



KfK 2841  
August 1979

# Wärmetransport aus volumbeheizten Flüssigkeiten mit temperaturabhängiger Viskosität

G. Fieg  
Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik  
Projekt Schneller Brüter

Kernforschungszentrum Karlsruhe



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik  
Projekt Schneller Brüter

KfK 2841

Wärmetransport aus volumbeheizten  
Flüssigkeiten mit temperaturabhängiger  
Viskosität

G. Fieg

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
ISSN 0303-4003

## Wärmetransport aus volumbeheizten Flüssigkeiten mit temperaturabhängiger Viskosität

---

### Zusammenfassung

Dieser Bericht behandelt thermohydraulische Experimente zum Wärmetransport aus Flüssigkeiten mit hoher Prandtl-Zahl, deren Viskosität stark von der Temperatur abhängt. Neben reiner Bénard-Konvektion wurde auch der Wärmetransport volumbeheizter Flüssigkeiten untersucht.

In beiden Fällen ergeben sich keine wesentlichen Unterschiede zum Wärmetransport aus Flüssigkeiten mit nahezu temperatur-unabhängiger Viskosität.

Abstract

Heat transfer from internally heated fluids with temperature  
dependent viscosity

---

This paper deals with thermo-hydraulical experiments on heat transfer in fluids with high Prandtl-numbers and strong temperature dependent viscosity. Pure Bénard-convection and volume heated liquids have been investigated.

In both cases the results show no essential differences compared to the heat transfer in fluids with nearly temperature independent viscosity.

## Einführung

Während eine große Anzahl von Veröffentlichungen über naturkonvektiven Wärmetransport aus Flüssigkeiten mit nahezu temperaturunabhängiger Viskosität vorliegt, wurden bisher nur wenige entsprechende Untersuchungen in Flüssigkeiten mit stark temperaturabhängiger Viskosität durchgeführt. Diese Arbeiten behandeln durchweg das Problem der reinen Bénard-Konvektion, die eine gewisse Bedeutung für das Verständnis des Wärmetransports aus dem Inneren von Planeten und damit auch für die Theorie der Kontinentaldrift auf unserem Planeten hat /1,2,3/.

Das Problem des Wärmetransports aus volumbeheizten Flüssigkeitsschichten mit stark temperaturabhängiger Viskosität stellt sich bei der Konzipierung eines Borax-Kernfängers für einen gasgekühlten schnellen Brutreaktor /4/. Das Borax dient in diesem Kernfänger als Opferbett; Borax und Mischungen von Borax mit Kernschmelzen weisen eine stark temperaturabhängige Viskosität auf.

Für die Auslegung des Kernfängers muß der Einfluß dieser starken Temperaturabhängigkeit der Viskosität auf den Wärmetransport bei Naturkonvektion volumbeheizter Flüssigkeiten bekannt sein.

### Experimenteller Aufbau

Die thermohydraulischen Experimente wurden in einer bereits früher beschriebenen Konvektionszelle /5/ ausgeführt. Die Grundfläche der Zelle betrug 15.7 cm x 15.7 cm. Die zu untersuchende Flüssigkeitsschicht ist zwischen zwei horizontalen Wärmetauscherflächen eingeschlossen. Die Konstanz der Temperaturverteilung über die gesamten Wärmetauscherflächen wird durch geeignete Zirkulation des Kühlmediums (Wasser bzw. Alkohol) im Wärmetauscher erreicht. Das Kühlmedium wird mittels eines Thermostaten auf der erforderlichen Temperatur gehalten. Acht Fe-Const-Thermoelemente, die über die Wärmetauscherfläche verteilt sind, überwachen die Temperaturkonstanz. Die Wärmeflüsse an die Wärmetauscher wurden aus dem Temperaturanstieg des Kühlmediums und dessen Massendurchsatz ermittelt. Die vertikalen Wände der Konvektionszelle bestehen aus 10 mm starkem Plexiglas. Sie werden durch Isolierung mit Glaswolle adiabatisch gehalten.

Als Flüssigkeit mit stark temperaturabhängiger Viskosität wurde Glyzerin (87 %) gewählt, dessen temperaturabhängigen Viskositätsverlauf Abb. 1 zeigt. Neben den eigentlichen Experimenten mit Glyzerin wurden jedoch auch solche mit destilliertem Wasser zum Zweck des Tests des gesamten Meßaufbaus ausgeführt.

Bei Glyzerin ist - anders als bei früheren Experimenten mit Salzlösungen - eine Volumheizung durch Joule'sche Wärme wegen der zu kleinen elektrischen Leitfähigkeit nicht möglich. Die Volumheizung wurde deshalb mit Hilfe eines engmaschigen, durch Wechselstrom beheizten Drahtgitters simuliert. Die Maschenweite dieses Drahtnetzes betrug 1 cm in horizontaler und senkrechter Richtung. Der Drahtdurchmesser war 0.5 mm ( $\hat{=} 2.5 \Omega/\text{m}$ ). Mit destilliertem Wasser wurde getestet, inwieweit mit einer solchen Drahtgitterheizung eine gleichmäßige Volumheizung simuliert werden kann.



## Meßergebnisse

### 1. Bénard-Konvektion

Abb. 2 zeigt das Ergebnis der Wärmeübergangsmessungen bei reiner Bénard-Konvektion, d. h. bei diesen Experimenten wurde die Bodentemperatur der Konvektionszelle stets höher gehalten als die Temperatur der oberen Wärmeaustauschfläche. Die Verhältnismerte der kinematischen Viskositäten  $\nu$  variierten je nach Temperaturdifferenz zwischen 10 und 120:

$$10 < \nu_{\max} / \nu_{\min} < 120$$

Die Stoffwerte zur Bestimmung der Rayleigh-Zahl

$$Ra = \frac{g\beta}{\nu a} H^3 \Delta T$$

sowie der Nusselt-Zahl

$$Nu = \frac{\alpha H}{\lambda} = \frac{jH}{\lambda \Delta T}$$

wurden beim arithmetischen Mittel zwischen oberer und unterer Grenztemperatur gewählt.

In derselben Abbildung mitangegeben sind die  $Nu_{\nu} Ra$ -Korrelationen für Flüssigkeiten mit nahezu konstanter Viskosität /1,7/, sowie die experimentelle Korrelation für eine Flüssigkeit mit stark temperaturabhängiger Viskosität ( $100 < \nu_{\max} / \nu_{\min} < 200$ ) /1/.

Zwar sind die Korrelationen etwas verschieden, jedoch ist zu erkennen, daß selbst bei einem Viskositätsverhältnis  $\nu_{\max} / \nu_{\min}$  von 100 - 200 der Wärmeübergang nur um etwa 10 % reduziert wird gegenüber Flüssigkeiten mit temperaturunabhängiger Viskosität.

Allerdings weisen die Temperaturprofile (Abb. 3) kein symmetrisches Verhalten um das arithmetische Mittel der Wandtemperaturen mehr auf, wie es bei Flüssigkeiten mit temperaturunabhängiger Viskosität der Fall ist (nahezu temperaturunabhängige Wärmeleitfähigkeit vorausgesetzt). Der Wärmeübergang

ist in unmittelbarer Wandnähe rein konduktiver Natur. Da die Wärmeleitfähigkeit von Glycerin ebenfalls nur sehr schwach temperaturabhängig ist, stimmen auch die Temperaturgradienten an der oberen und unteren Begrenzung überein. Infolge der geringeren Viskosität wird jedoch die Konvektion im unteren Bereich der Konvektionszelle erleichtert, im oberen, kalten Bereich dagegen durch die hohe Viskosität erschwert. Dort bildet sich entsprechend eine dickere, rein konduktive Grenzschicht aus, was zu der beobachteten Asymmetrie des Temperaturprofils führt.

## 2. Volumheizung der Flüssigkeit

### 2.1 Gleiche Temperaturen an unterer und oberer Begrenzung

Bei Glycerin ist, im Gegensatz zu den bisher verwendeten elektrolytischen Salzlösungen, Volumbeheizung durch Joule'sche Wärme nicht möglich. Daher wurde, wie oben bereits erwähnt, versucht, mittels eines engmaschigen Heizdrahtgitters durch Widerstandsheizung im Draht eine innere Volumbeheizung der Flüssigkeit zu simulieren. Wie sich herausstellte, treten dabei Schwierigkeiten im Bereich der unteren konduktiven Inversionsgrenzschicht auf. Mit Hilfe von zwei verschiedenartigen Heizdraht-Gitteranordnungen in diesem kritischen, unteren Bereich, wurde eine Abschätzung der auftretenden systematischen Fehler gemacht. Zu diesem Zweck wurde als Arbeitsmedium reines, destilliertes Wasser verwendet, da hier die  $Nu$  vs  $Ra$ -Korrelationen gut bekannt sind. Die Abb. 4 und 5 zeigen die Ergebnisse dieser Messungen. Es sind die Dammköhler-Zahl

$$Da = \frac{Q_v H^2}{\lambda \Delta T} \quad (\text{Abb. 4})$$

und die Bruchteile der an die untere Wand,  $\eta_{\downarrow}$ , und die obere Wand,  $\eta_{\uparrow}$ , abgegebenen Wärmemengen (Abb. 5) als Funktionen der internen Rayleigh-Zahl

$$Ra_i' = \frac{g\beta}{\nu a \lambda} Q_v H^5$$

aufgetragen. Zur Bestimmung dieser Größen wurden dabei die Stoffwerte bei

der mittleren Bulk-Temperatur gewählt.

Es zeigte sich, daß bei dem gleichmäßig aufgebauten Drahtgitter der Wärmefluß nach unten zu gering ist. Zum Vergleich sind in Abb. 5 die Korrelationen von Kulacki und Goldstein /8/, Jahn und Reineke /9/ sowie Fieg /5/ eingezeichnet, welche in Flüssigkeiten mit gleichförmiger Joule'scher Volumbeheizung gewonnen wurden. Bei diesem Gitter liegt in der unteren Inversionsschicht nur eine einzige Drahtreihe. Damit ist die Simulation einer gleichmäßigen Volumheizung dieses konduktiven Bereichs nicht möglich. Beim geänderten Gitteraufbau lagen in der unteren Inversionsschicht zwei Schichten von Heizdrähten mit entsprechend vermindertem elektrischen Widerstand pro Länge, so daß die elektrische Leistung pro Volumeinheit in der gesamten Konvektionszelle konstant blieb. Mit dieser Anordnung trat ein zu großer Wärmetransport nach unten auf (Abb. 5). Die Simulation einer gleichmäßigen Volumheizung in der unteren Inversionsgrenzschicht mittels eines Heizdrahtgitters ist demnach äußerst schwierig zu simulieren. Die Ergebnisse sind entsprechend mit einem systematischen Fehler behaftet, der der Abweichung zwischen den mit den beiden Drahtgittern gewonnenen Resultaten entspricht.

Die entsprechenden Ergebnisse der Messungen mit Glyzerin als Arbeitsmedium und dem geänderten Gitteraufbau sind in Abb. 6 und 7 dargestellt. Das Viskositätenverhältnis  $\nu_{\max}/\nu_{\min}$  lag bei diesen Experimenten zwischen 10 und 25. Während die Dammköhler-Zahl als Funktion der Rayleigh-Zahl innerhalb der Fehlerschranken etwa durch die Korrelation von Kulacki und Goldstein beschrieben werden kann (Abb. 6), ergeben sich für die Bruchteile  $\eta$  der nach oben bzw. unten abgeführten Wärmemengen ähnliche systematische Abweichungen gegenüber Experimenten mit Joule'scher Beheizung wie mit Wasser (Abb. 7). Diese Diskrepanzen sind auch hier im wesentlichen zu erklären aus den oben beschriebenen Schwierigkeiten in der unteren Inversionsschicht, eine homogene Volumbeheizung zu simulieren.

## 2.2 Adiabate Wand unten

Die Schwierigkeiten mit inhomogener Beheizung im unteren Bereich können bei Adiabasie der unteren Wand - in Analogie zu den Experimenten von Fiedler und Wille /10/ und Kulacki und Emara /11/ mit Wasser als Arbeits-

fluid ( $\nu \approx \text{const}$ ) - weitgehend vermieden werden.

Die Ergebnisse dieser Messungen mit Wasser und Glyzerin sind in Abb. 8 dargestellt. Als Funktion der modifizierten Rayleigh-Zahl

$$Ra_{KE} = \frac{g\beta}{\nu\alpha} L^3 \Delta T = \frac{g\beta}{\nu\alpha} H^3 \frac{Q_v H^2}{2\lambda}$$

ist die Nusselt-Zahl

$$Nu = \frac{\alpha H}{\lambda} = \frac{jH}{\lambda \Delta T} \quad \text{mit} \quad \Delta T = T_{\text{unten}} - T_{\text{oben}}$$

aufgetragen. Die Stoffwerte zur Ermittlung obiger Kenngrößen wurden bei der Bulk-Temperatur gewählt. Mit eingezeichnet sind die Resultate von Fiedler und Wille /10/, Kulacki und Emara /11/ sowie Baker, Faw und Kulacki /12/. Sowohl die Ergebnisse mit Wasser als Arbeitsmedium ( $\nu \approx \text{const}$ ) als auch die mit Glyzerin ( $30 < \nu_{\text{max}}/\nu_{\text{min}} < 60$ ) stimmen befriedigend mit der von Baker, Faw und Kulacki /12/ gefundenen Korrelation überein. Die Resultate von Kulacki und Emara /11/ bzw. die von Fiedler und Wille /10/ können als untere bzw. obere Schranken gedeutet werden. Daraus ist, ebenso wie aus den Experimenten mit unten gekühlter Wand, zu schließen, daß der Wärmetransport, wenn überhaupt, nur schwach von  $\nu_{\text{max}}/\nu_{\text{min}}$  abhängt.

Bei den Experimenten mit Glyzerin fielen die relativ großen Werte der Temperaturschwankungen  $\sqrt{T'^2}$  auf. Experimente bei gleichen Rayleigh-Zahlen und Wasser als Arbeitsmedium wiesen geringere Temperaturschwankungen auf. Es stellte sich jedoch heraus, daß die relativen Temperaturschwankungen (bezogen auf die Temperaturdifferenz zwischen unterer und oberer Wand) gut übereinstimmen und die Werte von  $\frac{\sqrt{T'^2}}{\Delta T}$  bei 10 % liegen.

#### Schlußbemerkungen

Die Ergebnisse dieser Experimente lassen die Schlußfolgerung zu, daß der Wärmeübergang aus volumbeheizten Flüssigkeiten mit stark temperaturabhängiger Viskosität sich befriedigend beschreiben läßt mit bereits

bekannten  $Nu$  vs  $Ra$ -Korrelationen, die mit Hilfe von Flüssigkeiten, deren Viskosität nahezu temperaturunabhängig ist, gewonnen wurden. Dies gilt zumindest bei Viskositätsverhältnissen bis etwa 60 und wahrscheinlich sogar hinauf bis zu 100 - 200, da eine Übertragung der Ergebnisse bei Bénard-Konvektion auf volumbeheizte Flüssigkeiten wahrscheinlich zulässig ist.

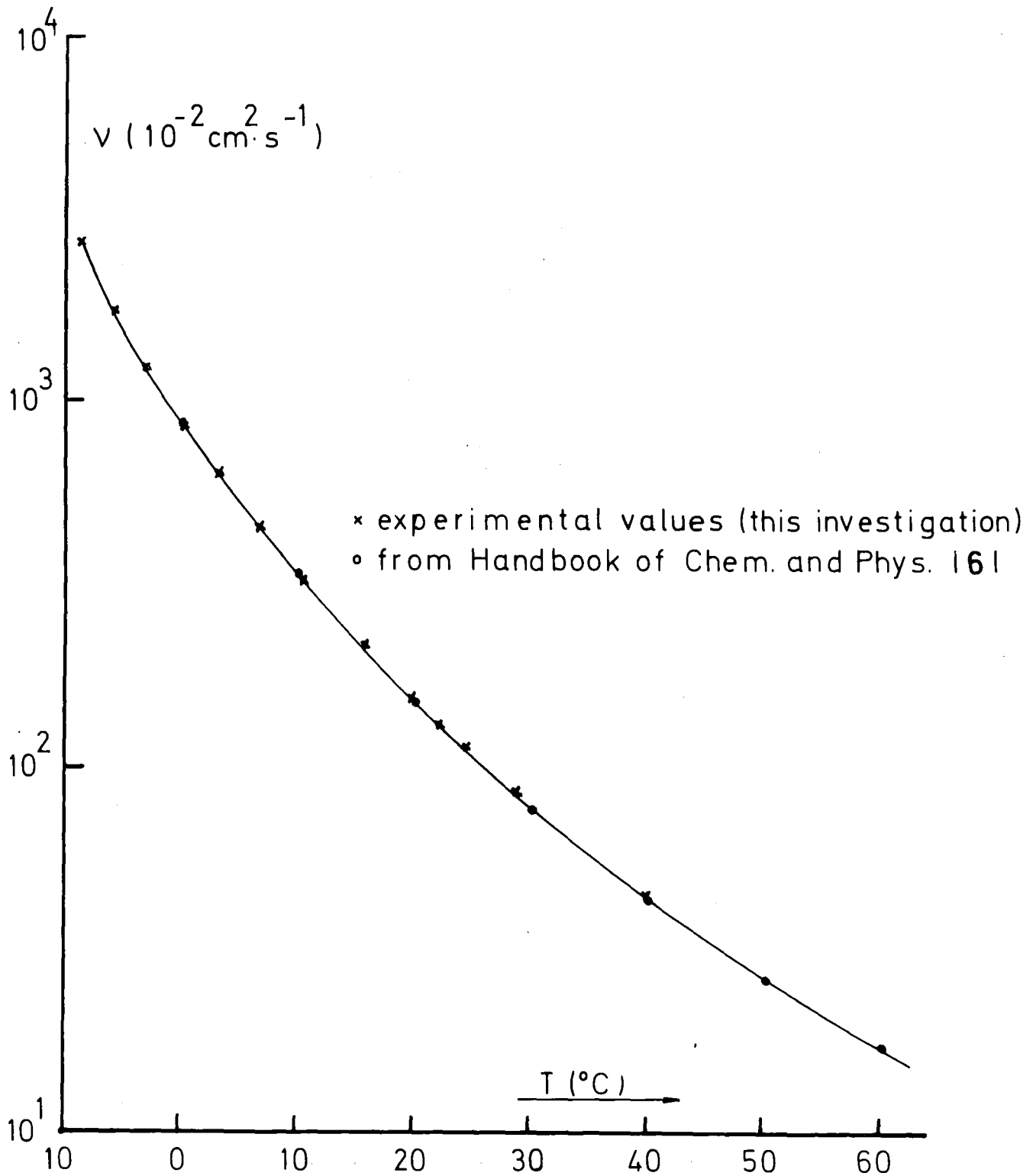
Nomenklatur

a	Thermische Diffusivität ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ )		
g	Gravitationskonstante ( $\text{cm s}^{-2}$ )		
H	Höhe der Flüssigkeitsschicht (cm)		
j	Wärmefluß ( $\text{W cm}^{-2}$ )		
$Q_V$	Volumenquelle ( $\text{W cm}^{-3}$ )		
T	Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )		
$\Delta T$	Temperaturdifferenz (K)		
$\alpha$	Wärmeübergangszahl ( $\text{W cm}^{-2} \text{K}^{-1}$ )		
$\beta$	Volumetrischer Ausdehnungskoeffizient ( $\text{K}^{-1}$ )		
$\eta$	Bruchteil der an die Wände abgeführten Wärme		
$\lambda$	therm. Leitfähigkeit ( $\text{W cm}^{-1} \text{K}^{-1}$ )		
$\nu$	kinematische Viskosität ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ )		
$Da = \frac{Q_V H^2}{\lambda \Delta T}$	Dammköhler-Zahl		
$Nu = \frac{\alpha H}{\lambda}$	Nusselt-Zahl		
$Pr = \frac{\nu}{a}$	Prandtl-Zahl		
$Ra = \frac{g \beta}{\nu a} \cdot L^3 \cdot \Delta T$	Rayleigh-Zahl:	$L^* = H$ $\Delta T = T_{\text{unten}} - T_{\text{oben}}$	Bénard-Konv.
		$L^* = H$ $\Delta T = \frac{Q_V H^2}{\lambda}$	volumetr. Heizung Isothermie
		$L^* = H$ $\Delta T = \frac{1}{2} \frac{Q_V H^2}{\lambda}$	volumetr. Heizung unt. Wand adiab.

- /1/ J. R. Booker  
Thermal convection with strongly temperature-dependent viscosity,  
J. Fluid Mech. (1976), vol. 76, part 4, pp. 741 - 754
- /2/ J. R. Booker and K. C. Stengel  
Further thoughts on convective heat transport in a variable-  
viscosity fluid  
J. Fluid Mech. (1978), vol. 86, part 2, pp. 289 - 291
- /3/ F. M. Richter  
Experiments on the stability of convection rolls in fluids  
whose viscosity depends on temperature  
J. Fluid Mech. (1978), vol. 89, part 3, pp. 553 - 560
- /4/ M. Dalle Donne, S. Dorner and G. Schumacher  
Development work for a borax internal core-catcher for a gas-  
cooled fast reactor,  
Nuclear Technology, Vol. 39, pp. 138 - 154, July 1978
- /5/ G. Fieg  
Exp. Investigations of Heat Transfer Characteristics in Liquid  
Layers with Internal Heat Sources  
Proc. of the Intern. Meeting "Fast Reactor Safety and Related  
Physics" Chicago, Oct. 5 - 8, 1976
- /6/ Handbook of Chemistry and Physics, 44th Edition  
The Chemical Rubber Publishing Company, Cleveland, Ohio (1962)
- /7/ H. T. Rossby  
A Study of Bénard convection with and without rotation  
J. Fluid Mech. (1969), vol. 36, p. 309
- /8/ F. A. Kulacki and R. J. Goldstein  
Thermal convection in a horizontal fluid layer with uniform volumetric  
energy sources  
J. Fluid Mech. (1972), vol. 55, part 2, pp. 271 - 287

- / 9/ M. Jahn and H. H. Reineke  
Free convection with internal heat sources, calculations  
and measurements  
Proc. Fifth Int. Heat Trans. Conf., 3, Tokyo, (1974), p. 74
- /10/ H. E. Fiedler and R. Wille  
Turbulente freie Konvektion in einer horizontalen Flüssigkeits-  
schicht mit Volumen-Wärmequelle  
Proc. Fourth Int. Heat Trans. Conf., 4, Paris (1970), p. 5
- /11/ F. A. Kulacki and A. A. Emara  
High Rayleigh number convection in enclosed fluid layers with  
internal heat sources  
NUREG-75/065, Technical Report 3952-1, (1975)
- /12/ L. Baker, jr., R. E. Faw and F. A. Kulacki  
Postaccident Heat Removal - Part 1:  
Heat Transfer within an Internally Heated, Nonboiling Liquid Layer  
Nucl. Sc. and Eng., 61, pp. 222 - 230, (1976)





KfK

Abb. 1 Temperaturverlauf der kinematischen Viskosität von Glycerin (87 Z)

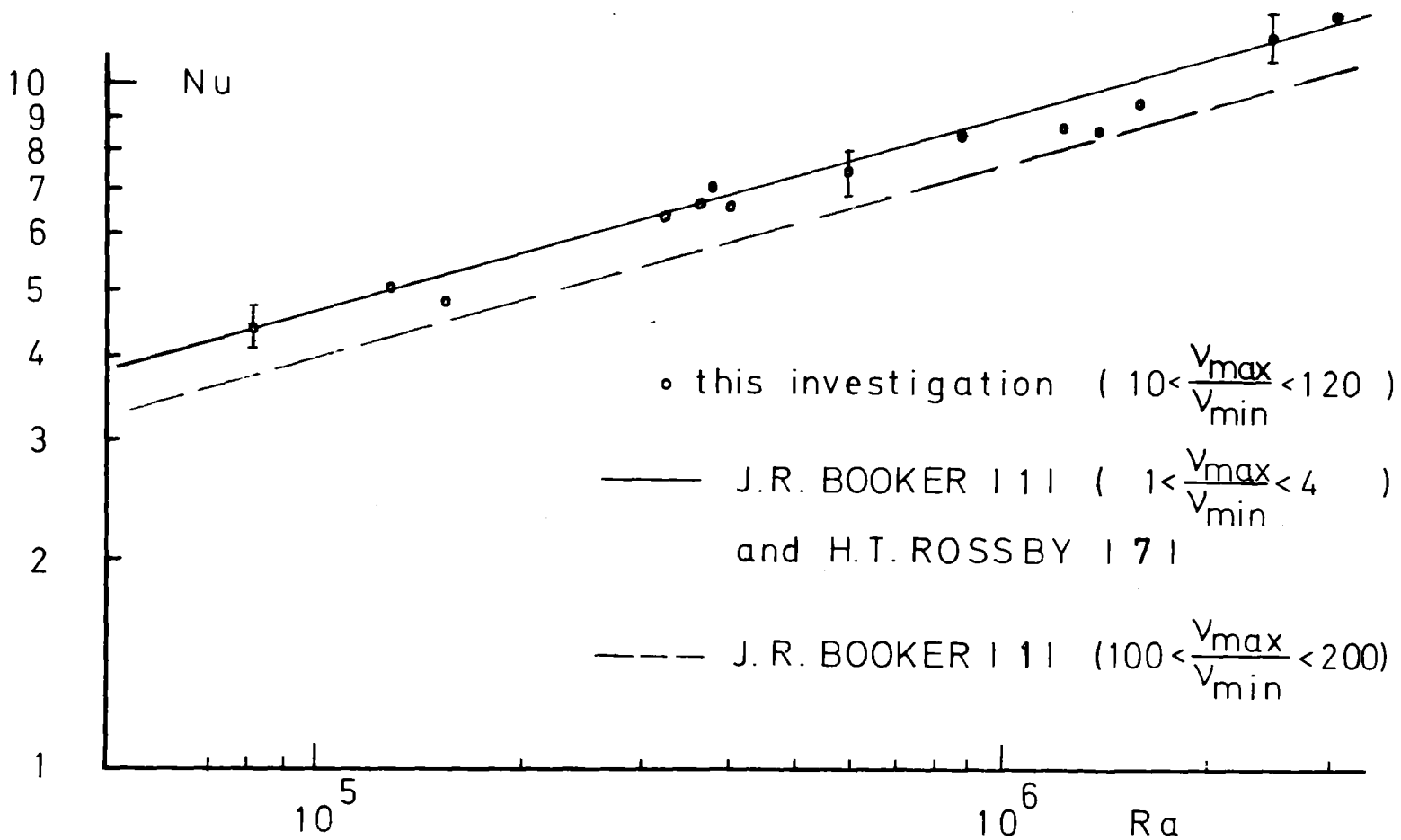
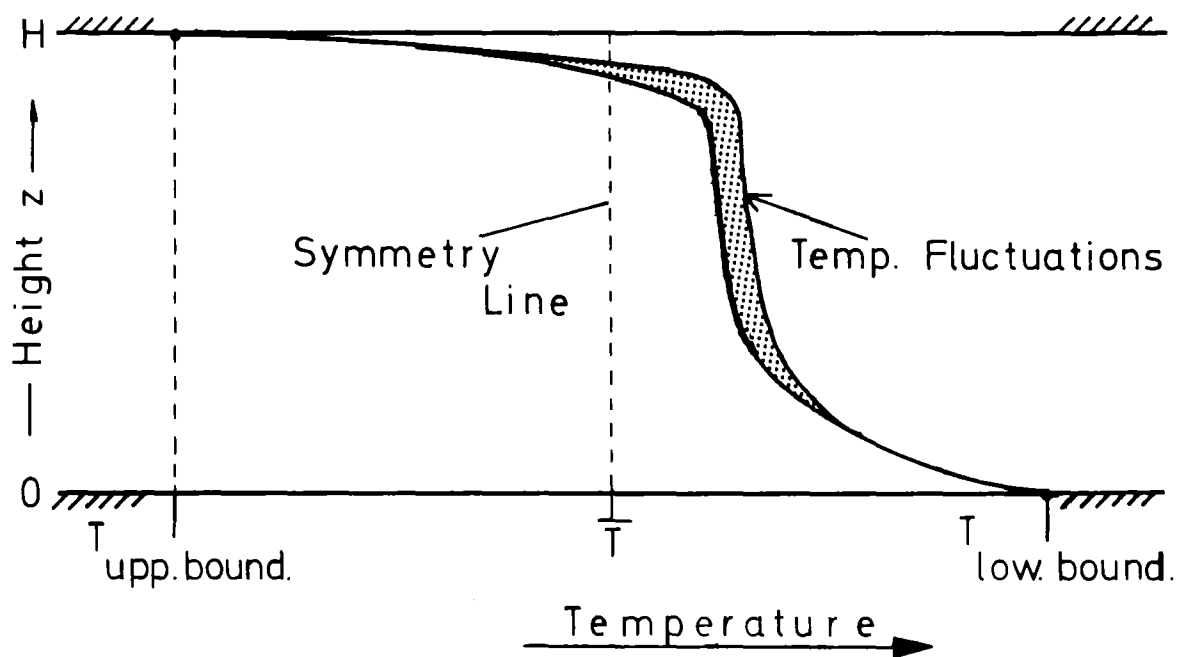
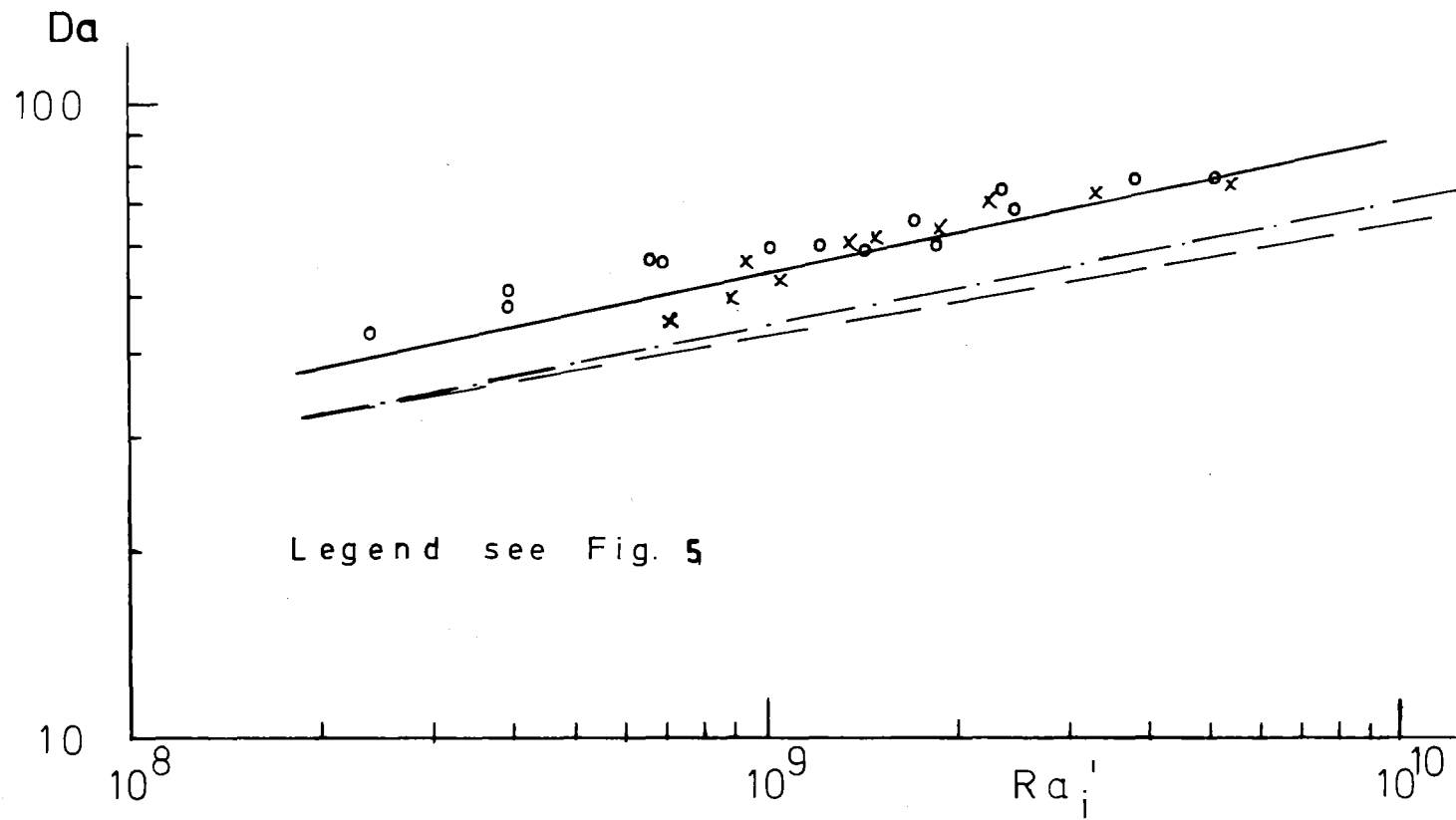


Abb. 2 Experimentelle Nu vs Ra-Korrelation bei Bénard-Konvektion



KfK

Abb. 3 Vertikales Temperaturprofil bei Bénard-Konvektion  
in Glycerin ( $Ra=3.7 \cdot 10^5$ ,  $\nu_{\max}/\nu_{\min}=29.8$ )



Legend see Fig. 5



Abb. 4 Da vs Ra-Korrelation mit Wasser als Fluid und Drahtgitterheizung

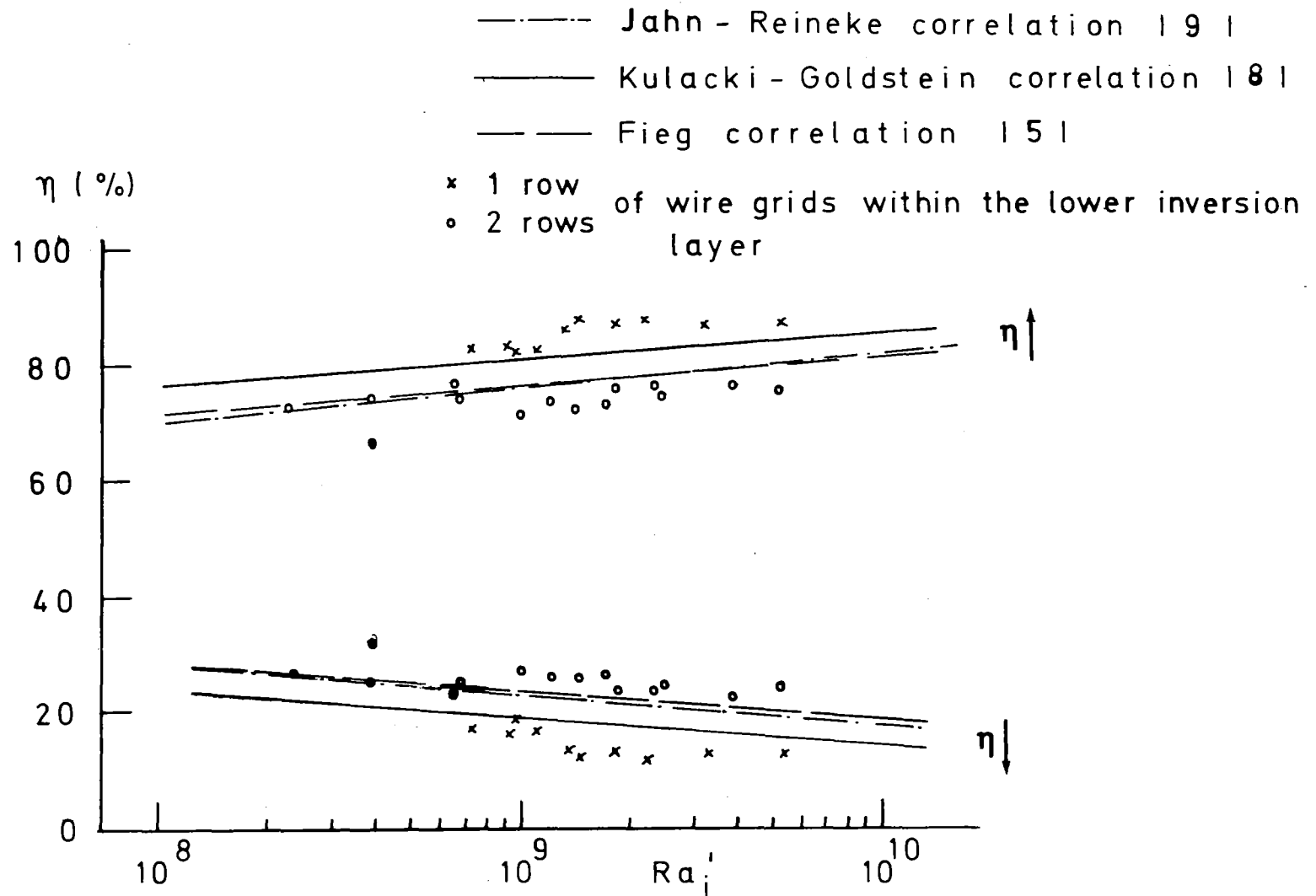


Abb. 5 Bruchteile der nach unten,  $\eta \downarrow$ , und oben,  $\eta \uparrow$ , transportierten Wärmemengen als Funktion der Rayleigh-Zahl für Wasser als Fluid und Drahtgitterheizung

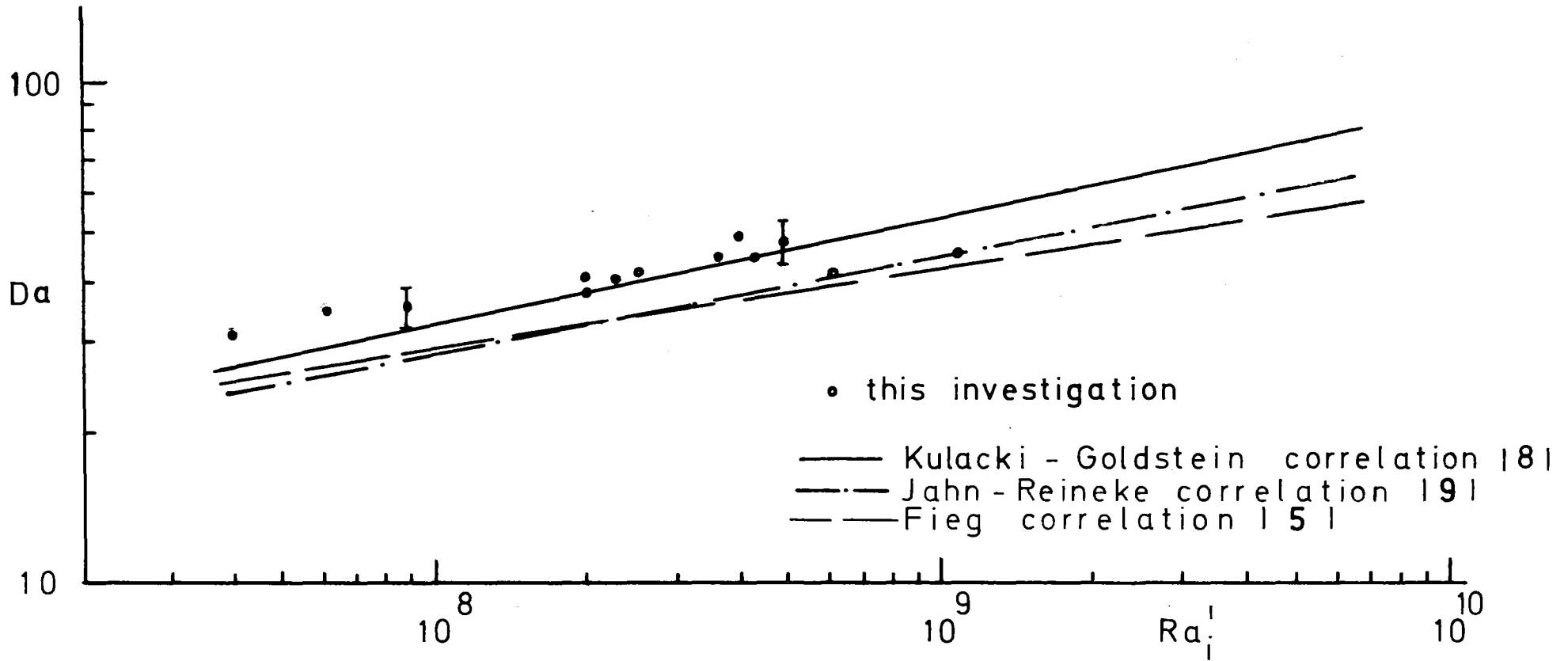


Abb. 6  $Da$  vs  $Ra$ -Korrelation mit Glycerin als Fluid und Drahtgitterheizung  
 (  $10 < \nu_{max} / \nu_{min} < 25$  )

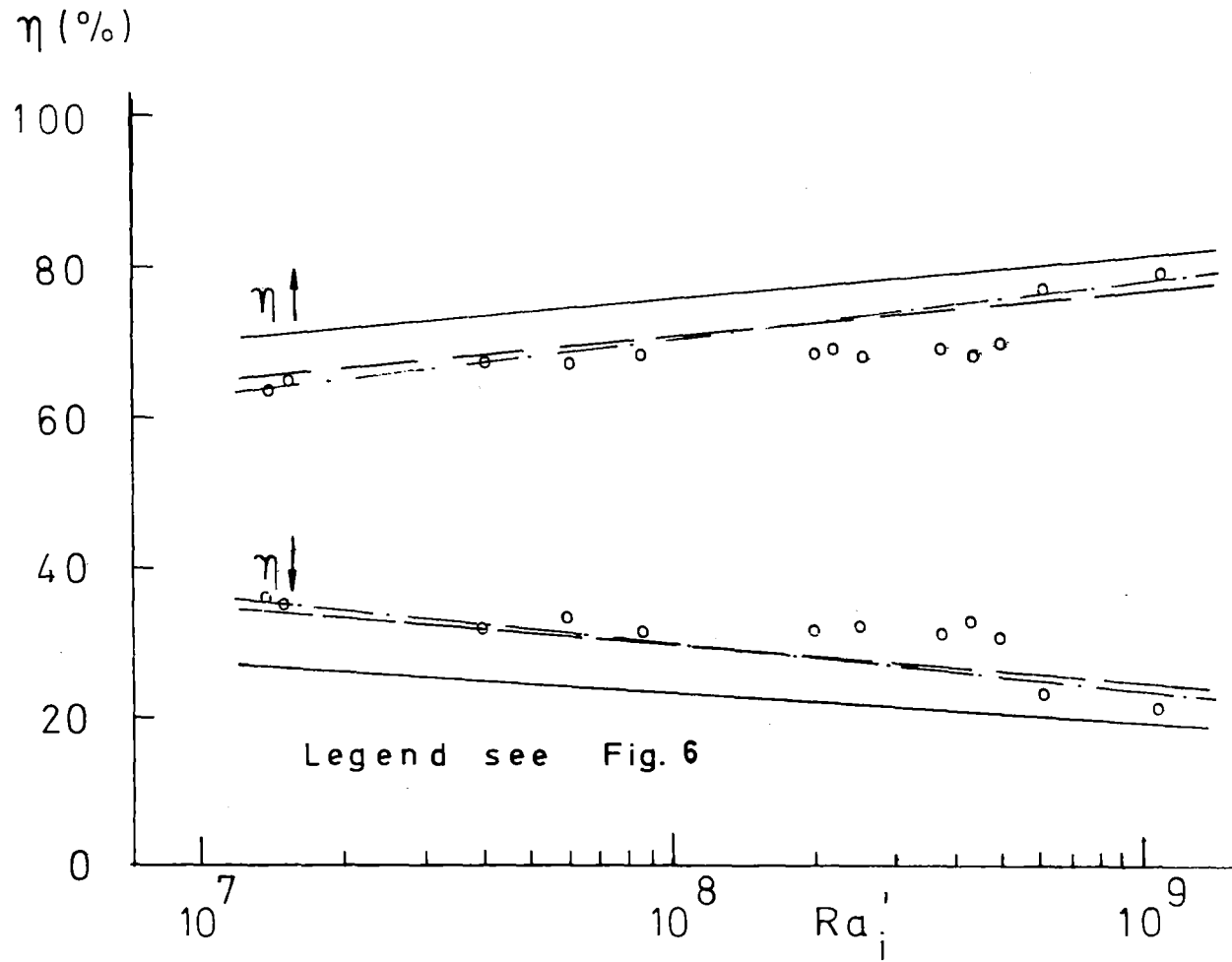
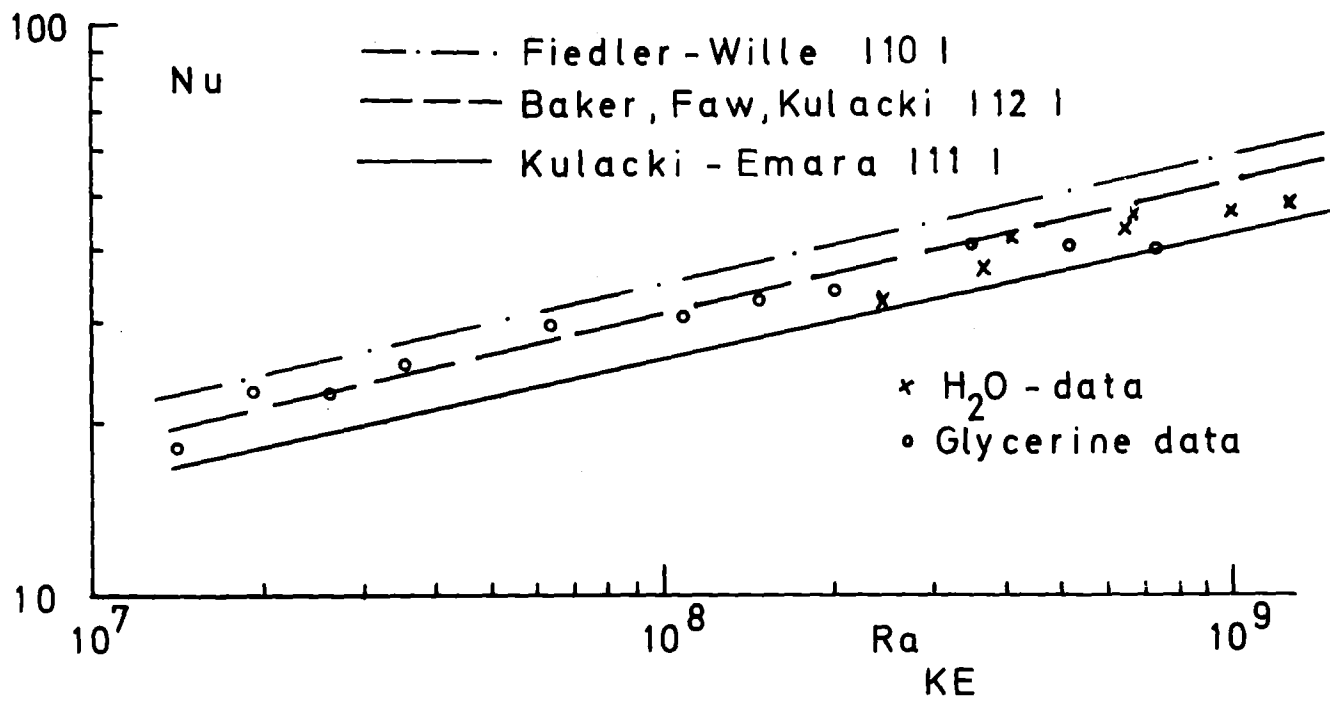


Abb. 7 Bruchteile der nach unten,  $\eta \downarrow$ , und oben,  $\eta \uparrow$ , transportierten Wärmemengen als Funktion der Rayleigh-Zahl für Glycerin als Fluid und Drahtgitterheizung (  $10 < \nu_{\max} / \nu_{\min} < 25$  )



KIK

Abb. 8  $Nu$  vs  $Ra$ -Korrelation bei unterer adiabater Wand für Wasser ( $\nu \approx \text{const.}$ ) und Glycerin ( $30 \leq \nu_{\text{max}} / \nu_{\text{min}} < 60$ )