut für Reaktorsicherheit
W - 7500 Karlsruhe**

**13. Mai 1992
Seminarreihe Supercomputer
KfK**

Generelle Zielsetzung

Passive Sicherheit bei NWA in schnellen Reaktoren

- Naturkonvektion im Tank
- unzulässige Temperaturen vermeiden



Vorgehen bei PSF

Modellexperimente in Wasser

- | | | |
|------------------|----|---------------|
| - Scheibenmodell | 2d | 1 : 20 (IATF) |
| - Ramona | 3d | 1 : 20 (IATF) |
| - Neptun | 3d | 1 : 5 (IATF) |

Reaktorexperimente

Übertragung Modell → Reaktor und Analyse

- FLUTAN (COMMIX - 2V) (INR)
 - Lösungsalgorithmen, Effizienz
 - Erweiterung der Turbulenzmodelle
 - Kugelexperiment Wasser/Natrium (IATF)
 - Düsenblock Wasser/Natrium (IATF)
 - Rayleigh-Benard Konv. Natrium (IATF)
 - Numerische Simulation bel. Fluid (IRS)

Ziel und Vorgehen im IRS

Ziel für numerische Simulation

Information über Konvektion in Flüssigmetallen

- Mechanismen der Turbulenz
- Statistische Daten der Turbulenz
- Koeffizienten von Turbulenzmodellen

Werkzeug TURBIT

3d, zeitabhängig,

einfache Geometrien

entwickelt im IRE/IRS des KfK

Schumann 1970 ..., Grötzbach 1975 ..., Wörner 1989

..., ...

Vorgehen mit TURBIT

Anpassung der Lösungsmethode

Simulationen für Rayleigh-Benard Konvektion

- Verifizieren mit Luft
- Produzieren + analysieren für Natrium
- Beiträge zu Turbulenzmodellen

Weiterentwicklungen für hohe Turbulenzgrade

Simulationsmethode

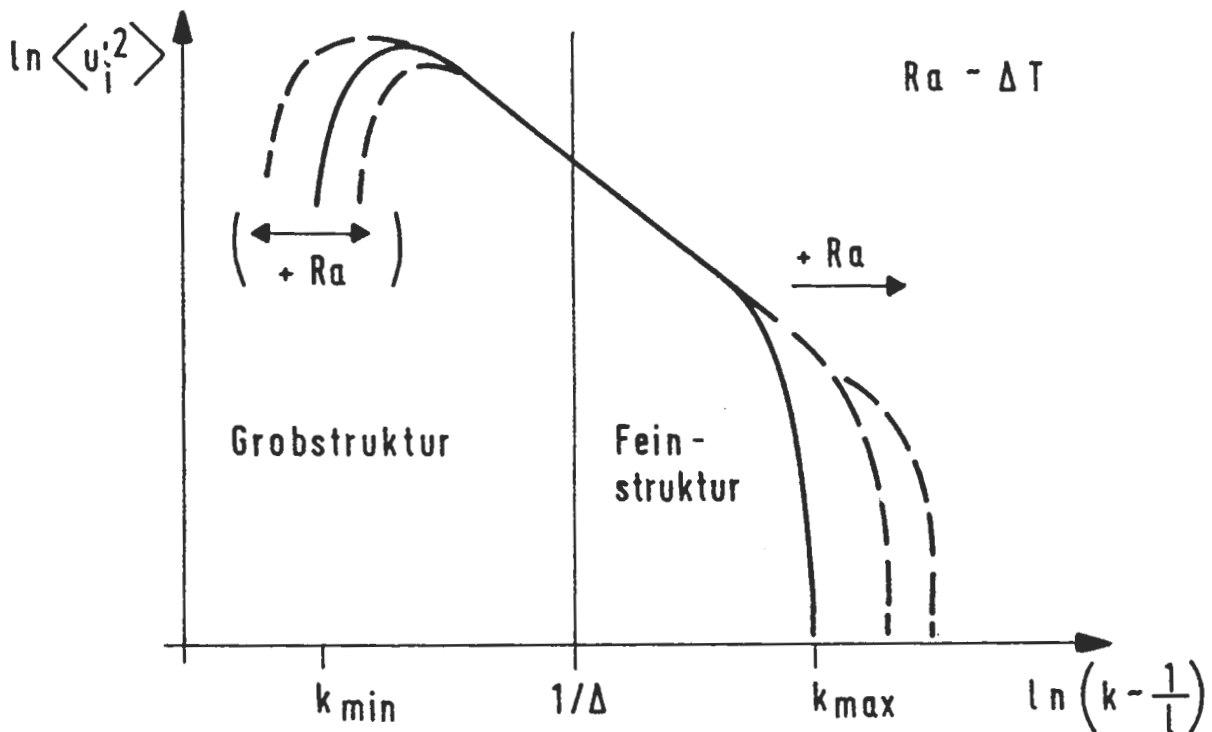
Numerische Simulation von Konvektion

Erhaltungsgleichungen für

- Masse
- Impuls
- thermische Energie

Probleme wegen Turbulenzeigenschaften

- dreidimensional
- zeitabhängig
- Spektrum von Längenmaßstäben



- $\Delta > 1/k_{\min}$ → Statistisches Abbild, Turbulenzmodelle
- $\Delta > 1/k_{\max}$ → Grobstruktursimulation; Feinstrukturmodelle
- $\Delta < 1/k_{\max}$ → Direkte Simulation, keine Modelle, Auflösung aller Skalen

Lösungsmethoden in TURBIT-4

Raumdiskretisierung

- zentrale Differenzen 2. Ordnung
- semi-spektraler direkter Poisson-Löser
 - einfache Geometrien

Zeitintegration

- explizit, $y^{n+1} = f(y^n, y^{n-1})$

$$\Delta t = 1/2 \{ |u_i|/\Delta x_i + 4 \max(v, a)/\Delta x_i^2 \}^{-1}$$

- semi-implizit, $y^{n+1} = f(y^{n+1}, y^n, y^{n-1})$

- Diffusion thermischer Energie $Pr \ll 1$

$$\Delta t = 1/2 \{ |u_i|/\Delta x_i + 4 v/\Delta x_i^2 \}^{-1}$$

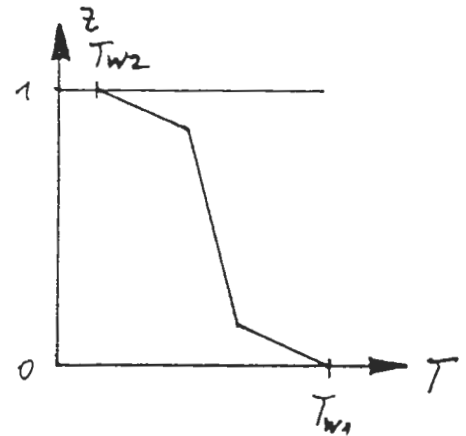
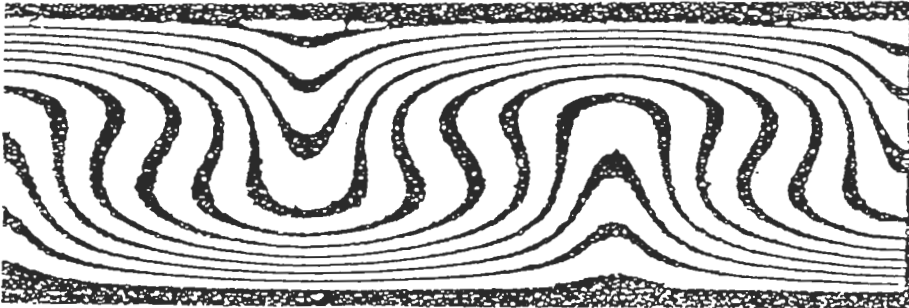
direkt → 50 mal schneller bei Natrium

Beispiele

für heute "machbare" Simulationen

Rayleigh-Bénard Konvektion von Luft

laminar, kleines ΔT



Interferogramm von M. Jahn (1975)

Besonderheiten

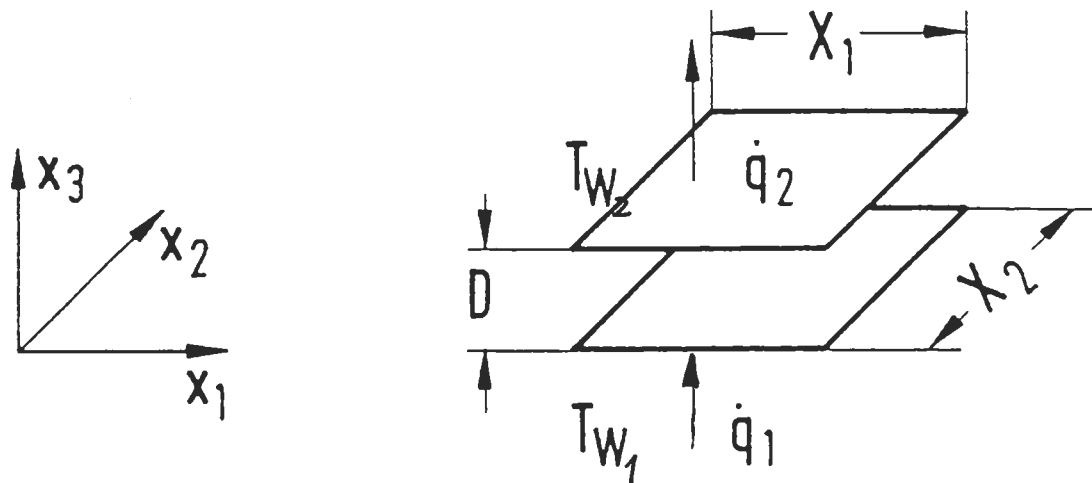
- zwei instabile Grenzschichten
- gegenseitige Beeinflussung
- Viele experimentelle Untersuchungen
- Programm- + Benutzervalidierung

Gitteranforderungen

- Grenzschichten auflösen
- Kolmogorovlänge auflösen
- Makrolängen auflösen

Spezifikationen für Simulationen von Rayleigh-Bénard-Konvektion

Horizontaler Plattenkanal



Fluid	Luft	Natrium
Pr	0.71	0.006
Ra	630.000	12.000
X_i/D	7.92	8.0
$N_1 \cdot N_2 \cdot N_3$	200 · 200 · 39	250 · 250 · 39
N_t	16.000	61.000

Startwerte

Luft: Simulationsergebnisse von $Ra = 380.000$

Natrium: $\underline{u} = 0$, $\langle T \rangle = \text{linear}$, $T' = \text{random}$

Direkte Simulationen!

Semiimplizite Zeitintegration

(Beilage)

nach Übergang zu vollentwickelter Strömung:

Farbfolien

**Temperatur in 3 Schnittebenen
Farbcode heiß/kalt**

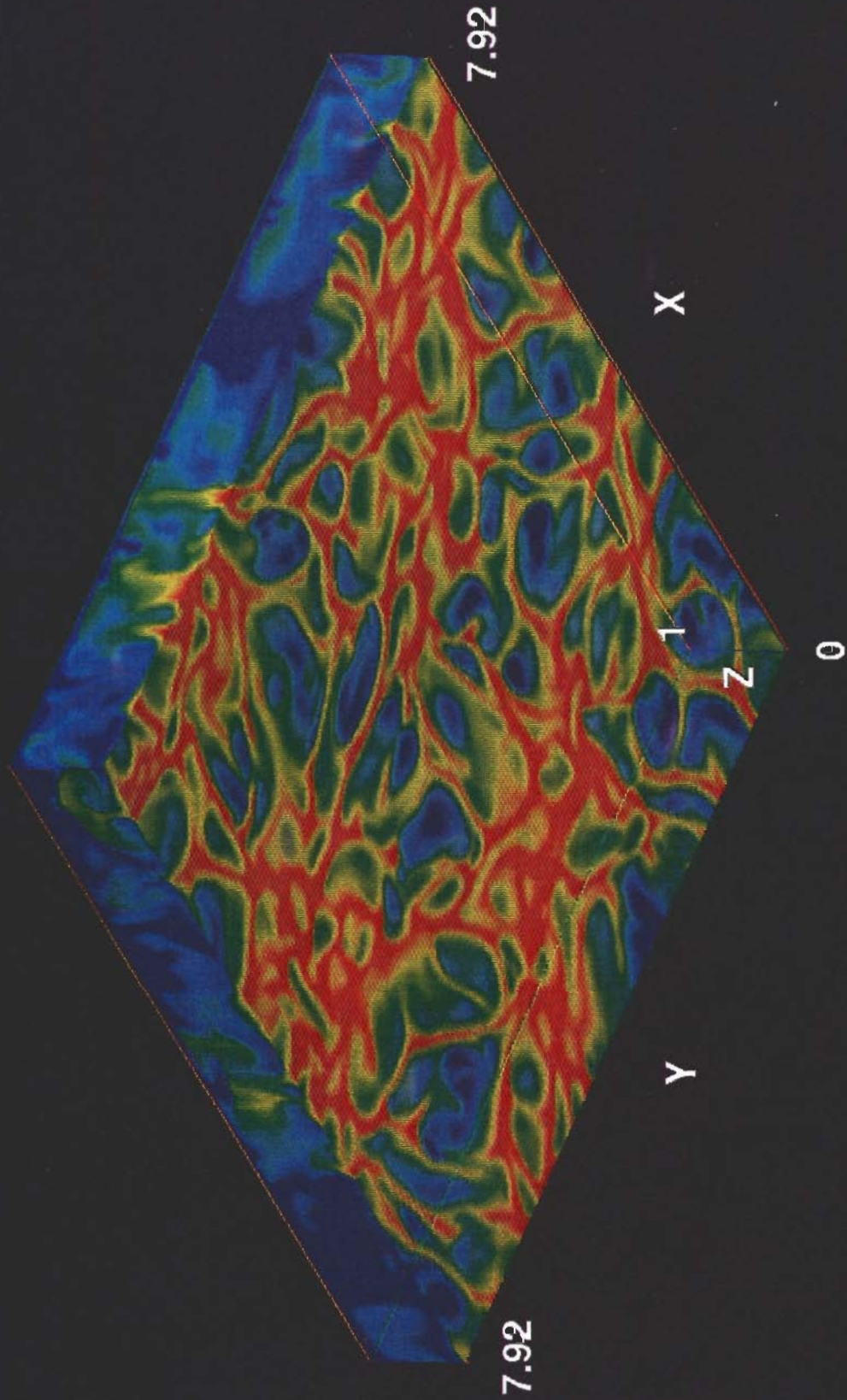
**Temperaturisofläche $T = 0.7$
Farbcode u_3**

**Temperaturisofläche $T = 0.5$
Farbcode u_3**

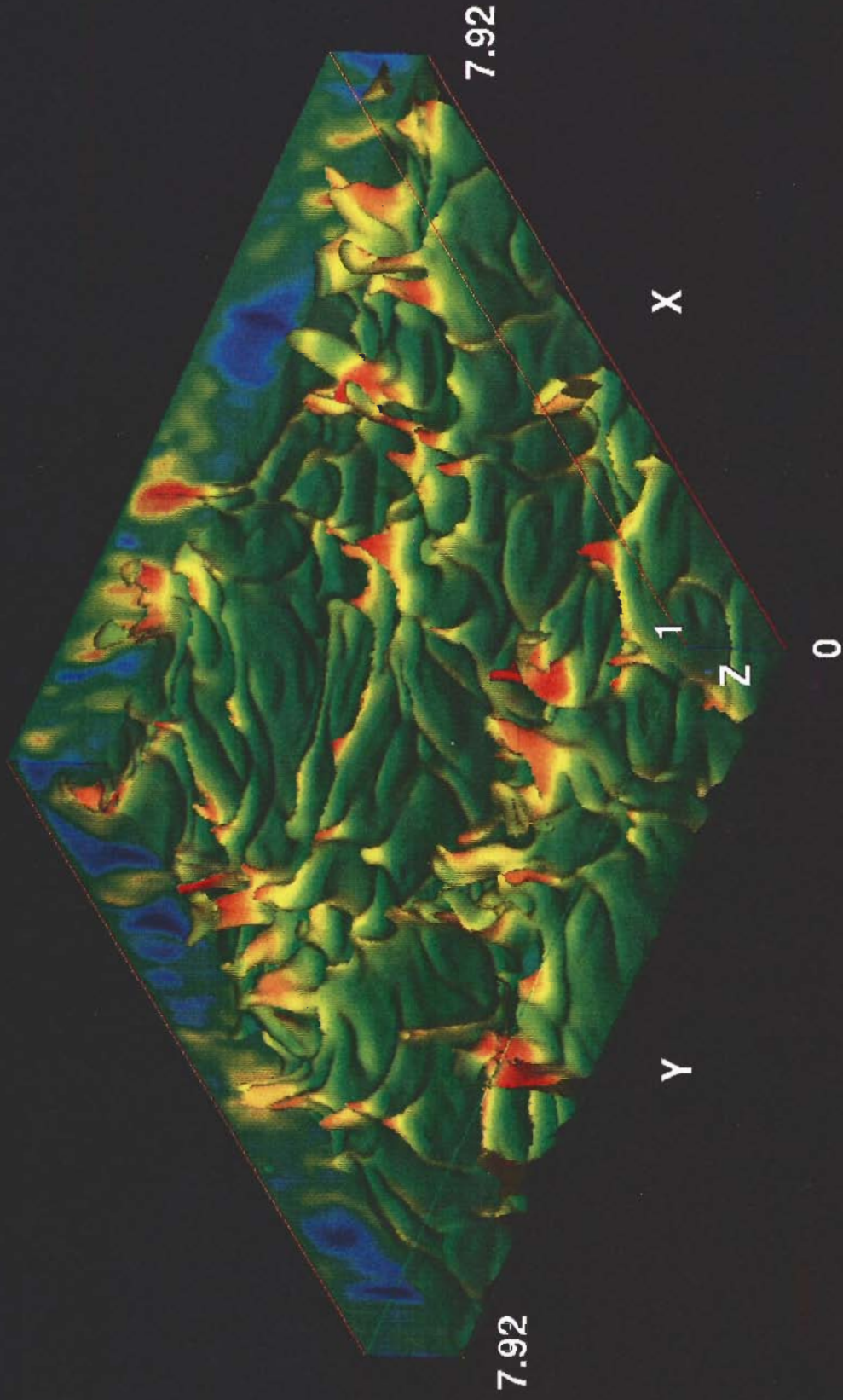
→ Speichen und Pilzstrukturen

**Zeitverhalten siehe Film (5 min)
(nur 1/4 des Kanals)**

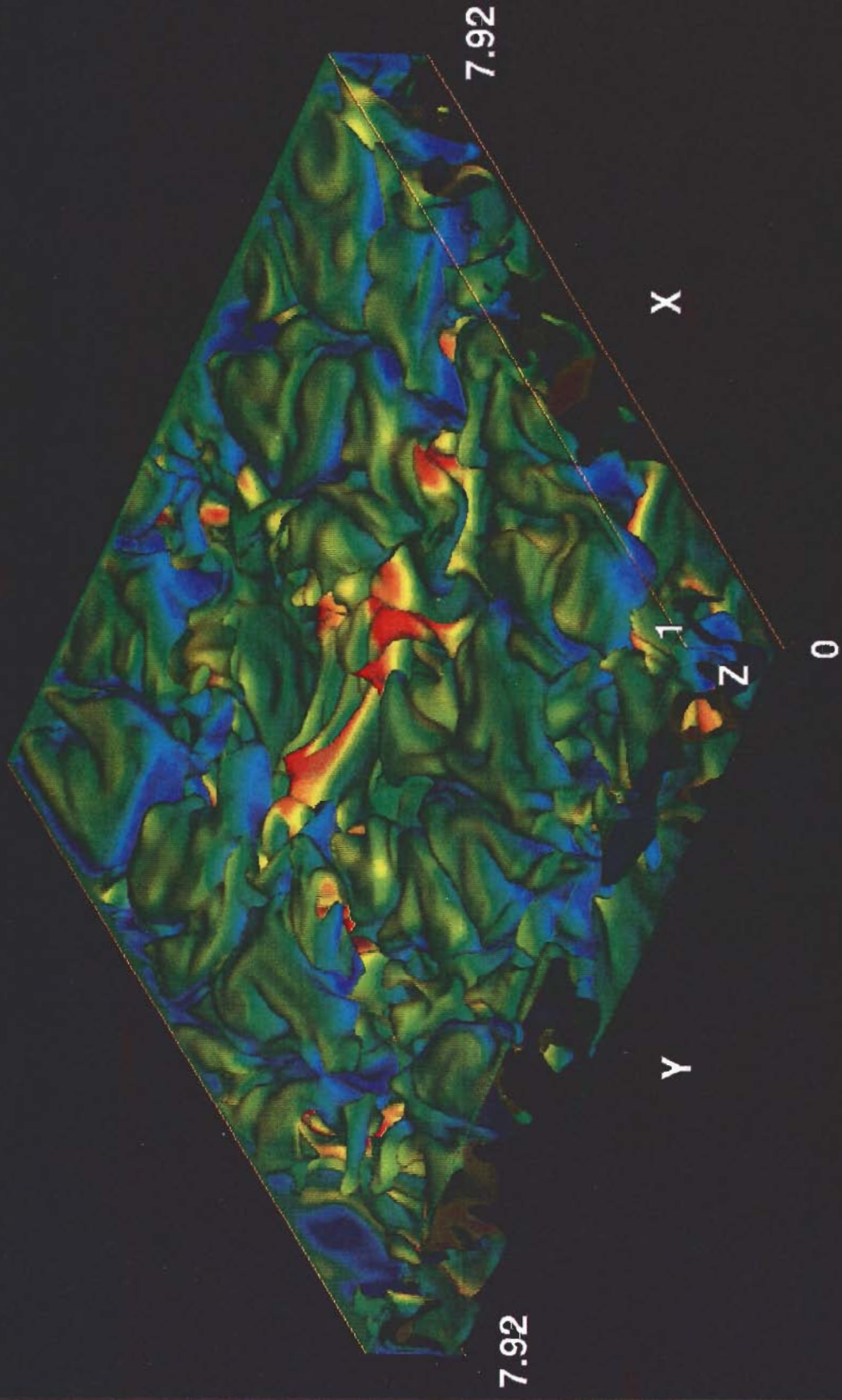
**Zeitskala 1 : 1 zu Deardorff's Exper.
(Luft, $D = 0,1$ m)**



Blu7 Ntim = 58 100 Color: Tp (0.4 - 0.9) k=5 (z = 0.0425)



Blu7 Ntim = 58 100 Isosurface: Tp = 0.7 Color: w

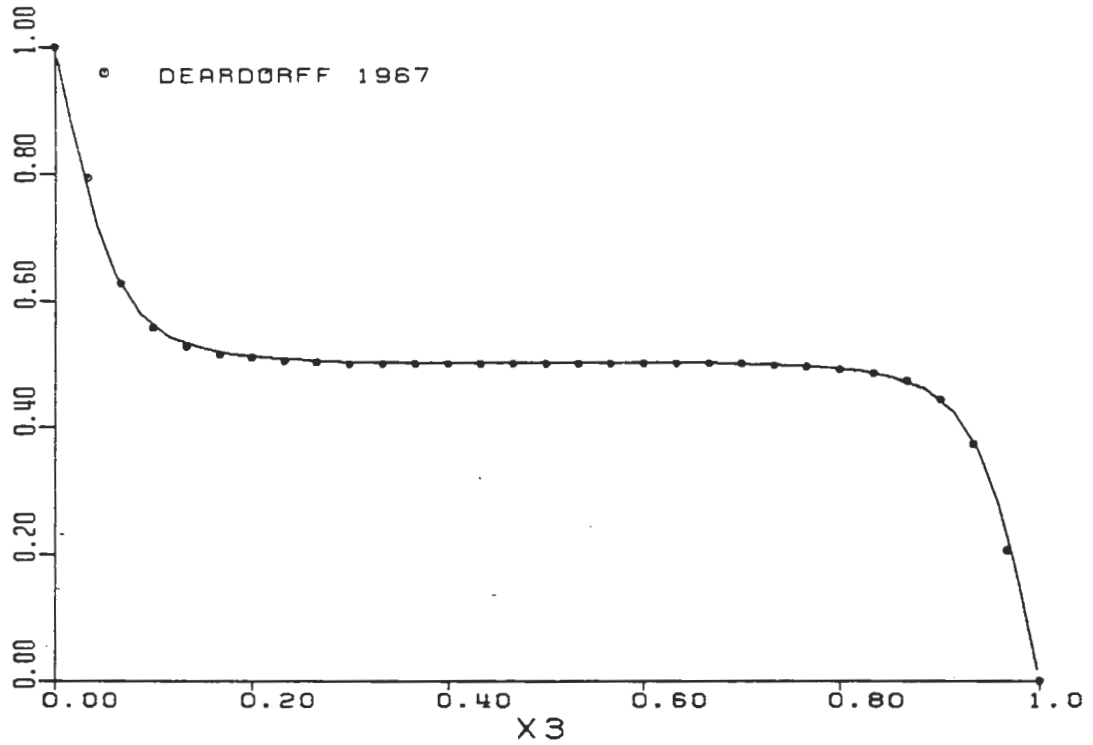


Blu7 Ntim = 58 100 Isosurface: Tp = 0.5 Color: w

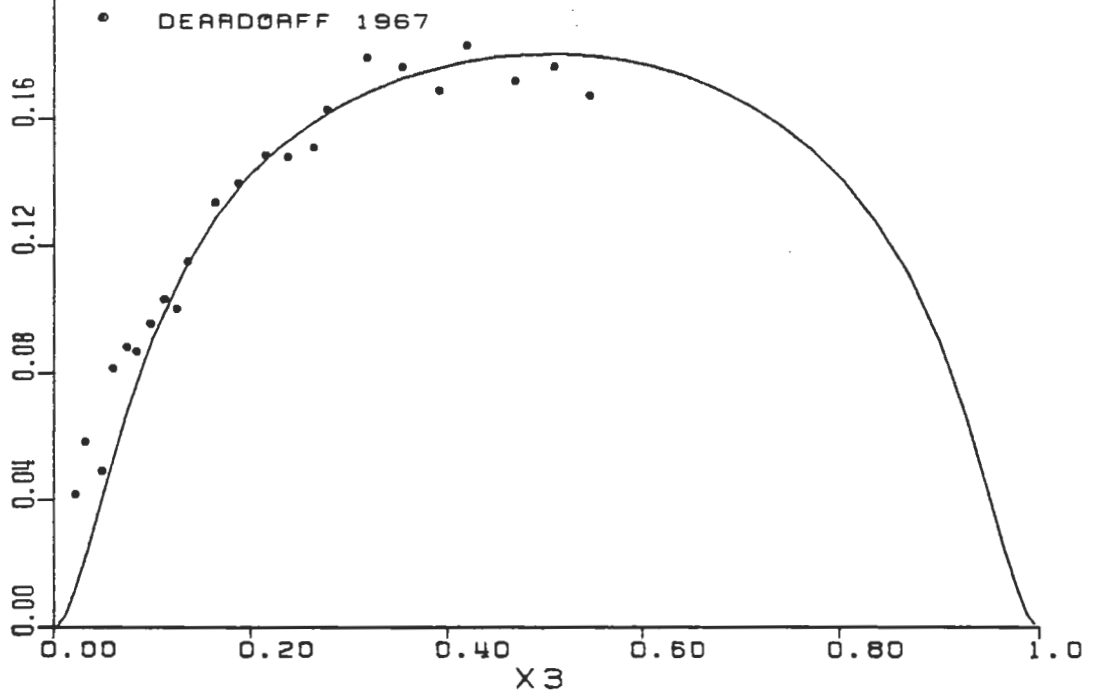
Verifikation Pr = 0.71

Experimente Deardorff (1967)

$\langle T \rangle$

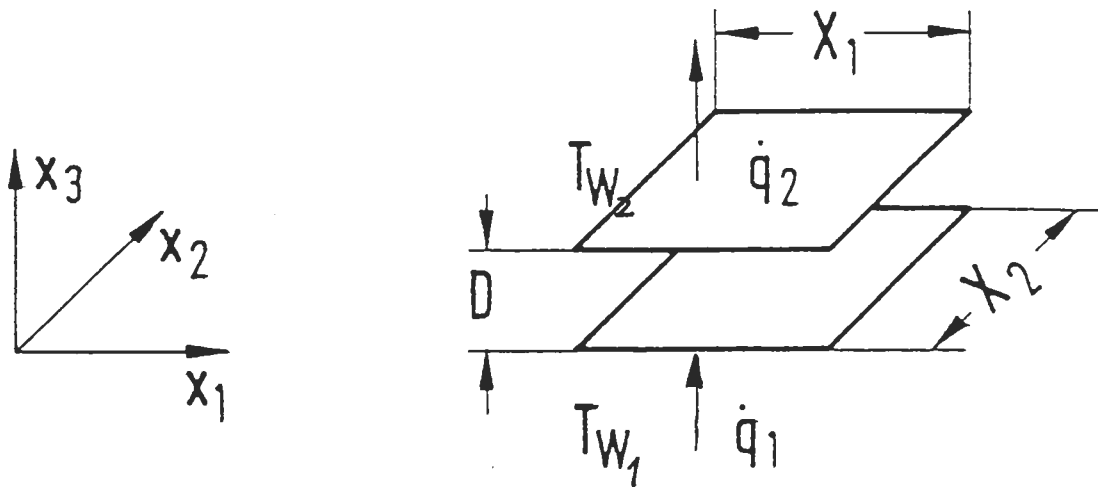


$\sqrt{\langle u_3'^2 \rangle}$



Spezifikationen für Simulationen von Rayleigh-Bénard-Konvektion

Horizontaler Plattenkanal



Fluid	Luft	Natrium
Pr	0.71	0.006
Ra	630.000	12.000
X_i/D	7.92	8.0
$N_1 \cdot N_2 \cdot N_3$	200 · 200 · 39	250 · 250 · 39
N_t	16.000	61.000

Startwerte

Luft: Simulationsergebnisse von $Ra = 380.000$

Natrium: $\underline{u} = 0$, $\langle T \rangle = \text{linear}$, $T' = \text{random}$

Direkte Simulationen!

Semiimplizite Zeitintegration

(Beilage)

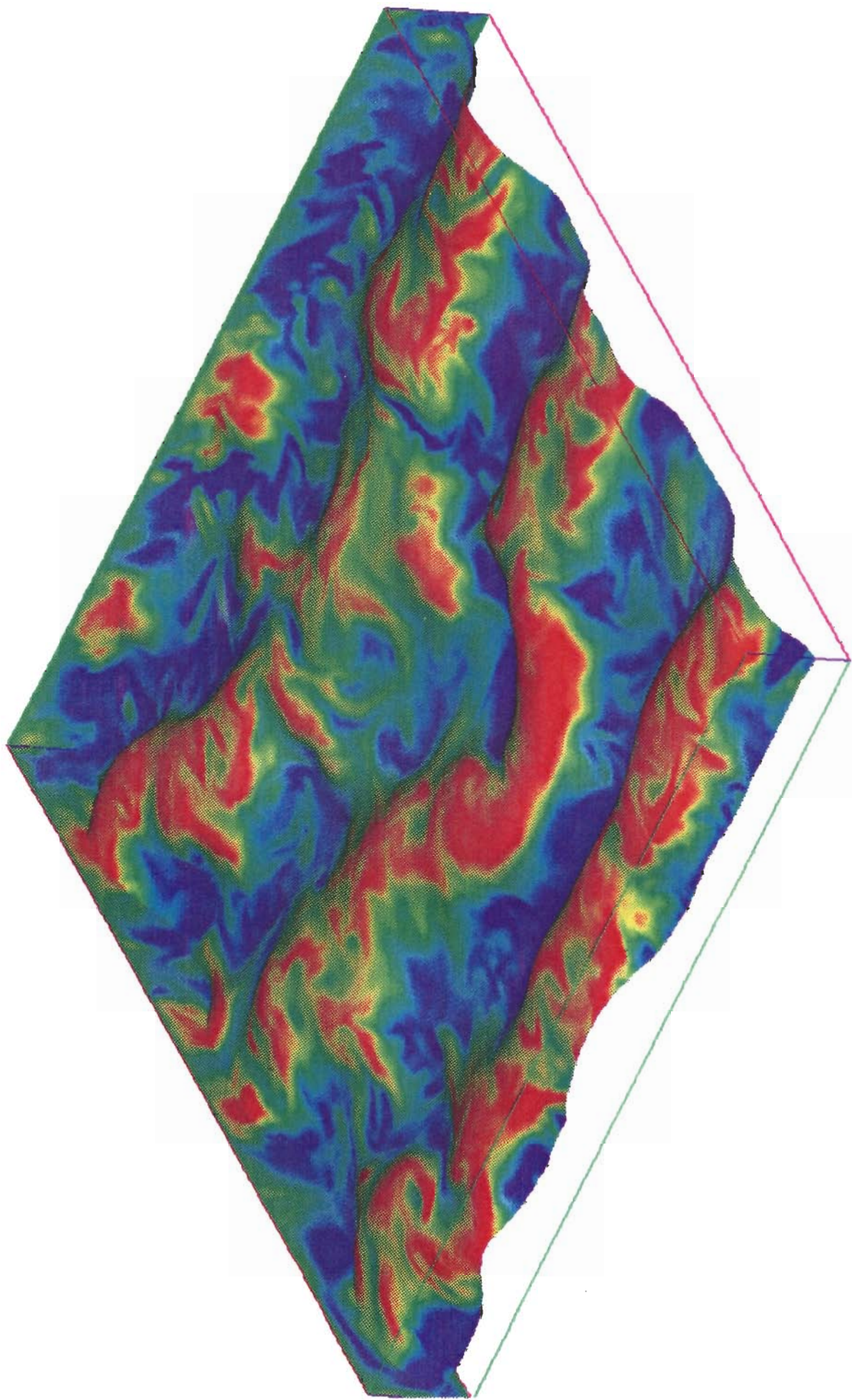
nach Übergang zu vollentwickelter Strömung:

Temperaturisofläche $T = 0.5$
Farbcode u_3

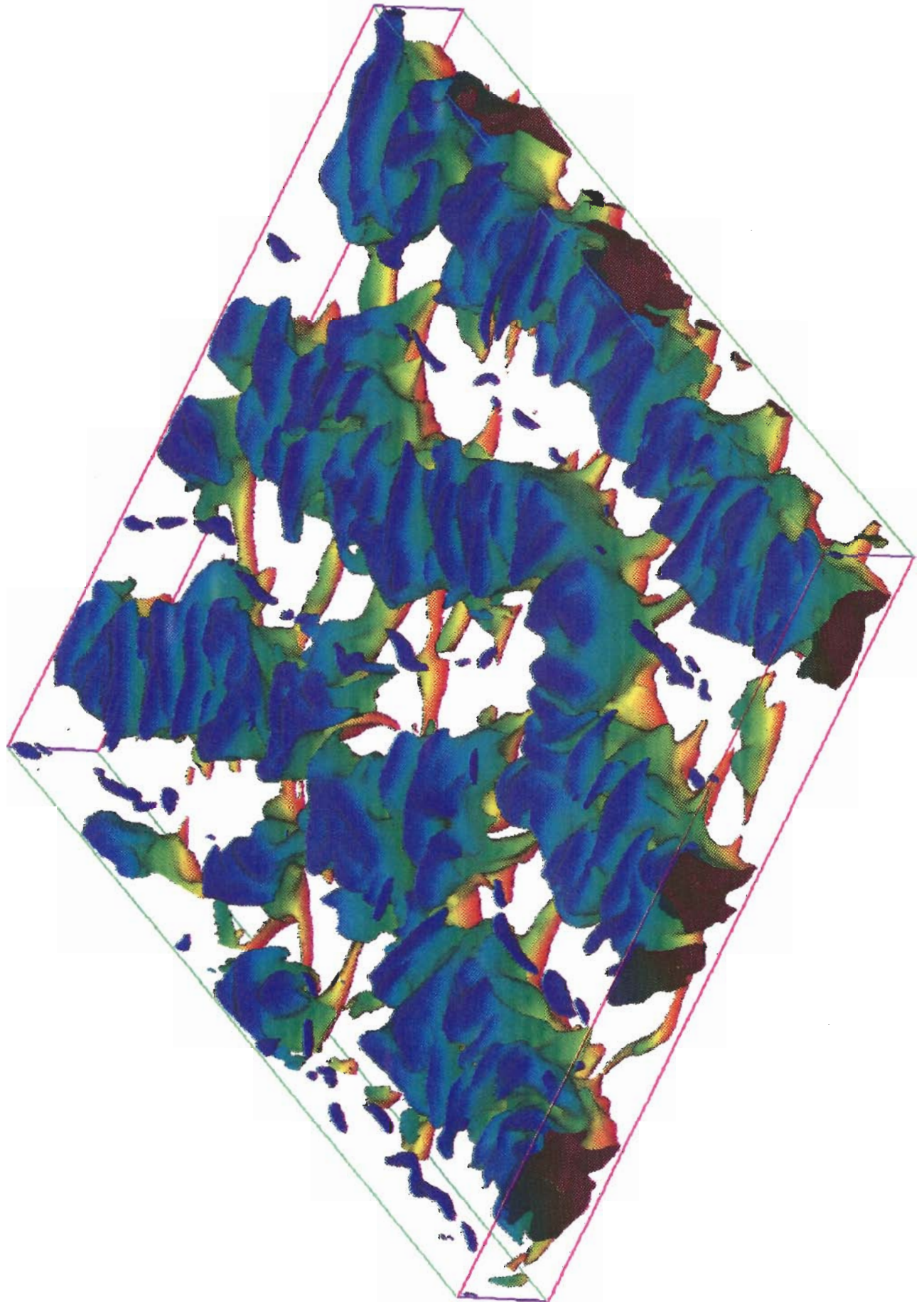
u_3 -Isofläche $u_3 = 0.1$
Farbcode heiß/kalt

u_3 in 3 Schnittebenen
Farbcode u_3 auf/ab

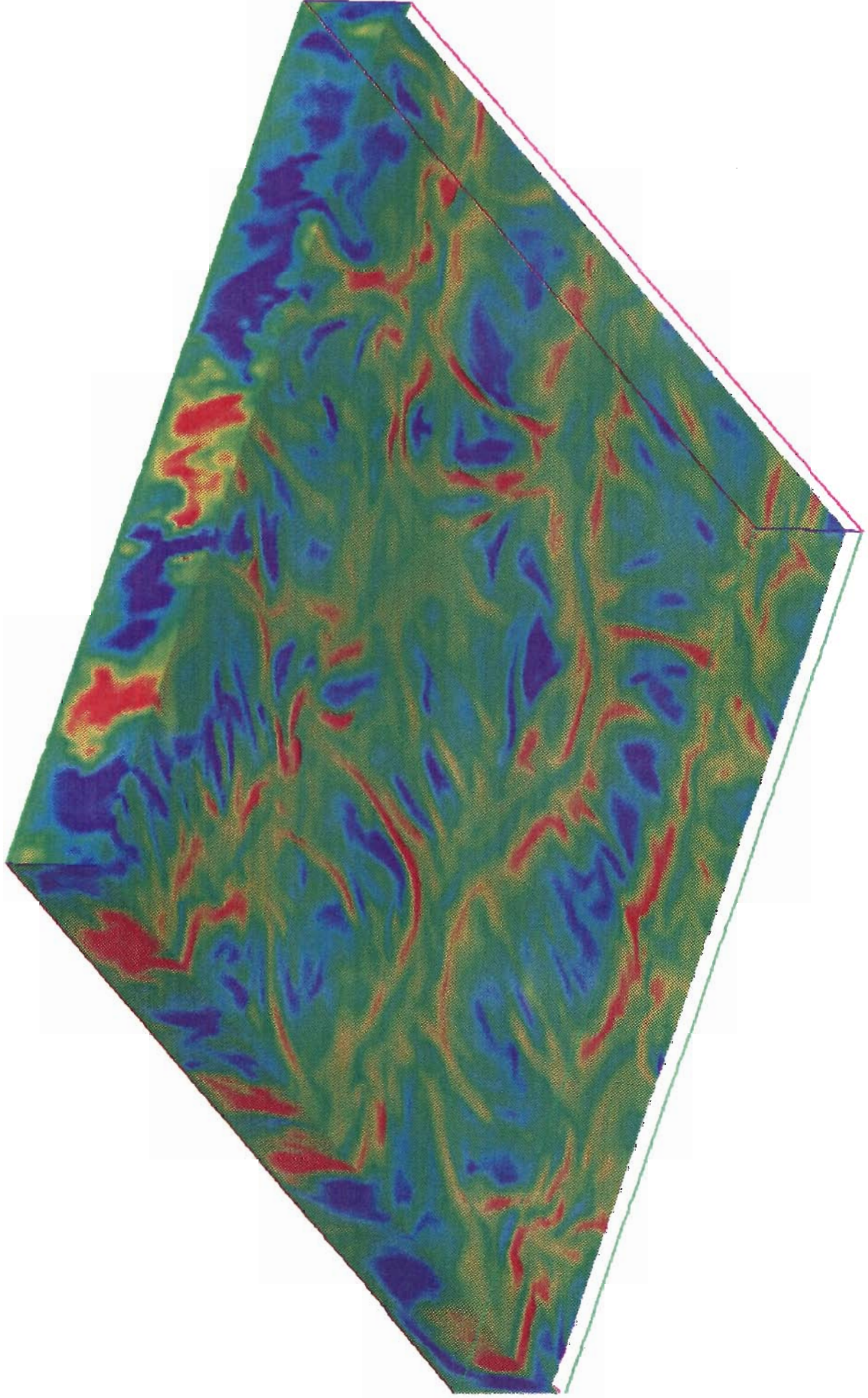
→ langwelliges T-Feld, Rollen
kurzwelliges u-Feld, Speichen
(keine Aussagen aus Experimenten)



Na12h11a Ra=12000 Pr=0.006 Iso: Tp=0.5 C:u3 (-0.5/0.5)



ns1Sh1 ja Ps=15000 Pr=0.000 lso:w=0.1 C:Tp



Na12h11a Ra=12000 Pr=0.006 Oslicer: u3 (C:-0.5/0.5)

Film mit Mechanismen

**in Vorbereitung
IRS-Seminar, 11. Juni 1992**

Verifikation

mit vorhandenen Daten nur integral möglich

Beispiele

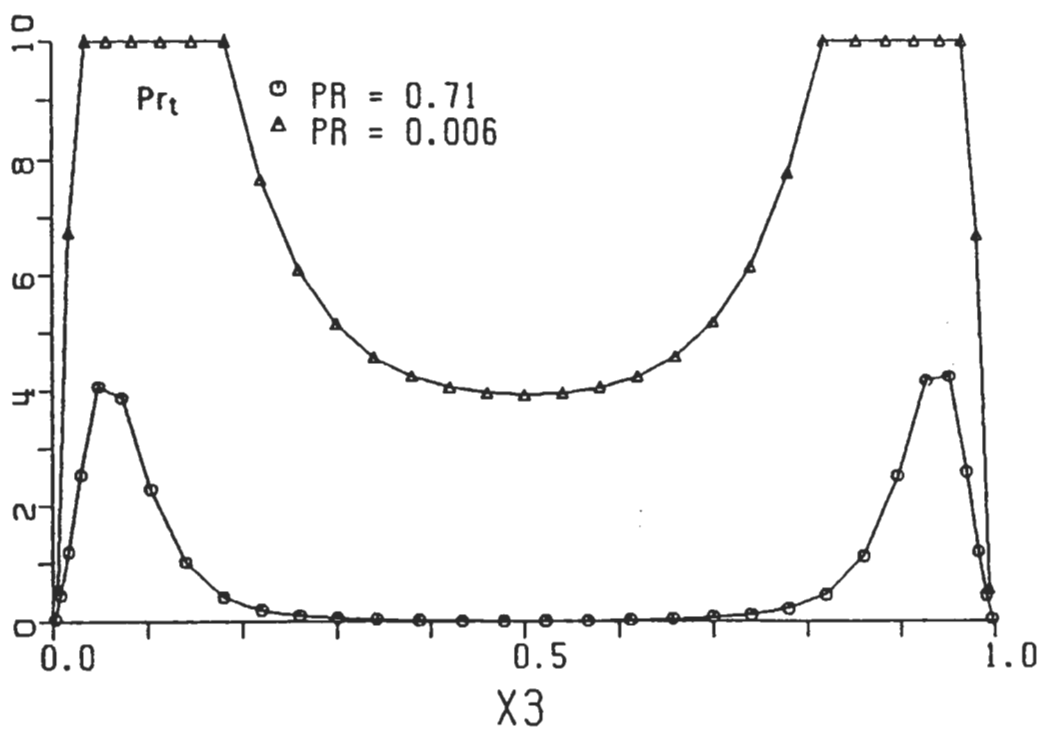
für Analyse von Termen aus Turbulenz- modellen

f (Pr)

$$\begin{aligned} \text{Ra} &= && \text{Luft} & / & \text{Natrium} \\ &= && 380.000 & / & 6.000 \\ \text{Gr} = \text{Ra/Pr} &= && 5,4 \cdot 10^5 & / & 10^6 \end{aligned}$$

Turbulente Prandtl-Zahl

$$Pr_t = \nu_t / a_t$$



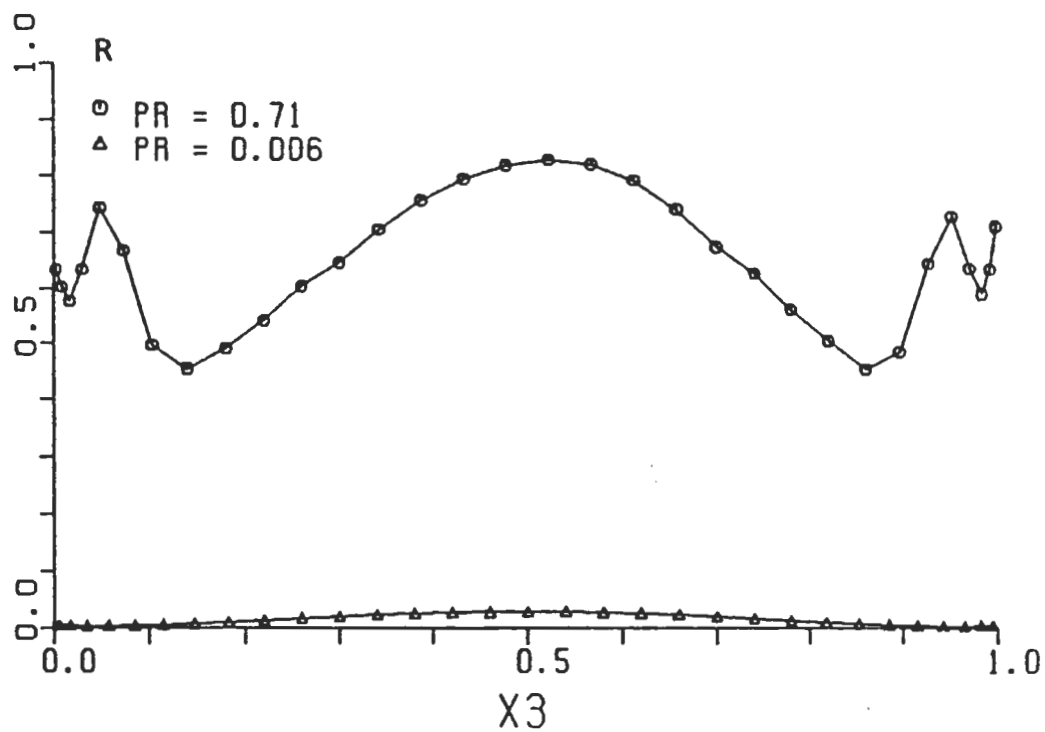
"Dissipation" in der g-Gleichung

$$\text{für } a_t = C_H k \cdot g / \text{diss}_g$$

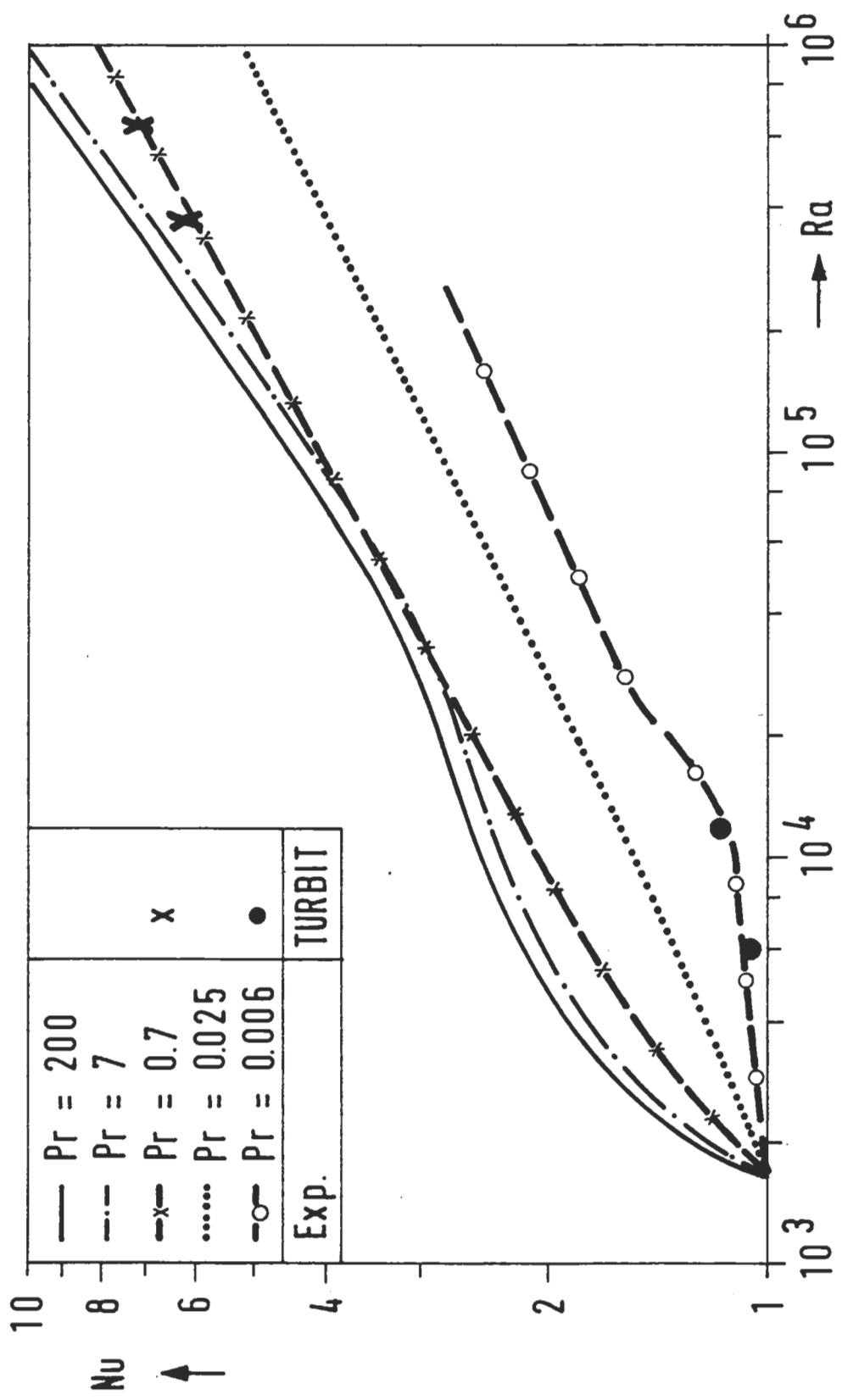
$$g = \langle T'^2 \rangle / 2$$

$$\text{Diss}_g = \text{Diss}_k \cdot g / (k \cdot R)$$

$$R = \text{Zeitskalenverhältnis} = ?$$



Wo stehen wir heute ?

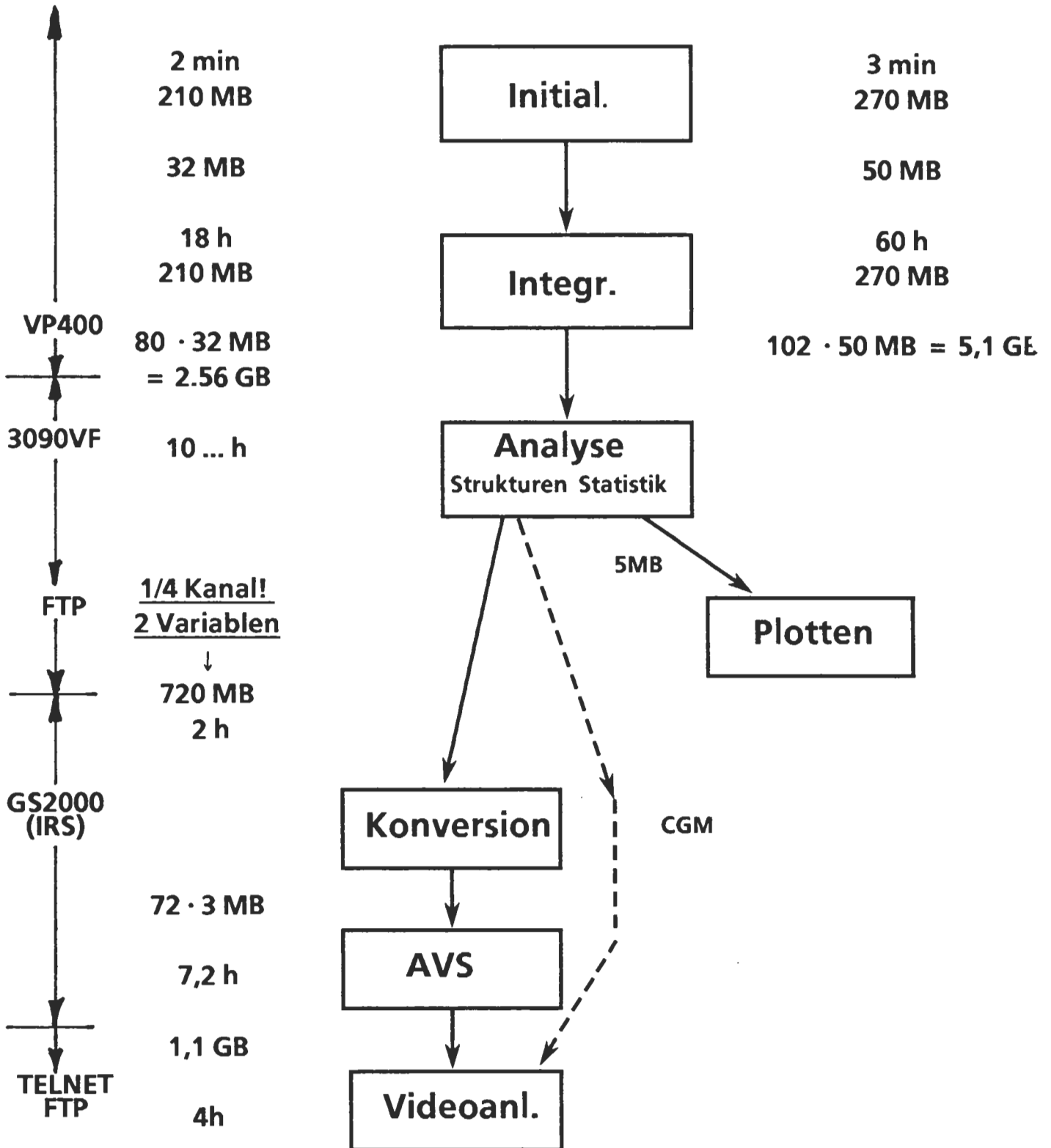


Nusselt-Zahl in Rayleigh-Bénard-Konvektion (nach Kek)

Simulationsaufwand

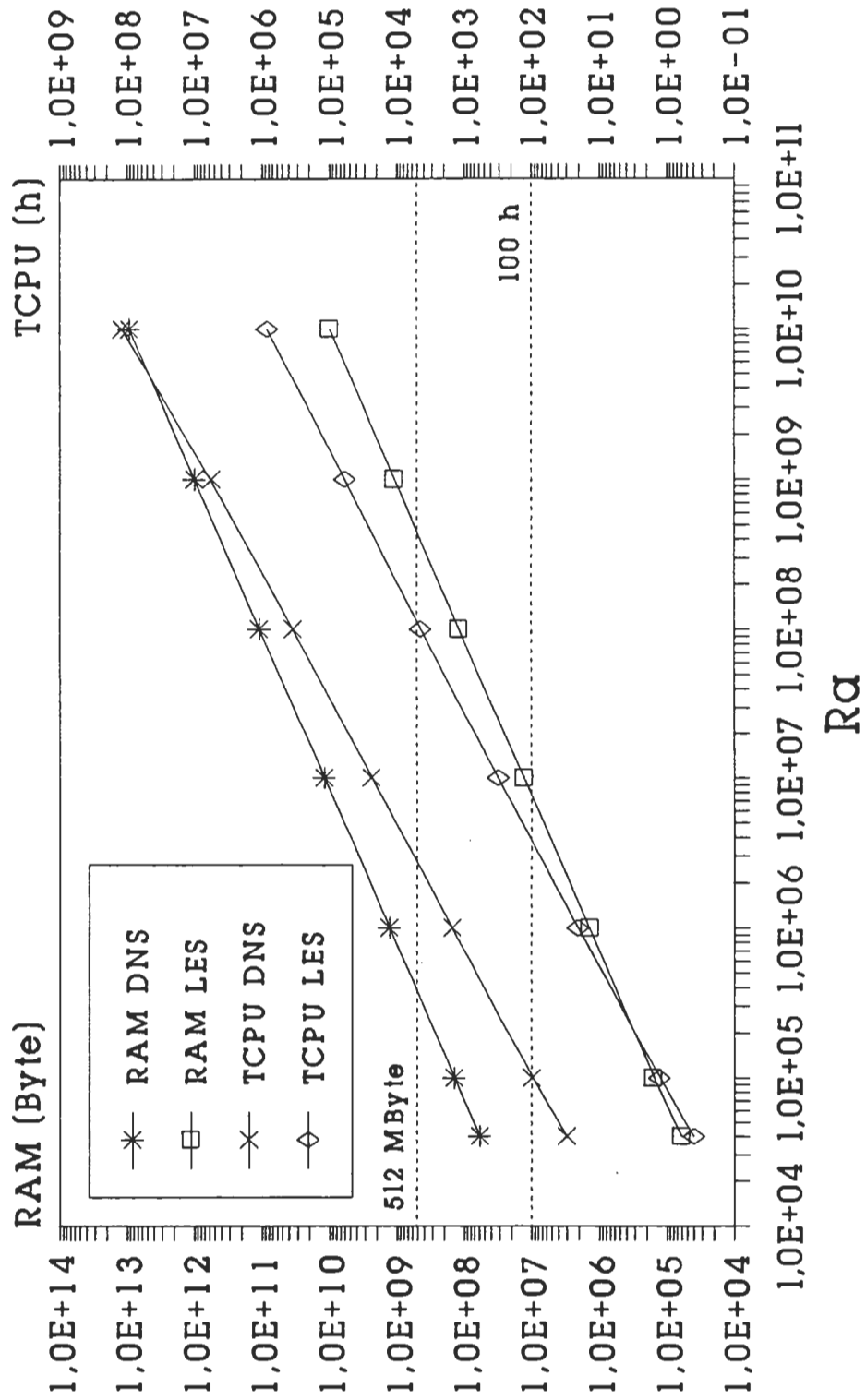
Ra = 630.000, Pr = 0.71

Ra = 12.000, Pr = 0.006



**Wie erreicht man
höhere Turbulenzgrade ?**

Abschätzung Speicherplatz- und Rechenzeitbedarf



Methodische Maßnahmen für höhere Ra

DNS auf zukünftigen Rechnern

- Parallelisierung
- "Parallele" Poisson Löser

Grobstruktursimulation

- Feinstrukturmodelle
- wie DNS

Vorteil:

keine Obergrenze für Ra

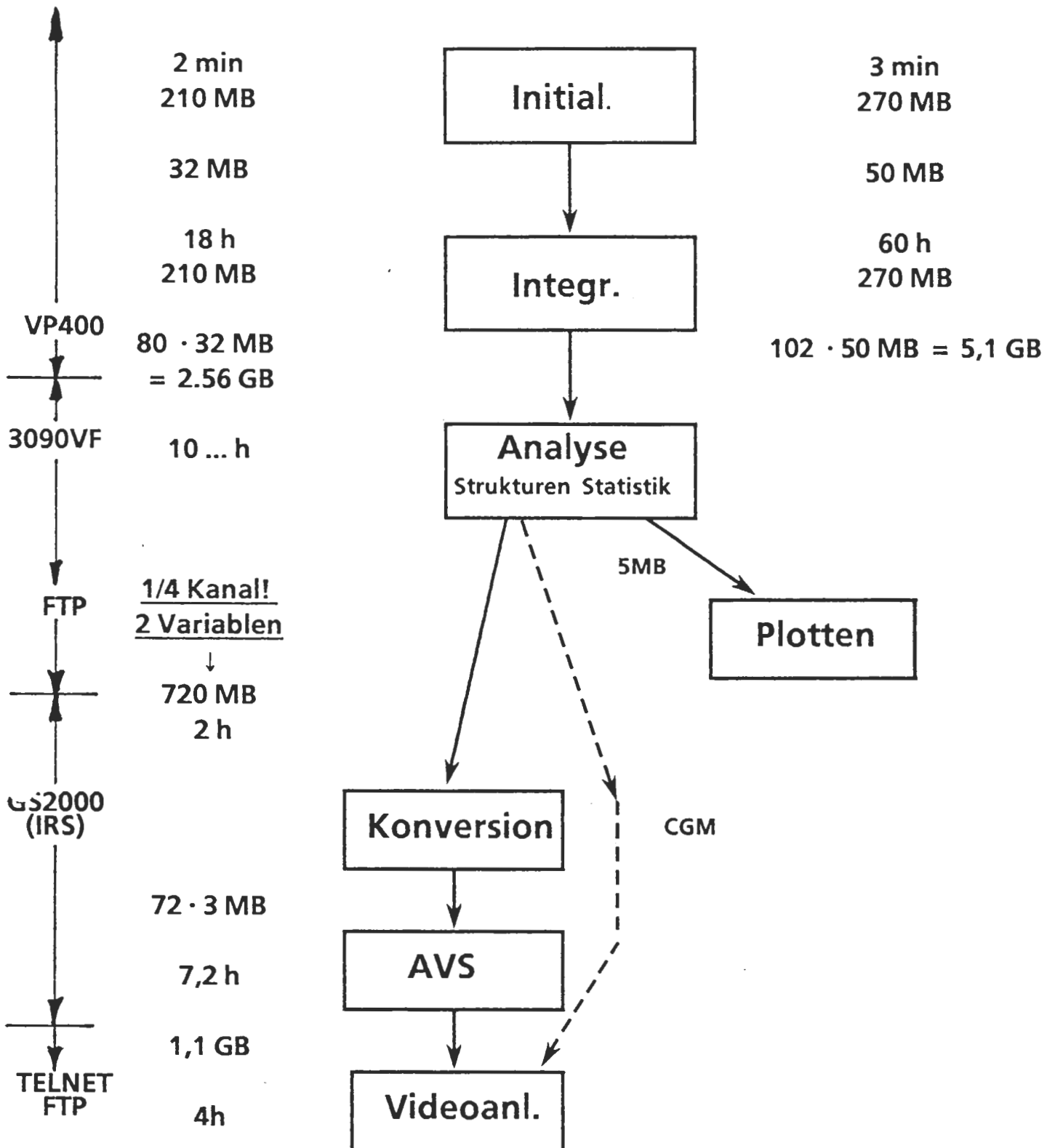
Nachteil:

Abhängig von Parametern
kleine Skalen nicht auswertbar

Simulationsaufwand

Ra = 630.000, Pr = 0.71

Ra = 12.000, Pr = 0.006



Schlußfolgerungen

Direkte Simulationsmethode

keine Modellparameter
alle Skalen auflösen!
Zeitintegration fluidabhängig wählen

Rayleigh-Bénard Konvektion von Luft

Zellstrukturen in Grenzschichten
Experimentelle Bestätigung fehlt
Mechanismen
Statistik experimentell bestätigt

Rayleigh-Bénard Konvektion von Natrium

Rollen im T- und \underline{u} -Feld
Zellstrukturen in \underline{u} -Grenzschichten
kurzwelliges \underline{u} -Feld
Kaum experimentelle Daten für Vergleich

→ numerische Vorhersage von Turbulenzdaten

Terme in Turbulenzmodellen f (Pr)

Wärmeaustausch

Starke Abhängigkeit von Pr
→ Datenbasis für Turbulenzmodelle

Ausblick

Wege zu höheren Turbulenzgraden

Computerhardware mit TFLOPS für DNS

300fach höhere Ra ($> 10^7$)

200fach größerer Speicheraufwand

→ Entwicklungsnotwendigkeiten

Parallelisierung

“parallele” direkte Poisson Löser

Vergangenheit zeigt langsamen stetigen Zuwachs

DNS für Luft seit 15 Jahren!

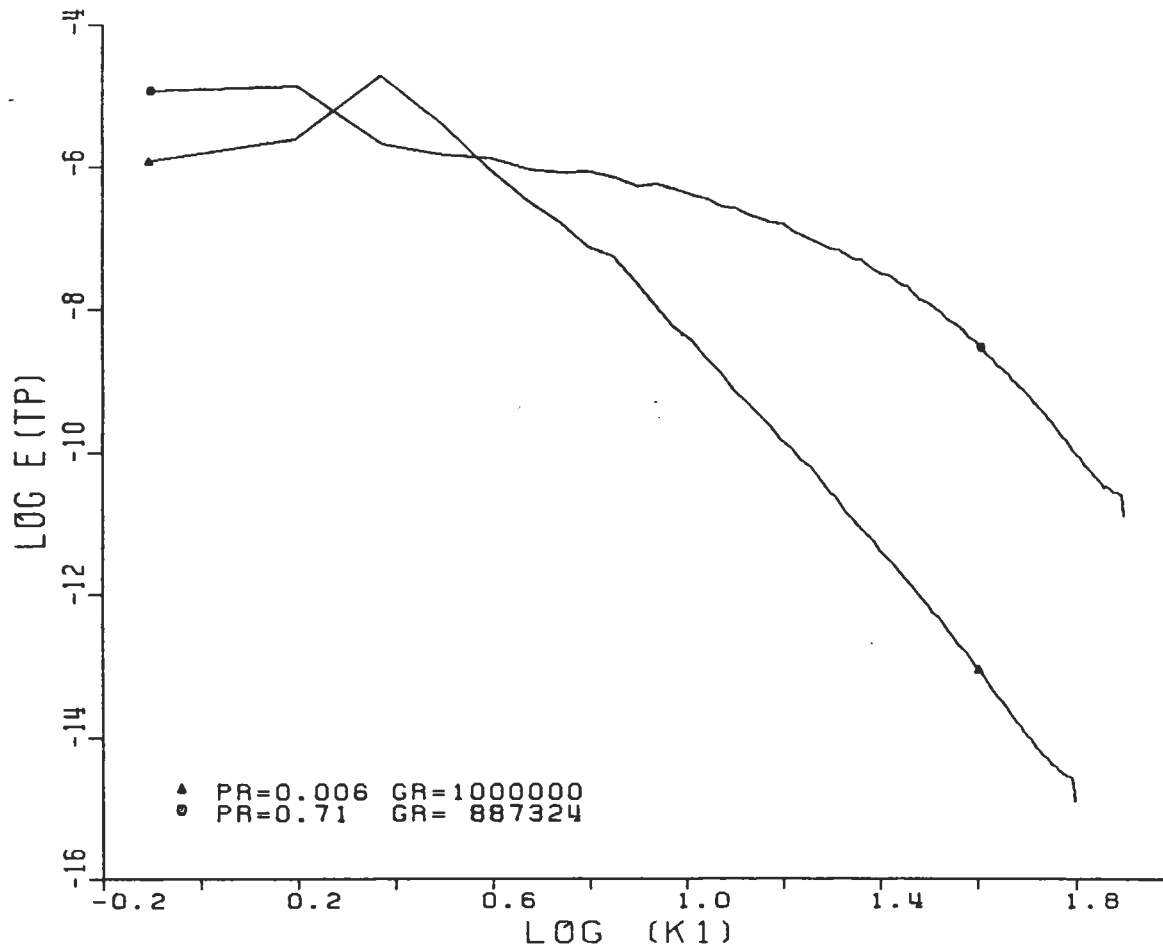
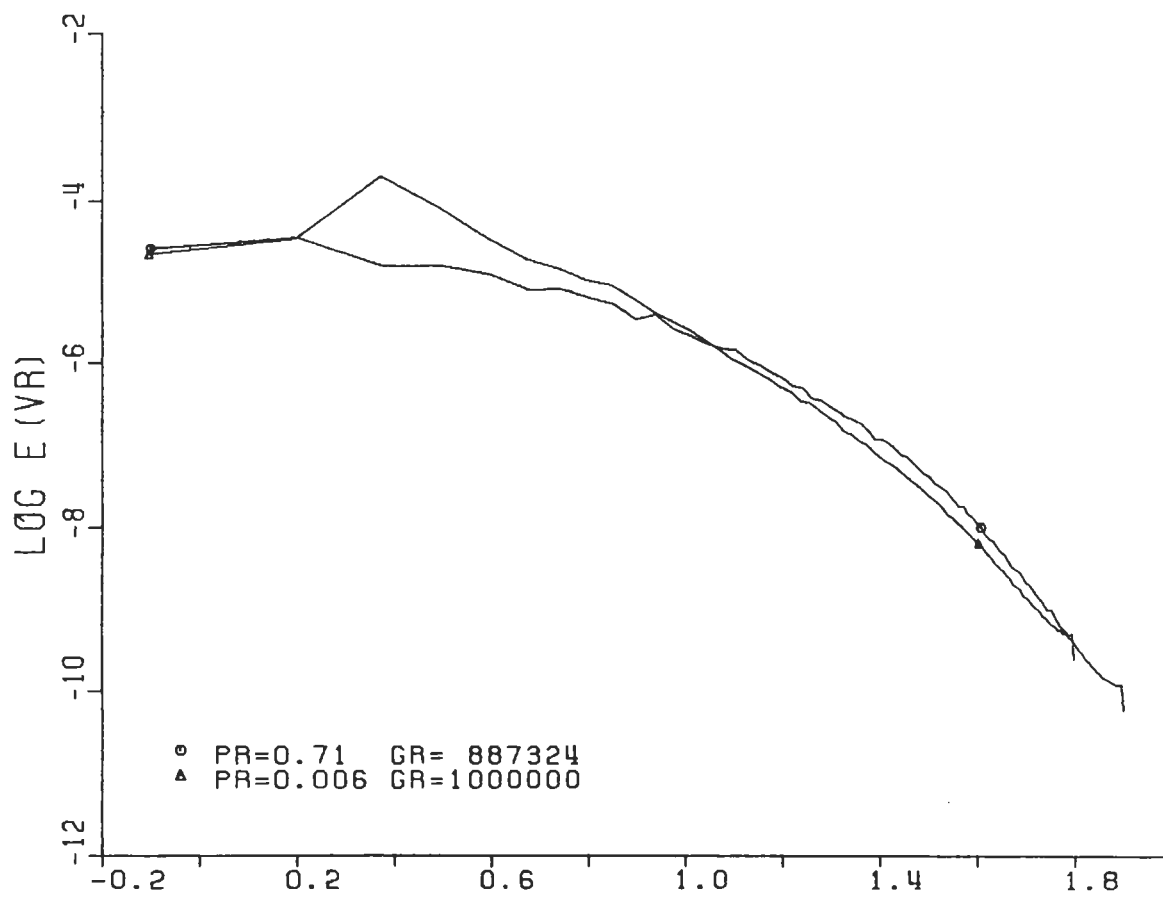
Grobstruktursimulationen

Feinstrukturmodelle entwickeln

→ erste Ergebnisse für Teile von Turbulenzmodellen

Hardwarefortschritt reduziert Einschränkungen

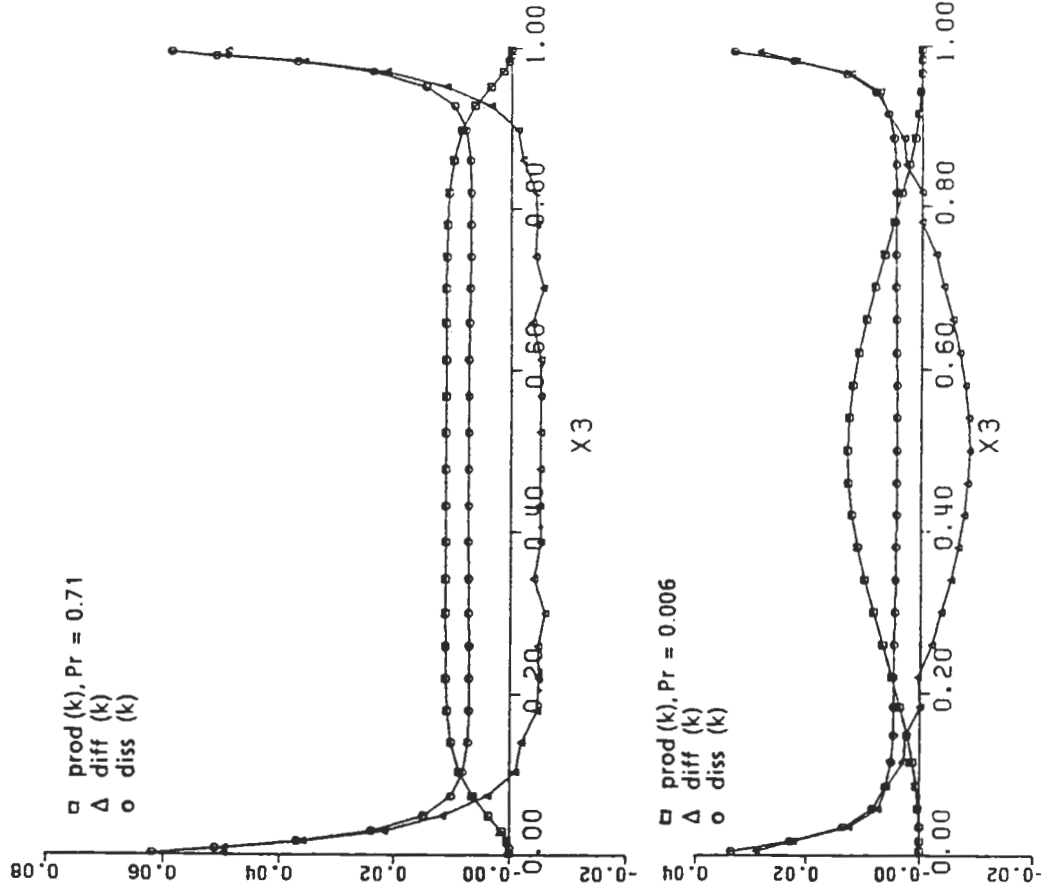
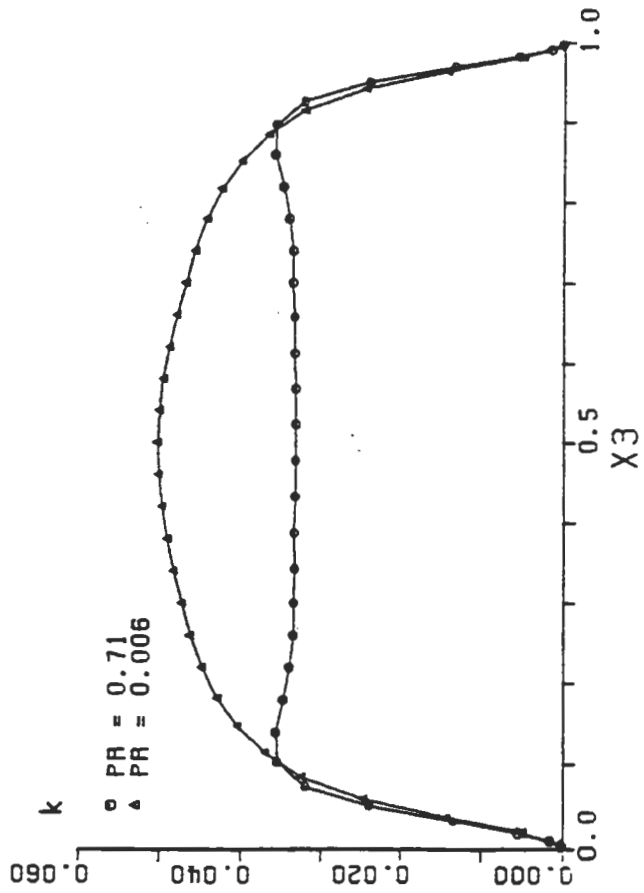
⇒ Turbulenzsimulation wird auch künftige Rechnergenerationen voll fordern



SPEKTRENVERGLEICH BLU7-NA6H (Z=0.5)

k-Gleichung, z.B. für $\nu_t = C_\mu k^2/\text{diss}$

$$\begin{aligned}
 k &= \langle u_i'^2 \rangle / 2 \\
 \partial k / \partial t &= 0 = \text{prod} + \text{diff} - \text{diss} \\
 \text{prod} &= -\langle u_3 T \rangle \cdot Gr_3 / Re_0^2 \\
 \text{diff} &= -\text{div} \{ \langle \underline{u}' k \rangle + \langle \underline{u}' p' \rangle \} + \nu \text{div grad } k \\
 \text{diss} &= \nu \{ \langle (\text{rot } \underline{u}')^2 \rangle + 2 \langle \text{div} (\underline{u}' \text{grad } \underline{u}') \rangle \}
 \end{aligned}$$



Realisierte Rayleigh-Bénard Simulationen, Pr = 0.7
(Beispiele)

		Ra	Maschen	X_i/D	Nu
Lipps	1976	15 Ra _{cr}	$3 \cdot 10^4$	$2.9 \approx \lambda$	2.9
Grötzbach	1982	220 Ra _{cr}	10^5	$2.8 \approx \lambda$	6.9
	1983	220 Ra _{cr}	10^5	$5.6 \approx \lambda$	6.5
Eidson	1985	220 Ra _{cr}	$5 \cdot 10^5$	$4.0 \approx \lambda$	8.1
Grötzbach	1989	220 Ra _{cr}	10^6	$7.9 \approx 2 \lambda$	6.2
Moeng	1989	220 Ra _{cr}	10^6	$6 > \lambda$	7.0
Wörner	1992	370 Ra _{cr}	$1,6 \cdot 10^6$	$7.9 \leq 2 \lambda$	7.2

→ Erst neuerdings direkte Simulationen möglich.

Rechengeschwindigkeit
Speichergröße

Realisierte Rayleigh-Bénard Simulationen, Flüssigmetalle (Beispiele)

		Ra	Pr	Maschen	X_i/D	N_t
Grötzbach	1988	6.000	0.0214	$1.3 \cdot 10^5$	5.6	$1.8 \cdot 10^5$
Wörner	1992	12.000	0.006	$2.5 \cdot 10^6$	8	$1.2 \cdot 10^4$

- Erste Simulationen überhaupt.
- Ermöglicht durch
 - Semiimplizite Zeitintegration
 - Speichergröße
 - Rechengeschwindigkeit