

KFK 2954
Mai 1980

Wärmeübergang im Abstandhalterbereich gasgekühlter Stabbündel

Md. Abul Hassan
Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Schneller Brüter

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Schneller Brüter

KfK 2954

Wärmeübergang im Abstandshalterbereich gasgekühlter
Stabbündel

Md. Abul Hassan

Dissertation genehmigt von der Fakultät für Maschinen-
bau der Universität Karlsruhe

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

A b s t r a c t

HASSAN, MD. ABUL:

WÄRMEÜBERGANG IM ABSTANDSHALTERBEREICH GASGEKÜHLTER STABBÜNDEL

Durch experimentelle Untersuchungen wurde erstmals der Einfluß von Abstandshaltergittern in Stabbündeln auf den Wärmeübergang bei Gaskühlung über einen großen Parameterbereich ermittelt. Die Untersuchungen erstreckten sich über einen Bereich von Reynoldszahlen zwischen 600 und $2 \cdot 10^5$. Die Experimente wurden mit glatten und künstlich aufgerauhten Stabbündeln durchgeführt. Deshalb konnten Meßergebnisse von der laminaren Strömung über den Übergang von laminarer zur turbulenten Strömung, den Übergang von hydraulisch glattem zu rauhem Strömungsverhalten bis hin zu voll rauhem Strömungsverhalten bei hohen Reynoldszahlen gewonnen werden. Das rauhe Stabbündel war mit einer Rauheitsgeometrie versehen, die für eine zweidimensionale Rauigkeit optimale Wärmeübertragungseigenschaften besitzt. Der untersuchte Bereich von Querschnittsversperrungen ($0.25 < \epsilon < 0.35$) ist für Gitterabstandshalter in Stabbündeln von gasgekühlten Reaktoren typisch. Die Messungen erstreckten sich von 10 hydraulischen Durchmessern stromaufwärts des Abstandshalters bis $33 D_h$ stromabwärts und erfaßten damit das gesamte Gebiet, das hinsichtlich der Wärmeübertragung durch Gitterabstandshalter beeinflusst ist.

Die Messungen ergaben, daß der Wärmeübergang in allen untersuchten Fällen durch die Abstandshalter verbessert wird. Anhand der Meßergebnisse konnten empirische Gesetzmäßigkeiten für den Einfluß der Abstandshalter auf die Wärmeübertragung (Anstieg, Maximum und exponentieller Abfall der Nusseltzahlen) für das ausgemessene Parameterfeld (Reynoldszahl, Querschnittsversperrung und Art der Staboberfläche) entwickelt werden. Diese empirischen Beziehungen können direkt in Rechenprogrammen für die thermo- und fluid-dynamische Analyse gasgekühlter Stabbündel angewendet werden.

Heat Transfer Near Spacer Grids in Gas-Cooled Rod Bundles

Abstract

The influence of spacer grids on heat transfer in gas-cooled rod bundles was experimentally determined for the first time over a wide range of parameters. The experimental investigations were carried out with a smooth and a rough rod bundle for Reynolds-numbers between 600 and $2 \cdot 10^5$. The measured range of Reynolds-numbers covered the transition from laminar to turbulent, the transition from hydraulic smooth to rough and fully rough flow. By gas cooling, artificial roughnesses are used on the rod surfaces to disturb the viscous sublayer, which acts as an insulator because of the low thermal conductivity of gases. For this investigation, a two-dimensional rectangular roughness was used, which had an optimal heat transfer characteristic. The blockage factor ϵ was varied between 25% and 35%. These values are typical for flow blockage due to spacer grids in gas-cooled fast reactors. The measurements were carried out from $10 D_h$ upstream to $33 D_h$ downstream of the spacer grid. The measured range covered the zone of influence on heat transfer by the spacer grid.

The measurements showed that the heat transfer was improved due to spacer grids in all investigated cases. On the basis of the measurements empirical correlations could be established for the influence of the spacer grid on heat transfer in terms of the measured parameters i.e. Reynolds number, blockage factor, and the type of the heat transfer surface. These empirical correlations can be directly used in computer codes for the thermo- and fluiddynamic analysis of gas-cooled rod bundles.

Inhalt

	Seite
1. Einleitung	1
2. Analyse des Wärmeübergangs in Stabbündeln mit Abstandshaltern	3
2.1 Grundlagen	3
2.2 Literaturübersicht	5
3. Aufgabenstellung	10
4. Versuchsaufbau	11
4.1 Versuchsanlage	11
4.2 Teststrecke	11
4.3 Meßanordnung	15
4.4 Meßmethode	17
5. Durchführung der Messungen	21
5.1 Untersuchte Parameter	21
5.2 Meßbereich	21
5.3 Auswertungsverfahren	22
6. Versuchsergebnisse	25
6.1 Messungen unter dem Abstandshalter am Kanalende	25
6.1.1 Wandtemperaturverteilung	25
6.1.2 Wärmeübergang	27
6.1.3 Bewertung der Meßergebnisse am oberen Abstandshalter	33
6.2 Messungen unter dem mittleren Abstandshalter	33
6.2.1 Vergleich der Messungen an den beiden Abstandshaltern	33
6.2.2 Vergleich der Temperaturverteilung unter dem Abstandshalter für unterschiedliche Querschnittsversperrungen	35
6.2.3 Festlegung der Position zur Messung der axialen Temperaturverteilung	39
6.2.4 Ungestörte Nusseltzahlen	43
6.2.5 Vergleich der gemessenen axialen Nusseltzahlverteilungen	43
6.2.6 Vergleich der maximalen Nusseltzahlen	51

	Seite
7. Analyse und Diskussion	56
7.1 Ermittlung von empirischen Beziehungen zur Beschreibung der Meßergebnisse	56
7.1.1 Nusseltzahlen vor dem Abstandshalter	56
7.1.2 Maximale Nusseltzahlen	57
7.1.3 Nusseltzahlen hinter dem Abstandshalter	61
7.2 Vergleich der Meßergebnisse mit den ermittelten Beziehungen	67
7.3 Vergleich der ermittelten Beziehungen mit den Ergebnissen anderer Autoren	75
7.4 Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit Beziehungen aus der Literatur	81
7.4.1 Nusseltzahlen für vollausgebildete Strömung und Wärmeübertragung bei turbulenter Strömung	82
7.4.2 Nusseltzahlen für vollausgebildete Strömung und Wärmeübertragung bei laminarer Strömung	85
7.4.3 Maximale Nusseltzahlen	86
7.5 Vergleich des ermittelten Verlaufs der Nusselt- zahlen stromabwärts vom Abstandshalter mit Literaturangaben	88
8. Zusammenfassung und Schlußfolgerung	90
Referenzen	92
Nomenklatur	95
Anhang 1: FØRTRAN-Programm für die empirische Beziehungen	98
Anhang 2: Versuchsergebnisse	101

1. Einleitung

Für den wirtschaftlichen Betrieb von Kernkraftwerken ist die Sicherheit und Zuverlässigkeit aller Komponenten eine entscheidende Voraussetzung. Die Auslegung des Reaktorkerns wird neben anderen Faktoren von der Art der Oberflächen zur Wärmeübertragung und deren Langzeitverhalten bestimmt. Trotz der Randbedingungen, die sich aufgrund physikalischer Kriterien hinsichtlich der Wahl von Spalt- und Strukturmaterial ergeben, sind die erreichbaren Temperaturen im Brennstoff und im Hüllmaterial im allgemeinen Grenzwerte für die Kernauslegung. Diese Temperaturen werden einerseits beeinflusst von Wärmefluß, Kühlmittel, Strömungsgeschwindigkeit und Eintrittstemperatur in den Kern, auf der anderen Seite beeinflussen diese Temperaturen auch das mechanische und das Korrosionsverhalten der Brennelemente. Für die normale Kernauslegung werden mittlere Werte für die Nusseltzahlen, die im gesamten Kern oder in Teilen des Kerns gültig sind, verwendet. Die tatsächlichen Betriebsbedingungen werden dann im Rahmen einer Heißstellenanalyse untersucht. Hierzu werden die möglichen Abweichungen von der Normalauslegung statistisch erfaßt und sogenannte Heißstellen-Faktoren bestimmt. Man kann die Abweichungen von der Normalauslegung in zwei Hauptkategorien einteilen: die nuklearen Abweichungen, z.B. in der Neutronenflußverteilung und die ingenieurstechnischen Abweichungen, z.B. ungleichmäßige Strömungsverteilung. Die Heißstellenfaktoren haben nicht nur Einfluß auf die Sicherheit und Zuverlässigkeit sondern auch auf die Wirtschaftlichkeit des Betriebes von Kernkraftwerken. Diese Arbeit befaßt sich mit einem besonderen Problem aus der Zahl der ingenieurstechnischen Einflußgrößen auf die Heißstellenanalyse, nämlich mit den lokalen Nusseltzahlen im Bereich der Abstandshalter von gasgekühlten Stabbündeln.

Bei gasgekühlten schnellen Reaktoren werden die axial angeströmten Brennstäbe in Bündeln zusammengefaßt und durch Abstandshalter auf Distanz gehalten, wobei das Stababstandsverhältnis in der Regel etwa 1,4 - 1,5 beträgt. Für Stababstandsverhältnisse in diesem Bereich werden normalerweise gitterförmige Abstands-

halter verwendet. Diese Gitterabstandshalter erhöhen nicht nur den Druckverlust, sondern beeinflussen auch die Wärmeübertragung in der Nähe des Gitters.

Da bei Gaskühlung die Temperaturdifferenz zwischen beheizter Oberfläche und Kühlmittel wegen der schlechten Wärmeübertragungseigenschaften von Gasen verhältnismäßig groß ist, könnten Schwankungen des Wärmeübergangskoeffizienten an den Brennstaboberflächen gefährliche Übertemperaturen (Heißstellen) verursachen, obwohl die mittlere Wandtemperatur am Umfang in der Abstandshalterebene im zulässigen Bereich liegt. Zur Verbesserung der Wärmeübertragung in gasgekühlten Brennstabbündeln werden die Staboberflächen mit künstlichen Rauigkeiten versehen. Über den Einfluß von Abstandhaltern auf die Wärmeabfuhr von glatten und rauhen Staboberflächen ist nur wenig bekannt.

Zur genauen Berechnung der Strömungs- und Temperaturverteilung in hochbelasteten Brennelementen ist aber eine möglichst gute Berücksichtigung des Abstandshaltereinflusses auf den Wärmeübergang nötig. Da dieser wegen der komplizierten Geometrie im Brennelement auf theoretische Weise nur schwierig bestimmt werden kann, ist es erforderlich, experimentelle Untersuchungen durchzuführen.

2. Analyse des Wärmeübergangs in Stabbündeln mit Abstandshaltern

2.1 Grundlagen

Für den allgemeinen Fall des Wärmeübergangs in Stabbündeln mit Querschnittsversperrungen durch Gitterabstandshalter bei stationären Bedingungen lassen sich die maßgebenden Kennzahlen aus den Erhaltungssätzen für Masse, Impuls und Energie sowie den vorliegenden strömungstechnischen, thermischen und geometrischen Randbedingungen ableiten. Für den hier untersuchten Fall ist die Nusseltzahl

$$\text{Nu} = \frac{\alpha D_h}{\lambda} \quad (1)$$

eine Funktion von

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}, \text{Ma}, \text{Gr}, \text{Gz}, \theta, P/D, W/D, \varepsilon, \phi, G_{sp}, \text{Oberfläche}) \quad (2)$$

Der Einfluß der Fluidstoffwerte, die in der Prandtl-Zahl enthalten sind,

$$\text{Pr} = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad (3)$$

wird in dieser Arbeit nicht untersucht, da alle Experimente für Gaskühlung mit Luft als Arbeitsmedium durchgeführt werden. Außerdem sind die Strömungsgeschwindigkeiten in gasgekühlten Reaktoren klein gegenüber der Schallgeschwindigkeit, sodaß der Einfluß der Kompressibilität, ausgedrückt durch die Mach-Zahl

$$\text{Ma} = \frac{u}{c} \quad (4)$$

nicht interessiert.

Die Grashof-Zahl

$$\text{Gr} = \frac{g \beta \Delta T x^3}{\nu^2} \quad (5)$$

berücksichtigt den Einfluß von Naturkonvektion. Diese spielt, wie auch die Meßergebnisse zeigen, bei kleinen Reynoldszahlen

(laminare Strömung) eine Rolle. Die wenigen Ergebnisse dieser Arbeit für kleine Reynoldszahlen sind jedoch nicht verallgemeinerungsfähig, sodaß der Einfluß der Grashofzahl unberücksichtigt bleibt.

Alle Messungen werden für Temperaturverhältnisse zwischen Wand- und Fluidtemperatur

$$\theta = \frac{T_W}{T_G} \quad (6)$$

$\theta < 1.1$ durchgeführt. Auch dieser Einfluß wird vernachlässigt. Der Einfluß der Geometrieparameter Stababstandsverhältnis P/D und Wandabstandsverhältnis W/D spielt für den Wärmeübergang in Stabbündeln nur für P/D und $W/D < 1.2$ eine wesentliche Rolle bei turbulenter Strömung /1/. Bei laminarer Strömung wird dieser Einfluß wichtiger, er kann im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht untersucht werden.

Ein Einfluß der Abstandshaltergeometrie auf die Nusseltzahlen ist sicherlich vorhanden. In dieser Arbeit wird die Abstandshaltergeometrie auf Wabengitter beschränkt.

Der Einfluß der Umfangsposition ϕ am Stab spielt sicherlich, insbesondere an den Kontaktstellen zwischen Abstandshalter und Stab eine Rolle. Dieser Einfluß wird später diskutiert.

Wichtige Parameter, deren Auswirkung auf die Nusseltzahlen in dieser Arbeit untersucht werden soll, sind die Reynoldszahl

$$Re = \frac{\rho u D_h}{\mu} \quad (7)$$

die die Strömungsbedingungen charakterisiert, die Graetz-Zahl

$$Gz = \frac{x}{D_h} \frac{1}{Re \cdot Pr} \quad (8)$$

die das Gebiet stromabwärts vom Abstandshalter charakterisiert und das Versperrungsverhältnis

$$\epsilon = \frac{F_{sp}}{F_{ges}} \quad (9)$$

definiert als Verhältnis des in Strömungsrichtung projizierten Gitterabstandshalterquerschnitts zum freien Strömungsquerschnitt im Stabbündel außerhalb des Abstandshalterbereiches.

Außerdem spielt die Art der Staboberfläche für den Wärmeübergang eine Rolle, d.h. für eine künstlich raue Staboberfläche können i.a. nicht die gleichen Abhängigkeiten wie bei einer glatten Staboberfläche erwartet werden.

2.2 Literaturübersicht

Es gibt nur wenige experimentelle Untersuchungen, über deren Ergebnisse in der Literatur berichtet wird. Davon sind die meisten Untersuchungen an glatten Oberflächen und nur wenige mit rauhen Oberflächen durchgeführt worden. Auch ist der untersuchte Reynoldszahl-Bereich sehr klein. In der Tab.1 sind die bisher durchgeführten Untersuchungen zusammengestellt, dabei ist der Reynoldszahl-Bereich, die Oberflächenart, das Versperrungsverhältnis und das gemessene Verhältnis von maximaler Nusseltzahl im Abstandshalterbereich zur ungestörten Nusseltzahl angegeben. Fast alle bisherigen Untersuchungen zeigen nämlich, daß der Wärmeübergang im Abstandshalterbereich bei Gaskühlung verbessert wird.

Die maximalen Werte für den Wärmeübergang zwischen den Distanzrippen des Abstandshalters wurden aus den Abbildungen der einzelnen Berichte entnommen. Die angegebenen Werte für die Querschnittsversperrung, die sowohl aus den Abbildungen der Abstandshalter wie auch aus Dimensionsangaben errechnet wurden, sind aufgrund der Ungenauigkeiten bei den Abbildungen nur als Näherungswerte zu betrachten.

Literatur	Abstands- halter- Typ	Reynolds- zahl $\times 10^{-4}$	Ober- fläche	Nu^*_{max}	ϵ
Hoffmann et al.	lateral	2.4	glatt	1.234	0.1905
Vlček, Weber	5	12-13	glatt	1.29	0.2368
	60	15-16	glatt	1.4	0.2886
Hudina, Nöthiger	Ia	1.5-5	glatt	1.086	0.1527
			R13	1.065	
			R4B	1.05	
	Ib		glatt	1.092	0.1559
			R13	1.079	
			R4B	1.068	
	IIa		R27	1.089	0.1085
			glatt	1.040	
	IIb		R4B	1.035	0.1252
			glatt	1.088	
	IIc		R4B	1.081	0.1589
			R4B	1.060	
IIIa	glatt	1.086	0.0871		
	R4B	1.046			
IIIb	glatt	1.08	0.0871		
	R4B	1.032			
IIIc	R4B	1.051	0.0871		
	R4B	1.051			
Krett, Majer	A-1	5.3	glatt	1.78	0.375
		9.9		1.76	
		13.4		1.70	
	C	4.4	glatt	1.525	0.303
		6.8		1.517	
		8.5		1.504	
8.0		1.485			
A-2	11.0	rauh	1.475	0.296	
	13.0		1.465		
	6.5		1.325		
Marek, Rehme	B 1	12.7	glatt	1.33	0.253
			R1	1.246	
			R2	1.253	
	B 2		glatt	1.52	0.302
			R1	1.32	
			R2	1.244	
	B 3		glatt	1.75	0.348
			R1	1.447	
			R2	1.417	

Tab. 1: Zusammenstellung aller Untersuchungen aus der Literatur

Hoffmann, Miller, Sozzi und Sutherland /2/ haben in zwei 7-Stabbündeln aus glatten Rohren in hexagonaler Anordnung, drei Arten von Abstandshalter für einen Re-Bereich $5 \cdot 10^4$ bis $1.5 \cdot 10^5$ untersucht. Aus der Flächentemperaturverteilung, die in dimensionslosen Wärmeübergangszahlen in /2/, Fig.4-50, dargestellt wurde, sowie aus der axialen Temperaturverteilung /2/, Fig.4-49, kann ein deutlicher Temperaturabfall in der Abstandshalterebene festgestellt werden. Bei einem Gitterabstandshalter-Typ jedoch wurden leichte "hot spots" registriert.

Vlček und Weber /3/ untersuchten an einem glatten Stab, bei $Re = 1.3-2.1 \cdot 10^5$ und $\dot{q} = 5.6$ und 7.6 W/cm^2 , zwei Abstandshalterarten (5 und 60 mm breit). Die gemessenen axialen Temperaturverteilungen in der Abstandshalterebene /3/, Fig.5 und 6, lassen einen der Abstandshaltergröße entsprechenden Anstieg des Wärmeübergangs erkennen.

Acht verschiedene Arten von Abstandshaltern wurden von Hudina und Nöthiger /4/, bei $Re = 1.5-5 \cdot 10^4$, an einem glatten und 3 verschiedenen rauhen Stäben untersucht. Bei sämtlichen Messungen der Umfangstemperaturverteilung /4/, Fig. 5A-D, wurden Kaltstellen ermittelt. Die Ergebnisse der gemessenen axialen Temperaturverteilungen /4/, Fig.6A-D, wurden in dimensionsloser Form über der dimensionslosen Längsposition x/D_h angegeben. Da die axiale Nu-Verteilung nicht zwischen den Distanzrippen angegeben ist, wurden die Maximalwerte der gemessenen Umfangsverteilungen abgelesen. Diese Werte wurden korrigiert mit dem Verhältnis der Nusseltzahl zwischen den Distanzrippen zur Nusseltzahl an der Stelle, wo die Umfangstemperaturverteilung gemessen wurde. Die relativ niedrigen Werte für die Wärmeübergangserhöhung im Abstandshalterbereich sind darauf zurückzuführen, daß bei diesen Untersuchungen die Versperrung des Strömungsquerschnitts durch die Abstandshalter sehr gering war. Eine klare Tendenz der Nu-Änderung bei verschiedenen Rauigkeiten konnte aus den Messungen von Hudina und Nöthiger /4/ nicht herausgefunden werden, was an den großen geometrischen Toleranzen der Rauigkeitsgeometrie liegen mag, die durch Photoätzung hergestellt wurde.

Krett und Majer /5/ liefern Meßergebnisse von 4 Abstandshalterarten, die an Bündeln von 7 glatten und 19 mit Längsrippen versehenen Stäben bei $Re=0.4-1.5 \cdot 10^5$ und $\ddot{q}=0.6-3.3 \text{ W/cm}^2$, gewonnen wurden. Es wurden nur axiale Temperaturverteilungen gemessen und in /5/, Fig.13, mit den Ergebnissen von /3/ verglichen. Die über der dimensionslosen Längsposition x/D_h aufgetragenen Nu_{\max}^* -Werte liegen im Bereich zwischen 1.3 und 1.8. Die Querschnittsversperrungswerte ϵ konnten aus diesen Untersuchungen nicht errechnet werden, da Dimensionsangaben des Abstandshalters fehlen. Es wird jedoch ein Versperrungsfaktor β angegeben, der in Tab.1 als ϵ -Wert angegeben ist. Es konnte nicht herausgefunden werden, ob die Definitionen für β und ϵ die gleichen sind.

Schließlich wurden von Marek und Rehme /6/ Untersuchungen an der vom Autor verwendeten Teststrecke für eine Reynoldszahl und drei verschiedene Abstandshalter mit glatten und zwei rauhen Stab-bündeln aus drei Stäben durchgeführt. Anhand der Meßergebnisse wurde in /6/ eine einfache Beziehung für die Maximalwerte der Nusseltzahl in Abhängigkeit von der Querschnittsversperrung angegeben.

$$Nu_{\max}^* = 1 + 5.55\epsilon^2 \quad \text{für glatte und} \quad (10)$$

$$Nu_{\max}^* = 1 + 3.55\epsilon^2 \quad \text{für rauhe Oberflächen.} \quad (11)$$

Martelli /7/ hat anhand der Meßergebnisse aus /6/ auch für den axialen Verlauf der Nusseltzahl Beziehungen entwickelt und zwar für glatte Staboberflächen

$$Nu^* = 1 + 5.55\epsilon^2 \cdot f(x^*) \quad (12)$$

$$f(x^*) = \left\{ \begin{array}{l} 1 + \frac{x^* - 1.6}{2.6} ; \quad -1 \leq x^* \leq 1.6 \\ 1 + \frac{1.6 - x^*}{4.2} ; \quad 1.6 \leq x^* \leq 3 \\ \frac{11 - x^*}{12} ; \quad 3 \leq x^* \leq 11 \end{array} \right\}$$

und für raue Oberflächen

$$\text{Nu}^* = 1 + 3.55 \epsilon^2 f(x^*) \quad (13)$$

$$f(x^*) = \left\{ \begin{array}{ll} 1 + \frac{x^*-1}{2} ; & -1 \leq x^* \leq 1 \\ 1 + \frac{1-x^*}{4} ; & 1 \leq x^* \leq 3 \\ \frac{11-x^*}{16} ; & 3 \leq x^* \leq 11 \end{array} \right\}$$

Dabei ist $x^* = x/D_h$ der dimensionslose axiale Abstand von der Vorderseite des Abstandshalters aus gerechnet. Zur Entwicklung der Beziehungen mußten die Meßergebnisse, die nur bis $x^*=7$ vorlagen, für $x^*>7$ extrapoliert werden.

3. Aufgabenstellung

Die Übersicht über die in der Literatur berichteten Ergebnisse zeigt, daß die vorhandenen Informationen bei weitem nicht ausreichen, um eine sichere und genaue Berechnung der Wandtemperaturen in gasgekühlten Stabbündeln unter Abstandshaltern zu gewährleisten.

Insbesondere liegen zu wenig Meßergebnisse über die axiale Ausdehnung des Bereiches stromabwärts vom Abstandshalter vor, dessen Temperaturverteilungen durch den Abstandshalter beeinflusst werden. Außerdem ist unbekannt, wie die maximalen Nusseltzahlen und die Ausdehnung des beeinflussten Bereiches von der Reynoldszahl abhängen. Das gilt sowohl für glatte als auch für rauhe Oberflächen. Meßergebnisse für die Übergangsbereiche von rauher zu glatter sowie von turbulenter zu laminarer Strömung fehlen völlig. Diese Bereiche bei kleinen Reynoldszahlen interessieren jedoch besonders im Zusammenhang mit nicht-nominellen Betriebszuständen und für die Notkühlung.

Schließlich fehlt eine allgemeine Beziehung für die Abstandshaltereinflüsse auf den Wärmeübergang als Input für Unterkanal-Rechenverfahren (SAGAPO/8/).

Aus diesem Grunde wurden experimentelle Untersuchungen mit der folgenden Zielsetzung durchgeführt:

- Untersuchung der Wandtemperaturverteilung unter gitterförmigen Abstandshaltern
- Bestimmung des Wärmeübergangs im Abstandshalterbereich
- Bestimmung der axialen Ausdehnung des Bereiches hinter dem Abstandshalter, dessen Temperaturverteilung beeinflusst wird
- Untersuchungen für unterschiedliche Gitterversperrungen mit glatten und rauhen Stäben bei laminarer und turbulenter Strömung sowie im dazwischenliegenden Übergangsbereich
- Entwicklung einer allgemeinen Beziehung für die Abstandshaltereinflüsse auf den Wärmeübergang in Form einer Funktion

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Gz}, \epsilon, \phi, \text{Oberfläche}) \quad (14)$$

4. Versuchsaufbau

4.1 Versuchsanlage

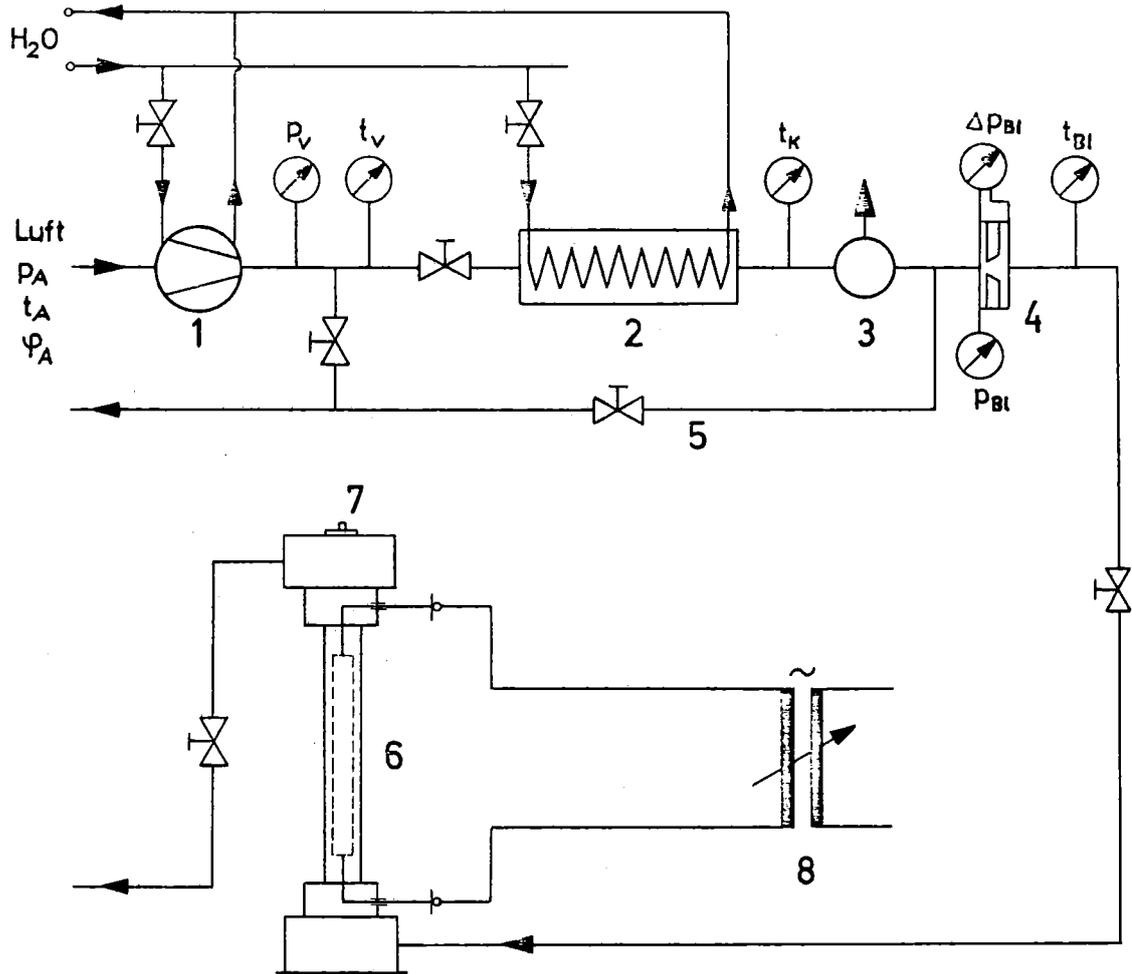
Die Versuche wurden an einem offenen Luftkreislauf durchgeführt. Die wesentlichen Teile dieses Kreislaufs (Abb.1) sind:

- der Schraubenverdichter mit einer maximalen Fördermenge von etwa 0.34 kg/s bei einem Druck von 2.5 bar,
- der Luftkühler zur Regelung der Teststreckeneintrittstemperatur zwischen 20^o-50^oC,
- die Heizung, bestehend aus einem Gleichrichter mit 0-15V und 0-600A für Messungen bei $Re < 5 \cdot 10^4$ und aus einem Transformator mit 0-20V und 0-2000A, für Messungen für $Re > 5 \cdot 10^4$,
- die Teststrecke, die gegen Wärmeverluste nach außen isoliert ist.

4.2 Teststrecke

Die Teststrecke (Abb.2 und 3) hat die folgenden wesentlichen Merkmale:

- drei Heizrohre, die in Dreiecks-Anordnung in einem Führungskanal eingesetzt und durch gitterförmige Abstandshalter in drei Ebenen abgestützt sind;
- der Führungskanal wurde aus Araldit in ein Stahlrohr um einen Kern gegossen;
- zur elektrischen Aufheizung der Strecke sind die drei Heizrohre parallel geschaltet, wobei eine kurze unbeheizte Anlaufstrecke aus Kupferrohren mit 3 mm Wandstärke existiert;
- zur elektrischen Isolierung der Heizrohre besitzen die Abstandshalter Distanzrippen aus Keramik;
- die Luft strömt radial durch den Eintrittsstutzen im unteren Bereich der Teststrecke und kühlt nach oben strömend die elektrisch beheizten Rohre;
- alle Dimensionen sind so gewählt, daß sie den Verhältnissen in einem gasgekühlten schnellen Reaktor ähnlich sind. Ausgehend von der Herstellungsmöglichkeit der Temperaturmeßeinrichtung



1. Verdichter (1000 Nm³/h, 4bar, 80KW)
2. Luftkühler
3. Wasserabscheider
4. Durchflußmessung
5. Bypass
6. Teststrecke
7. Meßkopf- Verstellvorrichtung
8. Transformator 0-40 KW

- p_v Druck am Verdichteraustritt
 t_v Temperatur am Verdichteraustritt
 t_K Temperatur am Kühleraustritt
 Δp_{BI} Wirkdruck an der Blende
 p_{BI} Druck vor der Blende
 t_{BI} Temperatur an der Blende
 p_A Druck am Verdichtereintritt
 t_A Temperatur am Verdichtereintritt
 φ_A rel. Feuchte am Verdichtereintritt

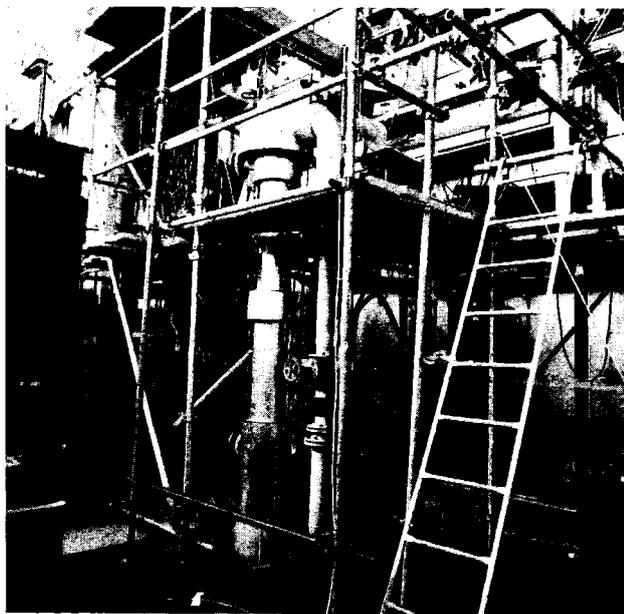


Abb.1 Versuchsanlage (schematisch, Gesamtansicht)

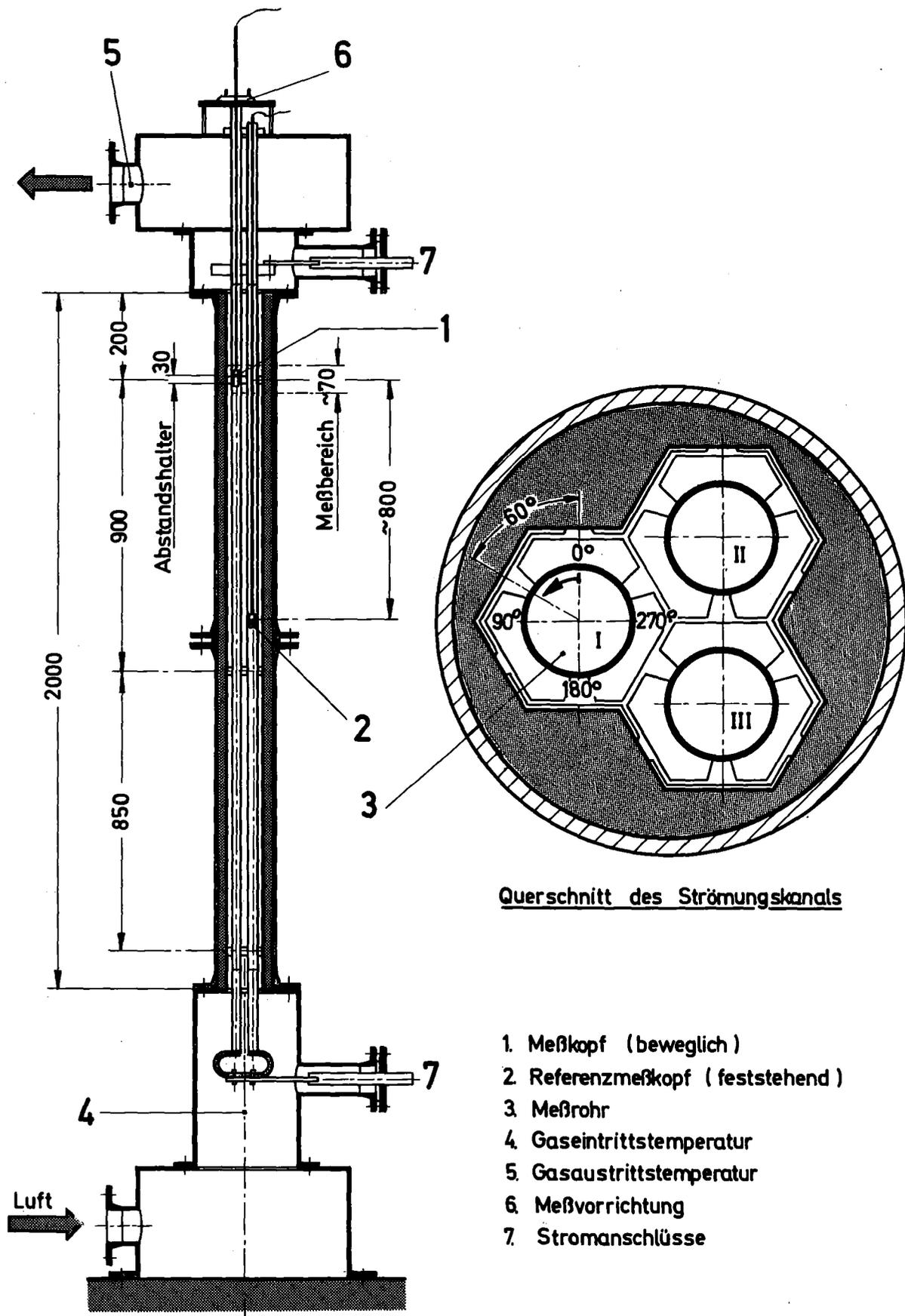
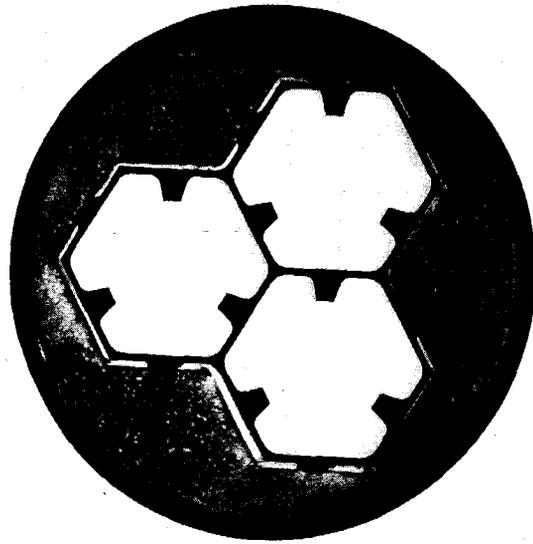


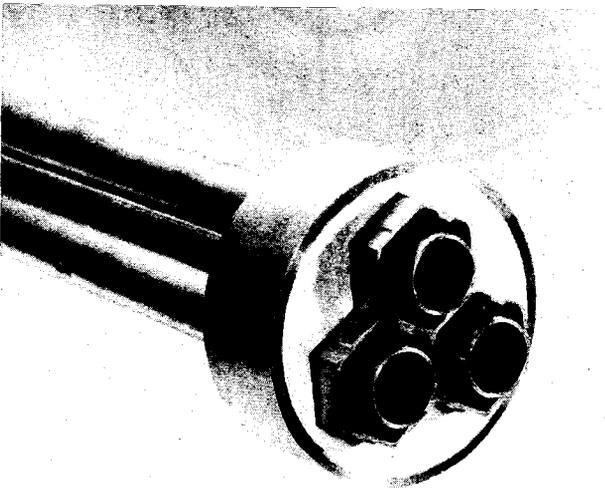
Abb. 2 Teststrecke (schematisch)



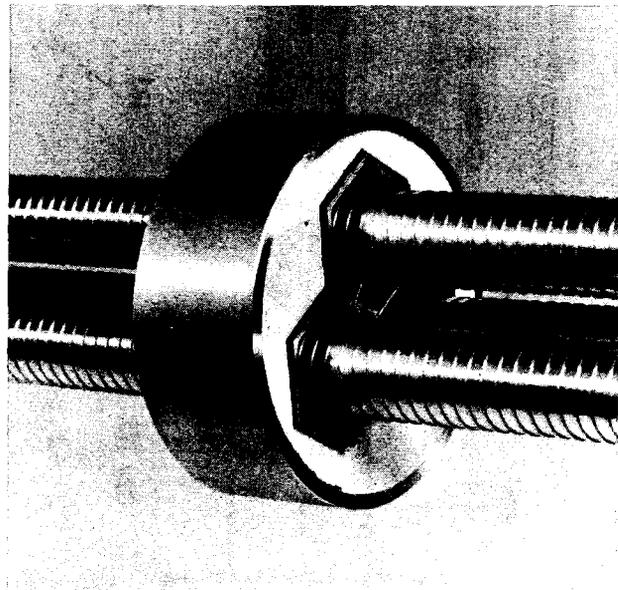
a) Abstandshalter



b) Querschnitt des Strömungskanals mit Abstandshalter



c) glatter Teil



d) rauher Teil

Abb.3 Teststrecke (Ausschnitt)

wurde die gesamte Teststrecke in dreifacher Originalgröße der Gasbrüter-Brennstäbe ausgeführt. Folgende geometrische Abmessungen wurden festgelegt:

Heizrohrdurchmesser $D = 21.2 \text{ mm}$

Wandstärke $s = 1.1 \text{ mm}$

Stababstandsverhältnis $P/D = 1.45$

Länge der Heizstrecke $L_H = 1110 \text{ mm}$

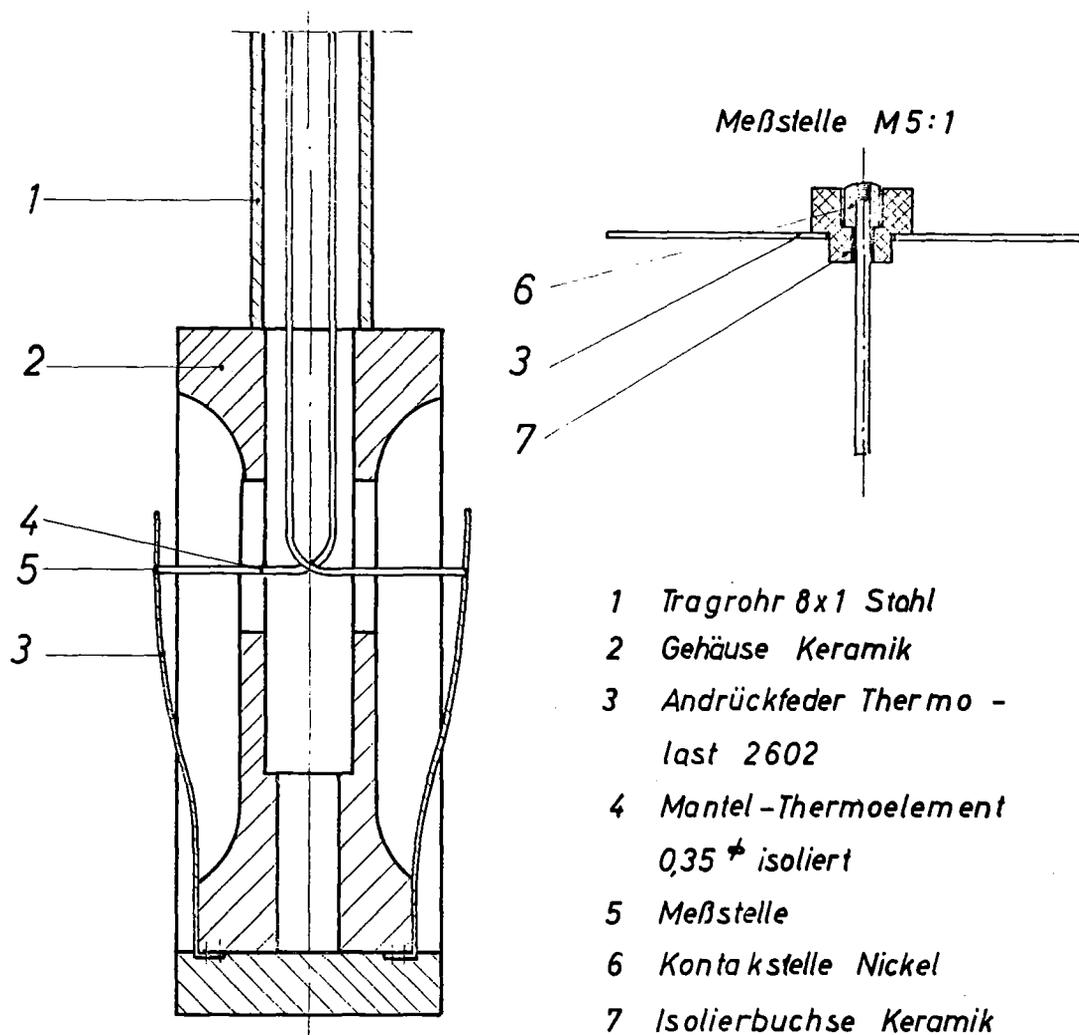
Länge des Führungskanals $L_K = 2002 \text{ mm}$

4.3 Meßanordnung

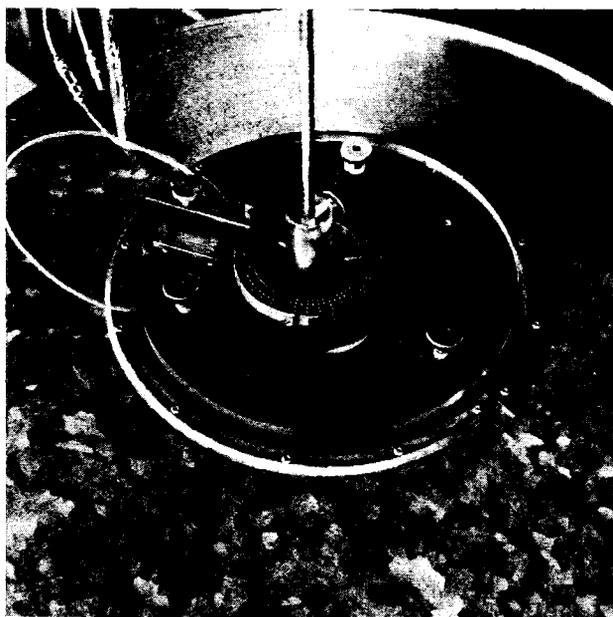
Der Luft-Massenstrom wurde mit Hilfe einer Normblende /9/ bei einem Rohrdurchmesser von 83.0 mm und einer ungestörten Einlaußlänge von 60 Durchmessern bestimmt. Absolut- und Differenzdrücke wurden je nach Größe mit Rohrfedermanometern Kl. 0.1, einschenklichen Quecksilbermanometern (Manoskop) oder mit einem Betz-Manometer ermittelt. Zur Berücksichtigung der Luftfeuchtigkeit wurde die relative Luftfeuchtigkeit und die Temperatur im Ansaugzustand gemessen. Die Lufttemperatur an der Meßblende wurde durch ein Quecksilberfederthermometer bestimmt.

Die elektrische Heizleistung ergab sich aus getrennten Messungen von Strom und Spannung. Die Heizspannung und der Heizstrom konnten durch einen Regler auf $\pm 0.01\text{V}$ und $\pm 1.0\text{A}$ konstant gehalten werden. Die Luftein- und Austrittstemperatur wurde durch Mantelthermoelemente mit isolierter Meßstelle gemessen. Die Lufteintrittstemperatur wurde durch den Luftkühler auf $\pm 1.0 \text{ K}$ konstant gehalten.

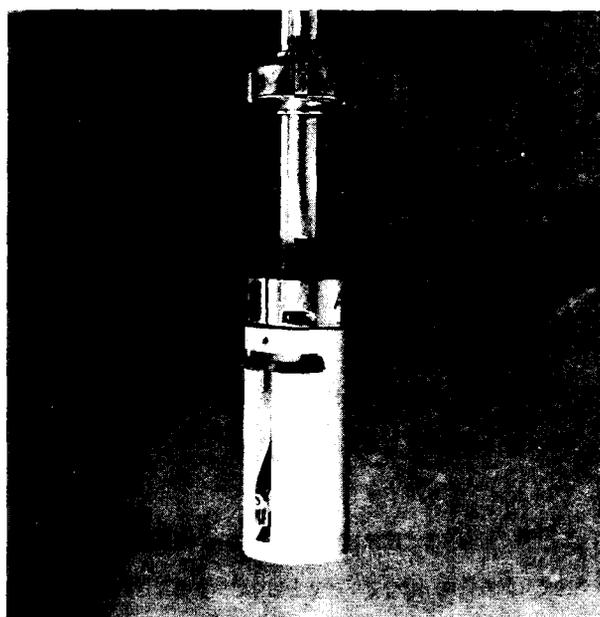
Zur Bestimmung der Luftaustrittstemperatur wurde die Temperatur am Ende der Heizstrecke mit drei fest eingebauten und in einer anschließenden Mischkammer mit drei beweglichen Thermoelementen gemessen. Der höhere der aus den jeweils drei Thermoelementen gebildeten Mittelwerte wurde als Austrittstemperatur betrachtet. Sie wurde jedoch nur zur Kontrolle der Wärmebilanz benutzt.



a) Meßkopf (schematisch M2:1)



b) Verstellvorrichtung



c) Ansicht des Meßkopfes

Abb.4 Meßkopf und Verstellvorrichtung

Zur Messung von Umfangs- und Längstemperaturverteilungen wurde ein beweglicher Meßkopf (Abb.4) verwendet, der im Rohrrinneren angebracht ist. Der Meßkopf ist mit zwei um 180° gegeneinander versetzten Miniaturmantelthermoelementen ausgerüstete, die an der Spitze auf 0.35 mm Durchmesser verjüngt sind. Die Meßstellen sind isoliert ausgeführt, um Spannungsabgriffe zu vermeiden. Eine Feder drückt die Thermoelemente mit einer Kraft von ca. 0.13 N gegen die Wand.

Feder und Thermoelemente sind in einem Isolierkörper aus keramischem Material eingebettet, der einen Wärmetransport durch natürliche Konvektion in der Umgebung des Meßelementes weitgehend verhindert. Eine Verstelleinrichtung ermöglicht die reproduzierbare Einstellung des Meßkopfes in axialer Richtung in 1 mm Abstand und in Umfangsrichtung alle 2 Winkelgrade.

4.4 Meßmethode

Um den Einfluß des Abstandshalters auf die Verteilung der Wandtemperatur genau zu ermitteln, mußte die Temperatur über den gesamten Gitterbereich systematisch erfaßt werden. Zur Bestimmung der Umfangstemperatur wurde der Meßkopf, dessen Lage in der Teststrecke in Abb.2 angegeben ist, um je 5 Grad, im Rippenbereich des Abstandshalters um je 2 Grad verstellt. In axialer Richtung wurde die Temperatur in Abständen von je 2 mm gemessen. Für die Messungen wurde dabei nur eines der beiden im Meßkopf eingebauten Thermoelemente verwendet. Das zweite Thermoelement diente zur Kontrolle. Während der Messungen, die mehrere Stunden andauern, ändern sich die Werte von Massendurchsatz und Luft-eintrittstemperatur. Der Massendurchsatz sinkt normalerweise bei kleiner Re-Zahl ab, die Lufteintrittstemperatur steigt mit fortschreitender Tageszeit an, weil die Hallentemperatur zunimmt. Auf diese Weise ändert sich die absolute Wandtemperatur mit der Zeit, und es ergeben sich für die aufeinanderfolgenden Messungen verfälschte Temperaturverhältnisse. Um diesen Meßfehler

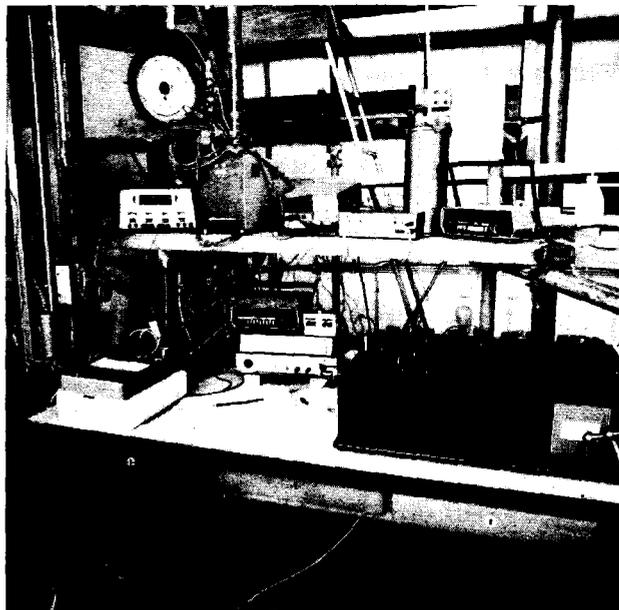
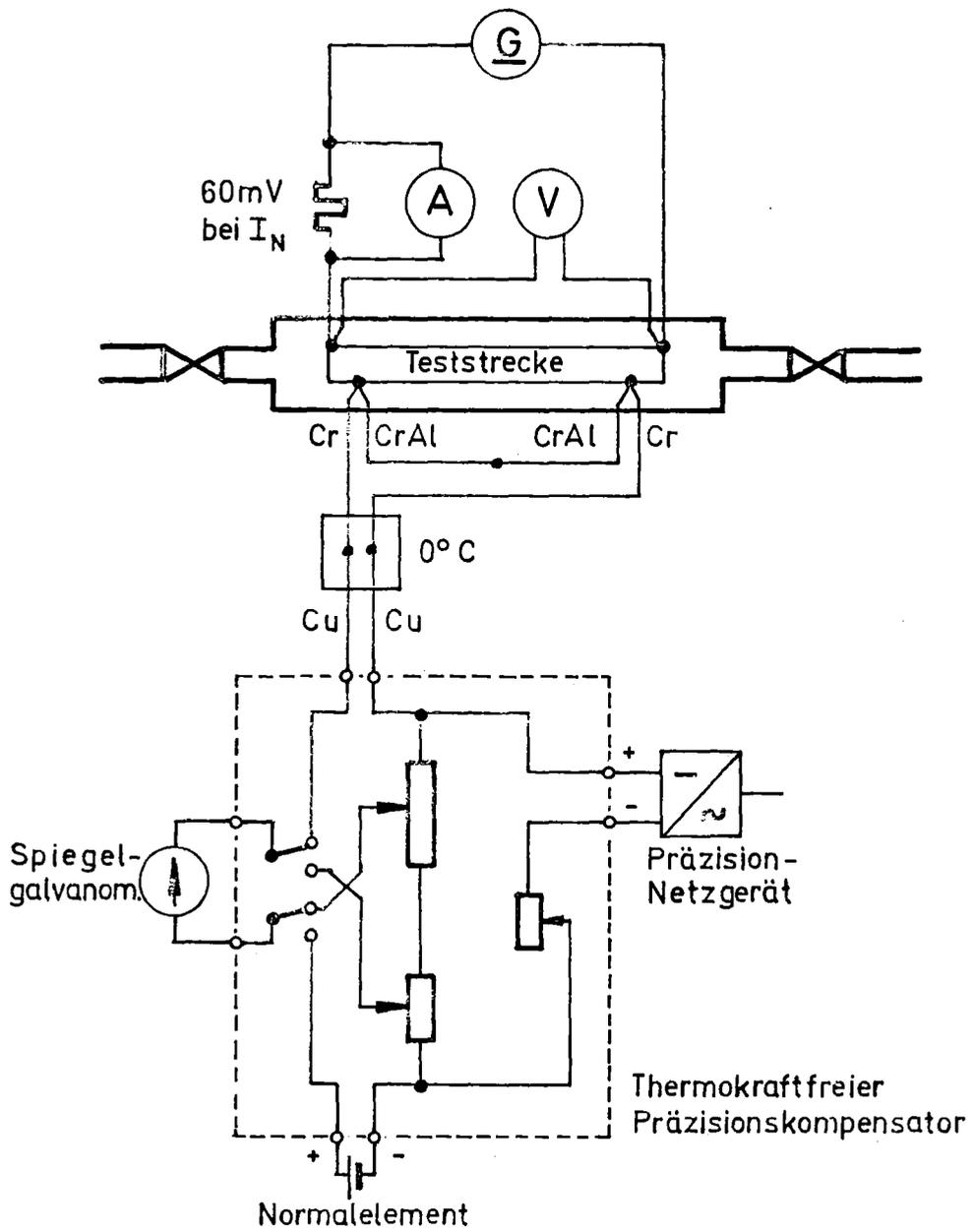
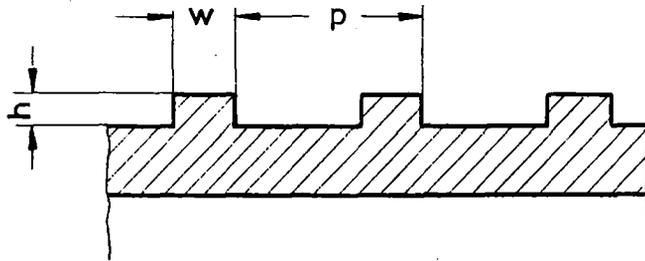


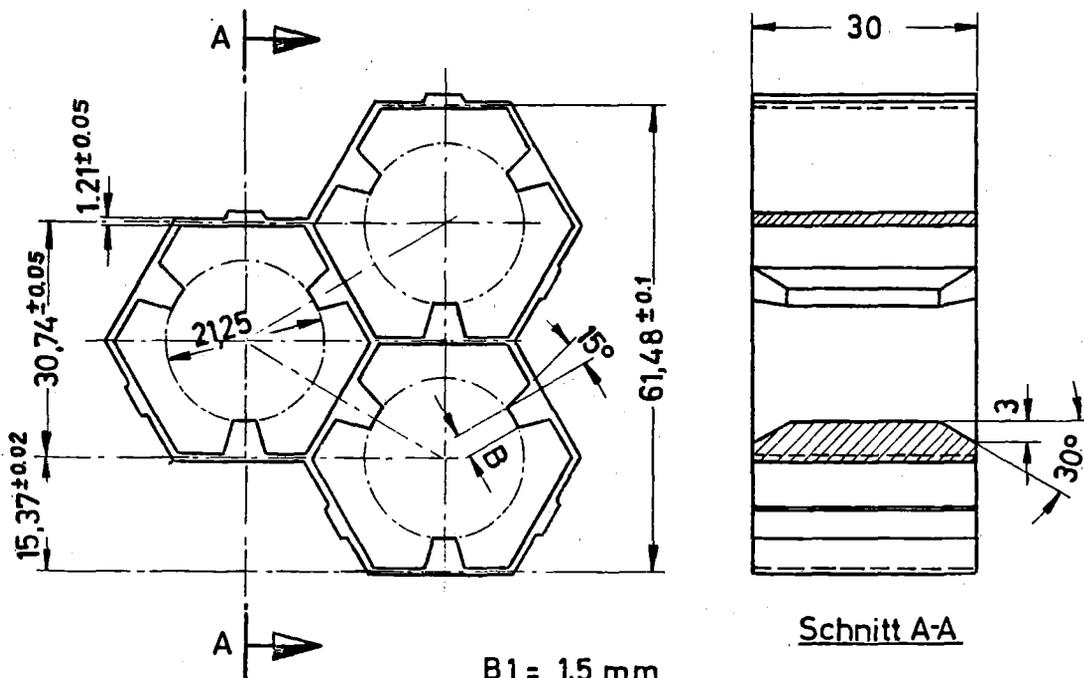
Abb.5 Instrumentierung (schematisch, Gesamtansicht)

auszuschließen, wurde die Wandtemperatur nicht direkt, sondern gegen einen Referenzpunkt gemessen, der praktisch den gleichen Änderungen des Massendurchsatzes und der Lufteintrittstemperatur unterliegt. Dieser Referenzpunkt wird durch einen zweiten, jedoch feststehenden Meßkopf gebildet und ist in einem der benachbarten Heizrohre eingebaut. Die Einbauhöhe ist so gewählt, daß sich zum beweglichen Meßkopf hin immer eine genügend große Temperaturdifferenz einstellt. Durch Positionswechsel des beweglichen Meßkopfes konnten auf diese Weise die einzelnen Temperaturdifferenzen über ein Spiegelgalvanometer mit einer Genauigkeit von $1/38$ K registriert werden (Abb.5). Die absoluten Wandtemperaturen ergaben sich aus den gemessenen Temperaturdifferenzen und der zu Beginn der Messungen einmal ermittelten Referenztemperatur.



Rauhigkeit	w	h	p
R1	0.5	0.3	3.75
R2	0.5	0.3	2.6

Geometrie der Rauhigkeitselemente



B1 = 1.5 mm
 B2 = 3 mm
 B3 = 6 mm

Geometrie der Abstandshalter

Abb.6 Geometrische Parameter

5. Durchführung der Messungen

5.1 Untersuchte Parameter

Für die Durchführung der Messungen wurden ein Stabbündel mit hydraulisch glatter Oberfläche und zwei Stabbündel mit künstlich aufgerauhter Oberfläche verwendet. Die beiden Rauigkeiten (Abb.6) hatten dieselbe Rippenhöhe von 0.3 mm, jedoch unterschiedlichen Rippenabstand, nämlich 3.75 mm (R1) und 2.6 mm (R2). Die drei Stabbündel wurden in Kombination mit drei verschiedenen Abstandshaltern vermessen. Die Geometrie der Abstandshalter ist in Abb.6 dargestellt. Sie unterscheiden sich maßlich in der Breite B der Distanzrippen, die 1.5 mm (B1), 3.0 mm (B2) und 6.0 mm (B3) beträgt, was ungefähr 8, 16 und 32 Winkelgraden der Heizrohroberfläche entspricht.

5.2 Meßbereich

Zur Bestimmung der Temperaturverteilung der Rohrwand wurden die Temperaturen in axialer Richtung im Bereich 20 mm vor dem Abstandshalter bis 40 mm nach dem Abstandshalter einschließlich 30 mm Abstandshalterlänge, d.h. über insgesamt 90 mm, in Abständen von je 2 mm gemessen. In Umfangsrichtung wurden die Temperaturen alle 5 Winkelgrade, im Bereich der Distanzrippen alle 2 Winkelgrade gemessen.

Zur Bestimmung des Wärmeübergangs und der axialen Ausdehnung des Bereiches hinter dem Abstandshalter, dessen Temperaturverteilung beeinflusst wird, wurden die Temperaturen zwischen den Distanzrippen bei der 0 Grad Umfangs-Position in axialer Richtung im Bereich 70 mm vor bis 80 mm nach dem obersten Abstandshalter gemessen. Die Grenze vor dem Abstandshalter ergab sich aus der Länge des Meßkopfes, hinter dem Abstandshalter durch das Kanalende. Die Reynoldszahlen der Luftströmung liegen zwischen 600 und $2 \cdot 10^5$. Sie sind nach oben durch die Leistung des

Schraubenverdichters begrenzt. Der durchmessene Reynoldsbereich entspricht dem Auslegungsbereich gasgekühlter Schneller Reaktoren.

Die Flächenleistung bei den Experimenten wurde in den Grenzen von 0.5 bis 50 kW/m² so an die jeweiligen Reynoldszahlen der Strömung angepaßt, daß die Wandtemperatur vor dem Abstandshalter in allen Fällen ungefähr 100°C erreichte.

5.3 Auswertungsverfahren

In einer Kanalströmung, die hydraulisch und thermisch voll- ausgebildet ist, verlaufen Wand- und Kühlmitteltemperatur parallel zueinander; das heißt, die Nusseltzahl ist konstant über die Kanallänge bei konstantem Wärmefluß. Diese Nusseltzahl wird im folgenden als "ungestörte" Nusseltzahl bezeichnet. Wenn der Wärmeübergang gestört wird, z.B. durch einen Abstandshalter, ändert sich die Wandtemperatur und damit die Nusseltzahl. Diese wird im folgenden als "gestörte" Nusseltzahl bezeichnet.

Um die Abstandshaltereinflüsse zu erfassen, bildet man nun das Verhältnis zwischen der gestörten und der ungestörten axialen Nusseltzahl bei einer Referenzumfangsposition:

$$\text{Nu}^* = \frac{\text{Nu}_x}{\text{Nu}_0} = \frac{(T_W - T_G)_0}{(T_W - T_G)_x} \quad (15)$$

Dabei wird angenommen, daß die Gastemperatur am Umfang des Heizrohres konstant ist und in axialer Richtung auf folgende Weise berechnet werden kann:

$$T_G = T_{\text{ein}} + \frac{Q(x/L_H)}{\dot{m} c_p} \quad (16)$$

Dabei bedeuten:

- T_W = Wandtemperatur (K)
- T_G = Kühlmitteltemperatur (K)
- T_{ein} = Kühlmittelintrittstemperatur (K)
- Q = Wärmeleistung (W)
- \dot{m} = Massendurchsatz (kg s^{-1})
- L = Heizrohrlänge (m)
- x = axiale Position (m)

Indizes o = ungestört
x = lokal

Wärmeleitungsrechnungen für die vorliegenden Bedingungen (1.1 mm Wandstärke) zeigen, daß der Temperaturunterschied zwischen der Innen- und Außenwand des Heizrohres etwa 0.25 K beträgt. Die Temperaturdifferenz zwischen Wand und Gas vor dem Abstandshalter lag je nach Reynoldszahl zwischen 30 und 60 K. Dieser kleine Temperaturunterschied von 0.25 K im Vergleich zu der Temperaturdifferenz zwischen Wand und Gas beeinflusst die Nusseltzahl um weniger als 1%. Deshalb wird die Temperaturdifferenz über die Heizrohrwand vernachlässigt und die Nusseltzahlen werden mit der gemessenen Temperatur an der Innenwand berechnet. Die Nusseltzahl nach Gl.(1), die Reynoldszahl nach Gl.(7) und die Graetzzahl nach Gl.(8) werden mit dem hydraulischen Durchmesser (D_h) des Gesamtkanals ohne Abstandshalter berechnet. Alle Stoffwerte werden auf die mittlere Kühlmitteltemperatur

$$T_m = (T_{\text{ein}} + T_{\text{aus}})/2 \quad (17)$$

bezogen.

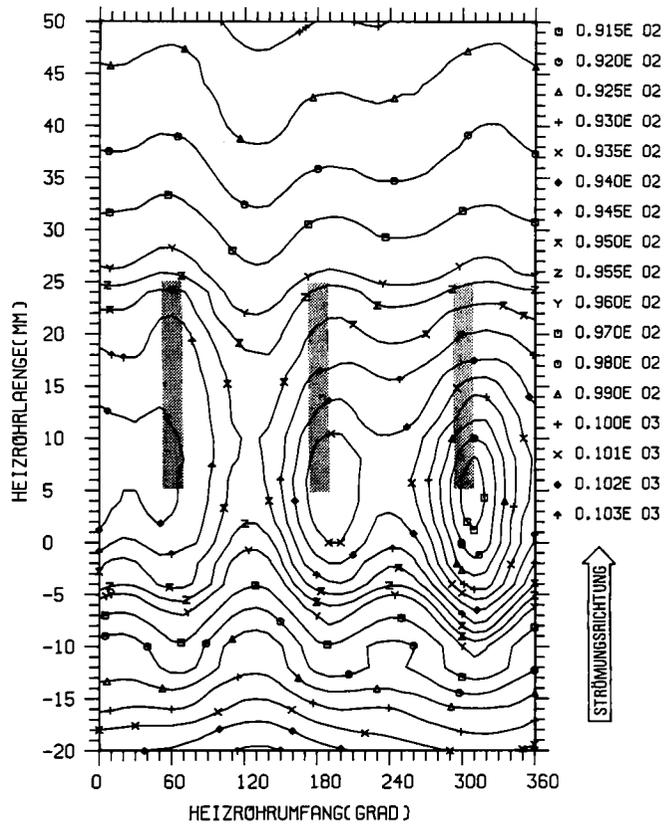
Die Nusseltzahlen werden ermittelt nach

$$\text{Nu} = \frac{\ddot{q} D_h}{(T_W - T_G) \lambda} \quad (18)$$

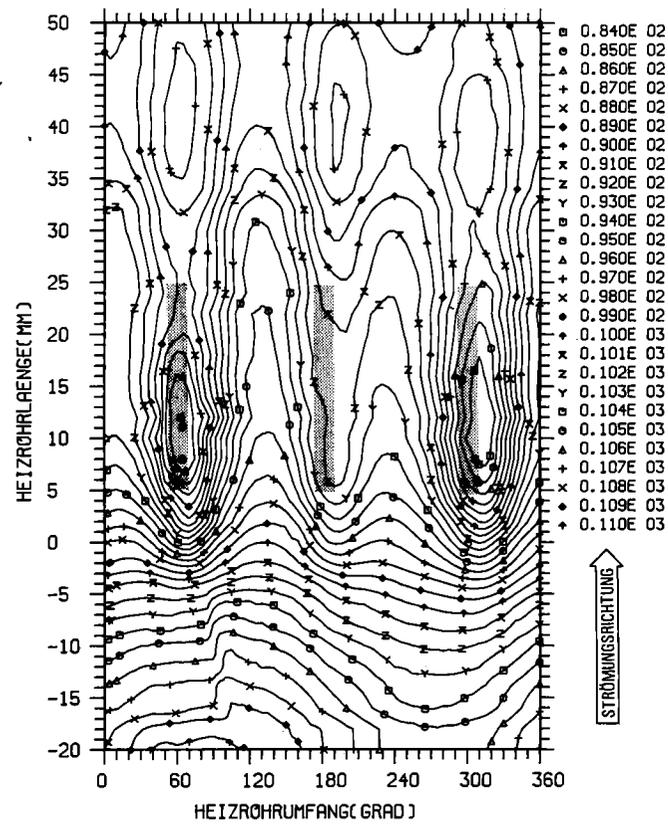
wobei der Wärmefluß zu

$$\ddot{q} = \frac{Q}{3 D_{\text{vol}} \pi L} \quad (19)$$

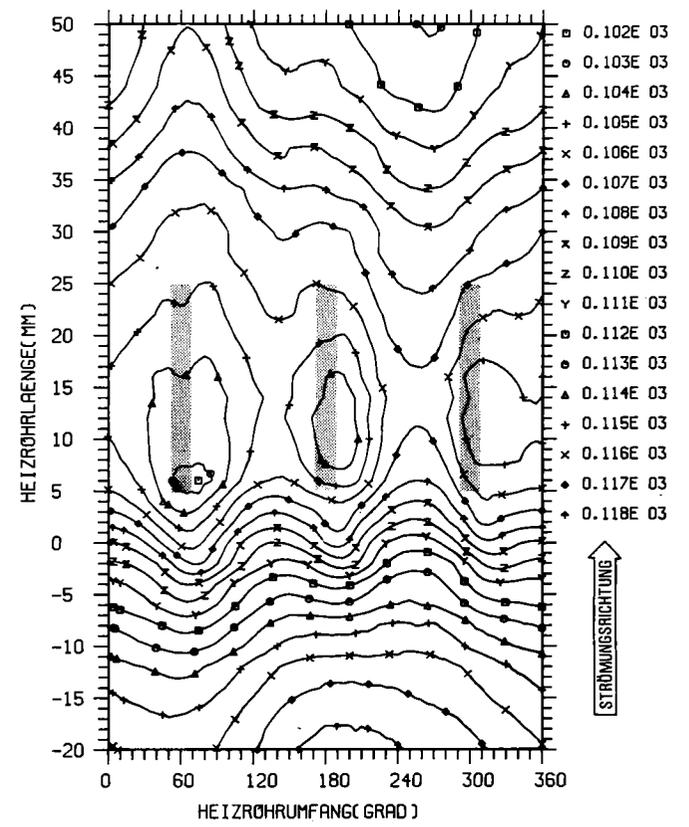
berechnet wird.



TEMPERATURVERTEILUNG FUER RE=1.18E+04 (R2, B2)



TEMPERATURVERTEILUNG FUER RE=3.50E+04 (G, B2)



TEMPERATURVERTEILUNG FUER RE=1.70E+4 (R1, B2)

Abb.7 Höhenliniendarstellung der Wandtemperatur für unterschiedliche Oberflächentypen

6. Versuchsergebnisse

6.1. Messungen unter dem Abstandshalter am Kanalausstritt

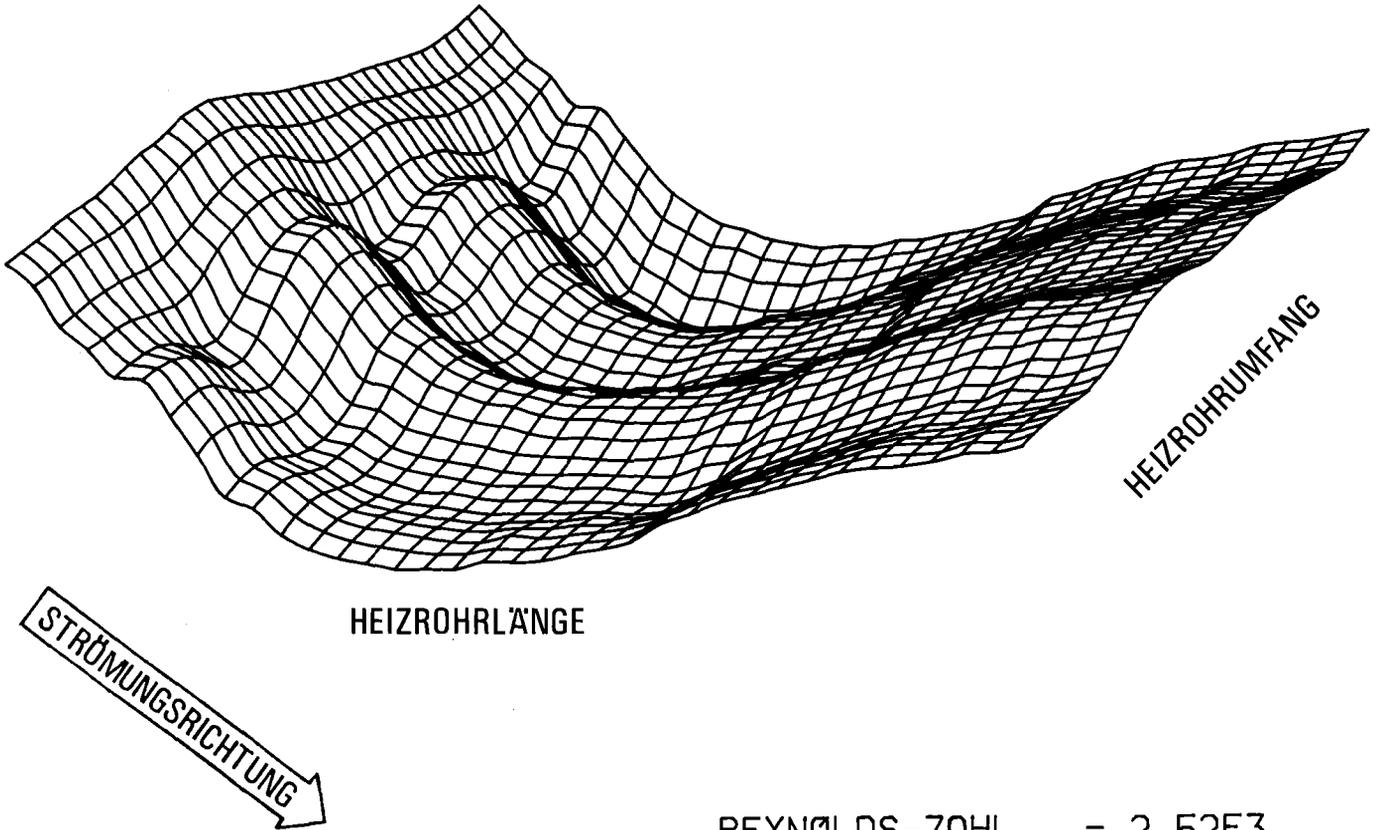
Die Messungen unter dem Abstandshalter am Kanalausstritt wurden mit dem Abstandshalter mit der mittleren Querschnittsverengung von $\epsilon=0.302$ (B2) an beiden rauhen und dem glatten Stab-bündel durchgeführt.

6.1.1 Wandtemperaturverteilung

Die gemessenen Wandtemperaturen sind in Abb.7 für die drei Oberflächentypen als Isothermen dargestellt, und zwar für die abgewinkelte Heizstaboberfläche, an der die Temperaturen gemessen wurden. Als Abszisse ist der Heizrohrumfang und als Ordinate die Heizrohrlänge aufgetragen. Die Kontaktzone zwischen den Distanzrippen und dem Heizrohr ist durch eine dunklere Tönung angedeutet. In allen untersuchten Fällen ist ein deutlicher Temperaturabfall im Bereich des Abstandshalter und insbesondere an den Distanzrippen zu beobachten. Das bedeutet, daß im Abstandshalterbereich keine Heißstelle, sondern eine Kaltstelle auftritt. Der Temperaturabfall wird durch die Verengung des Strömungsquerschnitts durch den Abstandshalter hervorgerufen. Durch die Querschnittsverengung wird infolge erhöhter Strömungsgeschwindigkeit und starker Turbulenzerzeugung die Wärmeabfuhr verbessert.

Der stärkste Temperaturabfall ergibt sich für die glatte Heizstaboberfläche. Er beträgt hier etwa 26 K. Bei den rauhen Oberflächen ist der Temperaturabfall geringer: 16 K für die schwächere Rauigkeit R1 ($p/h=12.5$) und 11.5 K für die stärkere Rauigkeit R2 ($p/h=8$). Das bedeutet, daß bei einer rauhen Oberfläche die Verbesserung des Wärmeübergangs durch die Turbulenzerzeugung am Abstandshalter nicht so groß

REYNOLDS-ZAHL = 1.18E4
RAUHIGKEITSFORM = R2
ABSTANDSHALTER = B2



REYNOLDS-ZAHL = 2.52E3
RAUHIGKEITSFORM = R2
ABSTANDSHALTER = B2

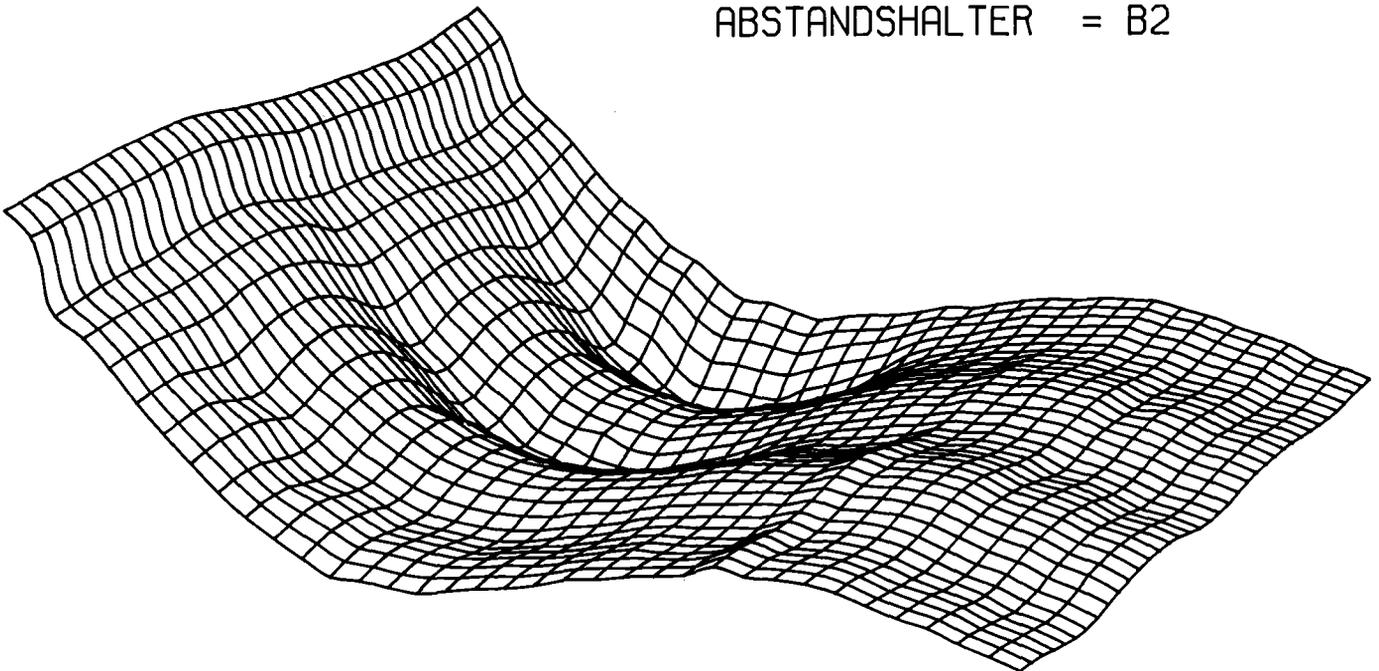


Abb.8 3-dimensionale Darstellung der Wandtemperatur

ist, wie bei einer glatten Oberfläche. Die Ursache hierfür liegt in der starken Turbulenzerzeugung an den Rauheitsrippen, die so groß ist, daß die zusätzliche Turbulenzerzeugung sich nicht so stark auswirken kann, wie das im Falle der glatten Oberfläche geschieht.

Gut zu erkennen in der Abbildung ist auch der Einfluß der Kanalgeometrie auf die Temperaturverteilung der Heizrohre. Vor dem Abstandshalter ergibt sich keine konstante Temperatur am Umfang des Heizrohres, sondern die Wandtemperatur ändert sich mit der Geometrie der Kanalwand. Interessant ist, daß beim glatten Heizrohr direkt hinter den drei Distanzrippen ein zweites Minimum in der Temperaturverteilung auftritt. Dieses Minimum liegt dort, wo die an der Distanzrippe des Abstandshalters abgelöste Strömung wieder auf die Rohrwand auftrifft.

Um die Temperaturverteilung zu verdeutlichen, ist in Abb.8 für eine raue Oberfläche (R2) die Temperaturverteilung dreidimensional dargestellt, und zwar für zwei Reynoldszahlen. Allgemein kann man feststellen, daß die Reynoldszahl nur einen geringen Einfluß auf die Temperaturverteilung hat, wenn man davon absieht, daß bei sehr kleinen Reynoldszahlen ($Re < 3000$) die Temperatur in axialer Richtung hinter dem Abstandshalter nochmals sinkt, ein Effekt der bei höheren Reynoldszahlen nicht auftritt. Einen stärkeren Einfluß auf die Temperaturverteilung hat die Art der Oberfläche.

6.1.2 Wärmeübergang

Aus den gemessenen Temperaturverteilungen wurden mit dem unter Abschnitt 5.3 beschriebenen Auswerteverfahren die Nusseltzahlverhältnisse (Nu^*) berechnet. Dabei wurde festgelegt, daß an der Umfangsposition von 0 Grad (Abb.2) der typische Verlauf in axialer Richtung bestimmt werden kann. Diese Festlegung führt zu konservativen Ergebnissen, da die Position zwischen zwei Distanzrippen des Abstandshalters

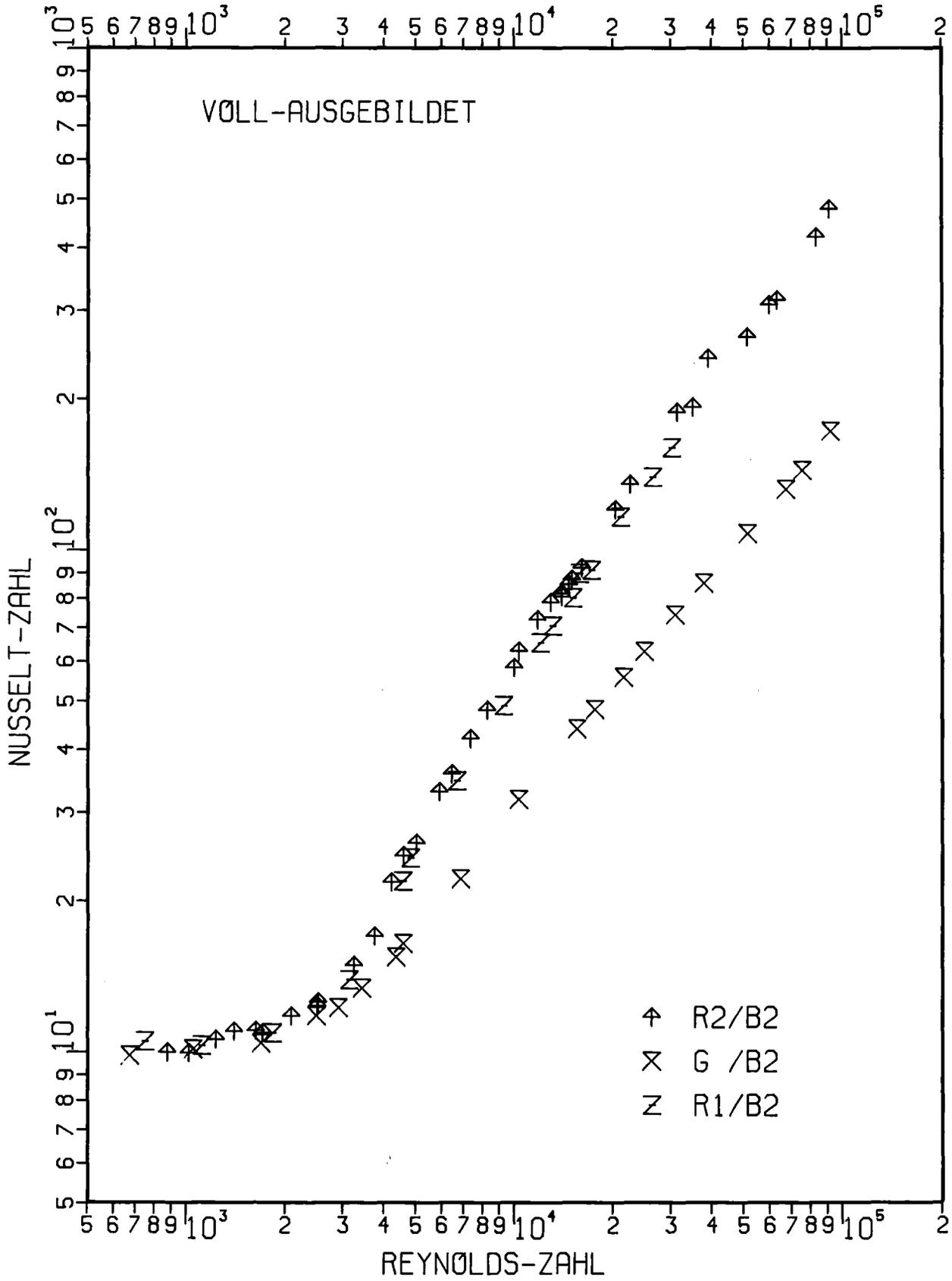


Abb.9 Einfluß des Oberflächentyps auf die ungestörte Nusseltzahl Nu_0

verläuft und die Verbesserung des Wärmeübergangs direkt unter den Distanzrippen besser ist. Der Einfluß auf die Ergebnisse, der durch diese Festlegung ausgeübt werden kann, wird in 6.2.3 näher untersucht. Die berechneten Nusseltzahlen werden auf die ungestörte Nusseltzahl vor dem Abstandshalter bezogen. Die ungestörten Nusseltzahlen sind in Abb.9 über der Reynoldszahl dargestellt. Für $Re < 3 \cdot 10^3$ stimmen die Nusseltzahlen für die glatte und raue Oberfläche überein, das bedeutet, daß die raue Oberfläche sich hydraulisch glatt verhält. Im Übergangsbereich zwischen glattem und voll rauhem Strömungsverhalten steigen die Nusseltzahlen für die raue Oberfläche stärker an als die der glatten Oberfläche. Für $Re > 2 \cdot 10^4$ ist die Abhängigkeit der Nusseltzahlen beider rauhen Oberfläche von der Reynoldszahl gleich. Die Nusseltzahlen der rauhen Oberfläche R2 sind bei gleicher Reynoldszahl höher als die Nusseltzahlen der Rauigkeit R1, weil die Rauigkeit R2 stärker ist.

Für jeweils vier Reynoldszahlen ist der axiale Verlauf des Nusseltzahl-Verhältnisses über der dimensionslosen axialen Position (x/D_h) in der Abb.10 dargestellt. Die axiale Position wird von der stromaufwärts liegenden Kante des Abstandshalters aus gerechnet ($x=0$) und durch den hydraulischen Durchmesser der Teststrecke normiert. Für alle untersuchten Oberflächen kann ab etwa 1-2 hydraulische Durchmesser vor dem Abstandshalter eine Verbesserung des Wärmeübergangs festgestellt werden. Dieser Anstieg des Wärmeübergangs vor dem Abstandshalter kann durch die bereits vor dem Abstandshalter beginnende Einschnürung der Strömung erklärt werden. Sicherlich spielt auch die axiale Wärmeleitung eine Rolle. Insbesondere bei kleinen Reynoldszahlen ($Re < 1000$), für die eine Erhöhung des Wärmeübergangs schon 5 hydraulische Durchmesser vor dem Abstandshalter bemerkt werden kann, sind die Nusseltzahlen auch durch Naturkonvektion beeinflusst. Die Nusseltzahlen steigen dann stark an und erreichen einen Maximalwert unter dem Abstandshalter. Weiter stromabwärts fallen die Nusseltzahlen allmählich wieder ab. Für die glatte Oberfläche ergibt sich ein zweites Maximum an der Position, wo sich die abgelöste Strömung wieder an die Wand anlegt. Direkt hinter den Distanzrippen ist dieses zweite Maximum stärker ausgeprägt (s.Abb.7). Dieses ausgeprägte Maximum beeinflusst natürlich die Nusseltzahlen in der

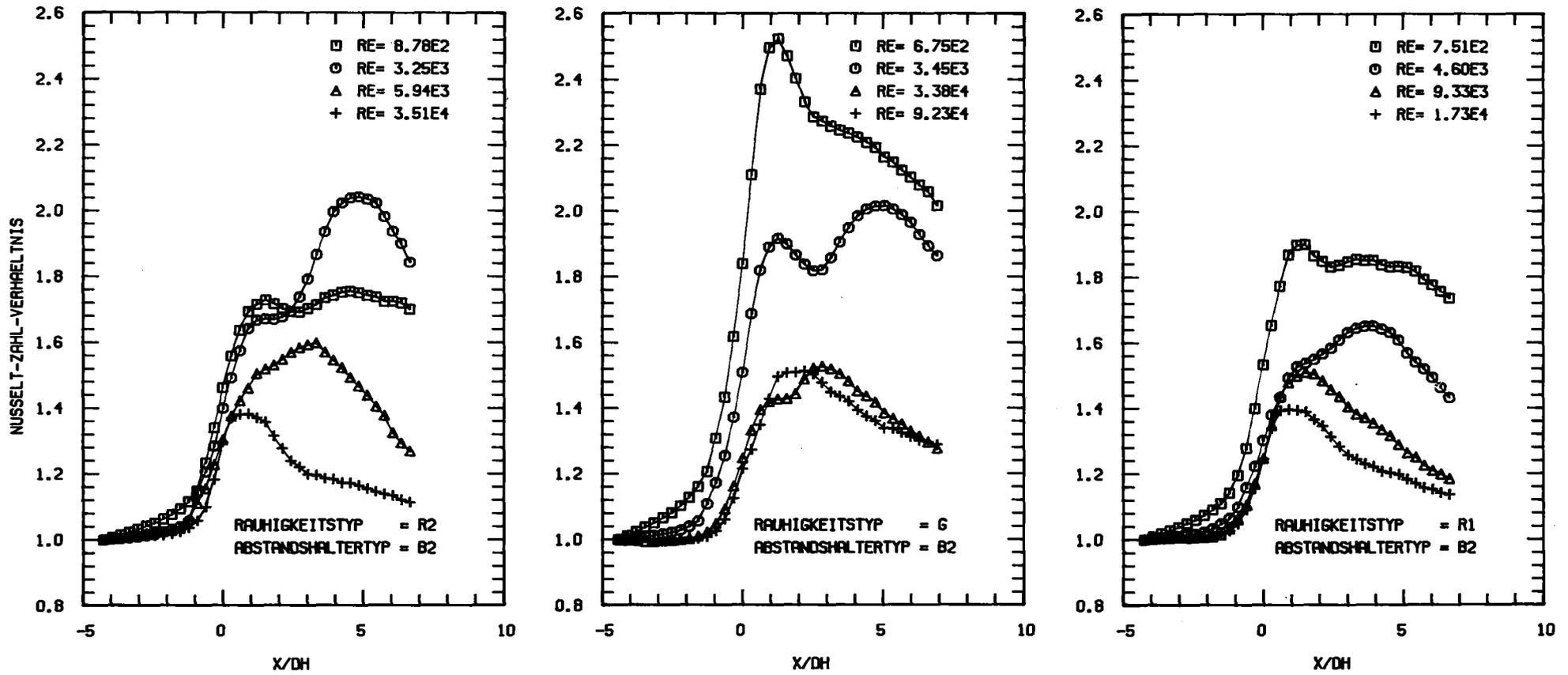


Abb.10 Verlauf des Wärmeübergangs im Abstandshalterbereich für unterschiedliche Oberflächentypen

Nachbarschaft, d.h. auch auf einer Mantellinie, zwischen den Distanzrippen. Diese Position verschiebt sich mit sinkenden Reynoldszahlen zu höheren x/D_h -Werten. Bei den rauhen Oberflächen kann ein zweites Maximum nur bei kleinen Reynoldszahlen beobachtet werden ($Re < 9 \cdot 10^3$). In diesem Reynoldszahlbereich findet bereits der Übergang vom rauhen zum glatten Strömungsverhalten statt.

Die Verbesserung des Wärmeübergangs sinkt mit steigender Reynoldszahl, sowohl im Maximalwert als auch im axialen Verlauf. Für gleiche Reynoldszahlen ist die Verbesserung des Wärmeübergangs bei der glatten Staboberfläche höher als bei den rauhen Oberflächen. Die beiden rauhen Oberflächen unterscheiden sich in der axialen Nusseltzahlverteilung nur geringfügig.

Die Abhängigkeit des maximalen Nusseltzahl-Verhältnisses von der Reynoldszahl ist in Abb. 11 halblogarithmisch dargestellt. Dabei wird unterschieden, ob der Maximalwert unter oder hinter dem Abstandshalter auftritt. Für die drei untersuchten Oberflächen ergibt sich die gleiche Abhängigkeit von der Reynoldszahl. Bis $Re \approx 4000$ steigen die relativen maximalen Nusseltzahlen an auf einen Maximalwert und fallen dann mit steigender Reynoldszahl ab. Für $Re > 4 \cdot 10^4$ stellt sich ein ungefähr konstanter Wert ein. Während die Unterschiede der maximalen Nusseltzahlen der beiden rauhen Oberflächen innerhalb der Meßgenauigkeit liegen, ist für die glatte Oberfläche eine deutlich höhere maximale Nusseltzahl festzustellen. Für die rauhen Oberflächen liegt der Maximalwert unterhalb von $Re = 9 \cdot 10^3$ hinter dem Abstandshalter. Für größere Reynoldszahlen stets unter dem Abstandshalter, bei der glatten Oberfläche liegt der Maximalwert stets hinter dem Abstandshalter. Für $Re < 4000$ stimmen die relativen maximalen Nusseltzahlen aller drei Oberflächen innerhalb der experimentellen Streubreite überein. Das bedeutet, daß sich die rauhen Oberflächen für $Re < 4000$ hinsichtlich der Wärmeübertragung wie glatte Oberflächen verhalten. Die sehr hohen Nusseltzahlverhältnisse bei der glatten Oberfläche und laminarer Strömung werden durch Naturkonvektion verursacht, wie in 6.2.1 diskutiert wird.

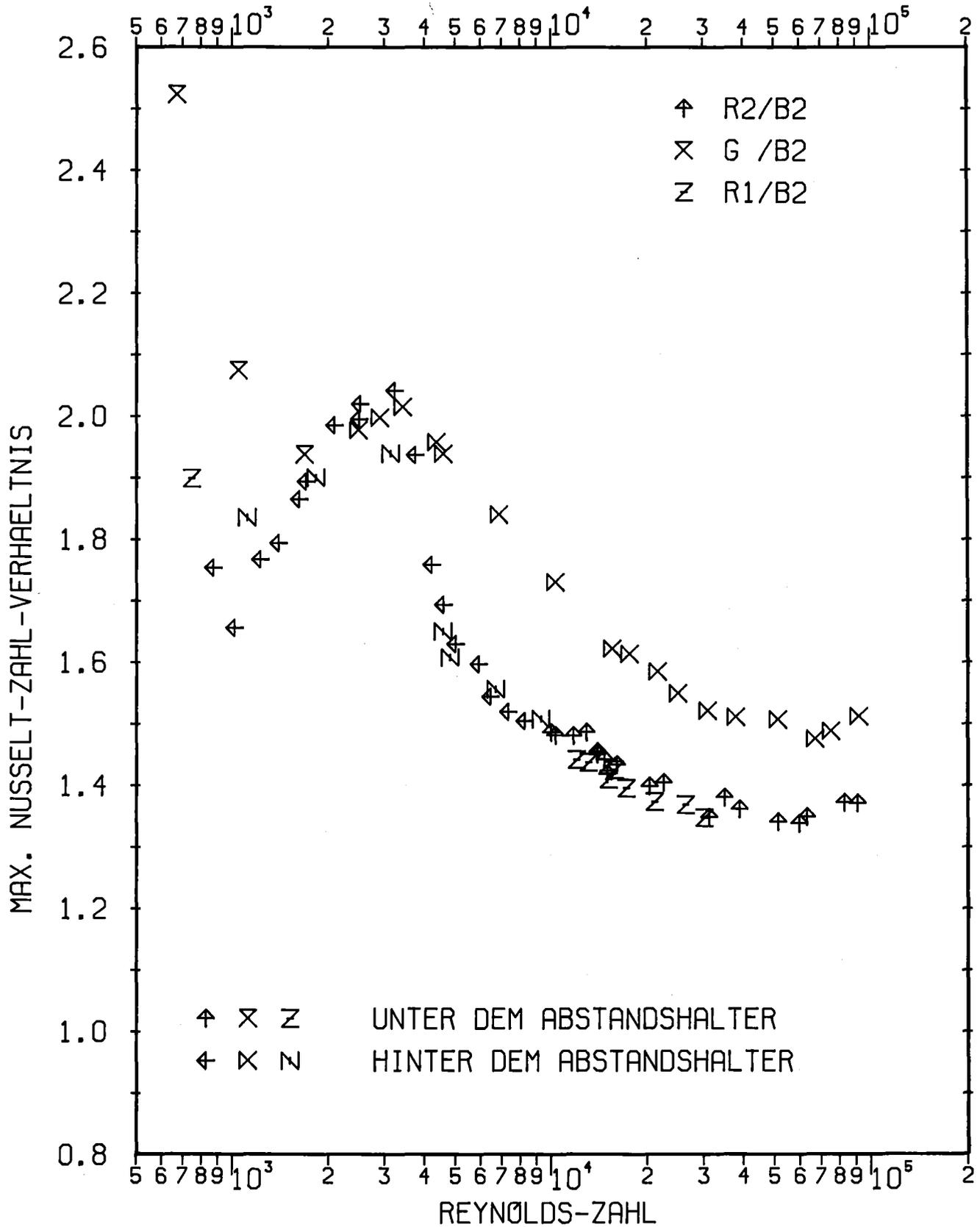


Abb.11 Einfluß der Reynoldszahl auf den maximalen Wärmeübergang im Abstandshalterbereich

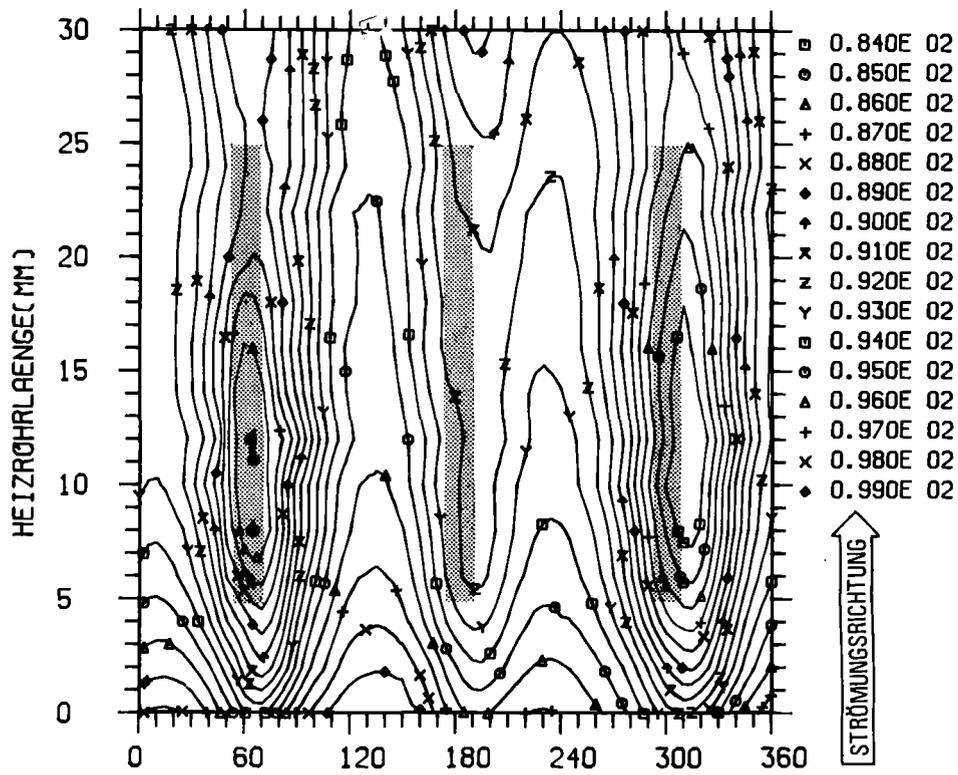
6.1.3 Bewertung der Meßergebnisse am oberen Abstandshalter

Die Messungen im Bereich des am Kanalende gelegenen Abstandshalters haben die typische Beeinflussung der Wärmeübertragung, die durch die Querschnittsversperrung am Abstandshalter verursacht wird, deutlich gemacht. Allerdings zeigen die Ergebnisse, daß es durch die Kürze der Teststrecke nach dem Abstandshalter nicht möglich ist, den gesamten Verlauf der Beeinflussung der Nusseltzahl durch den Abstandshalter zu erfassen. Deshalb wurden die Messungen mit dieser Querschnittsversperrung am mittleren Abstandshalter wiederholt, und die Messungen für die beiden übrigen Querschnittsversperrungen wurden nur am mittleren Abstandshalter durchgeführt. Wegen der geringen Unterschiede der Ergebnisse für die beiden rauhen Oberflächen erfolgten die weiteren Messungen nur mit der Rauigkeit R1 als rauher Oberfläche und mit der glatten Oberfläche. Am mittleren Abstandshalter konnten die Messungen im Bereich von 170 mm vor dem Abstandshalter bis 500 mm danach erfolgen, während am oberen Abstandshalter nur zwischen 70 mm vor bis 80 mm nach dem Abstandshalter gemessen werden konnte. Um den größeren axialen Bereich auszumessen, wurde die beheizte Länge auf $L_H=1540$ mm erhöht.

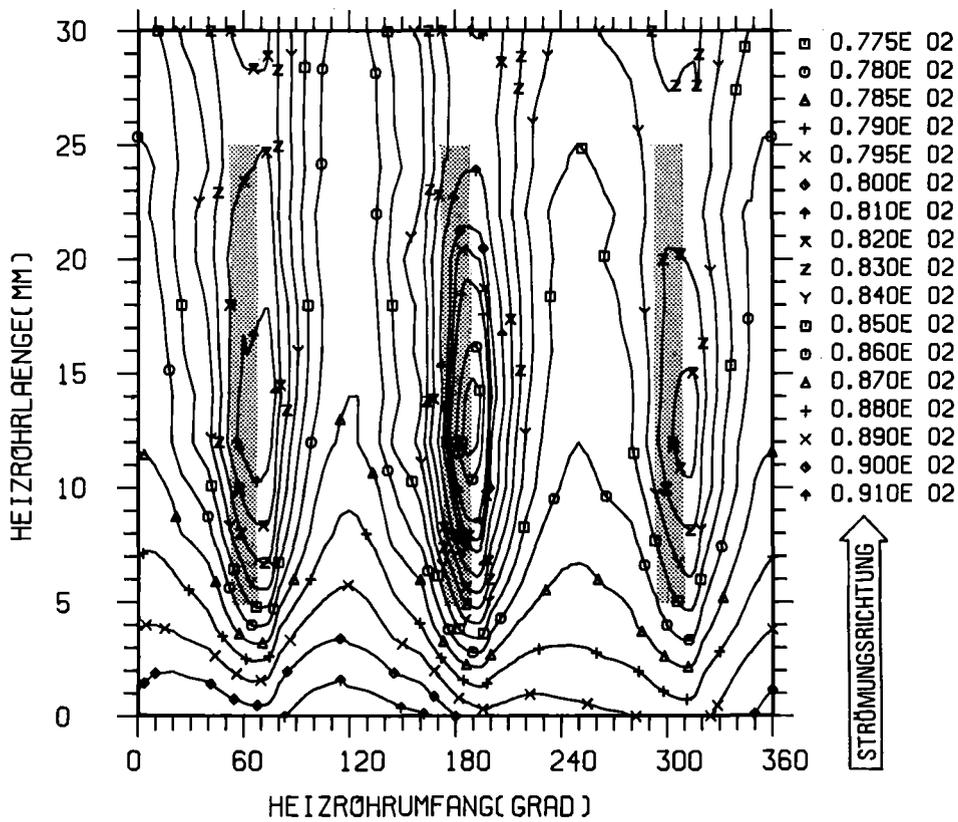
6.2 Messungen unter dem mittleren Abstandshalter

6.2.1 Vergleich der Messungen an den beiden Abstandshaltern

Zunächst werden die Temperaturverteilungen, die am mittleren und am oberen Abstandshalter gemessen wurden, miteinander verglichen. Die Höhenliniendarstellungen für die mittlere Querschnittsversperrung (B2) und das glatte Stabbündel zeigen einen ganz ähnlichen Verlauf der Isothermen (Abb.12). Kleine Unterschiede sind bedingt durch den unterschiedlichen Kontakt zwischen Distanzrippen und Heizstab, sowie durch unterschiedliche Wanddicken der Heizstäbe, wodurch eine unterschiedliche Wärmeerzeugung erfolgen kann /6/.



a) am oberen Abstandshalter



b) am unteren Abstandshalter

Abb.12 Die Wandtemperaturverteilungen für glatte Oberflächen,
 $Re=3.6 \cdot 10^4$, $\epsilon=0.302$

Die Nusseltzahlen, die aus den Messungen über den gesamten Reynoldszahlbereich berechnet wurden, sind in Abb.13 dargestellt. Für beide Abstandshalterpositionen sind die ungestörten Nusseltzahlen und die Maximalwerte der gestörten Nusseltzahlen angegeben. Dabei beziehen sich die offenen Symbole auf den mittleren, die ausgefüllten Symbole auf den oberen Abstandshalter. Die ungestörten Nusseltzahlen stimmen für beide Abstandshalterpositionen sehr gut überein für $Re \geq 2000$. Unterhalb dieser Reynoldszahl weichen die Meßwerte am oberen Abstandshalter nach oben ab. Verantwortlich dafür sind die Einflüsse von Naturkonvektion, die den Wärmeübergang verbessern. Bei den maximalen Nusseltzahlen zeigen sich Differenzen schon unterhalb $Re=10^4$, drastische Abweichungen ergeben sich allerdings auch erst für $Re < 2000$.

6.2.2 Vergleich der Temperaturverteilungen unter dem Abstandshalter für unterschiedliche Querschnittsversperrungen

Bei einer Vergrößerung der Querschnittsversperrung ändert sich die Temperaturverteilung unter dem Abstandshalter. Für kleine Querschnittsversperrungen liegt das Temperaturminimum direkt unter den Distanzrippen des Abstandshalters, sowohl bei glatter Oberfläche (Abb.12) als auch bei rauher Oberfläche (Abb.14). Für die größte gemessene Querschnittsversperrung ($\epsilon=0.348$) ergibt sich direkt unter den Distanzrippen bei rauher Oberfläche eine leichte Temperaturerhöhung, obwohl es insgesamt in Strömungsrichtung einen Temperaturabfall gibt (Abb.14). Der Grund für diese lokale Temperaturerhöhung ist darin zu sehen, daß mit Vergrößerung der Kontaktstelle zwischen Distanzrippen und Heizrohr die Wärmeabfuhr direkt unter der Kontaktstelle bei rauher Oberfläche behindert ist und die Temperatur daher leicht ansteigt.

Diesen Effekt kann man sehr gut sehen, wenn die gemessene Temperaturverteilung am Umfang für eine bestimmte axiale Position dargestellt wird. Abb.15 zeigt zwei Beispiele für verschiedene Querschnittsversperrungen und rauher Oberfläche.

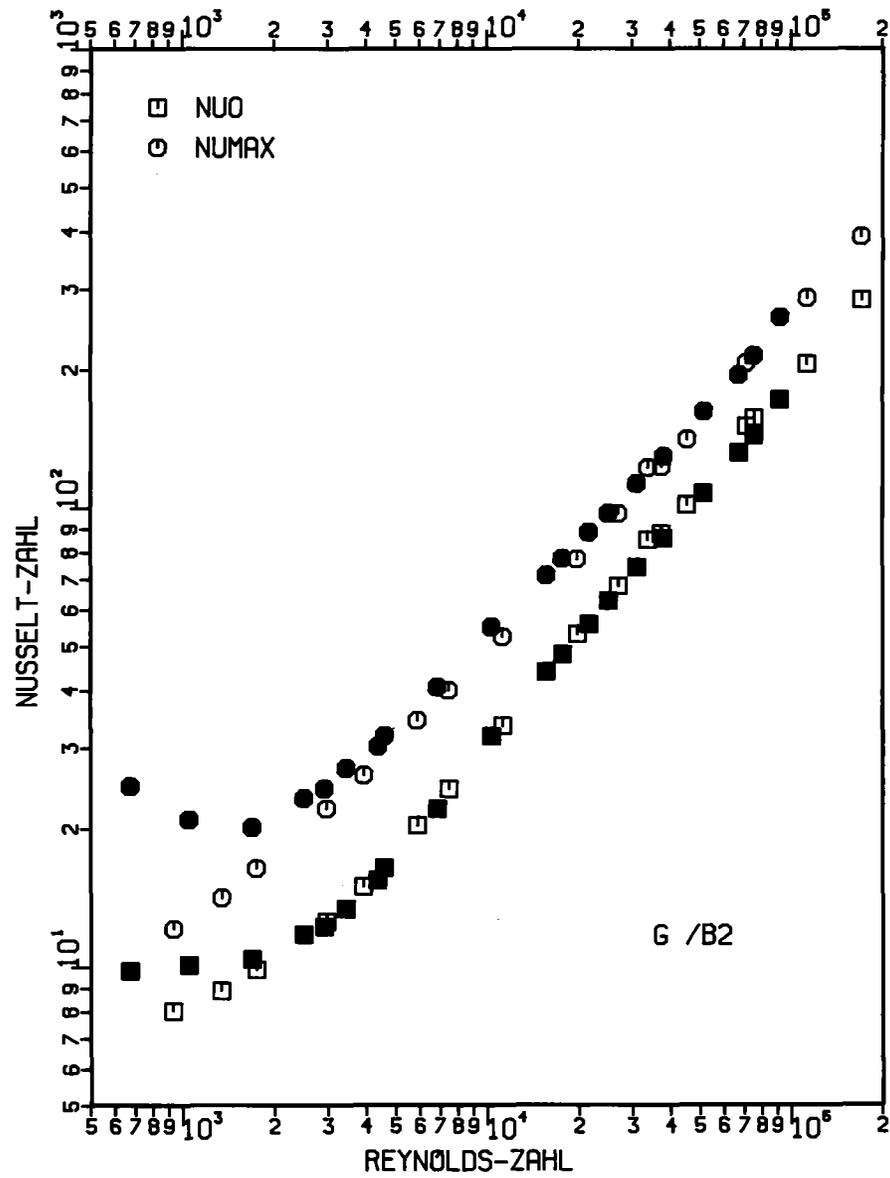
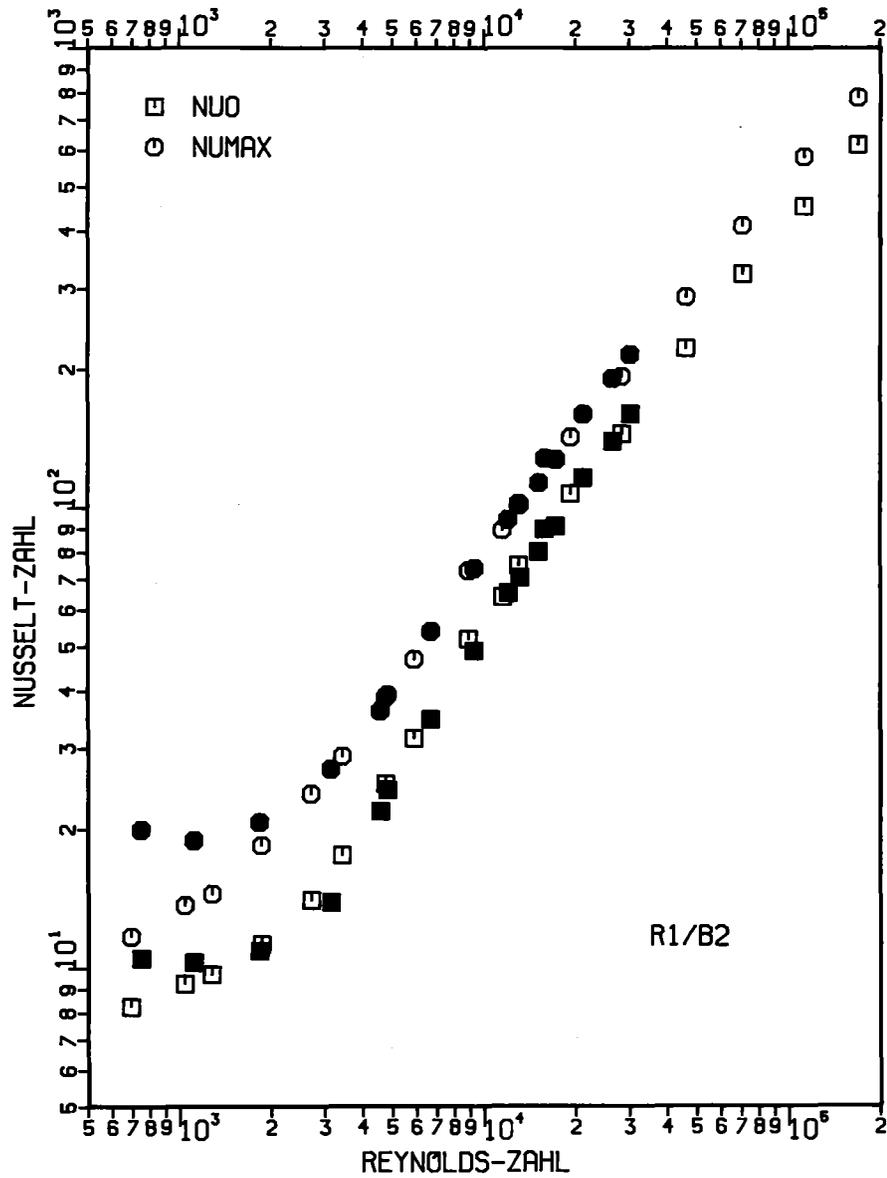


Abb.13 Vergleich des Wärmeübergangs an den zwei Abstandshalterpositionen (offene Symbole: am unteren Abstandshalter, geschlossene Symbole: am oberen Abstandshalter)

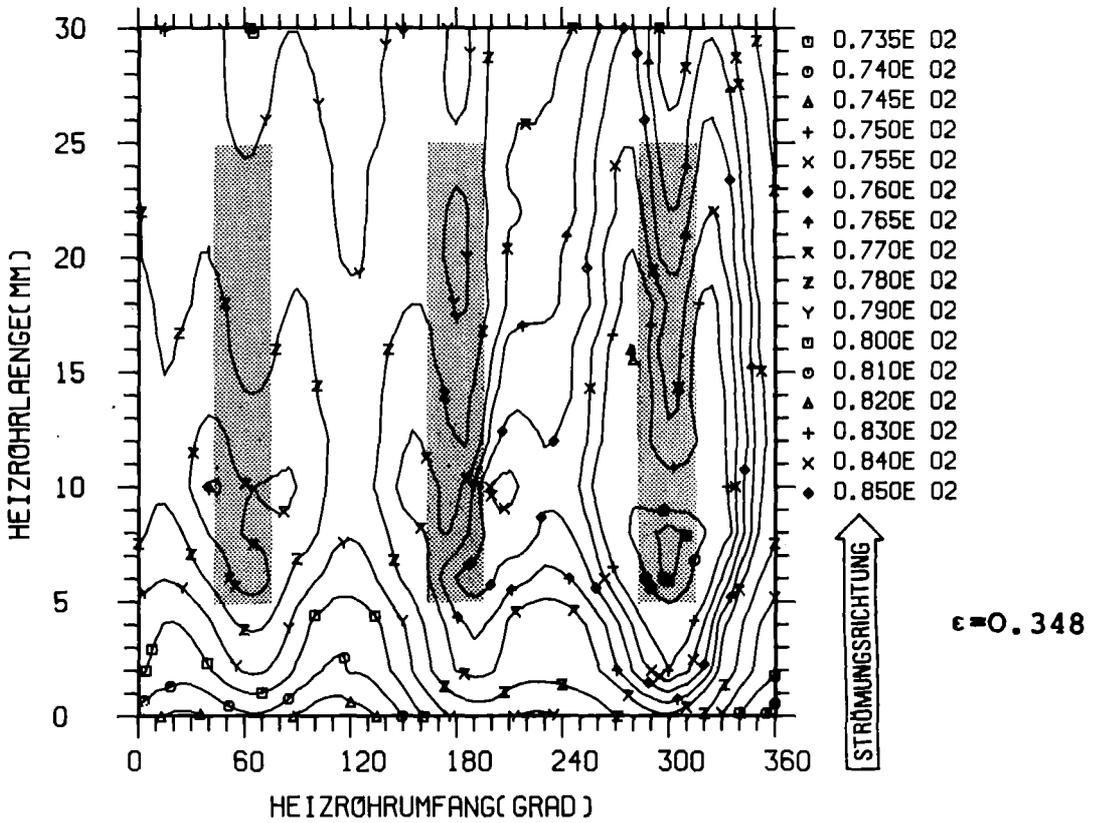
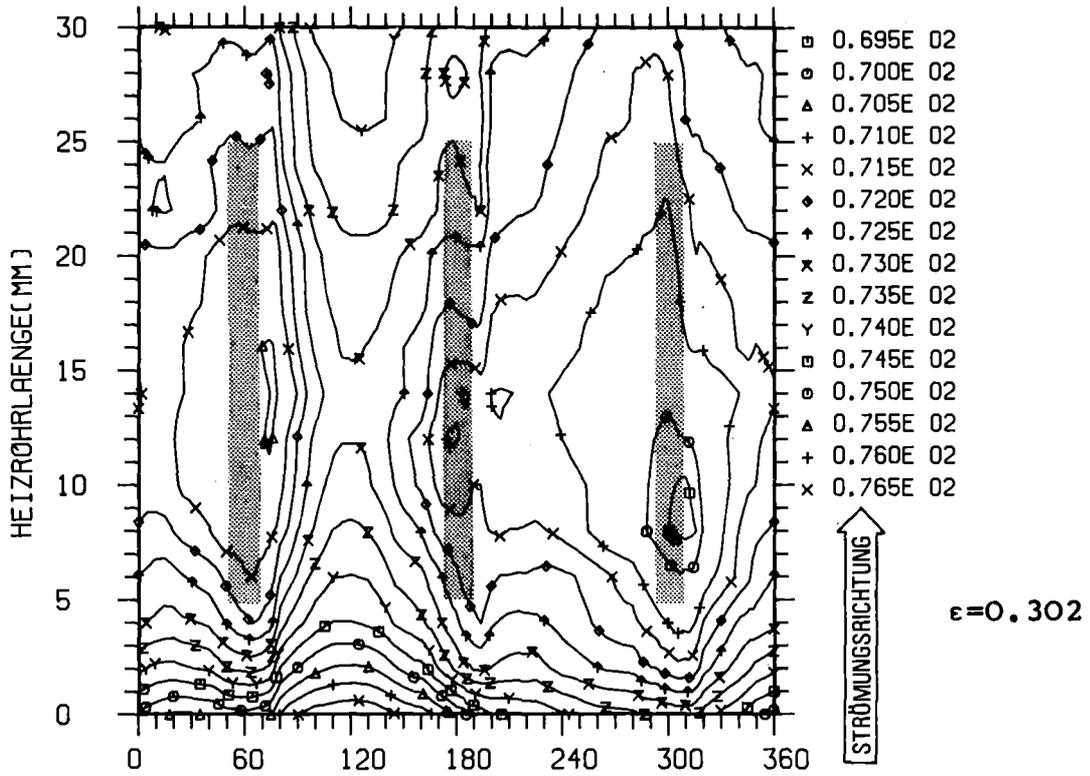


Abb.14 Einfluß der Querschnittsversperrung auf die Temperaturverteilung unter dem Abstandshalter (rauhe Oberfläche, $Re=3.7 \cdot 10^4$)

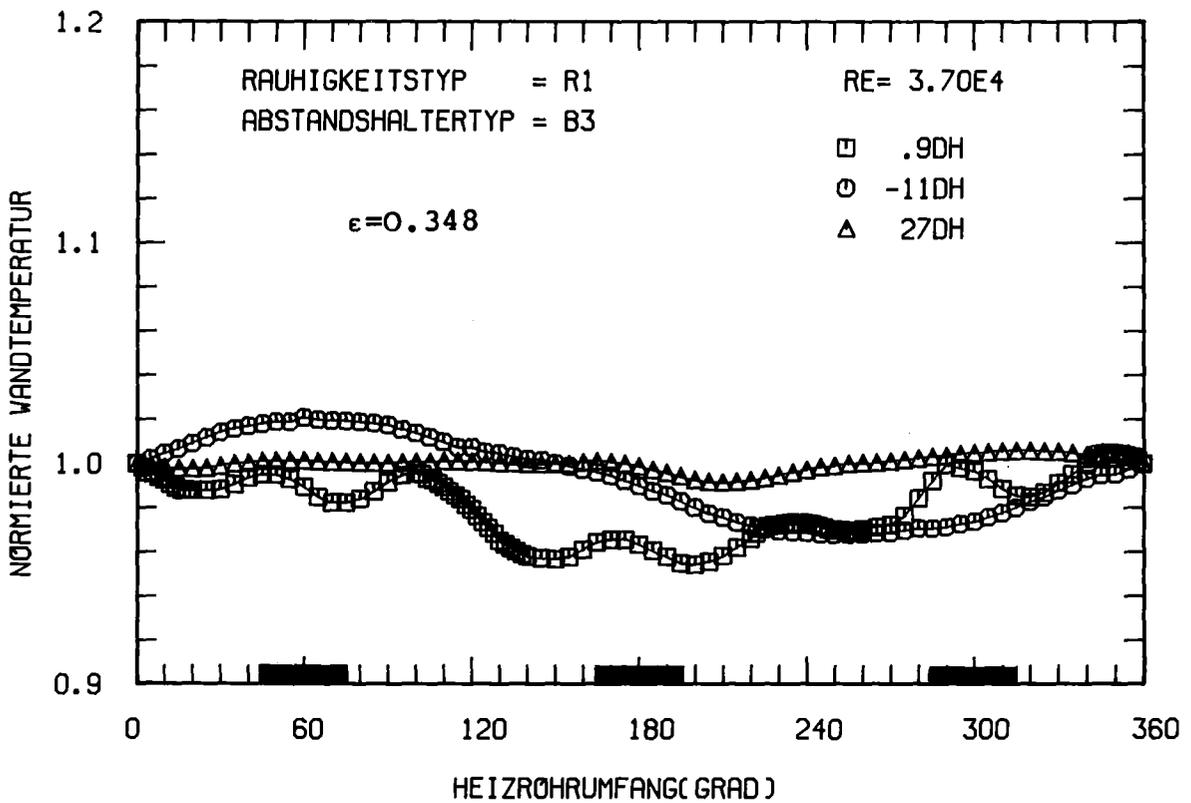
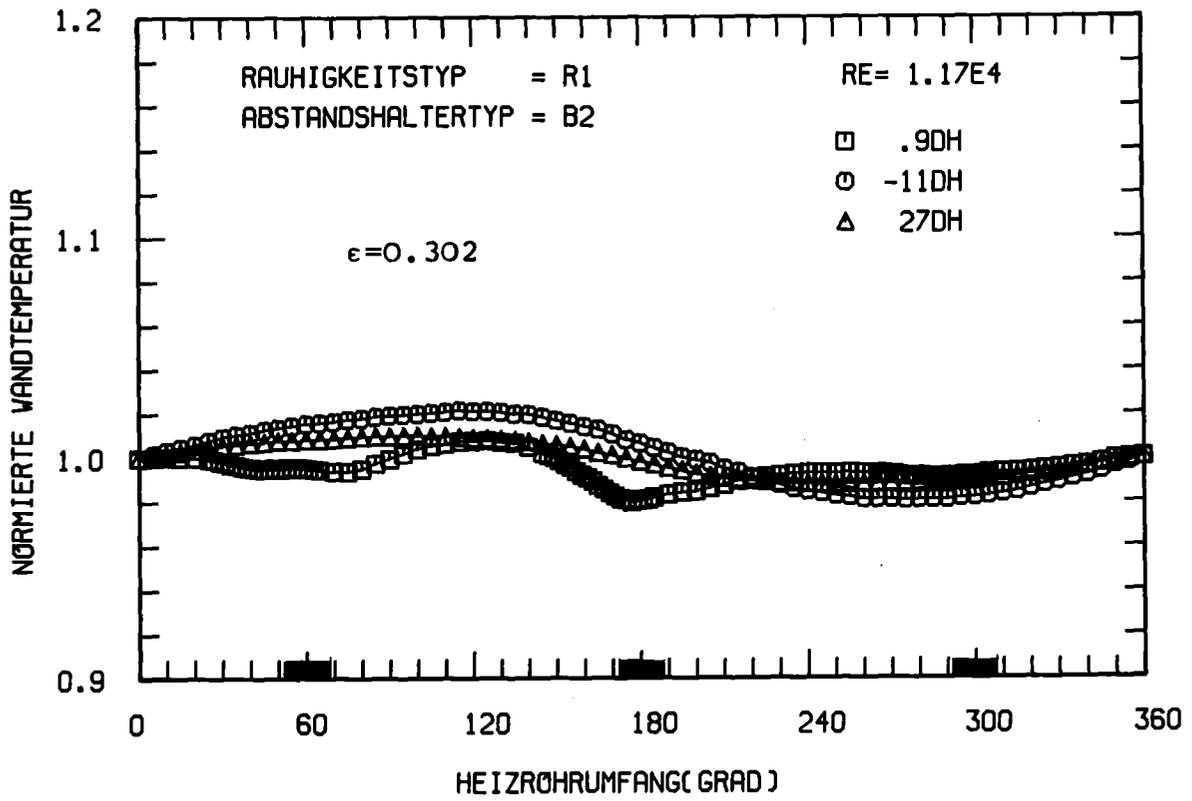


Abb.15 Relative Temperaturverteilungen am Umfang des Heizrohres für verschiedene axiale Positionen

Die Temperaturverteilung am Umfang wird auf die Temperatur an der Position 0 Grad normiert. Während bei der geringeren Querschnittsversperrung (B2) die Temperaturen an den Distanzrippen fallen, steigen sie unter den Distanzrippen bei höherer Querschnittsversperrung an. Die Unterschiede in den Temperaturen am Umfang sind jedoch klein.

In Abb.15 ist die normierte Temperaturverteilung weit vor und weit hinter dem Abstandshalter ebenfalls eingetragen. Man sieht, daß die Temperaturverteilung am Umfang vor dem Abstandshalter durch die Form der Kanalwand beeinflusst ist. Während sich bei kleinerer Querschnittsversperrung das Temperaturprofil $27 D_h$ hinter dem Abstandshalter schon fast wieder ausgebildet hat, zeigt die Temperaturverteilung für die größte Querschnittsversperrung, daß die Ausbildung des Temperaturprofils $27 D_h$ hinter dem Abstandshalter noch nicht abgeschlossen ist, da in diesem Fall die Störung durch den Abstandshalter größer ist. Bei glatter Oberfläche und der größten gemessenen Querschnittsversperrung liegt das Temperaturminimum weiterhin unter den Distanzrippen. In diesem Falle zeigen die Temperaturverteilungen ausgeprägte Minima unmittelbar hinter den Distanzrippen, an den Positionen, wo die abgelöste Strömung wieder auf die Wand trifft (Abb.16).

6.2.3 Festlegung der Position zur Messung der axialen Temperaturverteilung

Wie unter 6.1.2 erwähnt, wurde die 0-Grad Position bei den Messungen (Abb.2) zur Messung der axialen Temperaturverteilungen festgelegt. Diese Position liegt zwischen zwei Distanzrippen, und der Einfluß des Abstandshalters auf die Temperaturverteilung ist an dieser Position im allgemeinen schwächer als für eine Position direkt unter den Distanzrippen. Man erhält also konservative Ergebnisse. Da es noch zwei weitere Positionen zwischen zwei Distanzrippen gibt und die Kanalgeometrie an diesen Positionen etwas anders aussieht, wurde geprüft, ob die Festlegung auf die 0-Grad Position die Ergebnisse beeinflusst. Abb.17 zeigt zwei gemessene axiale Nusseltzahlverteilungen bei verschiedenen

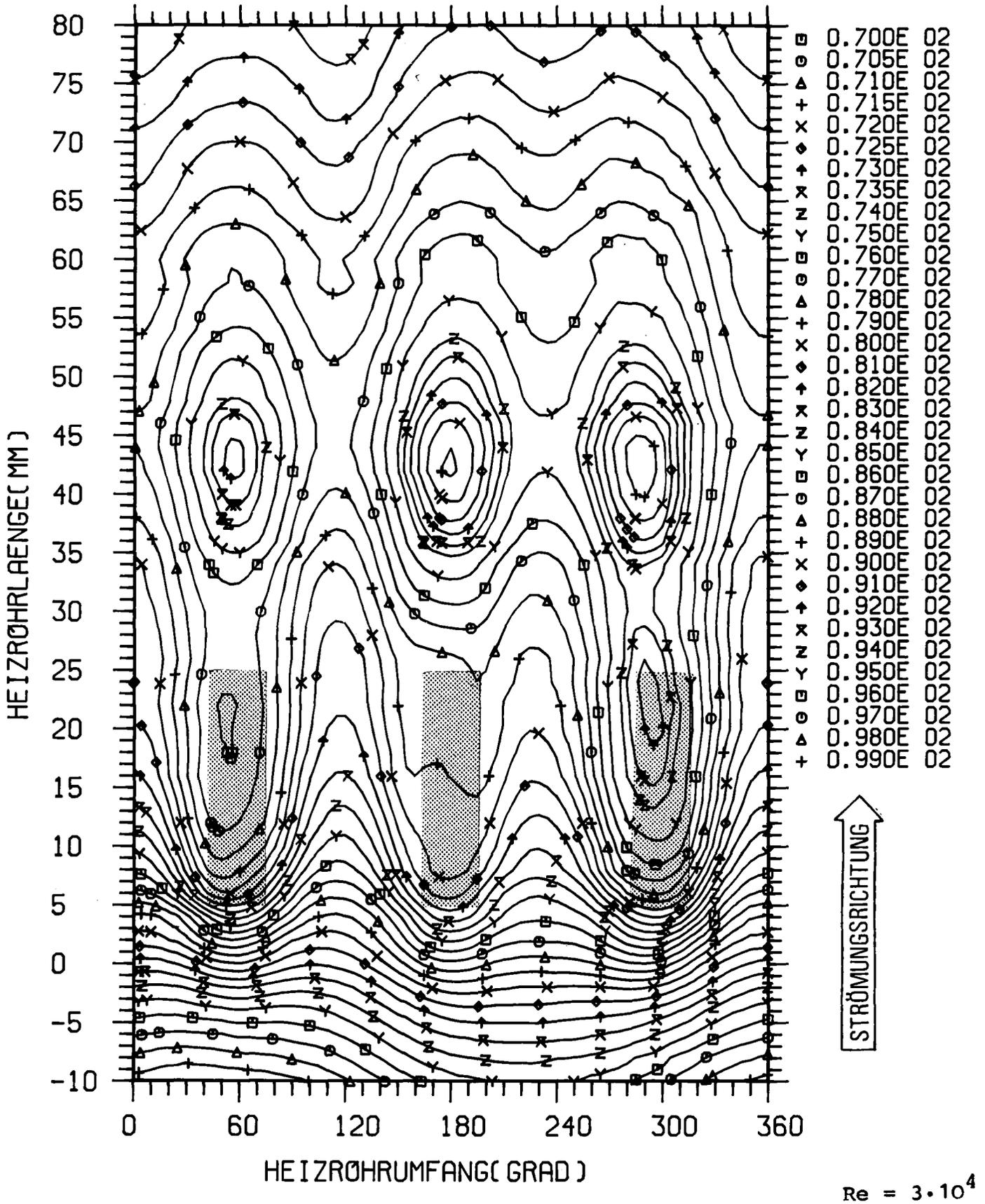


Abb.16 Isothermen für eine glatte Oberfläche mit 34.8% Querschnittsversperrung

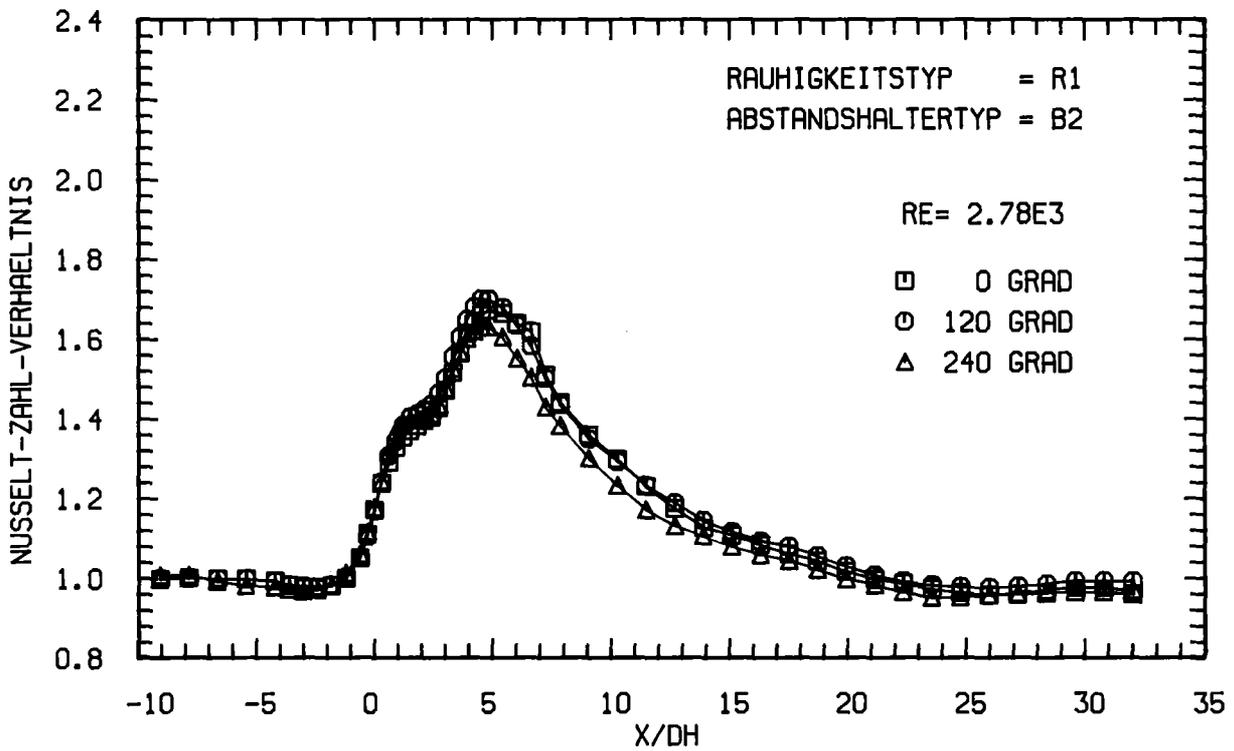
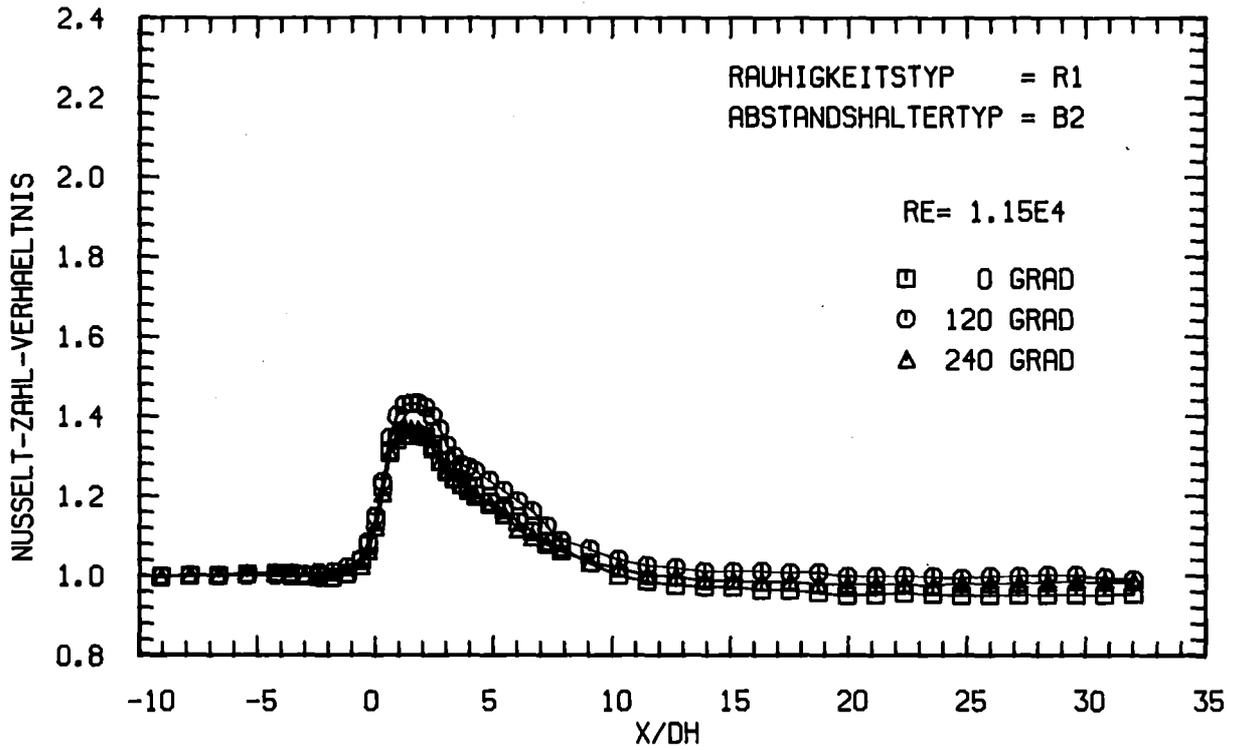


Abb.17 Axialer Verlauf des Nusseltzahlverhältnisses an verschiedenen Umfangspositionen

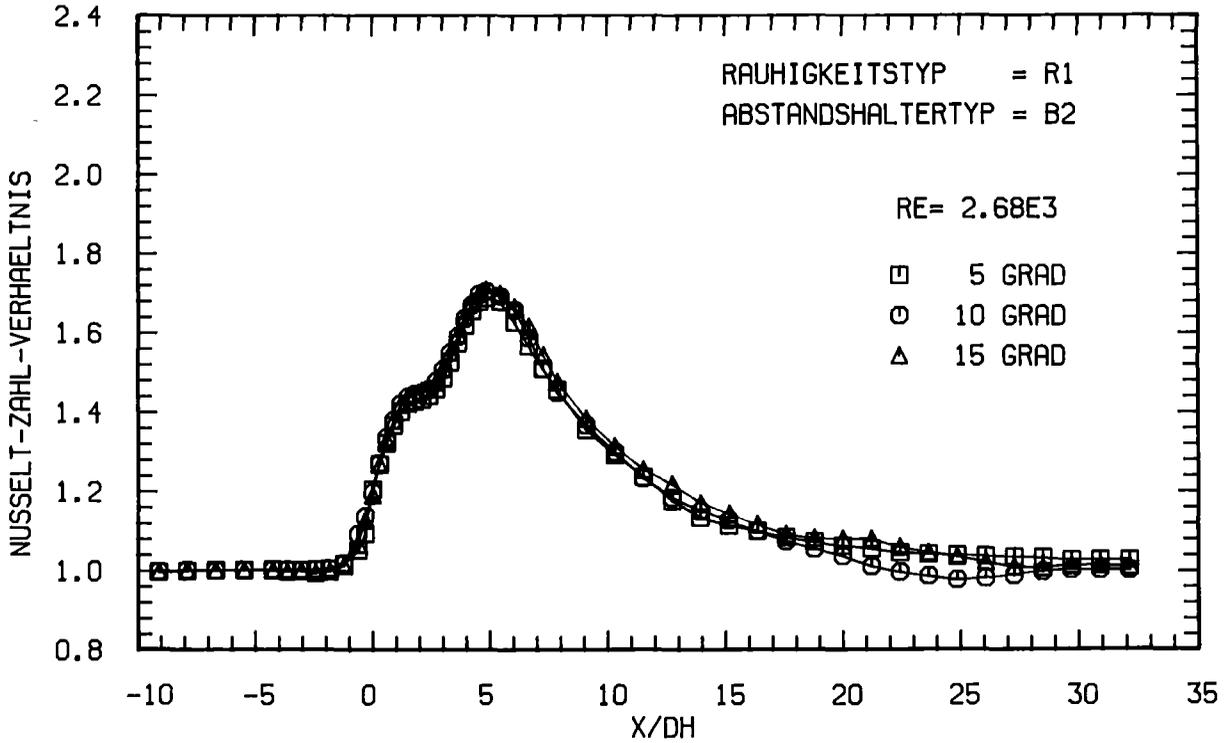
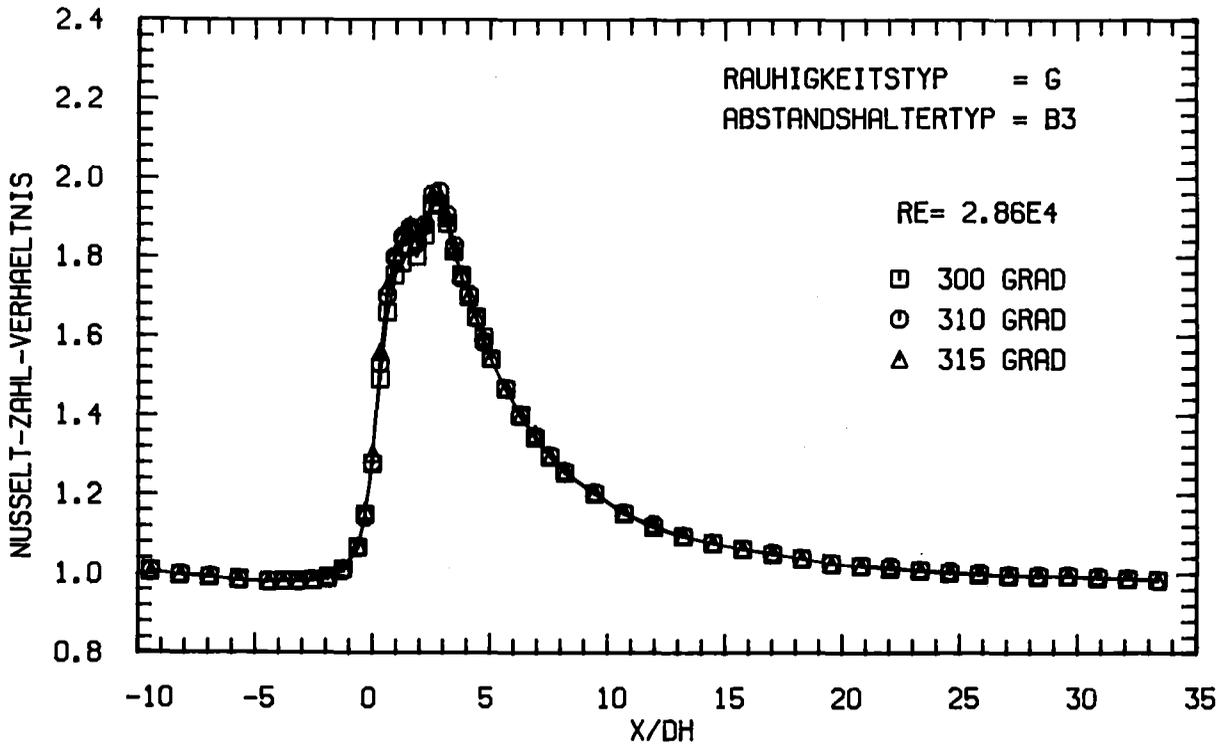


Abb.18 Axialer Verlauf des Nusseltzahlverhältnisses an verschiedenen Umfangspositionen

Reynoldszahlen für die drei Positionen normiert auf die ungestörte Nusseltzahl an der jeweiligen Meßposition. Man sieht, daß die Unterschiede in der Nusseltzahlverteilung gering sind. Die Nusseltzahlen für die Position 240 Grad sind etwas kleiner bei $Re=2.78 \times 10^3$, diese Position liegt in einem Zentralkanal.

Außerdem wurde untersucht, ob durch eine Änderung der Umfangsposition zwischen 5 und 15 Grad die Ergebnisse beeinflusst werden. Die normierten Nusseltzahlen sind in Abb.18 dargestellt, auch hier kann man nur geringe Variationen im axialen Verlauf feststellen. Das gilt auch für die Position unter den Distanzrippen für eine Variation zwischen 300,310 und 315 Grad.

6.2.4 Ungestörte Nusseltzahlen

Die ungestörten Nusseltzahlen vor dem Abstandshalter sind in Abb.19 über der Reynoldszahl dargestellt. Die Meßergebnisse bei den verschiedenen Abstandshaltern stimmen gut überein. Unterhalb einer Reynoldszahl von etwa $2 \cdot 10^4$ gibt es bei rauhen Oberflächen einen Übergang zu hydraulisch glattem Verhalten. Für $Re < 3000$ verhält sich die rauhe Oberfläche hydraulisch glatt. Die Nusseltzahlen der rauhen Oberfläche sind bei gleicher Reynoldszahl um den Faktor 2.2 höher als die Nusseltzahlen der glatten Oberfläche.

6.2.5 Vergleich der gemessenen axialen Nusseltzahlverteilungen

Der axiale Verlauf der normierten Nusseltzahlen ist in Abb.20 für die glatte Staboberfläche und die drei untersuchten Querschnittsversperrungen für ausgewählte Reynoldszahlen $Re > 3000$ über dem dimensionslosen Abstand von der Vorderkante des Abstandshalters dargestellt. In den Abbildungen wurden die Meßwerte linear verbunden, die Symbole dienen nur zur Unterscheidung der verschiedenen Reynoldszahlen. Es ist offensichtlich, daß die Verbesserung der Wärmeabfuhr durch den Abstandshalter mit der Querschnittsversperrung steigt. Gleichzeitig steigt auch die axiale Ausdehnung der gestörten Nusseltzahlen mit der Querschnittsversperrung. Die Gründe für das Ansteigen der Nusseltzahlen mit der Querschnittsversperrung wurde bereits unter 6.1.2 diskutiert. Es ist selbstverständlich, daß mit der Größe

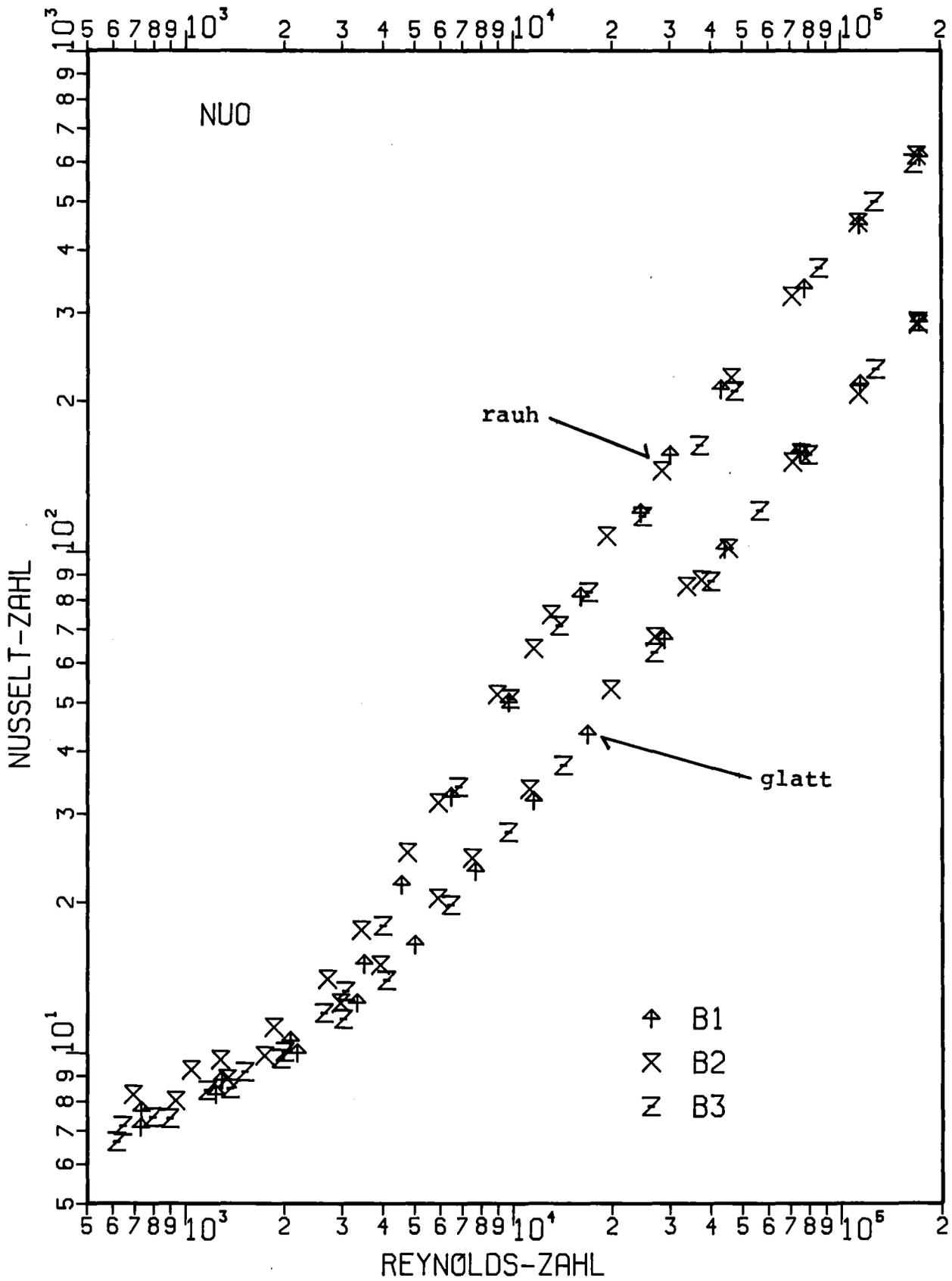


Abb.19 Ungestörte Nusseltzahl (Nu_0) als Funktion der Reynoldszahl für raue und glatte Oberfläche

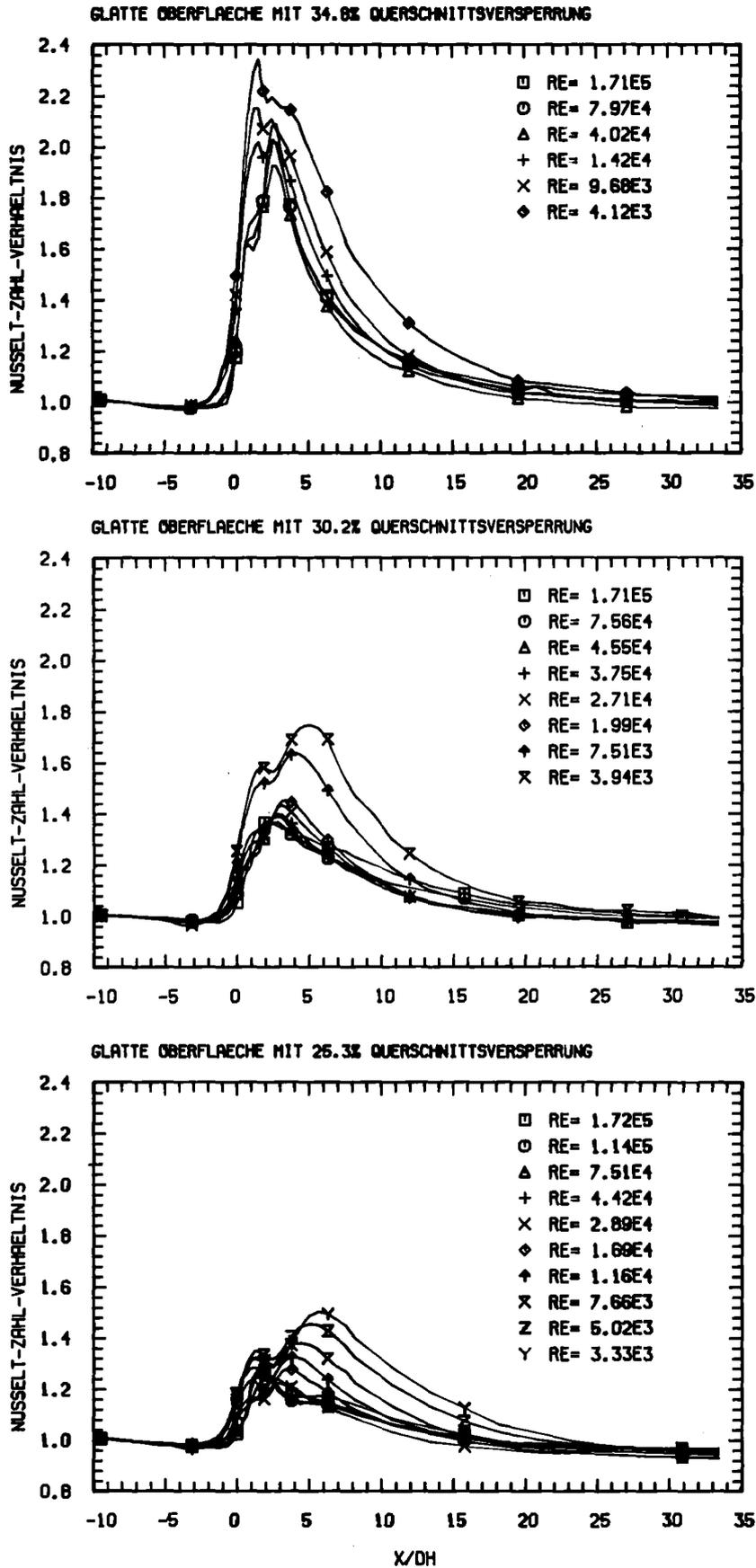


Abb.20 Einfluß der Querschnittsversperrung auf den Wärmeübergang bei verschiedenen Reynoldszahlen

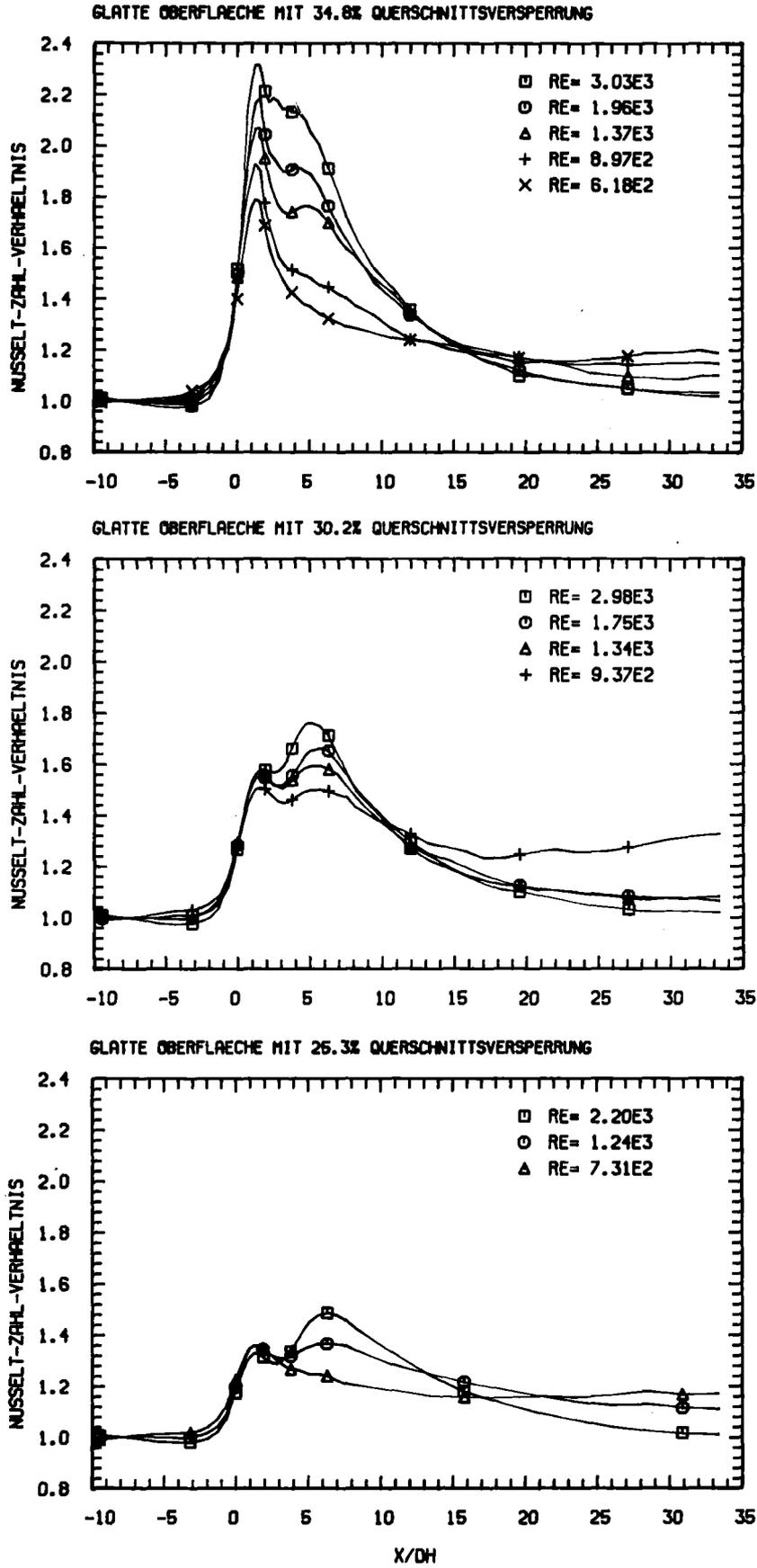


Abb.21 Einfluß der Querschnittsversperrung auf den Wärmeübergang bei verschiedenen Reynoldszahlen

der Störung auch die durch die Störung beeinflusste Länge hinter dem Abstandshalter wächst. Zur Abhängigkeit der Nusseltzahl-Verteilungen von der Reynoldszahl kann man für alle Versperrungen feststellen, daß mit steigender Reynoldszahl ($Re > 3000$) die Verbesserung des Wärmeübergangs sinkt und ebenso die Ausdehnung der Verbesserung in axialer Richtung. Für $Re > 4 \cdot 10^4$ sind die Unterschiede im axialen Nusseltzahlverlauf nur noch gering. Es zeigt sich eine Tendenz für die Untersuchungen bei glatten Staboberflächen, daß die Nusseltzahlverhältnisse für hohe Reynoldszahlen weit hinter dem Abstandshalter auf Werte unter 1.0 sinken. Diese Beobachtung kann durch die Massenumverteilung zwischen den Unterkanälen erklärt werden, die durch den Abstandshalter verursacht wird und die sich nach 33 hydraulischen Durchmessern offensichtlich noch nicht völlig wieder zurückgebildet hat. Ähnliche Ergebnisse wurden von Trippe /10/ bei Untersuchungen der Abstandshalterwirkung auf die Geschwindigkeitsverteilung in Unterkanälen von Stabbündeln berichtet. Dadurch daß die Gastemperaturen zur Ermittlung der Nusseltzahlen mit der Annahme völliger Mischung der Temperaturen berechnet werden, macht sich ein Einfluß dieser Vereinfachung in den Nusseltzahlen im Falle nicht voll ausgebildeter Strömungsverteilung hinter dem Abstandshalter stärker bemerkbar.

Bei kleinen Reynoldszahlen ($Re < 3000$) sinkt die Verbesserung der Nusseltzahl mit sinkender Reynoldszahl (Abb.21). Für $Re < 1000$ zeigt sich, daß die relativen Nusseltzahlen nicht auf 1.0 hinter dem Abstandshalter zurückgehen. Dieser Effekt muß auf Einflüsse durch Naturkonvektion zurückgeführt werden. Auch für die Messungen bei kleinen Reynoldszahlen, die im Übergangsbereich von turbulenter zu laminarer Strömung und bei laminarer Strömung liegen, steigt die Verbesserung des Wärmeübergangs mit steigendem Versperrungsverhältnis.

Für eine raue Staboberfläche (Abb.22) und $Re > 3000$ steigt die Verbesserung des Wärmeübergangs ebenfalls mit steigender Querschnittsversperrung an. Allerdings ist bei gleicher Querschnittsversperrung und Reynoldszahl die Verbesserung stets kleiner als

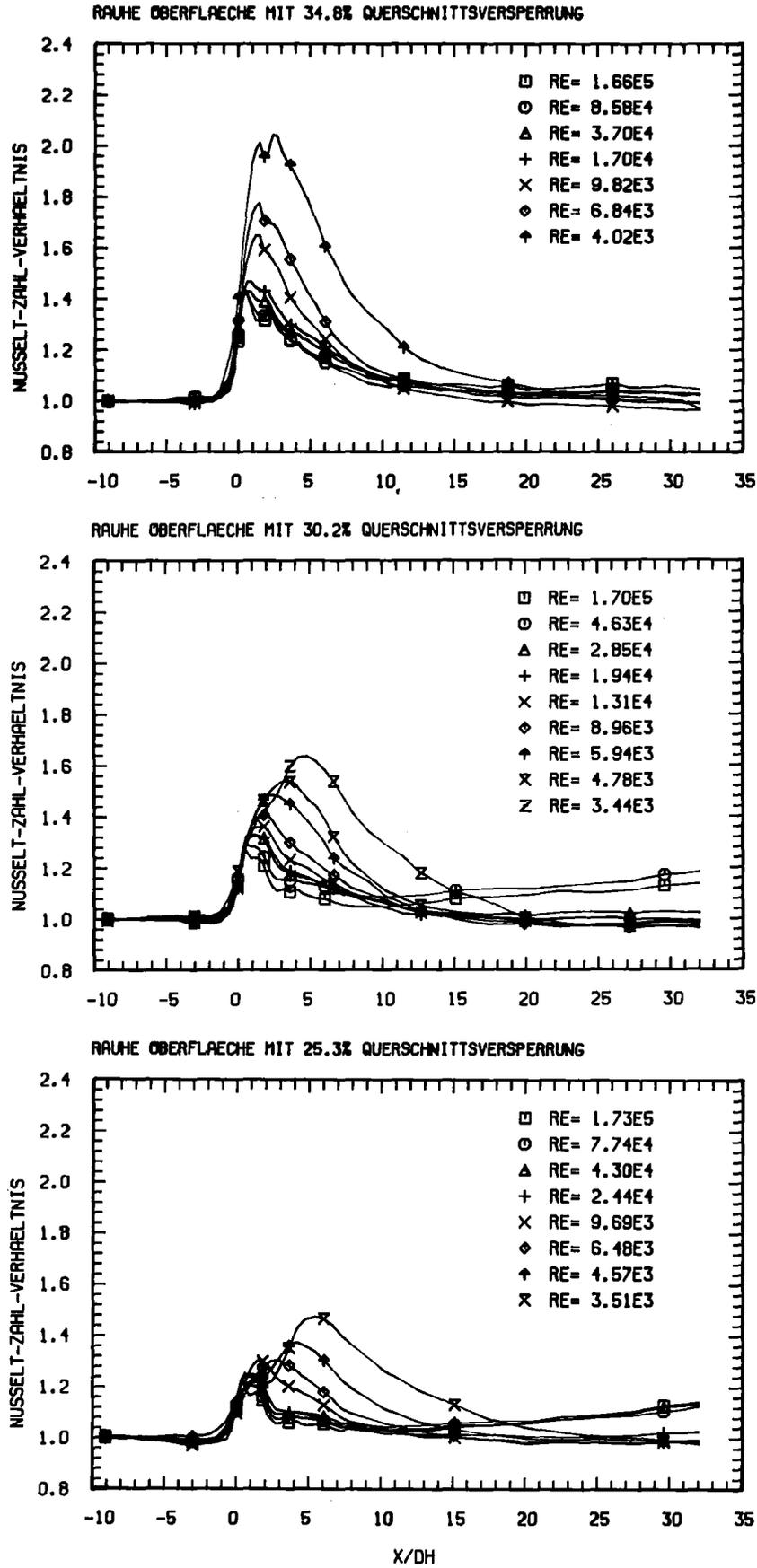


Abb.22 Einfluß der Querschnittsversperrung auf den Wärmeübergang bei verschiedenen Reynoldszahlen

bei einer glatten Staboberfläche, wie für glatte Staboberflächen sinkt die Verbesserung des Wärmeübergangs mit steigender Reynoldszahl, gleichzeitig sinkt auch die axiale Länge hinter dem Abstandshalter, die durch die Versperrung beeinflusst wird. Die axiale Ausdehnung der gestörten Nusseltzahlen ist für eine raue Staboberfläche ebenfalls kürzer als für eine glatte Oberfläche. Für $Re > 2 \cdot 10^4$ sind die Unterschiede in den gemessenen axialen Verläufen gering. Bei höheren Reynoldszahlen gehen die Nusseltzahlverhältnisse hinter dem Abstandshalter nicht wieder auf den Wert 1.0 wie vor dem Abstandshalter zurück. Dieser Effekt kann auf die Massenstromumverteilung zwischen den Unterkämen zurückgeführt werden, die durch den Abstandshalter verursacht wird. Im Falle rauher Staboberfläche wird mehr Masse in Richtung glatter Kanalwand verdrängt, wodurch die Wandtemperaturen absinken (s. Abb. 15). Da die Gastemperatur konstant über den gesamten Strömungsquerschnitt angenommen wird, ist die Temperaturdifferenz zwischen Wand und Gas zu klein und die Nusseltzahlen sind zu groß berechnet.

Bei kleinen Reynoldszahlen ($Re < 3000$) sind die axialen Verläufe der Nusseltzahlen bei rauher Staboberfläche praktisch gleich denen bei glatter Staboberfläche (Abb. 23). Das gilt sowohl für die Größe der Verbesserung des Wärmeübergangs als auch für die axiale Erstreckung des Einflusses. Die Erklärung für dieses Verhalten ist, daß die raue Oberfläche bei diesen Reynoldszahlen hydraulisch glatt ist.

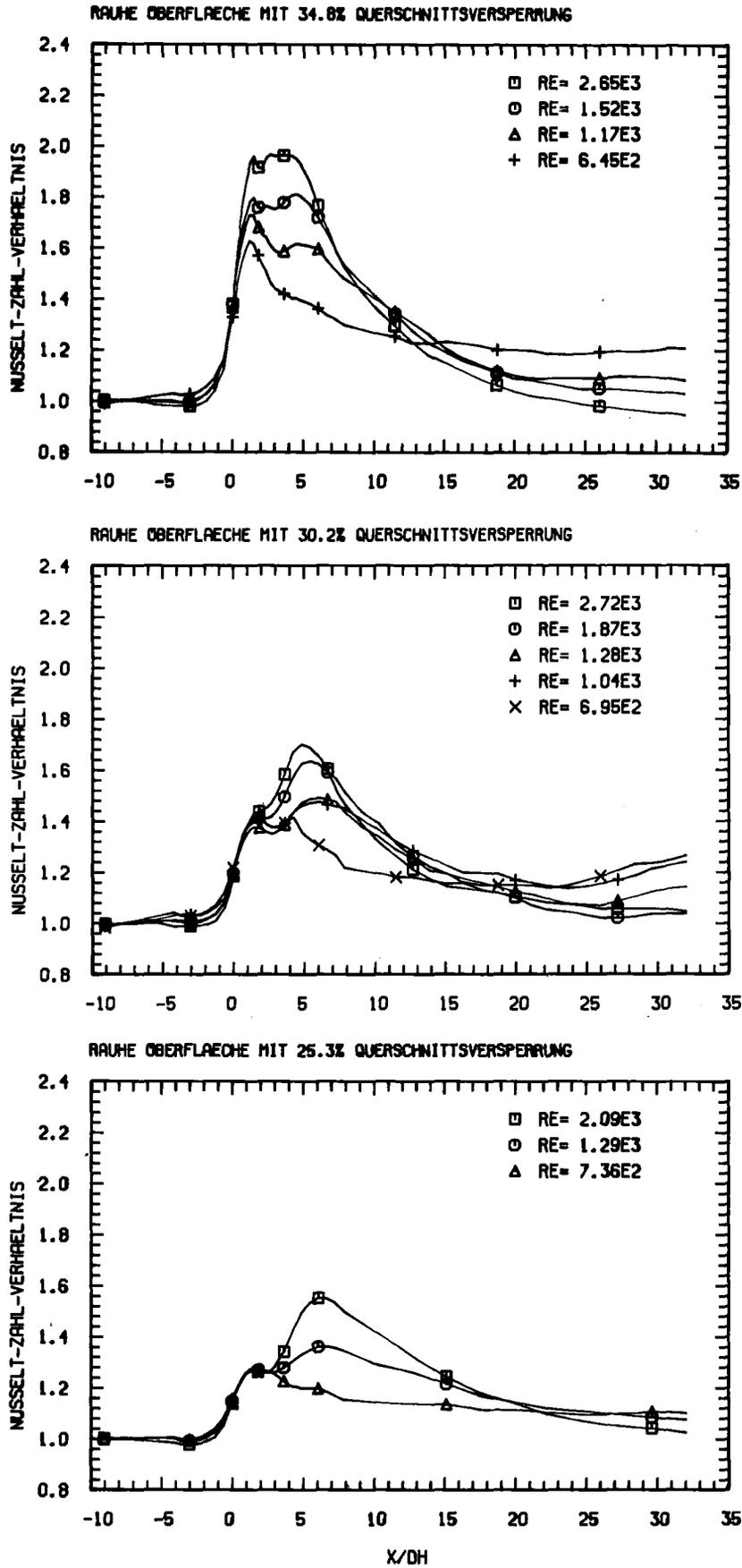


Abb.23 Einfluß der Querschnittsversperrung auf den Wärmeübergang bei verschiedenen Reynoldszahlen

6.2.6 Vergleich der maximalen Nusseltzahlen

Die gemessenen maximalen Nusseltzahlen bezogen auf die ungestörte Nusseltzahl sind für die glatte Staboberfläche in Abb. 24 über der Reynoldszahl dargestellt. Die Abhängigkeit von der Reynoldszahl ist für alle Querschnittsversperrungen ähnlich, wenn man davon absieht, daß bei der größten Versperrung die maximalen Nusseltzahl-Verhältnisse mit höheren Reynoldszahlen wieder ansteigen. Die axialen Positionen, an denen das Maximum auftritt, liegen für den größten Teil des ausgemessenen Reynoldszahlbereichs hinter dem Abstandshalter. Nur für $Re < 1000$ und bei der größten Versperrung für $Re < 2 \cdot 10^4$ liegen die Maxima der Nusseltzahlen unter dem Abstandshalter. Bei allen Querschnittsversperrungen ergibt sich die größte Verbesserung des Wärmeübergangs für $Re=3000-4000$. Das abweichende Verhalten des Nusseltzahlverlaufs für die größte Querschnittsversperrung kann nicht durch Meßunsicherheiten erklärt werden, da Nachmessungen zum gleichen Ergebnis führten. Es zeigt sich auch, daß für $Re < 3000$ die maximalen Nusseltzahlen für glatte und raue Oberflächen (Abb. 25) bei gleicher Querschnittsversperrung übereinstimmen, außer für die größte Versperrung, für die die Nusseltzahlen bei glatter Oberfläche höher sind. Die Ursache für die Abweichungen stellte sich beim Umbau der Teststrecke heraus: Der Abstandshalter war spiegelverkehrt eingebaut, so daß an der Referenzposition (0 Grad zwischen zwei Distanzrippen) bei den Versuchen mit der größten Querschnittsversperrung und glatter Oberfläche direkt unter den Distanzrippen gemessen wurde. Die Experimente konnten nicht wiederholt werden. Allerdings ist der Unterschied der Meßergebnisse für die Positionen unter und zwischen den Distanzrippen für den axialen Verlauf der Nusseltzahlen nicht erheblich. Er wirkt sich im wesentlichen nur auf die maximale Nusseltzahl aus. Dies erkennt man aus zwei Meßreihen, für die sowohl Ergebnisse für die Position zwischen den Distanzrippen als auch unter den Distanzrippen vorliegen. Abb. 26 zeigt diese Ergebnisse für eine niedrige und eine höhere Reynoldszahl. Für die kleine Reynoldszahl ergibt sich unter den Distanzrippen

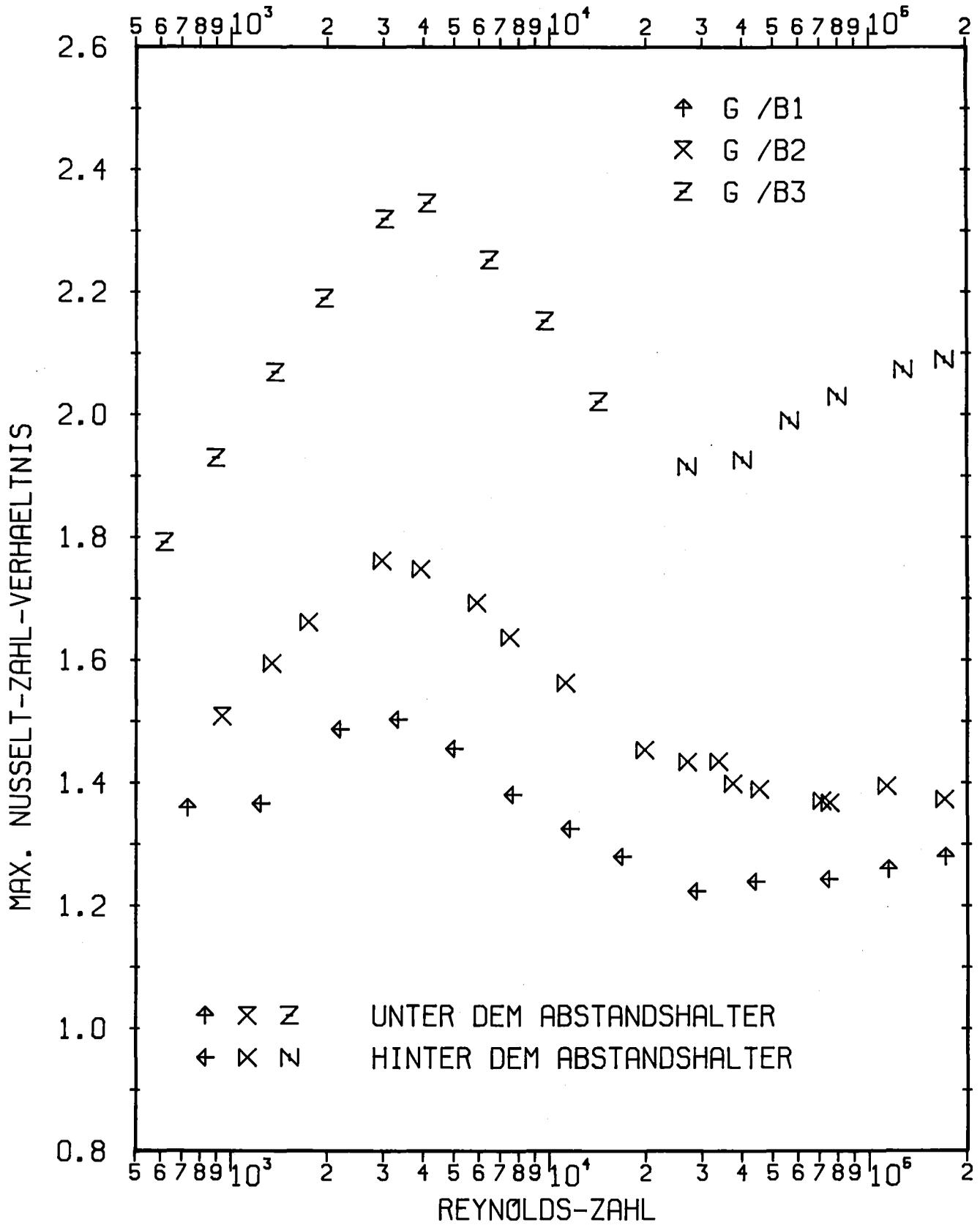


Abb.24 Einfluß der Reynoldszahl und Querschnittsversperrung auf den maximalen Wärmeübergang im Abstandshalterbereich

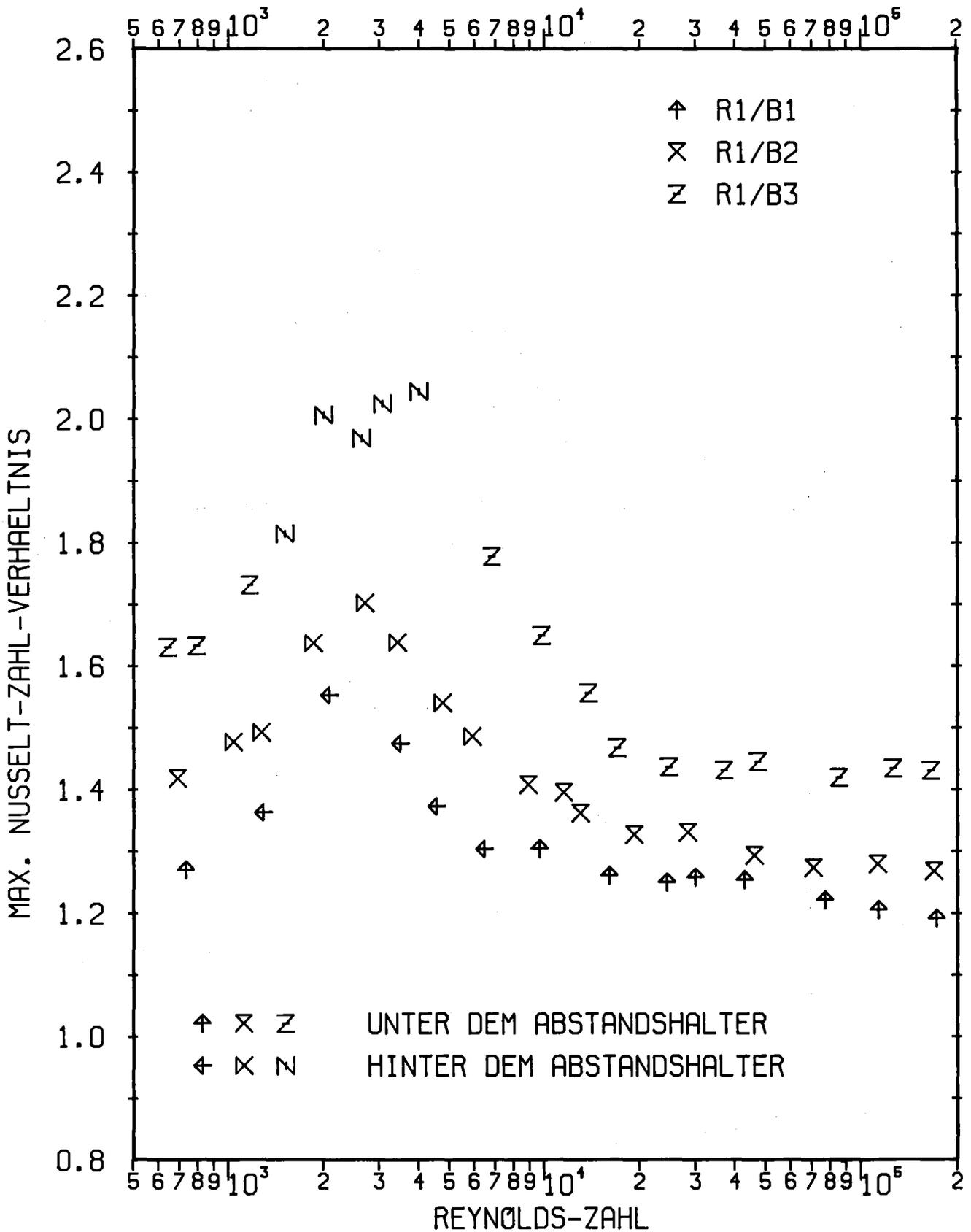


Abb.25 Einfluß der Reynoldszahl und Querschnittsversperrung auf auf den maximalen Wärmeübergang im Abstandshalterbereich

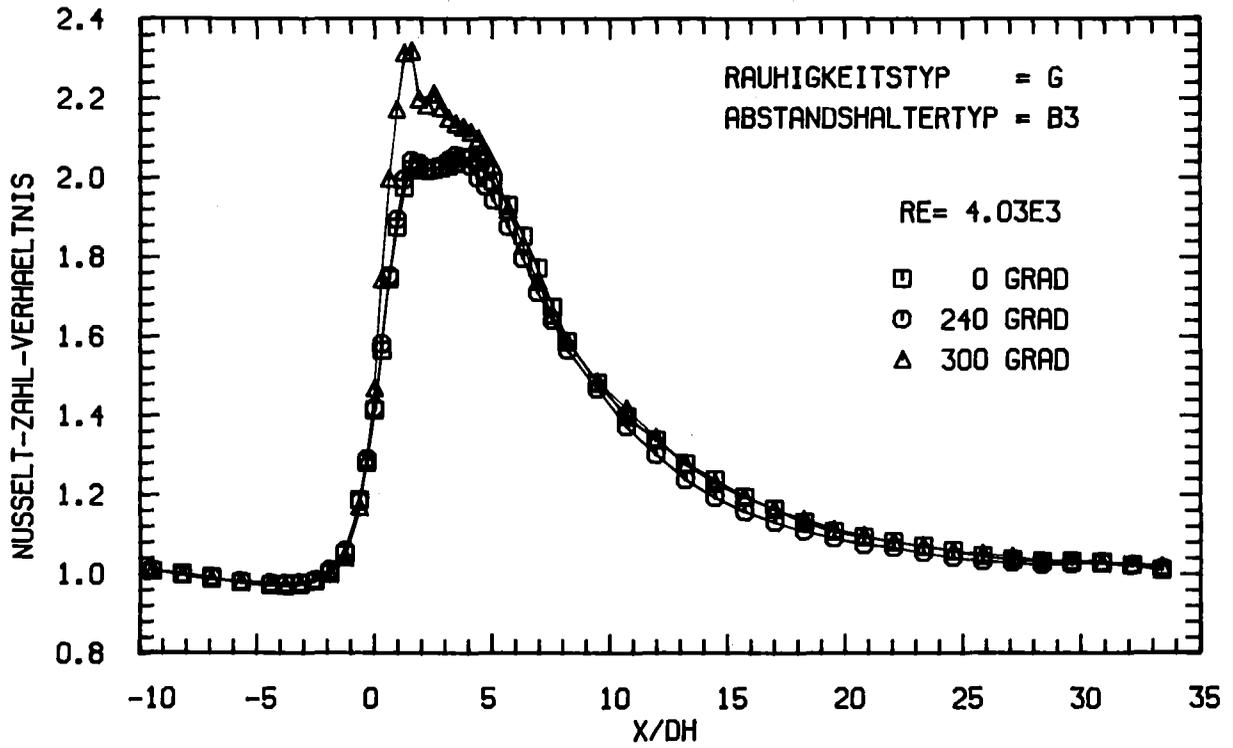
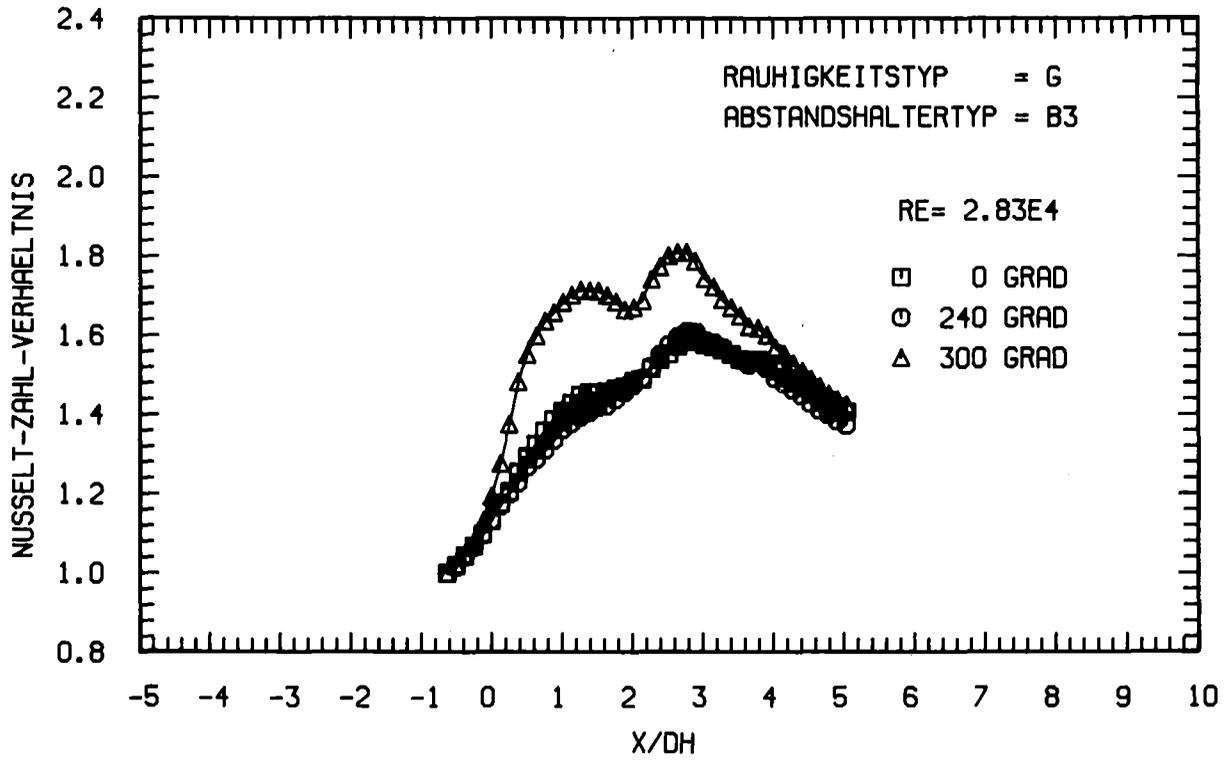


Abb.26 Axialer Verlauf des Nusseltzahlverhältnisses an verschiedenen Umfangspositionen

eine ausgeprägte Spitze in der Nusseltzahl, während das Maximum zwischen den Distanzrippen hinter dem Abstandshalter auftritt und etwa 14% niedriger ist. Bei der höheren Reynoldszahl tritt das Maximum bei beiden Positionen hinter dem Abstandshalter auf, liegt jedoch zwischen den Distanzrippen etwa 16% niedriger. Hier wird die Spitze im Maximum hinter den Distanzrippen durch die gute Wärmeabfuhr beim Wiederauslegen der Strömung verursacht. Diese Spitze beim Wiederauslegen wächst mit steigender Reynoldszahl und bewirkt das Ansteigen der maximalen Nusseltzahlen mit höheren Reynoldszahlen für G/B3 in Abb.24. Aus Abb.26 ist auch ersichtlich, daß der axiale Verlauf der Nusseltzahlen für $x/D_h > 5$ praktisch von der Meßposition unabhängig ist. Für die weitere Analyse der Meßwerte und die Entwicklung von Beziehungen zur Beschreibung der Ergebnisse wurde berücksichtigt, daß die Messungen für die Kombination G/B3 unter den Distanzrippen gemessen wurden.

Auch für die raue Staboberfläche ergibt sich die maximale Verbesserung des Wärmeübergangs für $Re = (3+4) \cdot 10^3$ (Abb.25). Auch hier ist die Abhängigkeit des Nusseltzahl-Verhältnisses von der Reynoldszahl bei allen Querschnittsversperrungen ähnlich. Im Gegensatz zur glatten Oberfläche liegen die Maximalwerte der Nusseltzahlen für $Re > 8 \cdot 10^3$ stets unter dem Abstandshalter. Für $Re < 8 \cdot 10^3$ ergibt sich das gleiche Verhalten wie bei glatter Staboberfläche. Die Strömung liegt in diesem Bereich im Übergangsbereich von rauhem zu glattem Verhalten und wird für kleine Reynoldszahlen schließlich glatt.

7. Analyse und Diskussion

Aus den Meßergebnissen ergibt sich, daß die Verbesserung des Wärmeübergangs durch den Abstandshalter von der Reynoldszahl, der Querschnittsversperrung und der Art der Staboberfläche bestimmt wird. Hinsichtlich des axialen Verlaufs der Verbesserung des Wärmeübergangs kann man drei Bereiche unterscheiden:

- den Anstieg der Nusseltzahlen vor dem Abstandshalter
- das Maximum der Nusseltzahlen unter dem Abstandshalter
- den Abfall der Nusseltzahlen hinter dem Abstandshalter.

Es ist sehr wichtig für die Anwendung der Meßergebnisse in den Rechenprogrammen zur thermo- und fluiddynamischen Analyse von Stabbündeln mit Gaskühlung, Beziehungen zu erarbeiten, durch die die experimentellen Befunde innerhalb des untersuchten Parameterfeldes hinreichend genau beschrieben werden können.

Im folgenden wird erläutert, wie empirische Gesetzmäßigkeiten, durch die die Verbesserung des Wärmeübergangs beschrieben werden kann, entwickelt wurden.

7.1 Ermittlung von empirischen Beziehungen zur Beschreibung der Meßergebnisse

7.1.1 Nusseltzahlen vor dem Abstandshalter

Die Meßergebnisse zeigen, daß bei allen untersuchten Querschnittsversperrungen, Reynoldszahlen und bei glatten und rauhen Oberflächen die Nusseltzahlen vor dem Abstandshalter steil ansteigen bis zu einem Maximalwert, der in der Regel unter dem Abstandshalter liegt. Der Anstieg der Nusseltzahlen beginnt etwa einen hydraulischen Durchmesser vor dem Abstandshalter. Die maximale Nusseltzahl wird bei glatten Staboberflächen am Ende des Abstandshalters und bei rauhen Staboberflächen etwa in der Mitte des Abstandshalters erreicht. Der Anstieg der Nusseltzahlen kann durch eine Gerade angenähert werden. Das Verhältnis der örtlichen Nusseltzahl Nu_x zur Nusseltzahl Nu_0 , die für die vom Abstandshalter unbeeinflusste Zone gemessen wurde, wird mit

$$\text{Nu}^* = \frac{\text{Nu}_x}{\text{Nu}_0} \quad (20)$$

bezeichnet. Der axiale Abstand von der Vorderkante des Abstandshalters wird durch den hydraulischen Durchmesser des Gesamtkanals dimensionslos gemacht zu

$$x^* = \frac{x}{D_h} \quad (21)$$

Mit den zwei festgelegten Punkten

$$x^* = -1; \text{Nu}^* = 1.0$$

$$x^* = A; \text{Nu}^* = \text{Nu}_{\text{max}}^*$$

mit

$$A = \frac{L_A}{2D_h} \quad \text{für rauh und glatt (Re < 3000)}$$

$$A = \frac{L_A}{D_h} \quad \text{für glatt (Re > 3000)} \quad (22)$$

ergibt sich die folgende Beziehung für den Anstieg der Nusseltzahlen vor dem Abstandhalter:

$$\text{Nu}^* = 1 + \frac{\text{Nu}_{\text{max}}^* - 1}{A + 1} (x^* + 1); \quad -1 \leq x^* \leq A \quad (23)$$

7.1.2 Maximale Nusseltzahlen

Die gemessenen maximalen Nusseltzahlen steigen stark mit der Querschnittsversperrung an, und sie sind höher bei glatter als bei rauher Oberfläche. Für $\text{Re} < 3000$ stimmen die gemessenen maximalen Nusseltzahlen bei glatter und rauher Oberfläche für gleiche Querschnittsversperrung überein.

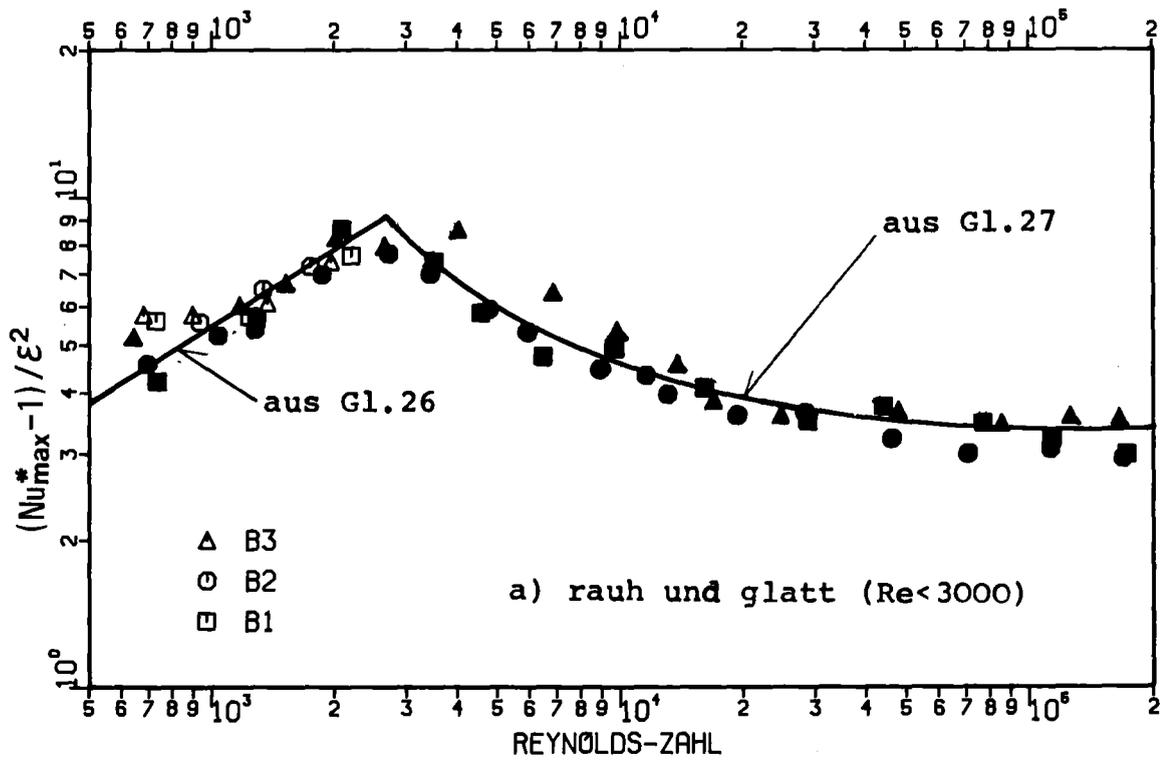
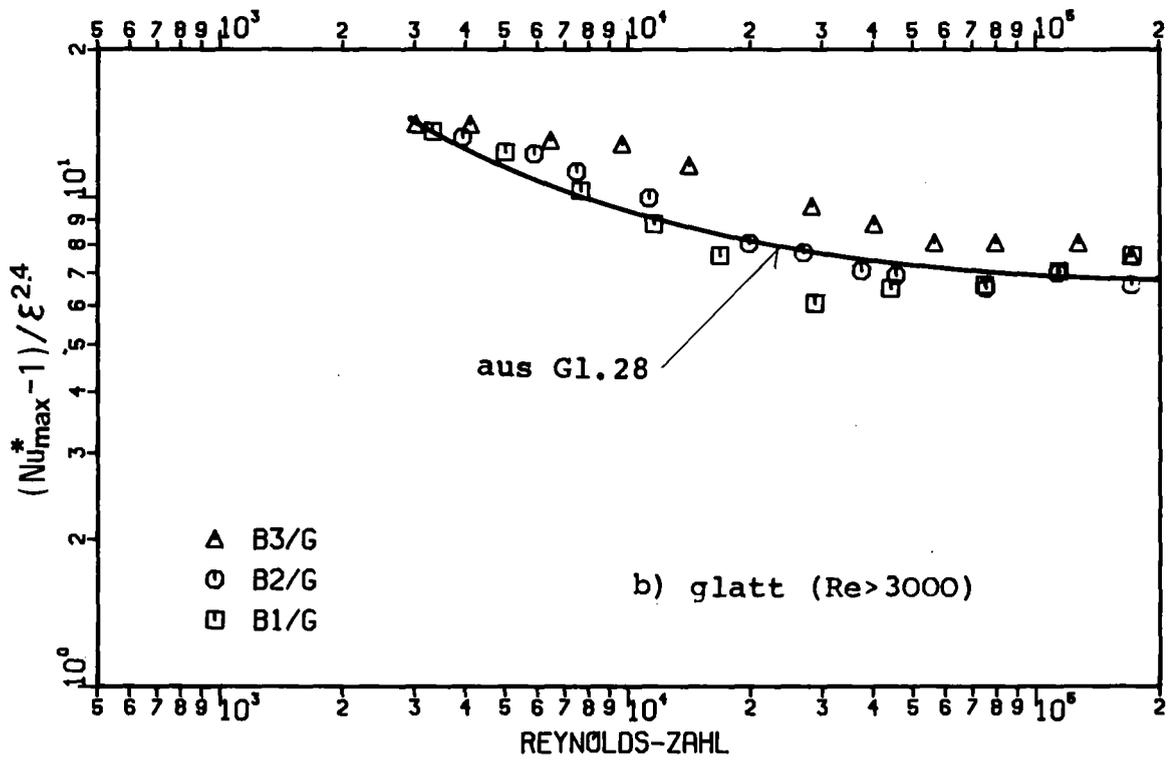


Abb. 27. Das normierte maximale Nusseltzahlverhältnis als Funktion der Reynoldszahl

Nach Bernoulli folgt, daß der Druckverlust bei einer Querschnittsverengung dem Quadrat des Flächenverhältnisses proportional ist. Messungen des Druckverlustes an Abstandshaltern bestätigen diese Abhängigkeit /11/. Für den Wärmeübergang wird die gleiche Abhängigkeit angenommen, da für Gase mit $Pr \approx 1$ die Analogie zwischen Impuls- und Wärmetransport gut zutrifft.

Mit der Querschnittsverperrung

$$\epsilon = \frac{F_{sp}}{F_{ges}} \quad (24)$$

wird angesetzt

$$Nu_{max}^* = 1 + K\epsilon^2 \quad (25)$$

Für die raue Oberfläche und die glatte für $Re < 3000$ sind $(Nu_{max}^* - 1)/\epsilon^2$ in Abb.27a (offene Symbole: glatt, ausgefüllte Symbole:rauh) über der Reynoldszahl für die drei Querschnittsverperrungen dargestellt. Es zeigt sich, daß alle Meßwerte um eine Mittelkurve in Abhängigkeit von der Reynoldszahl streuen.

Bei einer glatten Staboberfläche für $Re > 3000$ ergibt sich eine stärkere Abhängigkeit der maximalen Nusseltzahlen von der Querschnittsverperrung. Der Exponent der Querschnittsverperrung wurde zu 2.4 ermittelt (Abb.27b).

Die maximalen Nusseltzahlen lassen sich darstellen als:

$Re < 3000$, glatte und raue Oberfläche:

$$Nu_{max}^* = 1 + 0.174 \epsilon^2 Re^{0.5} \quad (26)$$

$Re > 3000$, raue Oberfläche:

$$Nu_{max}^* = 1 + \epsilon^2 (3.3 + 72700 Re^{-1.2}) \quad (27)$$

$Re > 3000$, glatte Oberfläche:

$$Nu_{max}^* = 1 + \epsilon^{2.4} (6.38 + 4550 Re^{-0.8}) \quad (28)$$

dabei soll gelten

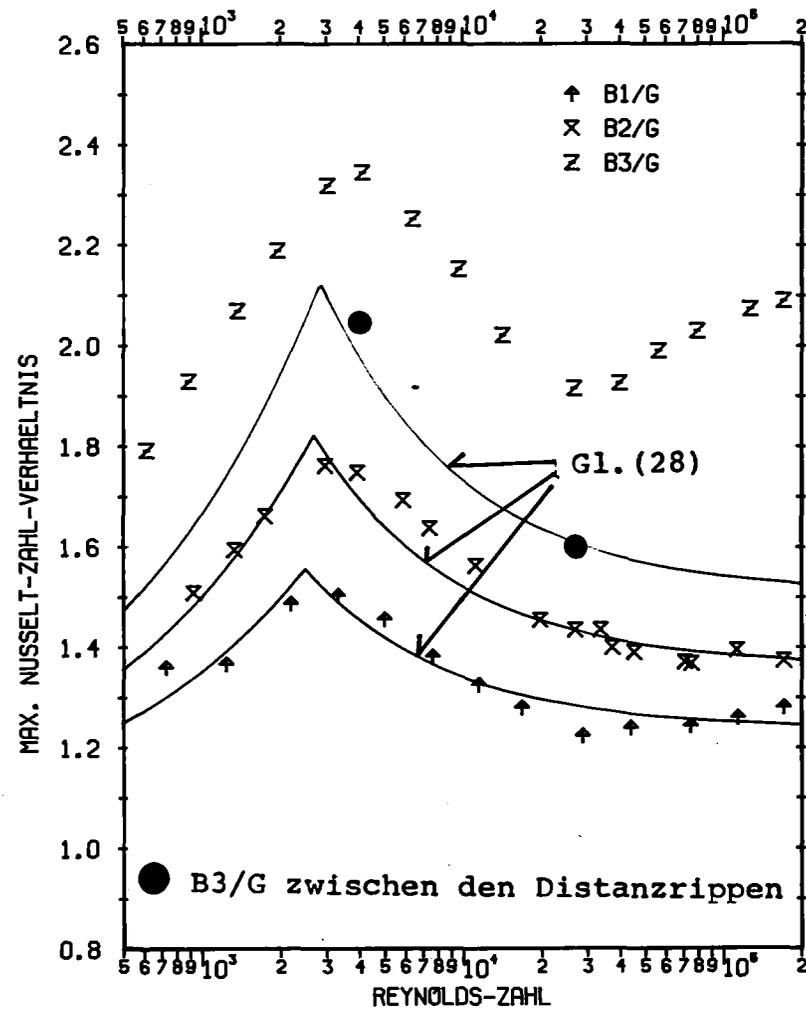
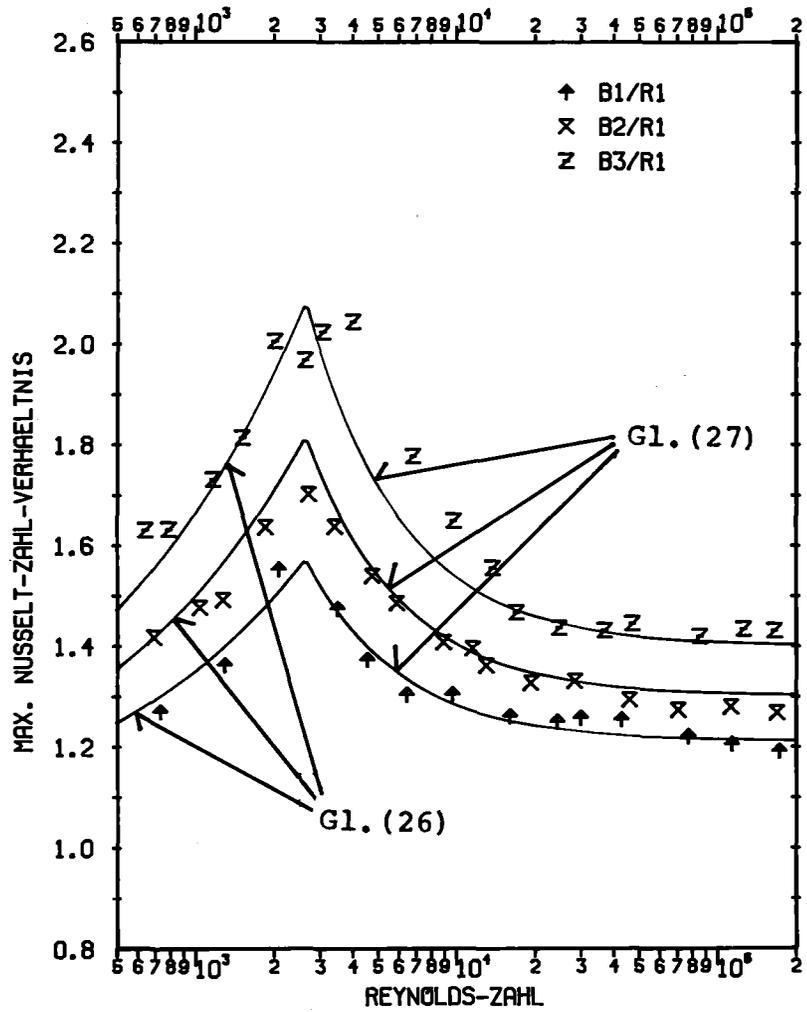


Abb.28 Vergleich der gemessenen max. Nusseltzahlverhältnisse mit den ermittelten Beziehungen

$$\text{Nu}_{\max}^* = \min ((26); (27)) \quad \text{für rauhe und}$$

$$\text{Nu}_{\max}^* = \min ((26); (28)) \quad \text{für glatte Oberfläche.}$$

In Abb.28 werden die Beziehungen Gl.(26-28) mit den Meßwerten verglichen. Die Übereinstimmung zwischen den Meßwerten und den Beziehungen ist gut, außer für die größte Querschnittsversperrung bei glatter Staboberfläche (B3/G). Diese Werte wurden unter den Distanzrippen gemessen (s.6.2.6). Die zwei Werte, die zwischen den Distanzrippen gemessen wurden, stimmen sehr gut mit den Beziehungen überein.

7.1.3 Nusseltzahlen hinter dem Abstandshalter

Die Störung der Nusseltzahlen durch den Abstandshalter klingt hinter dem Abstandshalter allmählich ab. Es wird angenommen, daß die Störung exponentiell abklingt. Der Verlauf der Nusseltzahlen anhand der Meßergebnisse zeigt, daß eine Ähnlichkeit mit einem Einlaufeffekt besteht. Die dimensionslose Kennzahl zur Charakterisierung von Einlaufeffekten bei der Wärmeübertragung ist die Graetz-Zahl (Gl.(8)). In den Abbildungen 29 und 30 sind die Meßwerte hinter dem Abstandshalter für die drei ausgemessenen Querschnittsversperrungen doppeltlogarithmisch über die Graetz-Zahl dargestellt. Der exponentielle Abfall der Nusseltzahlen trifft im gesamten Graetzbereich, d.h. für alle Reynoldszahlen, gut zu. Es wurde versucht in der üblichen Weise mit dem Ansatz:

$$\text{Nu}^* = K \text{Gz}^m \quad (29)$$

die Ergebnisse darzustellen.

Dabei stellte sich heraus, daß mit $m=\text{konst.}$ die experimentellen Daten nicht erfaßt werden konnten. Um die Daten dennoch möglichst einfach und an die üblichen Potenzansätze für die funktionalen Abhängigkeiten von Kennzahlen anschließend darzustellen, wurde der mathematisch formale Ansatz Gl.(29) dahingehend erweitert, daß $m=f(\text{Re}, \varepsilon)$ zusätzlich eingeführt wurde.

Dabei wurde folgendermaßen vorgegangen: Zunächst wurden die Steigungen der Nusseltzahlverläufe in den Abb.29 und 30 grafisch

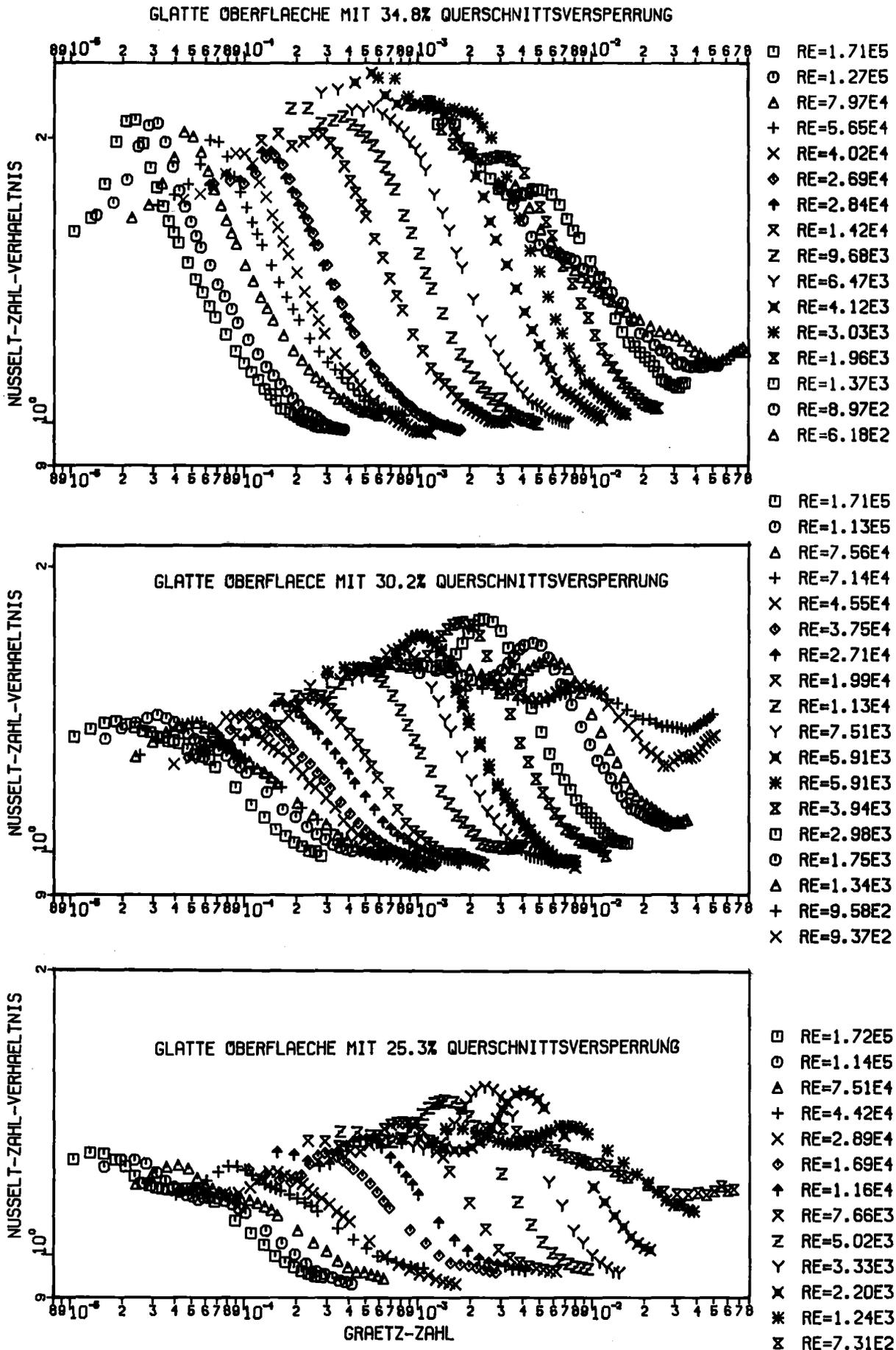


Abb.29 Verlauf des Wärmeübergangs hinter dem Abstandshalter in Abhängigkeit von der Graetzzahl

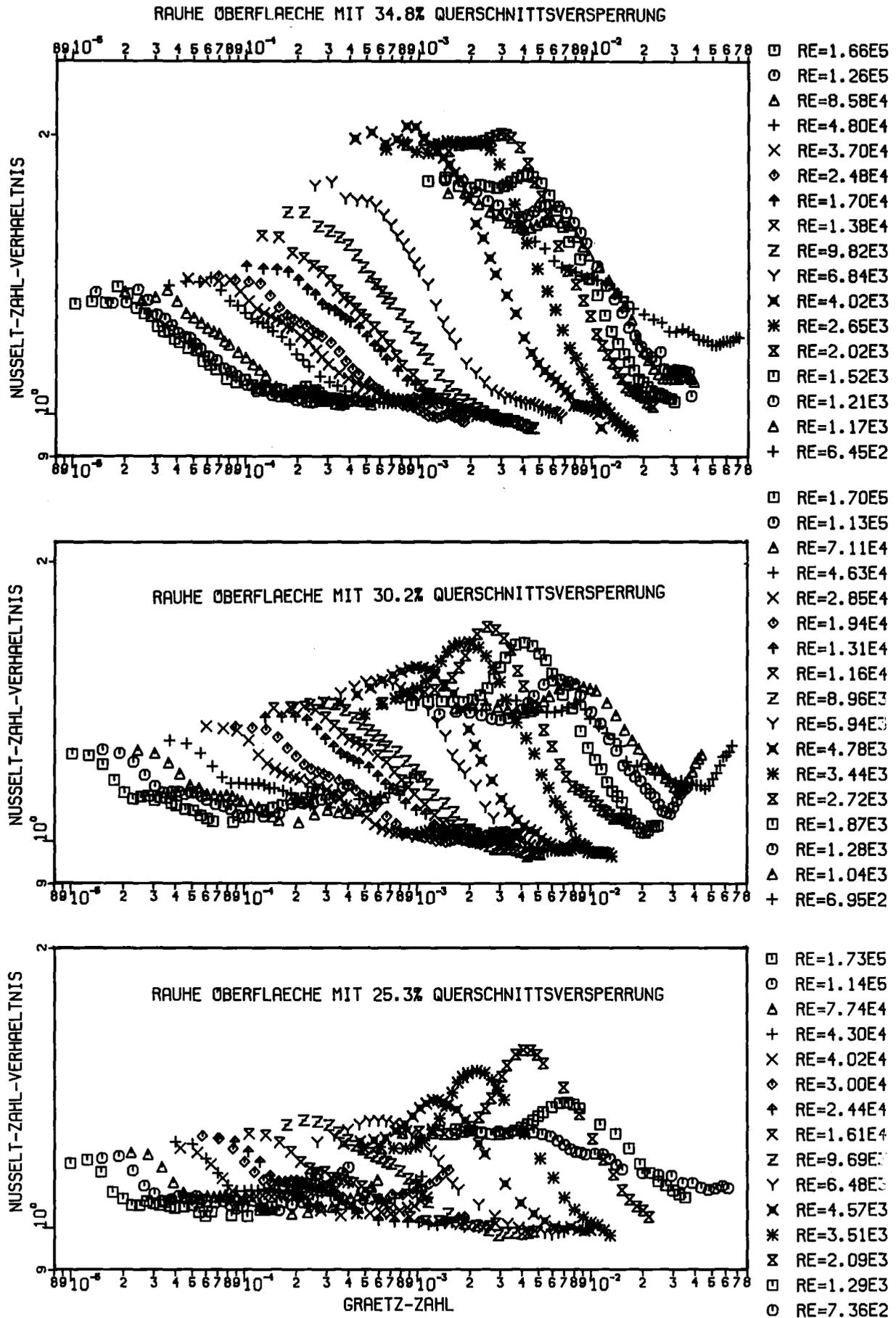


Abb.30 Verlauf des Wärmeübergangs hinter dem Abstandshalter in Abhängigkeit von der Graetzzahl

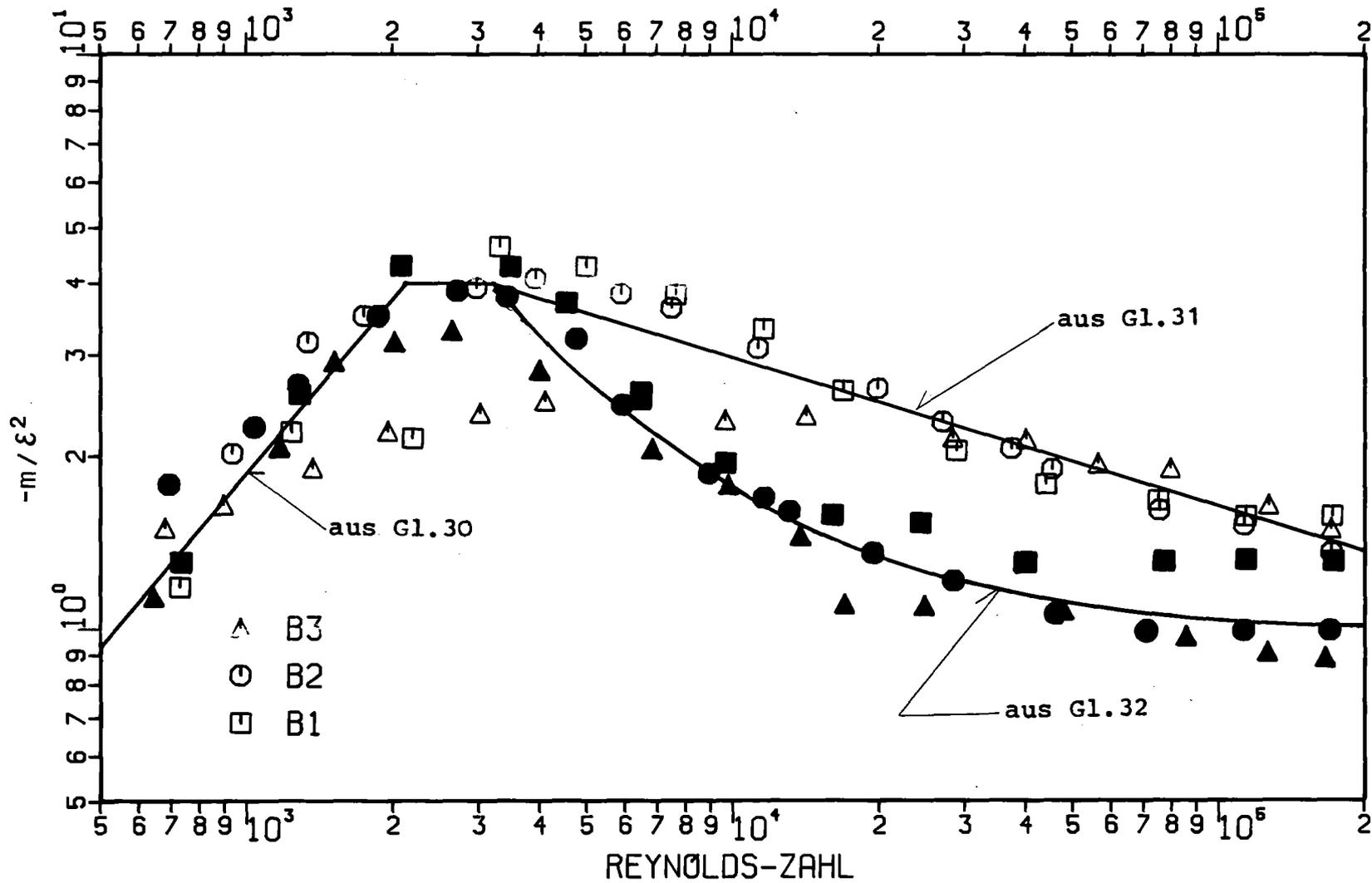


Abb. 31 Die normierten Exponenten der Graetzzahl (Gl.29) in Abhängigkeit von der Reynoldszahl (offene Symbole: glatt, geschlossene Symbole: rauh)

bestimmt und über der Reynoldszahl dargestellt. Es zeigte sich, daß die Steigungen sowohl bei glatter als auch bei rauher Oberfläche quadratisch von der Querschnittsversperrung abhängen. Abb.31 zeigt die ermittelten Steigungen dividiert durch das Quadrat des Versperrungsverhältnisses über der Reynoldszahl. Für $Re < 3000$ gibt es keinen Unterschied zwischen den normierten Steigungen bei glatter und rauher Oberfläche. In diesem Bereich lassen sich die Steigungen oder Exponenten der Graetzzahl als

$$m = -1.855 \cdot 10^{-3} \epsilon^2 Re \quad 600 < Re < 3000 \quad (30)$$

glatt und rauh

beschreiben.

Für $Re > 3000$ können die Exponenten der Graetzzahl als

$$m = -30.34 \epsilon^2 Re^{-0.253} \quad \text{für glatte und} \quad (31)$$

$$m = -\epsilon^2 (1 + 4.9 \cdot 10^4 Re^{-1.2}) \quad \text{für rauhe} \quad (32)$$

Oberflächen

dargestellt werden. Für beide Oberflächen gilt

$$m \geq -4\epsilon^2.$$

Mit diesen vorgegebenen Beziehungen für den Exponenten der Graetzzahl können dann die Konstanten $K=f(Re, \epsilon)$ aus Gl. (29) gefunden werden.

Dazu wird für die verschiedenen Kombinationen von Querschnittsversperrungen und Oberfläche jeweils ein bestimmter Wert von Nu^* vorgegeben und mit dem Meßwert, der diesem vorgegebenen Wert am nächsten liegt, die Konstante bestimmt. Für die Kombination (G, B_3) wurde z.B. $Nu^* = 1.1$ vorgegeben. Die derart ermittelten Konstanten wurden über der Reynoldszahl dargestellt und es zeigt sich, daß die Verläufe der Konstanten mit der Reynoldszahl für verschiedene Querschnittsverhältnisse parallel zueinander sind. Durch Addition von 2.25ϵ konnten die Kurven für die

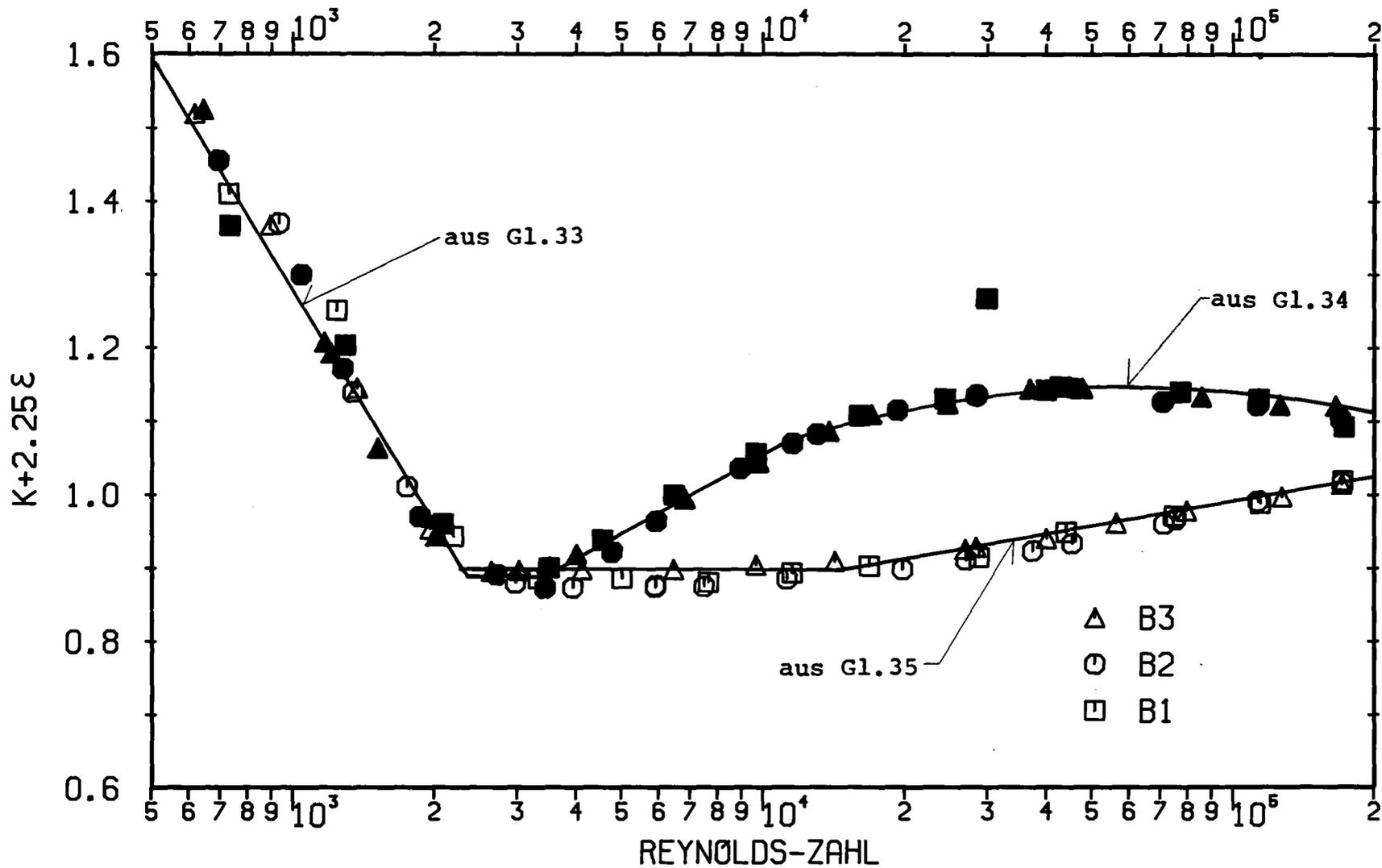


Abb.32 Die normierten Faktoren der Graetzzahl (Gl.29) in Abhängigkeit von der Reynoldszahl (offene Symbole: glatt, geschlossene Symbole: rauh)

verschiedenen Querschnittsverhältnisse zur Deckung gebracht werden (Abb. 32). Für $Re < 3000$ gibt es keinen Unterschied der Konstanten für glatte und raue Oberflächen. Mit

$$C = \log Re$$

kann man die Abhängigkeit von der Reynoldszahl wie folgt beschreiben:

$$K = 4.42 - 1.05C - 2.25\epsilon \quad \begin{array}{l} Re < 3000 \\ \text{glatt und rau} \end{array} \quad (33)$$

$$\left. \begin{array}{l} K = 0.426 + 0.113C - 2.25\epsilon \\ K \geq 0.895 - 2.25\epsilon \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} Re > 3000 \\ \text{glatt} \end{array} \quad (34)$$

$$K = \min \left\{ \begin{array}{l} -0.344 + 0.35C - 2.25\epsilon \\ -0.1298C^2 + 1.2466C - 1.8478 - 2.25\epsilon \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} Re > 3000 \\ \text{rau} \end{array} \quad (35)$$

$$K \geq 0.885 - 2.25\epsilon$$

7.2 Vergleich der Meßergebnisse mit den ermittelten Beziehungen

Für den gesamten ausgemessenen Reynoldszahl-Bereich sind in den Abb. 33-38 jeweils sechs ausgewählte axiale Verläufe der Nusseltzahlen für die verschiedenen Kombinationen von Querschnittsversperrung und Oberfläche dargestellt. Zugleich ist der Verlauf, der sich nach den ermittelten Beziehungen ergibt, zum Vergleich miteingetragen. In allen Fällen stimmen die Meßwerte mit den Beziehungen gut überein. Eine Ausnahme stellen die Ergebnisse für die größte Querschnittsversperrung mit glatter Oberfläche dar (Abb. 35). Die Gründe hierfür, daß nämlich die Messungen direkt unter den Distanzrippen vorgenommen wurden, wurden in 6.2.6 ausführlich diskutiert. Für die beiden vorliegenden Meßergebnisse zwischen den Distanzrippen zeigt Abb. 39 den Vergleich. Man sieht, daß in diesem Falle eine

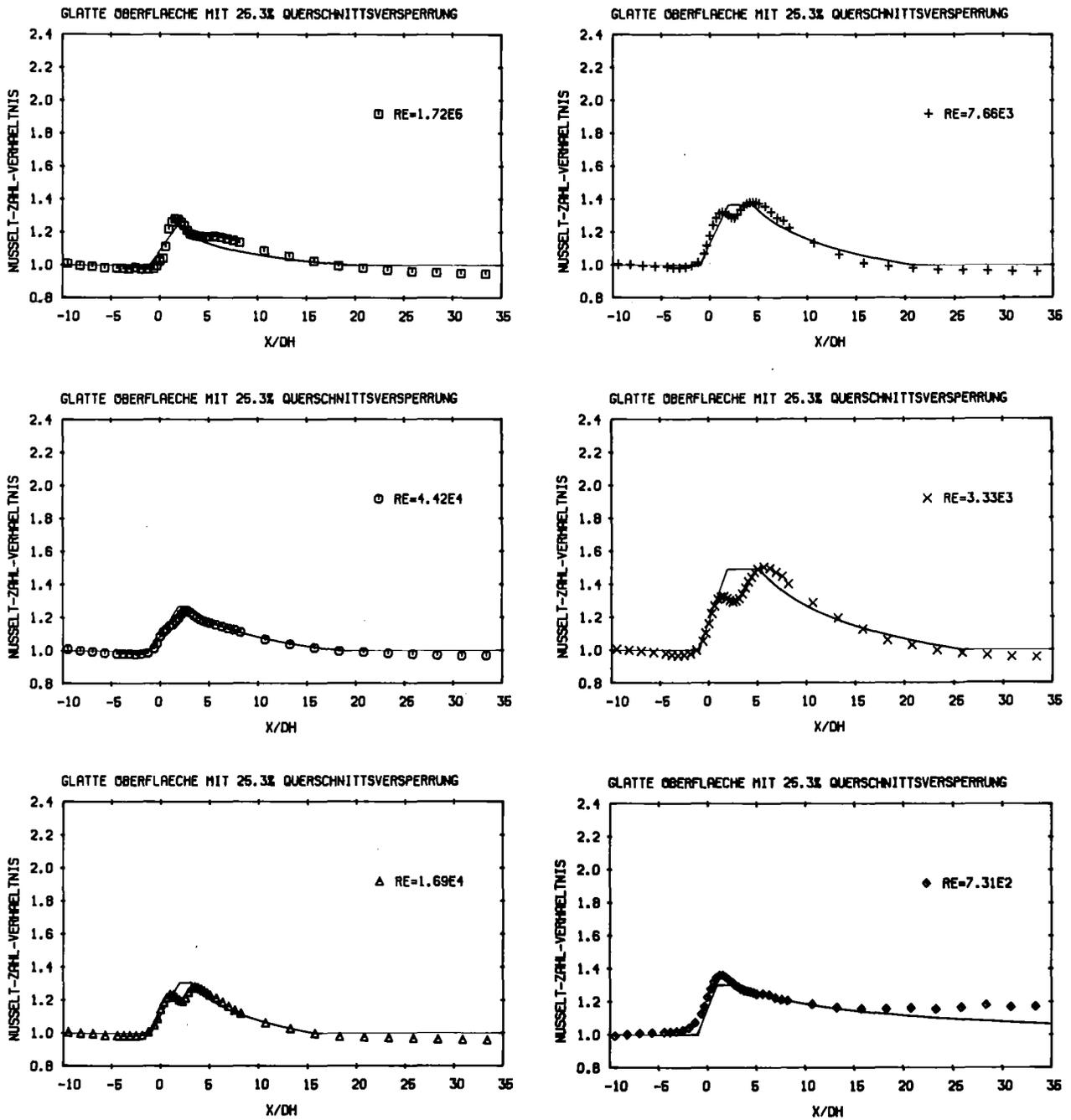


Abb.33 Vergleich der Meßergebnisse mit den ermittelten Beziehungen (durchgezogene Linie)

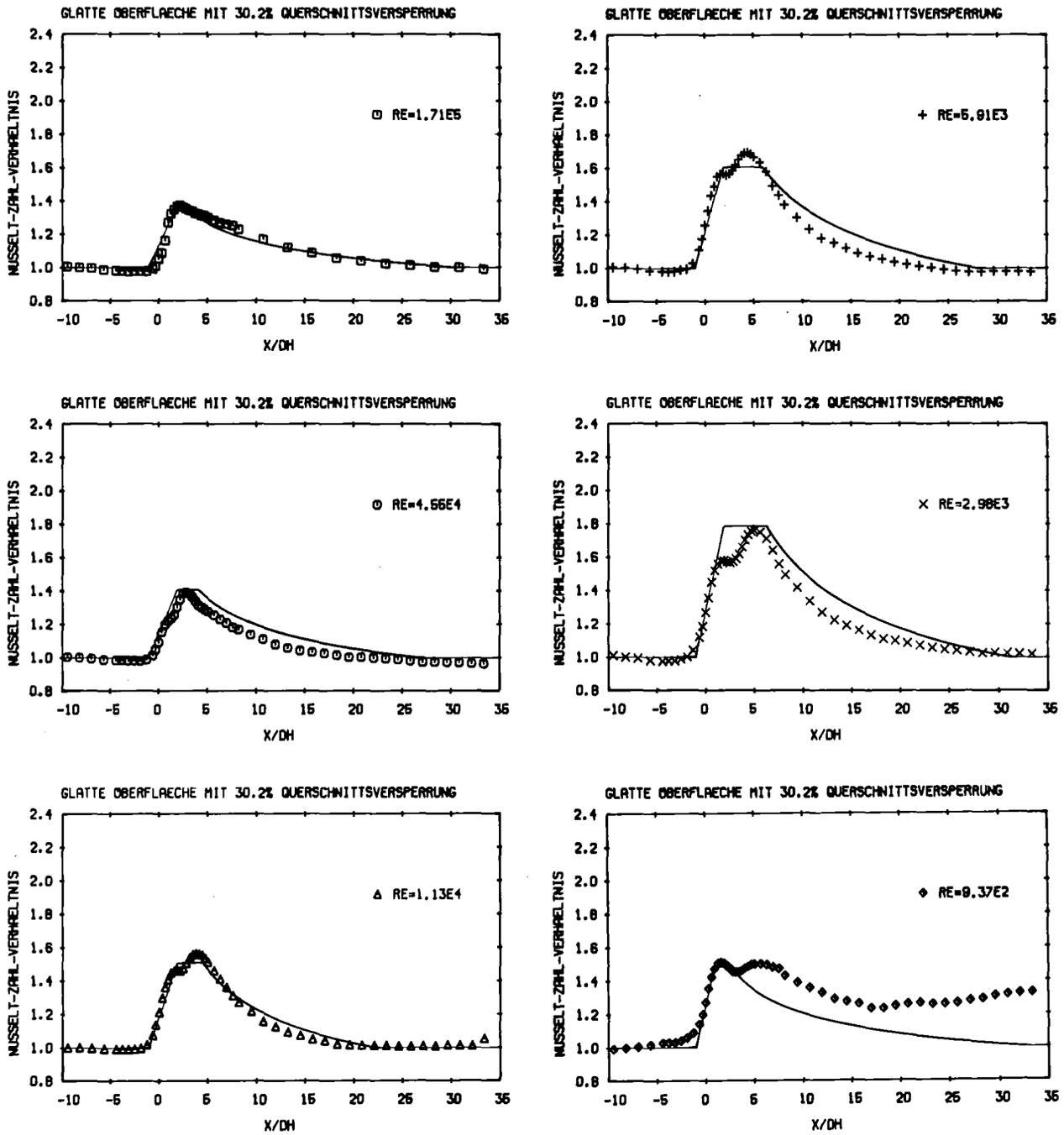


Abb.34 Vergleich der Meßergebnisse mit den ermittelten Beziehungen (durchgezogene Linie)

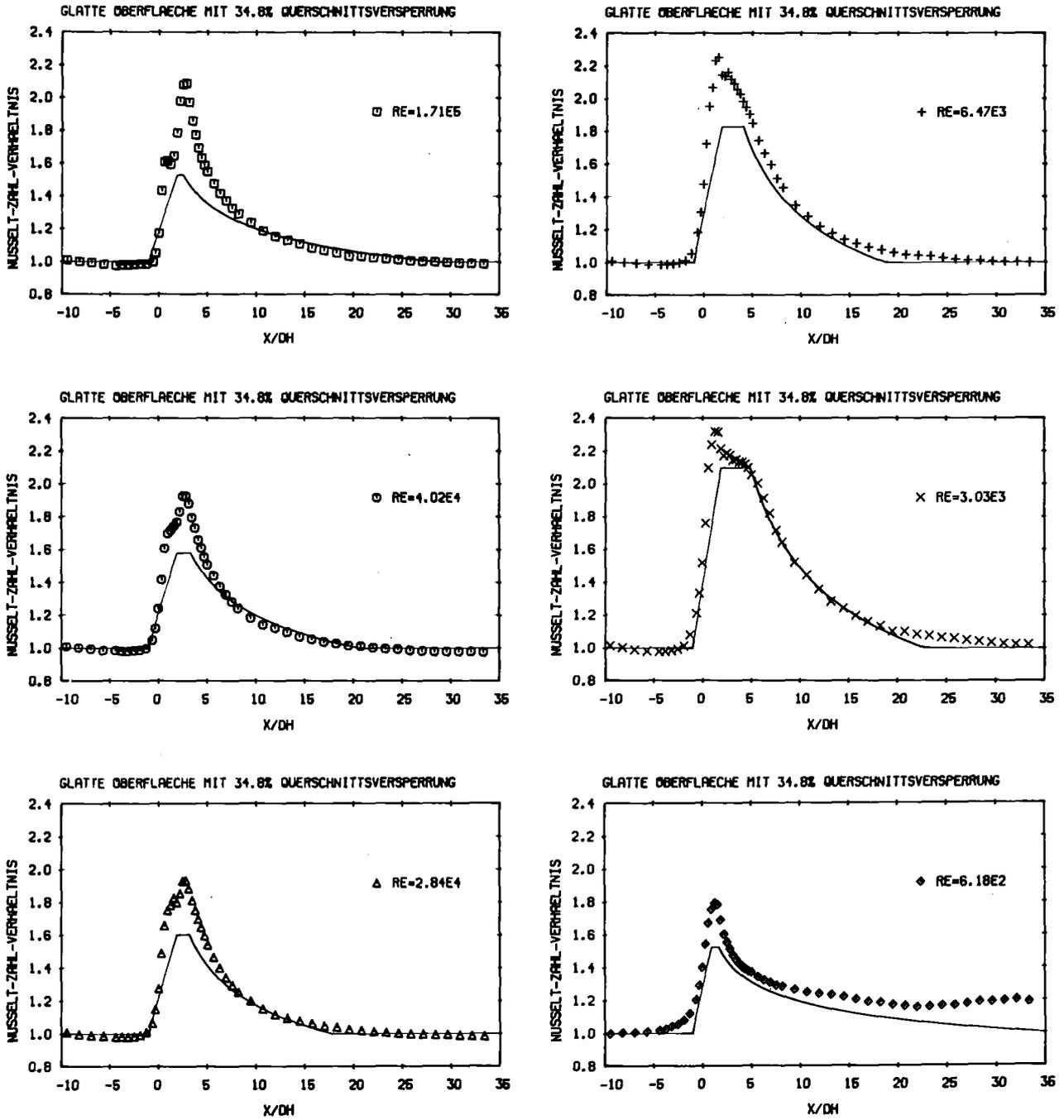


Abb.35 Vergleich der Meßergebnisse mit den ermittelten Beziehungen (durchgezogene Linie)

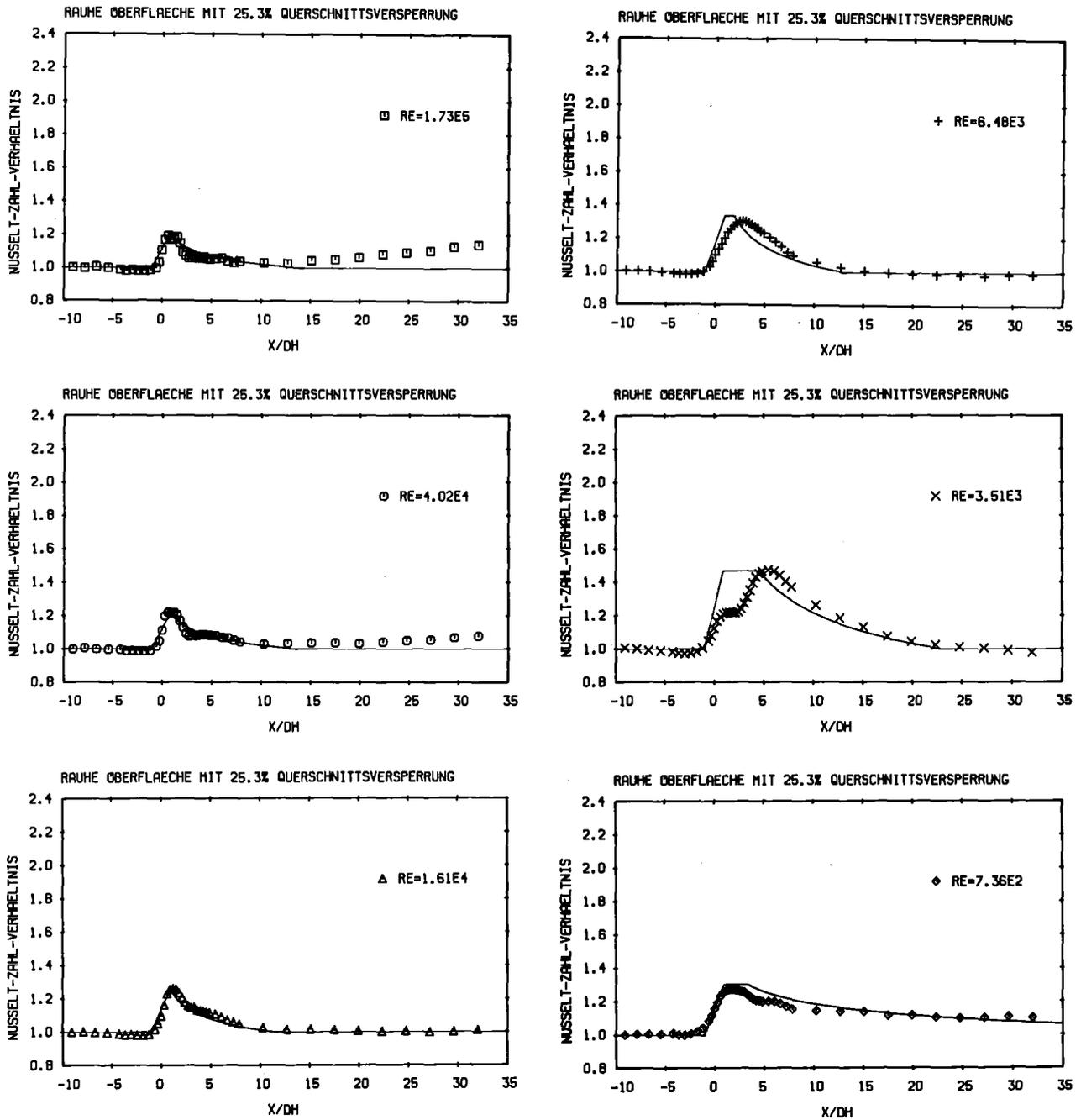


Abb.36 Vergleich der Meßergebnisse mit den ermittelten Beziehungen (durchgezogene Linie)

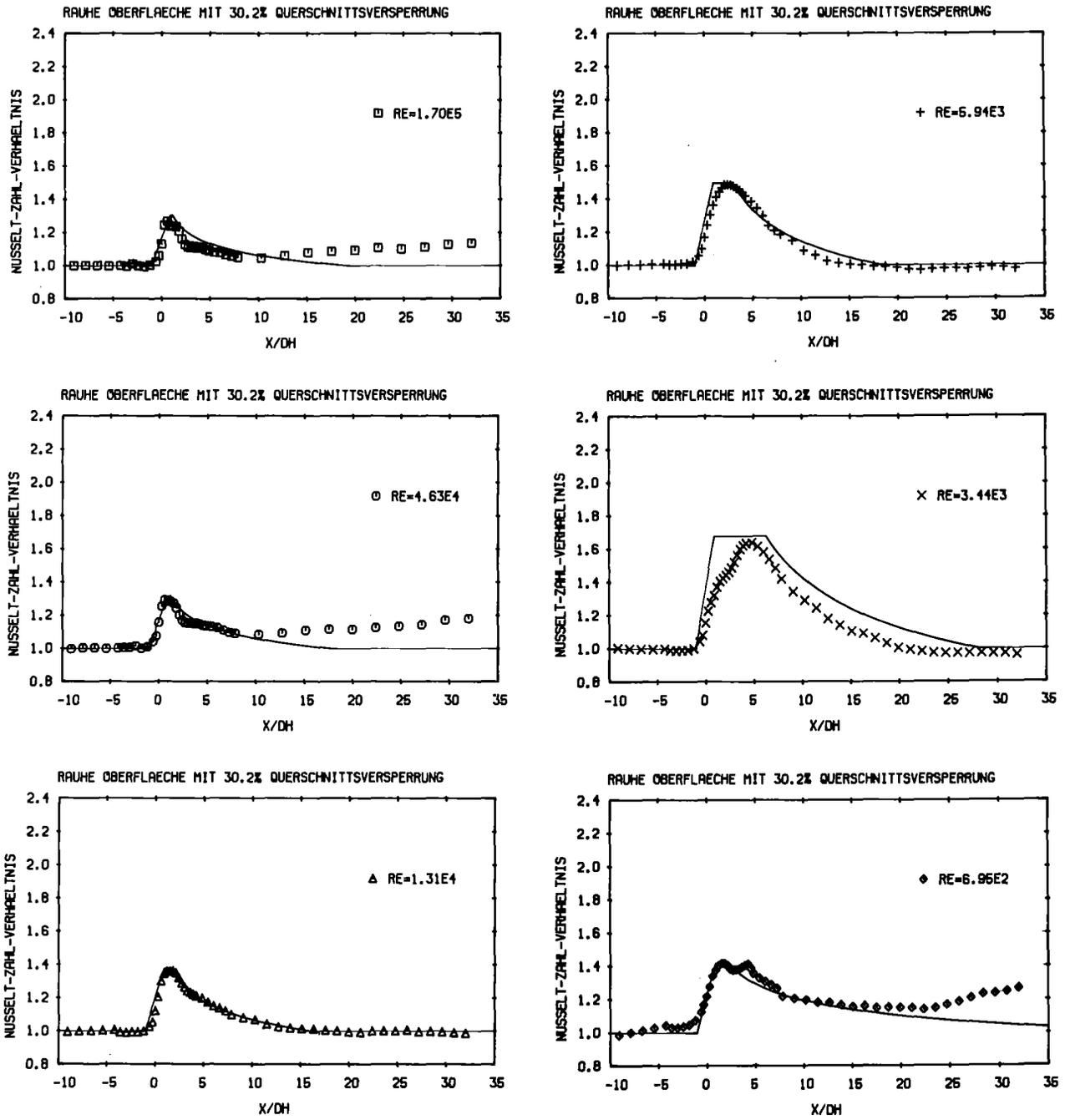


Abb.37 Vergleich der Meßergebnisse mit den ermittelten Beziehungen (durchgezogene Linie)

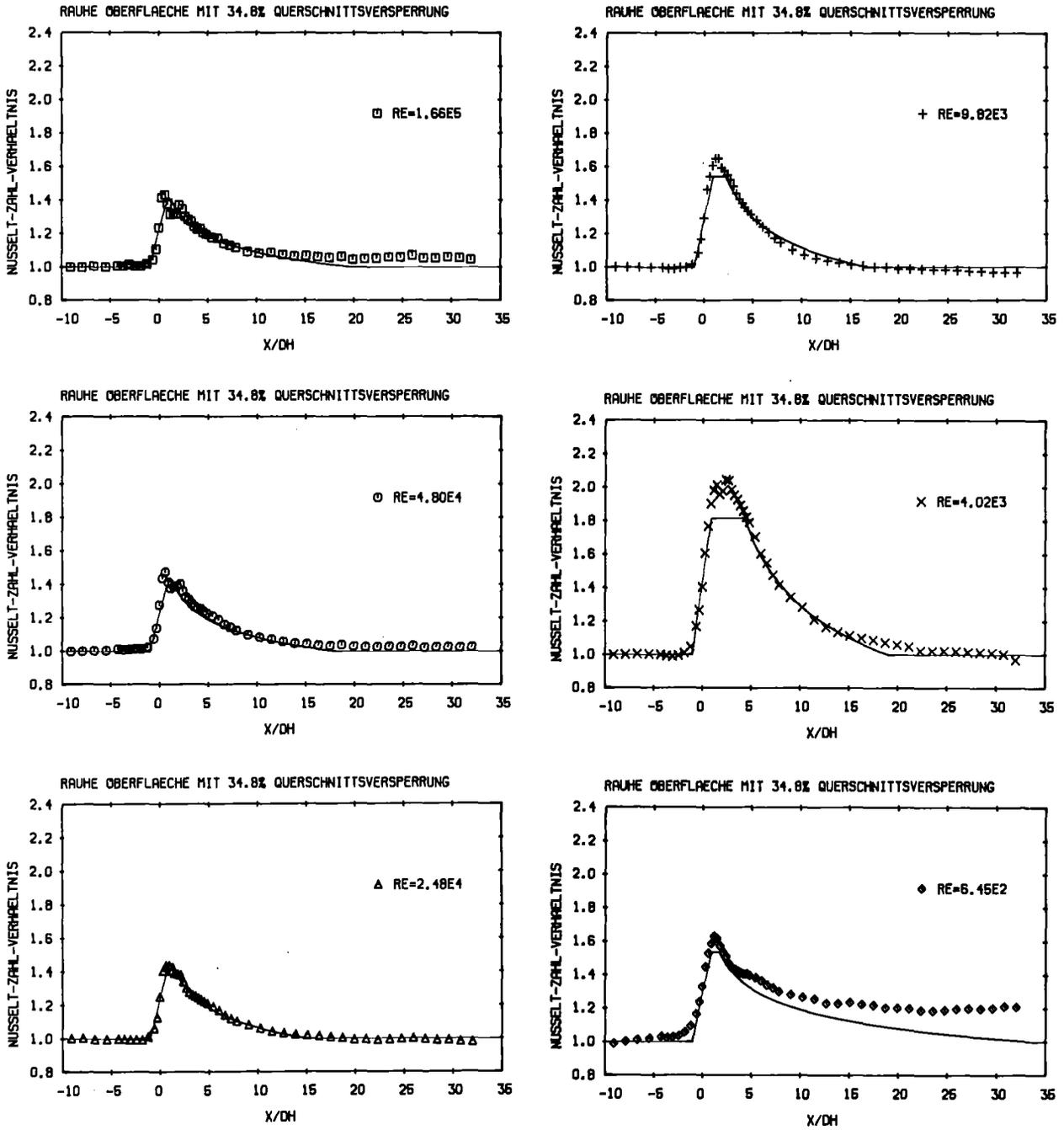
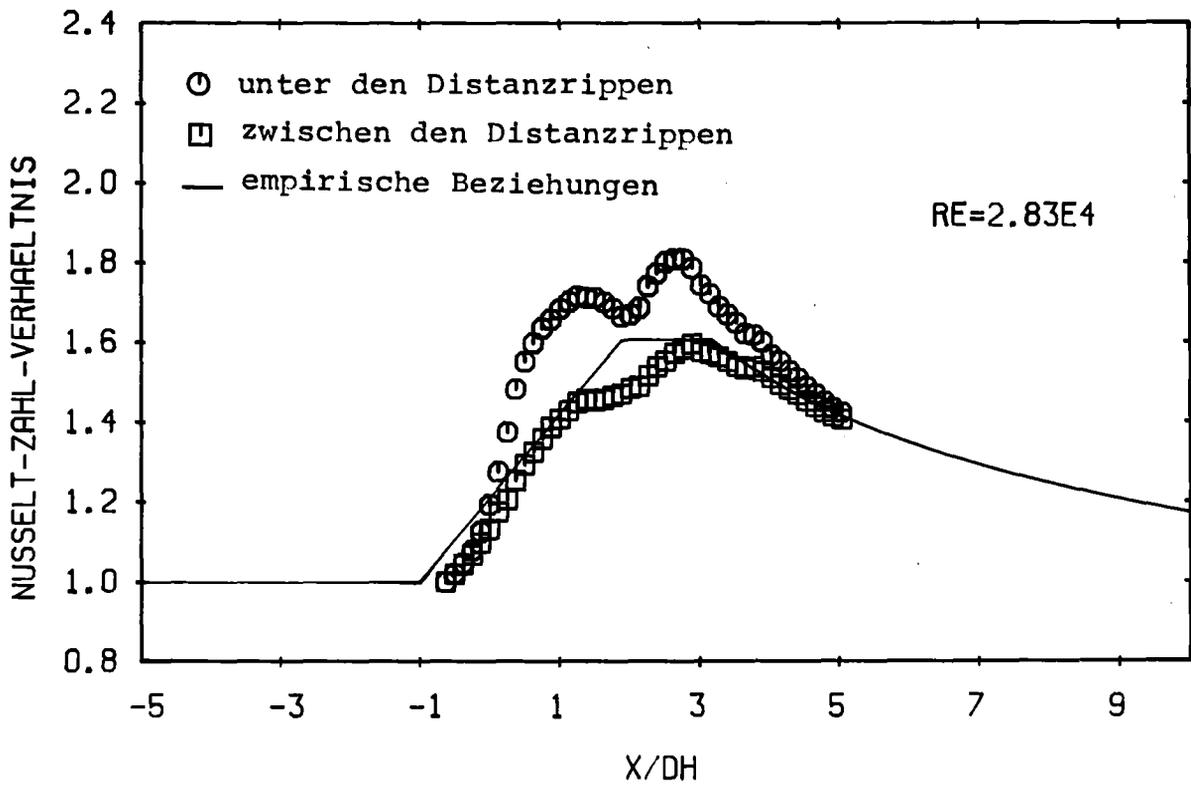


Abb.38 Vergleich der Meßergebnisse mit den ermittelten Beziehungen (durchgezogene Linie)

GLATTE OBERFLÄCHE MIT 34.8% QUERSCHNITTSVERSERRUNG



GLATTE OBERFLÄCHE MIT 34.8% QUERSCHNITTSVERSERRUNG

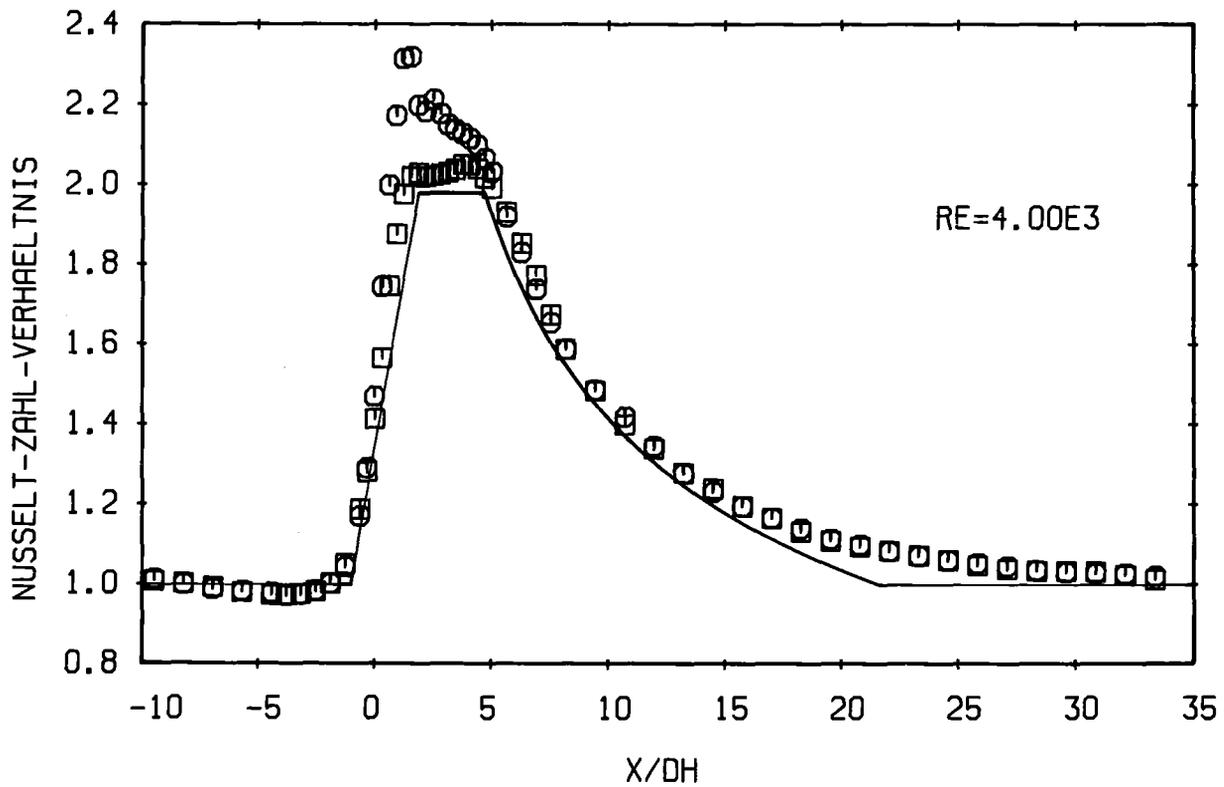


Abb.39 Vergleich der Meßergebnisse mit den ermittelten Beziehungen (durchgezogene Linie)

gute Übereinstimmung zwischen den Beziehungen und den Meßwerten besteht. Aus Abb.39 erkennt man auch, daß praktisch nur der Maximalwert der Nusseltzahlen an der Position unter den Distanzrippen höher ist als zwischen den Distanzrippen. Der Verlauf nach den ermittelten Beziehungen ist niedriger als unter den Distanzrippen gemessen, damit liegen die angegebenen Beziehungen, die in Rechenprogrammen verwendet werden sollen, auf der sicheren Seite, d.h. die berechneten Temperaturen sind etwas höher als die gemessenen. Für $Re < 3 \cdot 10^3$ unterschätzen die gerechneten Verläufe ebenfalls die Meßwerte, das geschah in voller Absicht, da bei den kleinen Reynoldszahlen die gemessenen Nusseltzahlen durch Naturkonvektion erhöht sind.

7.3 Vergleich der ermittelten Beziehungen mit den Ergebnissen anderer Autoren

Ein Vergleich der Meßergebnisse aus der Literatur mit den ermittelten Beziehungen ist schwierig, weil die Experimente meist unter unterschiedlichen Bedingungen durchgeführt werden (unterschiedliche geometrische Anordnung der Stäbe, unterschiedliche Form der Abstandshalter). Bei komplizierter Abstandshaltergeometrie ist es auch schwierig, die Querschnittsversperrung aus den Literaturangaben genau zu ermitteln. Für den Vergleich wurden die Bedingungen daher so eingesetzt, wie sie aus den Literaturangaben ermittelt werden konnten.

Ergebnisse von Marek, Rehme /6/

In Abb.40 ist der Vergleich zwischen den Meßergebnissen /6/ und den ermittelten Beziehungen dargestellt. In diesem Falle ist der Vergleich am besten möglich, da die Meßergebnisse praktisch an der gleichen Teststrecke gewonnen wurden, die für diese Arbeit verwendet wurde. Bei der rauhen Oberfläche ist die Übereinstimmung für alle drei Querschnittsversperrungen gut. Bei der glatten Oberfläche liegt die maximale Nusseltzahl nach der ermittelten Beziehung etwas tiefer als die Meßwerte, aber der Einlauf hinter dem Abstandshalter wird einigermaßen

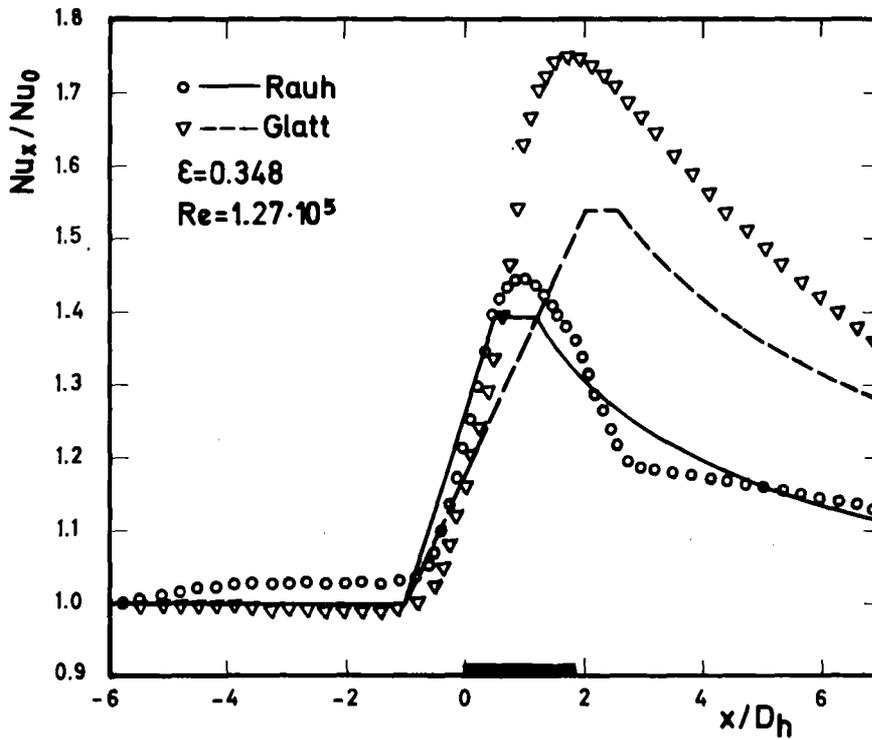
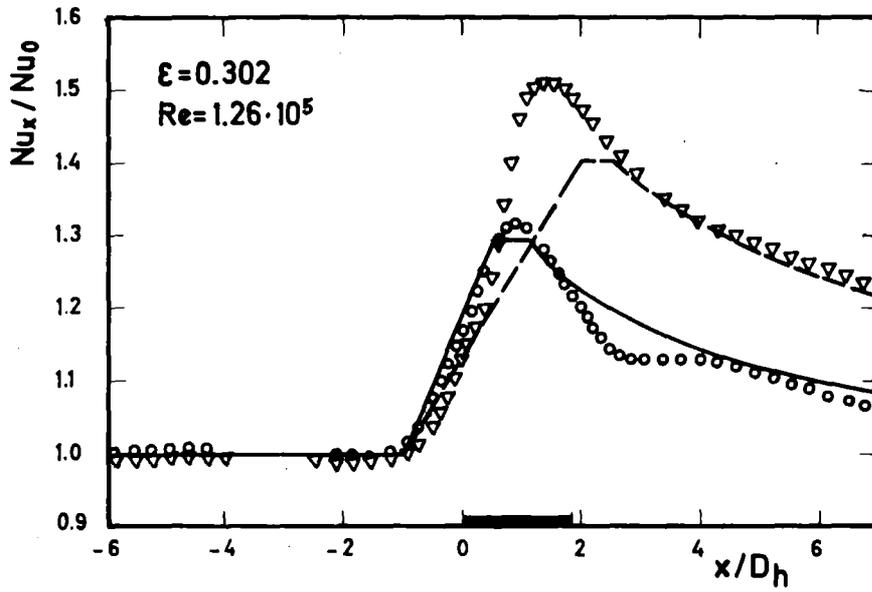
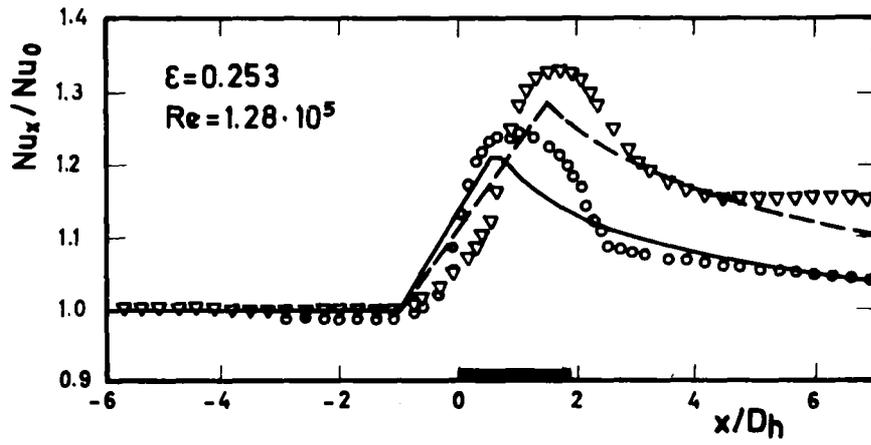


Abb.40 Vergleich der ermittelten Beziehungen mit den Ergebnissen von /6/ (Linien: empirische Beziehungen)

gut getroffen. Damit ist auch gezeigt, daß der für die Messungen in /6/ verwendete Abstandshalter mit nicht elektrisch isolierten Distanzrippen die Meßergebnisse nicht beeinflusst.

Ergebnisse von Vlček, Weber /3/

Die Form des Abstandshalter könnte einen gewissen Einfluß auf den Wärmeübergang im Abstandshalterbereich haben. Weil die Querschnittsversperrung sicherlich die wichtigste Einflußgröße ist, wurde die Abstandshaltergeometrie nur durch diesen Parameter in den ermittelten Beziehungen erfaßt. Vlček und Weber haben die Referenzposition (d.h. $\frac{x}{D_h} = 0$) für die Mitte des Abstandshalters definiert. In dieser Arbeit wurde die Referenzposition am Abstandshalterbeginn definiert. Deshalb wurden die Meßpunkte für den Vergleich (Abb.41) auf die hier verwendete Definition umgerechnet. Für den 60 mm langen Abstandshalter werden die Nusseltzahlen durch die in dieser Arbeit gefundenen Beziehungen unterschätzt. Die Übereinstimmung zwischen den Meßwerten und den Beziehungen ist sehr gut für den 5 mm-Abstandshalter.

Ergebnisse von Krett, Majer /5/

Für die Vergleiche wurde das angegebene β /5/ als Querschnittsversperrung angenommen. Krett, Majer /5/ haben die Referenzposition (x/D_h) hinter dem Abstandshalter definiert. Für den Vergleich sind die Meßwerte auf die Definition in dieser Arbeit umgerechnet worden. Der Vergleich von gerechneter Nusseltzahl-Verteilung mit den Meßwerten (Abb.42) zeigt, daß durch die Beziehungen der Anstieg der Nusseltzahl und der Maximalwert sehr gut getroffen werden für den C-Typ. Der exponentielle Abfall der Nusseltzahlen hinter dem Abstandshalter wird etwas überschätzt (etwa 10%). Für den Typ A-2 zeigt der Vergleich, daß trotz der völlig anderen Geometrie des Abstandshalters von Krett und Majer sowohl der Maximalwert der Nusseltzahl als auch der Abfall der Nusseltzahlen hinter dem Abstandshalter noch zufriedenstellend beschrieben werden, wenn man bedenkt, daß der Abstandshalter aus zwei Teilen besteht und der gerechnete Abfall der Nusseltzahlen um etwa 5 hydraulische Durchmesser nach rechts verschoben werden müßte.

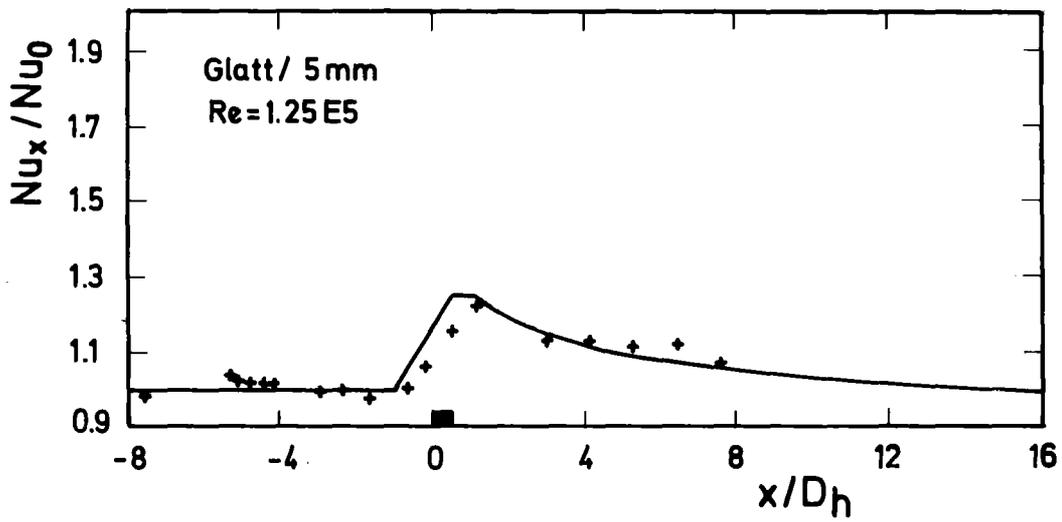
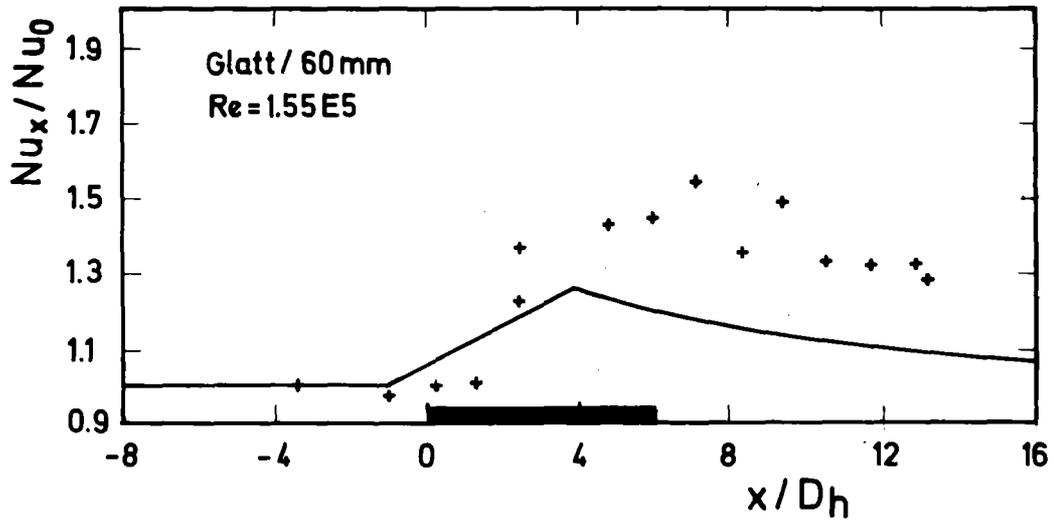


Abb.41 Vergleich der ermittelten Beziehungen mit den Ergebnissen von /3/ (Linie: empirische Beziehungen)

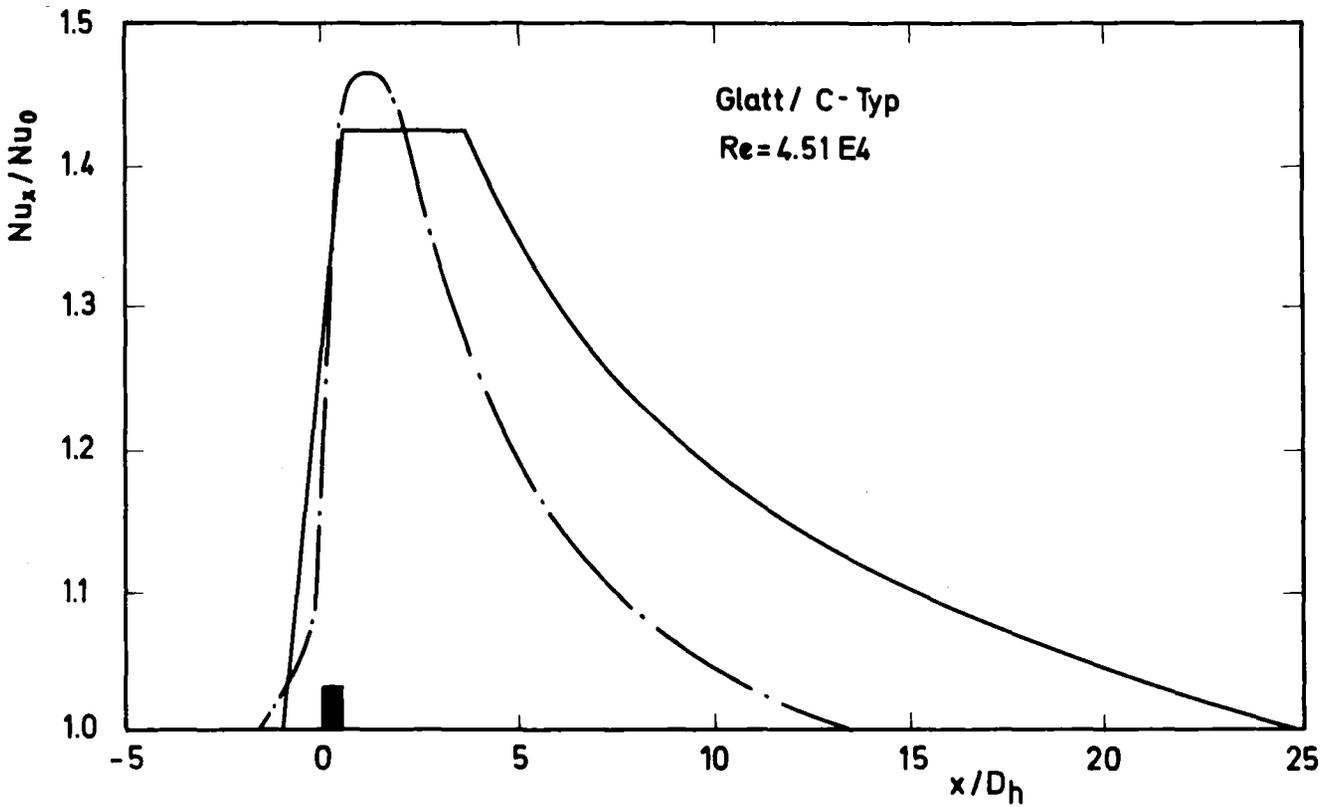
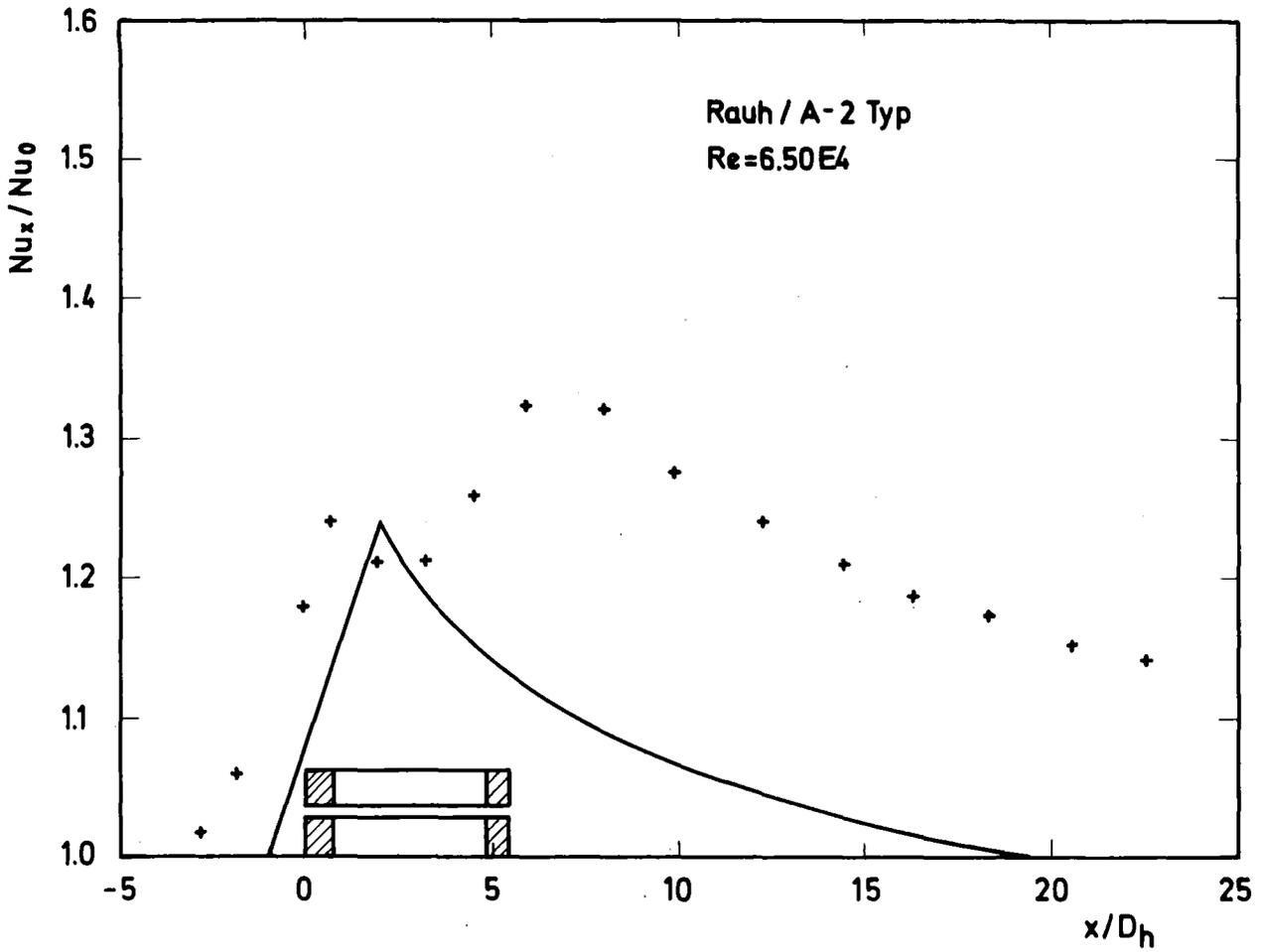


Abb.42: Vergleich der ermittelten Beziehungen mit den Ergebnissen von /5/ (durchgezogene Linie: empirische Beziehungen)

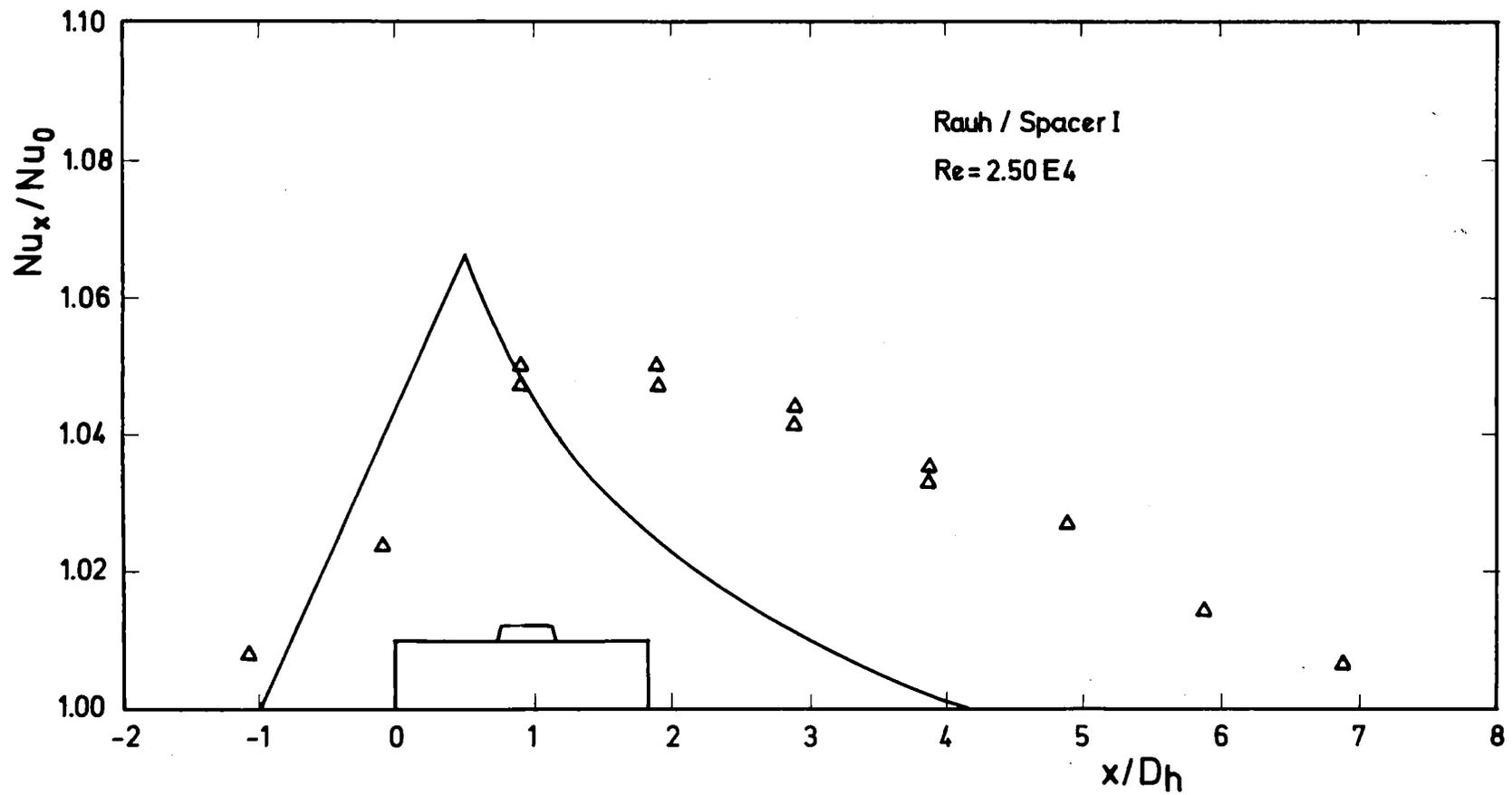


Abb.43: Vergleich der ermittelten Beziehungen mit den Ergebnissen von /4/ (Linie: empirische Beziehungen)

Ergebnisse von Hudina, Nöthiger /4/

Hudina, Nöthiger haben ebenfalls die Referenzposition ($x/D_h=0$) in der Mitte des Abstandshalters angegeben. Die untersuchten Querschnittsversperrungen in /4/ sind relativ klein ($\epsilon=0.15$), deshalb sind die Maximalwerte der Nusseltzahlen ebenfalls klein. Der Vergleich der Meßwerte mit dem berechneten Verlauf für eine rauhe Oberfläche (Abb.43) zeigt, daß auch für diesen Fall eine einigermaßen gute Übereinstimmung besteht, die maximale Abweichung beträgt 3.5% und kommt damit in die Nähe der Meßunsicherheiten.

Damit konnte gezeigt werden, daß die aus den Meßergebnissen dieser Arbeit ermittelten Beziehungen auch die wenigen Meßergebnisse aus der Literatur für andere Abstandshaltergeometrien und kleinere Querschnittsversperrungen prinzipiell richtig und mit einer für Rechenprogramme ausreichenden Genauigkeit wiedergeben. Man muß hierbei den Vorbehalt machen, daß für den Vergleich die Angaben über die verwendete Geometrie, insbesondere zur Berechnung der Querschnittsversperrung durch den Abstandshalter, oftmals sehr unzureichend sind, so daß eine gewisse Unsicherheit bestehen bleibt.

7.4 Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit Beziehungen aus der Literatur

In diesem Abschnitt soll der Versuch unternommen werden, die experimentellen Ergebnisse anhand der in der Literatur vorliegenden empirischen Beziehungen für den Wärmeübergang in Stabbündeln zu vergleichen. Ein solches Vorhaben kann nur für glatte Oberflächen erfolgen, da für rauhe Oberflächen keine expliziten Beziehungen aus der Literatur bekannt sind. Bei glatten Oberflächen wird für Stabbündel das Konzept des äquivalenten Ringspaltes verwendet, d.h. die in der Literatur referierten Beziehungen für den Wärmeübergang in konzentrischen Ringspalten werden auf Stabbündelgeometrie angewendet /8/.

7.4.1 Nusseltzahlen für vollausgebildete Strömung und Wärmeübertragung bei turbulenter Strömung

Nach den Beziehungen, die Petukhov und Roizen /12/ anhand zahlreicher Meßergebnisse für Ringspalte entwickelt haben, läßt sich die Nusseltzahl für den hydraulisch und thermisch voll ausgebildeten Fall des beheizten Innenrohres in Ringspalten bei konstantem Wärmefluß in axialer Richtung schreiben als:

$$\frac{Nu_{11\infty}}{Nu_{p.Pl.\infty}} = \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^{n(Pr)} \zeta \quad (36)$$

mit $n(Pr) = 0.16 Pr^{-0.15}$ (36a)

und
$$\zeta = \begin{cases} 1 & \text{für } r_1/r_2 \geq 0.2 \\ 1 + 7.5 \left(\frac{r_2/r_1 - 5}{Re} \right)^{0.6} & \text{für } r_1/r_2 < 0.2 \end{cases} \quad (36b)$$

mit dem Gültigkeitsbereich:

$$0.03 \leq \frac{r_1}{r_2} \leq 1$$

$$10^4 \leq Re \leq 10^6$$

$$0.7 \leq Pr \leq 100.$$

Hierbei ist $Nu_{p.Pl.\infty}$ die Nusseltzahl für den Grenzfall der parallelen Platte

$$\frac{Nu_{p.Pl.\infty}}{Nu_{R\infty}} = 1 - \phi(Pr) \quad (37)$$

mit $\phi(Pr) = \frac{0.45}{2.4 + Pr}$ (37a)

und $Nu_{R\infty}$ für den Grenzfall des glatten Rohres

$$\text{Nu}_{R\infty} = \frac{(\zeta/8) \text{ Re Pr}}{K + 12.7 \sqrt{\zeta/8} (\text{Pr}^{2/3} - 1)} \quad (38)$$

$$\text{mit } \zeta = (1.82 / \log \text{ Re} - 1.64)^{-2} \quad (38a)$$

$$\text{und } K = 1.07 + \frac{900}{\text{Re}} - \frac{0.63}{1 + 10 \text{ Pr}} \quad (38b)$$

mit dem Gültigkeitsbereich;

$$0.7 \leq \text{Pr} \leq 5 \cdot 10^5$$

$$4 \cdot 10^3 \leq \text{Re} \leq 6 \cdot 10^5.$$

Auf Stabbündel angewendet, wird, ausgehend vom Radius des Stabes r_1 , der Radius des Außenrohres r_2 so bestimmt, daß der Strömungsquerschnitt des Ringspaltes dem Zentralkanal eines Stabbündels äquivalent ist. Daraus folgt:

$$r_2 = \sqrt{\frac{\sqrt{3}}{2\pi} P} \quad (39)$$

mit dem Stabmittelpunktsabstand P .

Für den Vergleich werden die berechneten Nusseltzahlen für vorgegebene Reynoldszahlen auf den hydraulischen Durchmesser, der für die Meßwerte verwendet wurde, umgerechnet:

$$\text{Nu}_{\text{PR}} = \text{Nu}_{11\infty} (D_h / D_{A2}) \quad (40)$$

dabei ist $D_{A2} = 2(r_2 - r_1)$

$$\text{Re}_{\text{PR}} = \text{Re} (D_h / D_{A2}) \quad (41)$$

Abb. 44a zeigt den Vergleich der nach Petukhov und Roizen berechneten Nusseltzahlen mit den experimentellen Ergebnissen. Die Übereinstimmung ist sehr gut. Die gute Übereinstimmung ist ein weiterer Beweis für die Richtigkeit der Behandlung

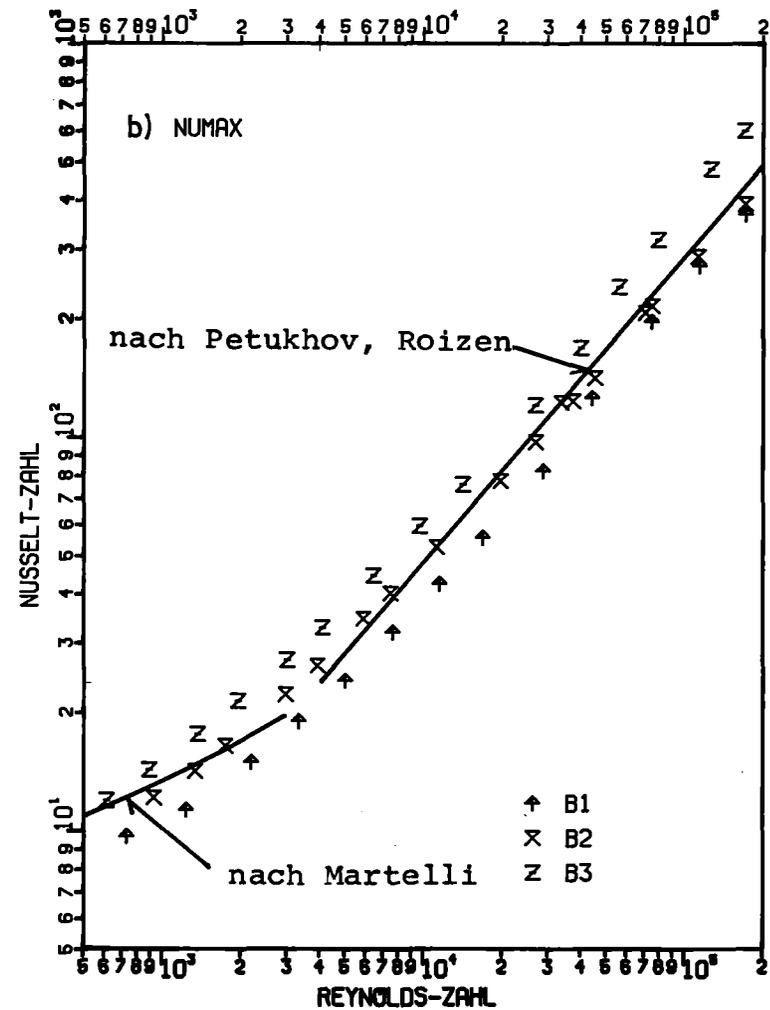
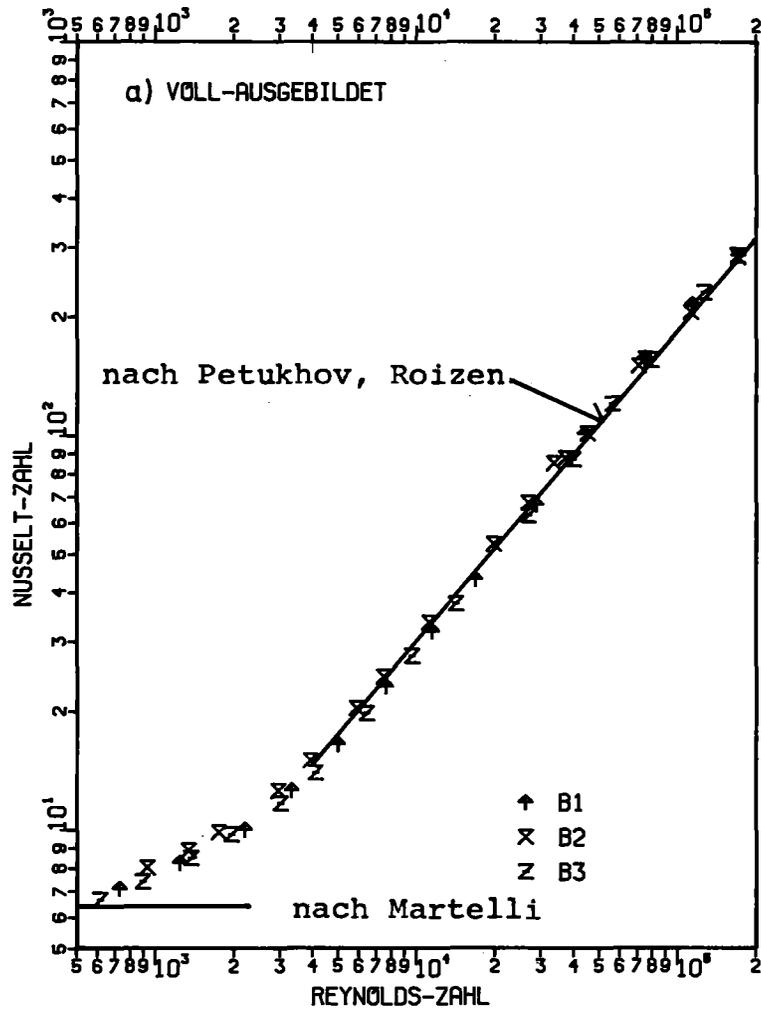


Abb.44: Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit Beziehungen aus der Literatur

von Stabbündeln als flächengleiche Ringspalte bei hohen Stababstandsverhältnissen ($P/D > 1.3$).

7.4.2 Nusseltzahlen für vollausgebildete Strömung und Wärmeübertragung bei laminarer Strömung

Für die Berechnung der Nusseltzahlen im laminaren Strömungsbereich wurde die folgende Beziehung von Martelli /7/ verwendet, die auf theoretischen Ergebnissen von Axford /13/ basiert:

$$Nu_1 = \frac{r^*}{1+r^*} \left[14.12 + 4.126 \ln \left(\frac{0.9523}{r^*} - 1 \right) \right] \quad (42)$$

wobei Nu_1 die voll-ausgebildete Nu-Zahl im laminaren Strömungsbereich und r^* das Radienverhältnis der äquivalenten Ringspalte $r^* = \frac{r_1}{r_2}$ ist.

Die Nu-Zahl nach Gl.(42) ist auf den hydraulischen Durchmesser D_{A2} der äquivalenten Ringspalte bezogen:

$$D_{A2} = 2 (r_2 - r_1) \quad (43)$$

Für den Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen wurden die Nusseltzahlen auf den hydraulischen Durchmesser des Gesamtkanals bezogen

$$Nu_M = Nu_1 \cdot (D_h/D_{A2}) \quad (44)$$

Die Ergebnisse sind ebenfalls in Abb.44a dargestellt. Es zeigt sich aufgrund der Meßwerte, die für die kleinsten gemessenen Reynoldszahlen noch nicht unabhängig von der Reynoldszahl sind, daß eine reine laminare Strömung noch nicht vorliegt. Die Meßwerte zeigen jedoch eine Tendenz, sich den berechneten Grenzwerten asymptotisch anzunähern.

7.4.3 Maximale Nusseltzahlen

Für die Berechnung der maximalen Nusseltzahlen liegen in der Literatur keine empirischen Beziehungen vor. Allerdings gibt es im Schrifttum Beziehungen für den Einlauf in konzentrische Ringspalte. Wenn man davon ausgeht, daß unmittelbar hinter dem Abstandshalter ein neuer Einlauf beginnt, kann man die vorliegenden Beziehungen für Ringspalte auf das untersuchte glatte Stabbündel anwenden.

Für den Einlauf bei turbulenter Strömung geben Petukhov und Roizen folgende Beziehung an:

$$\frac{Nu_{11}}{Nu_{11\infty}} = 0.86 + 0.8 \left(\frac{D_h}{x} \right)^{0.4} \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^{0.2} \quad (45)$$

Gültigkeitsbereich:

$$Pr = 0.7$$

$$0.02 \leq r_1/r_2 \leq 1$$

und von $\frac{x}{D_h} = 1$ bis $\frac{Nu_{11}}{Nu_{11\infty}} = 1$.

Natürlich ist in dieser Beziehung keine Abhängigkeit von der Querschnittsversperrung enthalten. Für einen Vergleich mit den gemessenen maximalen Nusseltzahlen wurde $x/D_h = 1$ gesetzt, um den maximalen Wert aus dieser Beziehung zu verwenden. Diese maximale Nusseltzahlen wurden nach Gl. (40) umgerechnet.

Für Laminarströmung wurde eine Beziehung verwendet, die Martelli /7/ aus tabellierten theoretischen Lösungen /14/ entwickelt hat:

$$Nu_x = C \cdot Nu_1 \quad (46)$$

mit einem von der Graetz-Zahl abhängigen Korrekturwert C und Nu_1 als der Nusseltzahl für hydraulisch und thermisch voll ausgebildeten Wärmeübergang. Dabei ist

$$C = \left(\frac{r^*}{0.00062} \right)^{B(Gz)} \quad (47)$$

$$B(Gz) = -0.1933 + 0.1217(Gz)^{-0.148} \quad (47a)$$

für $0.0001 \leq Gz \leq 0.025$

$$B(Gz) = \bar{B}(Gz) = -0.001338 + 0.0000277(Gz)^{-1.76} \quad (47b)$$

für $Gz \geq 0.025$
und $\bar{B}(Gz) \geq 0$

$$B(Gz) = 0 \quad \text{für } \bar{B}(Gz) \leq 0 \quad (47c)$$

Mit diesen Beziehungen wurden für $x/D_h = 1$ die maximalen Nusseltzahlen bei Laminarströmung berechnet. Diese maximale Nusseltzahlen wurden nach Gl.(44) umgerechnet.

In Abb.44b sind die berechneten maximalen Nusseltzahlen dargestellt. Die Meßwerte stimmen mit dem berechneten Verlauf nur für eine Querschnittsversperrung von $\epsilon=0.302$ annähernd überein. Für die anderen Querschnittsversperrungen bei turbulenter Strömung gibt es größere Abweichungen, da die berechneten Werte unabhängig von der Querschnittsversperrung sind. Für die größte Querschnittsversperrung sind die Meßwerte deutlich höher, weil sie unter den Distanzrippen gemessen wurden (s.6.2.6).

Man kann aus diesem Vergleich schließen, daß für den voll ausgebildeten Fall mit Hilfe des äquivalenten Ringspaltes die Nusseltzahlen gut berechnet werden können. Für die maximale Nusseltzahl ergibt sich keine Übereinstimmung mit den Meßwerten, wenn angenommen wird, daß im Einlauf von Ringspalten bei $x/D_h = 1$ ähnliche Verhältnisse wie unter dem Abstandshalter vorliegen. Dieses Ergebnis zeigt nochmals deutlich, daß die Abstandshaltereffekte auf den Wärmeübergang in gasgekühlten Stabbüdeln nur durch experimentelle Untersuchungen hinreichend genau ermittelt werden können.

7.5 Vergleich des ermittelten Verlaufs der Nusseltzahlen stromabwärts vom Abstandshalter mit Literaturangaben

In der Literatur finden sich Beziehungen für den Einlauf in konzentrische Ringspalte /12/ und für die Abstandshalterwirkung in Stabbündeln /7/ und /15/.

Petukhov und Roizen beschreiben den Einlaufeffekt für konzentrische Ringspalte nach Gl.(45). Diese Beziehung ist unabhängig von Reynoldszahl und Querschnittsversperrung. Die Beziehungen von Martelli /7/ sind ebenfalls unabhängig von der Reynoldszahl, berücksichtigen jedoch die Querschnittsversperrung und den Oberflächentyp (Gl. (12) und (13)).

Hashemi /15/ hat den Abstandshaltereinfluß durch die folgende Beziehung angenähert

$$\text{Nu}^* = 1 + \frac{0.54}{x/D_h - 1.55} \quad (48)$$

gültig für $x/D_h > 3$

Diese Beziehung enthält weder eine Abhängigkeit von der Reynoldszahl noch von der Querschnittsversperrung. Einen Vergleich der Nu^* -Werte für verschiedene x/D_h und eine Reynoldszahl von $\text{Re}=2 \cdot 10^5$ für die in dieser Arbeit entwickelten Beziehungen zeigt Tabelle 2. Während nach den Angaben von Martelli der Einfluß des Abstandshalters für verschiedene Querschnittsversperrungen bei $x/D_h=11$ endet, ist der Einfluß nach den Beziehungen von Petukhov und Roizen bzw. Hashemi für $x/D_h > 50$ noch größer 1% von Nu_∞ . Für die entwickelten Beziehungen steigt mit der Querschnittsversperrung ebenfalls die beeinflusste axiale Länge an; darüberhinaus gibt es einen erheblichen Einfluß der Reynoldszahl auf die axiale Länge, die durch den Abstandshalter hinsichtlich der Wärmeübertragung beeinflusst wird.

Autor	Bemerkung	Nu *								
		$\frac{x}{D_h}$ ϵ	1	2	3	5	10	20	30	50
Martelli /7/	Abstandshalterein- lauf, unabhängig von Reynoldszahl	0.253	1.27	1.32	1.24	1.18	1.03	1.00	1.00	1.00
		0.302	1.39	1.46	1.34	1.25	1.04	1.00	1.00	1.00
		0.348	1.52	1.61	1.45	1.34	1.06	1.00	1.00	1.00
Petukhov /12/	Ringspalteinlauf unabhängig von Reynoldszahl	-----	1.60	1.42	1.33	1.25	1.15	1.08	1.05	1.01
Hashemi /15/	Abstandshalter- einlauf, unabhängig von Re-Zahl und Querschnittsver- sperrung	-----	-----	---	1.37	1.16	1.06	1.03	1.02	1.01
diese Arbeit	Abstandshalter- einlauf für Re = $2 \cdot 10^5$	0.253	1.25	1.22	1.18	1.13	1.06	1.00	1.00	1.00
		0.302	1.38	1.38	1.34	1.26	1.15	1.06	1.00	1.00
		0.348	1.53	1.53	1.47	1.35	1.20	1.07	1.00	1.00

Tabelle 2 Vergleich der Nusseltzahlverhältnisse im Einlauf für eine glatte Oberfläche.

8. Zusammenfassung und Schlußfolgerung

In dieser Arbeit wurde durch experimentelle Untersuchungen erstmals der Einfluß von Abstandshaltergittern in Stabbündeln auf die Wärmeübertragung bei Gaskühlung für einen großen Parameterbereich ermittelt. Die Untersuchungen erstreckten sich über einen Bereich von Reynoldszahlen zwischen 600 und $2 \cdot 10^5$. Da die Experimente mit glatten und künstlich aufgerauhten Stabbündeln durchgeführt wurden, erstrecken sich die Meßergebnisse von der laminaren Strömung über den Übergang von laminarer zur turbulenten Strömung, den Übergang von hydraulisch glatttem zum rauhen Strömungsverhalten bis hin zu voll rauhem Strömungsverhalten bei hohen Reynoldszahlen. Der untersuchte Bereich von Querschnittsversperrungen ($0.25 < \epsilon < 0.35$) ist für Gitterabstandshalter in gasgekühlten Stabbündeln typisch. Die Messungen erstreckten sich von 10 hydraulischen Durchmessern stromaufwärts des Abstandshalters bis $33 D_h$ stromabwärts und erfaßten damit das gesamte Gebiet, das hinsichtlich der Wärmeübertragung durch Gitterabstandshalter beeinflusst ist.

Als wesentliche Ergebnisse dieser Arbeit sind zu nennen:

- Für glatte und rauhe Oberflächen ergeben sich im gesamten ausgemessenen Reynoldszahl-Bereich stets Verbesserungen des Wärmeübergangs durch den Abstandshalter, hervorgerufen durch erhöhte Turbulenz.
- Bei gleicher Querschnittsversperrung ist die Verbesserung des Wärmeübergangs bei glatten Staboberflächen größer als bei rauhen Oberflächen, außer für $Re < 3 \cdot 10^3$, wenn die rauhe Oberfläche sich hydraulisch glatt verhält.
- Für alle Reynoldszahlen und beide Oberflächen ergibt sich ein charakteristischer Verlauf der Wärmeübergangsverbesserung in axialer Richtung: etwa einen hydraulischen Durchmesser vor dem Abstandshalter steigen die Nusseltzahlen rasch auf einen Maximalwert an, der bei rauher Staboberfläche unter, bei glatter kurz hinter dem Abstandshalter liegt. Stromabwärts vom Abstandshaltergitter fallen die Nusseltzahlen exponentiell auf die ungestörte Nusseltzahl im Stabbündel ab.

- Der Maximalwert der Nusseltzahlen steigt mit der Querschnittsversperrung durch den Abstandshalter und hängt stark von der Reynoldszahl ab. Für $Re \approx (3+4) \cdot 10^3$ ergeben sich die größten Verbesserungen der Nusseltzahl.
- Die gemessenen ungestörten Nusseltzahlen des glatten Stabbündels stimmen für turbulente Strömung sehr gut mit empirischen Beziehungen aus der Literatur für Stabbündel überein, die aus Meßergebnissen an konzentrischen Ringspalten hergeleitet wurden.
- Für den Einfluß der Abstandshalter auf die Wärmeübertragung (Anstieg, Maximum und exponentieller Abfall der Nusseltzahl) in Stabbündeln konnten empirische Gesetzmäßigkeiten für das ausgemessene Parameterfeld (Reynoldszahl, Querschnittsversperrung und Oberfläche) entwickelt werden, die in Rechenprogrammen für die thermo- und fluiddynamische Analyse gasgekühlter Stabbündel direkt angewendet werden können. Die mit diesen Gesetzmäßigkeiten berechneten Wandtemperaturen sind konservativ, d.h. durch die Festlegung der Position zwischen den Distanzrippen zur Ermittlung der empirischen Beziehungen, für die die geringste Verbesserung des Wärmeübergangs auftritt, werden berechnete Wandtemperaturen eher über- als unterschätzt.
- Der Vergleich mit Meßergebnissen aus der Literatur zeigt, daß die entwickelten Beziehungen mit einer befriedigenden Übereinstimmung die Nusseltzahlverteilungen an anderen Abstandshalter-Geometrien beschreiben können. Bei einer Extrapolation auf kleinere als die untersuchten Querschnittsversperrungen ergeben sich ebenfalls konservative Wandtemperaturen.

Das rauhe Stabbündel war mit einer Rauheitsgeometrie versehen, die für eine zweidimensionale Rauigkeit ungefähr die besten Wärmeübertragungseigenschaften besitzt/16/. Für rauhe Oberflächen mit geringeren Wärmeübertragungseigenschaften ergeben sich ebenfalls konservative Wandtemperaturen bei Verwendung der Beziehungen für die rauhe Oberfläche, da die Verbesserung der Wärmeübertragung bei glatten Oberflächen größer ist.

Referenzen

- /1/ J. Marek, K. Maubach und K. Rehme:
Heat transfer and pressure drop performance of rod bundles arranged in square arrays. Int. J. Heat Mass Transfer, 16, 2215 (1973).
- /2/ H.J. Hoffmann, C.W. Miller, G.L. Sozzi, W.A. Sutherland:
Heat transfer in seven-rod clusters, influence of liner and spacer geometry on superheat fuel performance. Report GEAP-5289 of G.E. San Jose, California, October 1966.
- /3/ J. Vlček, P. Weber:
The experimental investigation of film heat-transfer coefficient in the fuel element spacers area. Report ZJE-66 Škoda Concern, Nuclear Power Plants Division, Information Centre Plzeň-Czechoslovakia 1970.
- /4/ M. Hudina, H. Nöthiger:
Experimental study of local heat transfer under and near grid spacers developed for GCFR. Report TM-IN-526 of Swiss Federal Institute for Reactor Research Würenlingen, Jan. 1973.
- /5/ V. Krett, J. Majer:
Temperature field measurement in the region of spacing elements. Report ZJE-114 Škoda Works, Nuclear Power Construction Department, Information Centre Plzeň-Czechoslovakia 1971.
- /6/ J. Marek, K. Rehme:
Experimentelle Untersuchung der Temperaturverteilung unter Abstandshaltern in glatten und rauhen Stabbündeln, KfK-Bericht Nr. 2128 (1975)
- /7/ A. Martelli:
Thermo- und fluiddynamische Analyse von gasgekühlten Brennelementbündeln, KfK-Bericht Nr. 2436 (1977)

- /8/ A. Martelli:
SAGAPO, a computer code for the thermo- fluiddynamic analysis of gas cooled fuel element bundles.
KfK-Bericht Nr. 2483 (1977)
- /9/ Durchflußmessung mit genormten Düsen, Blenden und Venturidüsen (VDI-Durchflußmeßregeln), DIN 1952, August 1971.
- /10/ G. Trippe:
Experimentelle Untersuchungen turbulenter Strömungen in axial durchströmten Stabbündeln ohne und mit gitterförmigen Abstandshaltern, KfK-Bericht Nr. 2834 (1979)
- /11/ K. Rehme:
Pressure drop correlations for fuel element spacers. Nucl. Technol., 17, 15 (1973).
- /12/ B.S. Petukhov and L.I. Roizen:
Generalized dependences for heat transfer in tubes of annular cross section, High Temp. 12, 485 (1975)
- /13/ R.A. Axford:
Two-dimensional, multiregion analysis of temperature fields in reactor tube bundles, Nucl. Eng. Design 6, 25-42 (1967)
- /14/ R.E. Lundberg, P.A. McCuen and W.C. Reynolds:
Heat transfer in annular passages. Hydrodynamically developed laminar flow with arbitrarily prescribed wall temperatures or heat fluxes, Int. J. Heat Mass Transfer 6, 495-529 (1963)
- /15/ M. H. Hashemi:
Heat transfer and thermal performance of the rod bundle with grid spacers and segmental baffles, Ph.D. Thesis, Department of Chemical Engineering, University of California, Santa Barbara (1975)

/16/ L. Meyer:

Turbulente Strömung an Einzel- und Mehrfachrauigkeiten
im Plattenkanal, Dissertation, Fakultät für Maschinenbau
der Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe (1978), und
KfK-Bericht Nr.2764 (1979)

Nomenklatur

A	-	$=L_A/D_h$
B	m	Breite der Distanzrippen des Abstandshalters
C	-	$=\log Re$
c	ms^{-1}	Schallgeschwindigkeit
c_p	$Wskg^{-1}K^{-1}$	spezifische Wärme
D	m	Rohrdurchmesser
D_h	m	hydraulischer Durchmesser des Gesamtkanals
D_{A1}	m	hydraulischer Durchmesser der äquivalenten Ringzone
D_{A2}	m	hydraulischer Durchmesser des äquivalenten Ringspaltes
D_{vol}	m	volumetrischer Durchmesser
F_{ges}	m^2	gesamter Strömungsquerschnitt
F_{sp}	m^2	projizierter Abstandshalterquerschnitt
g	ms^{-2}	Erdbeschleunigung
h	m	Höhe der Rauigkeitselemente
K	-	Konstante
L_A	m	Länge des Abstandshalters
L_H	m	Länge der Heizstrecke
L_K	m	Länge des Kanals
m	-	Steigung
\dot{m}	kgs^{-1}	Massendurchsatz
P	m	Stababstand
p	m	Abstand der Rauigkeitselemente
Q	W	Wärmeleistung
q	Wm^{-2}	Wärmefluß
r_1	m	Radius des Stabes
r_2	m	Radius des äquivalenten Ringspaltes

s	m	Wandstärke
T_{aus}	K	Austrittstemperatur
T_{ein}	K	Eintrittstemperatur
T_G	K	Gastemperatur
T_m	K	mittlere Gastemperatur
T_w	K	Wandtemperatur
ΔT	K	Temperaturdifferenz
u	ms^{-1}	Strömungsgeschwindigkeit
W	m	Stababstand von der Kanalwand
w	m	Breite der Rauigkeitselemente
x	m	axiale Länge
x^*	-	$= x/D_h$
α	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
β	K^{-1}	thermischer Ausdehnungskoeffizient
ϵ	-	Querschnittsversperrung
λ	Wm^{-1}K	Wärmeleitfähigkeit
μ	$\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$	dynamische Viskosität
ν	m^2s^{-1}	kinematische Viskosität
θ	-	$= T_w/T_B$
ϕ	grd	Winkel am Heizrohrumfang
Gr		Grashof-Zahl
Gz		Graetz-Zahl
Ma		Mach-Zahl
Nu		Nusselt-Zahl
Nu_1		laminare Nu-Zahl
Nu_0, Nu_∞		ungestörte Nu-Zahl
Nu_M		Nu-Zahl nach Martelli /7/
Nu_{max}		maximale Nu-Zahl
Nu_{PR}		Nu-Zahl nach Petukhov und Roizen /12/
Nu_x		lokale Nu-Zahl

Nu^* = Nu_x / Nu_0 (Nu-Zahlverhältnis)

Nu_{max}^* = Nu_{max} / Nu_0 (Max. Nu-Zahlverhältnis)

Pr Prandtl-Zahl

Re Reynolds-Zahl

Anhang 1

	SUBROUTINE SPANU (X,Y,K,RE,AL,E,XINT,DEL,IT)	00000100
C		00000200
C	EIN FORTRAN-IV-UNTERPROGRAMM ZUR EMPIRISCHEN BERECHNUNG	00000300
C	DES WAERMEUEBERGANGS IM ABSTANDSHALTERBEREICH	00000400
C		00000500
C	INR/HASSAN	00000600
C		00000700
C	02.12.1979	00000800
C		00000900
C	EINGABEDATEN	00001000
C		00001100
C	RE =REYNOLDSZAHL,BERECHNET MIT DEM HYDRAULISCHEN	00001200
C	DURCHMESSER DES GESAMTKANALS	00001300
C	AL =DIMENSIONLOSE ABSTANDSHALTERLAENGE,BEZOGEN AUF	00001400
C	DEN HYDRAULISCHEN DURCHMESSER DES GESAMTKANALS	00001500
C	E =QUERSCHNITTSVERSPERRUNG (.15<E<.35)	00001600
C	XINT =ANFANGS-WERTE VON X (=-1)	00001700
C	DEL =INKREMENT IN X (= .25)	00001800
C	IT =OBERFLAECHENTYP,(=0 FUER GLATT,=1 FUER RAUH)	00002000
C		00002100
C	ERGEBNISSE	00002200
C	X =DIMENSIONLOSER AXIALER ABSTAND VON DER VORDERSEITE	00002300
C	DES ABSTANDSHALTERS,BEZOGEN AUF DEN HYDRAULISCHEN	00002400
C	DURCHMESSER DES GESAMTKANALS	00002500
C	Y =NUSSELTZAHL-VERHAELTNIS (NUX/NUO)	00002600
C	NUX =DURCH DEN ABSTANDSHALTER GESTOERTE NU-ZAHL(LOKAL)	00002700
C	NUO =UNGESTOERTE NU-ZAHL	00002800
C	K =DIE GROESSE DES X,Y-FELDES	00002900
C		00003000
C	*****	00003100
C	DIMENSION X(100),Y(100)	00003200
C		00003300
C	*** BESTIMMUNG DES OBERFLAECHENTYPS *****	00003400
C	IF(IT.NE.0) GO TO 5	00003500
C		00003600
C	***** GLATT *****	00003700
C		00003800
C	*** BESTIMMUNG DES MAX.NU-ZAHL-VERHAELTNISSES *****	00003900
C	IF(RE.LT.2.E3) AL=AL/2	00004000
C	RNUMX=1.+174*E**2*RE**5	00004100
C	IF(RE.LT.2.2E3) GO TO 11	00004200
C	RNUL=RNUMX	00004300
C	RNUMX=1.+E**2.4*(6.38+4.55E3/RE**8)	00004400
C	IF(RNUL.LT.RNUMX) RNUMX=RNUL	00004500
C	11 CONTINUE	00004600
C	*****	00004700
C		00004800
C	*** BESTIMMUNG DER STEIGUNG <M> *****	00004900
C	CMAX=4.	00005000
C	C=1.855E-3*RE	00005100
C	IF(C.GE.CMAX) C=CMAX	00005200
C	IF(RE.LT.3.E3) GO TO 12	00005300
C	C=30.34*RE**(-.253)	00005400
C	IF(C.GE.CMAX) C=CMAX	00005500
C	12 CM=-C*E**2	00005600

```
C *** BESTIMMUNG DER KONSTANTEN <K> *****
DMIN=.895
D=4.42-1.05*ALOG10(RE)
IF(D.LE.DMIN) D=DMIN
IF(RE.LT.3.E3) GO TO 13
D=.426+.113*ALOG10(RE)
IF(D.LE.DMIN) D=DMIN
13 CK=D-2.25*E
XE=AL
WRITE(6,101) RE,E
C *****
XI=XINT
PR=.7
C ** PR=PRANDTLZAHL(=.7 FUER LUFT)
K=0
DO 20 I=1,100
K=K+1
X(I)=XI
YA=1+((RNUMX-1)/(XE+1))*(X(I)+1)
IF(YA.LT.1.) YA=1.
YB=RNUMX
Y(I)=YA
IF(YB.LT.YA) Y(I)=YB
IF(X(I).LE.0.) GO TO 21
YC=CK*(X(I)/RE/PR)**CM
IF(YC.LT.1.) YC=1.
IF(YC.LT.YB) Y(I)=YC
IF(Y(I).LE.1.) GO TO 25
IF(X(I).GE.5.) DEL=1.
IF(X(I).GE.20.) DEL=5.
21 XI=XI+DEL
IF(XI.GT.50.) GO TO 25
20 CONTINUE
25 WRITE(6,102) (X(I),Y(I),I=1,K)
WRITE(6,100)
DEL=.25
C *****
GO TO 1
C *****
5 CONTINUE
C
C ***** RAUH *****
C
C *** BESTIMMUNG DES MAX.NU-ZAHL-VERHAELTNISSES *****
RNUMX=1.+174*E**2*RE**5
IF(RE.LT.2.2E3) GO TO 31
RNUL=RNUMX
RNUMX=1.+E**2*(3.3+7.27E4/RE**1.2)
IF(RNUL.LE.RNUMX) RNUMX=RNUL
31 CONTINUE
C
C *** BESTIMMUNG DER STEIGUNG <M> *****
CMAX=4.
C=1.855E-3*RE
IF(C.GE.CMAX) C=CMAX
IF(RE.LT.3.E3) GO TO 32
C=1.+4.9E4/RE**1.2
IF(C.GE.CMAX) C=CMAX
32 CM=-C*E**2
```

```
C *** BESTIMMUNG DER KONSTANTEN <K> *****
  DMIN=.885
  D=4.42-1.05*ALOG10(RE)
  IF(D.LE.DMIN) D=DMIN
  IF(RE.LT.3.E3) GOTO 33
  D=-.344+.35*ALOG10(RE)
  IF(D.LE.DMIN) D=DMIN
  IF(RE.LT.8E3) GO TO 33
  DK=D
  D=-1.8478+1.2466*ALOG10(RE)-.1298*ALOG10(RE)**2
  IF(DK.LE.D) D=DK
33 CK=D-2.25*E
C
  XE=AL/2
  WRITE(6,101) RE,E
C *****
  XI=XINT
  PR=.7
C ** PR=PRANDTLZAHN(=.7 FUER LUFT)
  K=0
  DO 40 I=1,100
  K=K+1
  X(I)=XI
  YA=1+((RNUMX-1)/(XE+1))*(X(I)+1)
  IF(YA.LT.1.) YA=1.
  YB=RNUMX
  Y(I)=YA
  IF(YB.LT.YA) Y(I)=YB
  IF(X(I).LE.0.) GO TO 41
  YC=CK*(X(I)/RE/PR)**CM
  IF(YC.LT.1.) YC=1.
  IF(YC.LT.YB) Y(I)=YC
  IF(Y(I).LE.1.) GO TO 45
  IF(X(I).GE.5.) DEL=1.
  IF(X(I).GE.20.) DEL=5.
41 XI=XI+DEL
  IF(XI.GT.50.) GO TO 45
40 CONTINUE
45 WRITE(6,102) (X(I),Y(I),I=1,K)
  WRITE(6,100)
  DEL=.25
C *****
100 FORMAT(//)
101 FORMAT(1X,'RE=',E8.2,5X,'VERSERRUNG=',F6.4//)
102 FORMAT(T15,'X*',T25,'NU*',T35,'X*',T45,'NU*',T55,'X*',
1      T65,'NU*'//(8X,6F10.3))
C *****
1 RETURN
  END
```

Anhang 2

GLATTE OBERFLAECHE MIT 25.3% QUERSCHNITTSVERSERRUNG					
* RE *	7.31E2	1.24E3	2.20E3	3.33E3	5.02E3
X/DH	NU	NU	NU	NU	NU
-10.71	7.00	8.20	10.11	12.74	16.73
-9.45	7.06	8.27	10.12	12.70	16.63
-8.19	7.13	8.29	10.08	12.63	16.54
-6.93	7.18	8.32	10.01	12.55	16.38
-5.67	7.20	8.27	9.88	12.45	16.20
-4.41	7.23	8.28	9.86	12.35	16.17
-3.78	7.23	8.26	9.86	12.24	16.15
-3.15	7.25	8.27	9.87	12.20	16.18
-2.52	7.30	8.34	9.92	12.24	16.23
-1.89	7.43	8.44	10.02	12.33	16.37
-1.26	7.64	8.64	10.27	12.60	16.70
-0.63	8.02	9.06	10.79	13.30	17.61
-0.32	8.34	9.44	11.28	13.91	18.52
0.0	8.73	9.91	11.79	14.64	19.56
0.32	9.10	10.39	12.35	15.42	19.87
0.63	9.40	10.82	12.84	16.00	21.24
0.95	9.58	11.13	13.21	16.52	21.89
1.26	9.68	11.24	13.36	16.70	22.27
1.58	9.68	11.24	13.35	16.71	22.24
1.89	9.60	11.12	13.20	16.57	22.05
2.21	9.49	11.02	13.06	16.41	21.82
2.52	9.38	10.91	12.96	16.30	21.74
2.84	9.26	10.86	12.94	16.37	21.91
3.15	9.18	10.83	13.05	16.55	22.29
3.47	9.08	10.85	13.22	16.92	22.74
3.78	9.02	10.91	13.43	17.38	23.22
4.10	9.00	10.98	13.70	17.83	23.58
4.41	8.97	11.06	13.98	18.19	23.86
4.73	8.92	11.13	14.33	18.55	23.96
5.04	8.87	11.19	14.56	18.79	24.03
5.67	8.88	11.30	14.84	18.97	23.94
6.30	8.84	11.31	14.94	18.85	23.58
6.93	8.72	11.29	14.85	18.56	23.10
7.56	8.63	11.24	14.66	18.26	22.57
8.19	8.59	11.10	14.36	17.66	21.85
10.71	8.44	10.65	13.42	16.23	20.10
13.23	8.30	10.34	12.56	15.06	18.76
15.75	8.25	10.06	11.85	14.21	17.75
18.27	8.24	9.85	11.42	13.37	17.03
20.79	8.27	9.63	11.04	12.99	16.57
23.31	8.23	9.45	10.75	12.59	16.31
25.83	8.30	9.34	10.49	12.37	16.14
28.35	8.41	9.35	10.33	12.22	16.02
30.87	8.31	9.23	10.22	12.09	15.99
33.39	8.34	9.20	10.17	12.07	15.94

GLATTE OBERFLÄCHE MIT 25.3% QUERSCHNITTSVERSPERRUNG

* RE *	7.66E3	1.16E4	1.69E4	2.89E4
X/DH	NU	NU	NU	NU
-10.71	23.27	32.26	43.78	67.76
-9.45	23.24	32.22	43.67	67.50
-8.19	23.15	31.97	43.36	67.16
-6.93	23.01	31.72	43.20	66.63
-5.67	22.90	31.47	42.76	66.13
-4.41	22.85	31.50	42.75	66.03
-3.78	22.73	31.49	42.67	65.41
-3.15	22.71	31.51	42.69	65.39
-2.52	22.81	31.64	42.71	65.47
-1.89	22.97	31.83	42.89	65.67
-1.26	23.48	32.37	43.68	66.38
-0.63	24.71	33.93	45.53	68.18
-0.32	25.85	35.44	47.25	70.62
0.0	27.20	37.34	49.64	73.77
0.32	28.74	39.12	51.44	76.12
0.63	29.73	40.24	52.71	77.39
0.95	30.36	40.94	53.49	78.02
1.26	30.52	41.01	53.40	78.13
1.58	30.47	40.76	52.75	77.92
1.89	30.12	40.13	52.02	77.89
2.21	29.76	39.64	51.74	78.97
2.52	29.75	39.84	52.61	80.67
2.84	30.21	40.76	54.10	82.06
3.15	30.90	41.62	55.17	81.99
3.47	31.40	42.10	55.52	81.31
3.78	31.72	42.29	55.40	81.04
4.10	31.89	42.33	55.00	80.39
4.41	31.93	42.19	54.52	79.72
4.73	31.88	41.94	54.03	78.66
5.04	31.75	41.47	53.39	77.85
5.67	31.33	40.49	52.62	76.91
6.30	30.52	39.55	51.53	75.83
6.93	29.73	38.65	50.47	74.46
7.56	29.33	37.88	49.41	73.67
8.19	28.31	36.97	48.59	72.71
10.71	26.22	34.56	46.07	69.30
13.23	24.59	33.11	44.59	66.84
15.75	23.41	32.26	43.29	65.53
18.27	22.94	31.61	42.49	64.70
20.79	22.68	31.34	42.32	63.95
23.31	22.47	31.20	42.19	63.82
25.83	22.37	31.09	42.02	63.13
28.35	22.30	30.81	41.80	62.82
30.87	22.22	30.84	41.67	62.63
33.39	22.19	30.73	41.53	62.40

GLATTE OBERFLAECHE MIT 25.3% QUERSCHNITTSVERSPERRUNG

* RE *	4.42E4	7.51E4	1.14E5	1.72E5
X/DH	NU	NU	NU	NU
-10.71	102.47	159.42	218.19	292.57
-9.45	102.50	159.03	217.54	290.73
-8.19	101.52	158.12	216.31	287.04
-6.93	100.89	157.23	215.69	285.70
-5.67	100.07	157.04	213.86	283.07
-4.41	99.65	155.83	212.66	282.52
-3.78	99.61	156.00	212.49	282.21
-3.15	99.61	155.59	211.81	281.15
-2.52	99.23	155.50	211.21	283.71
-1.89	99.61	154.59	210.13	281.34
-1.26	100.03	154.88	210.12	280.75
-0.63	102.81	157.36	212.97	281.64
-0.32	105.91	160.85	217.57	286.44
0.0	110.25	165.28	224.53	294.77
0.32	112.97	168.16	228.25	299.80
0.63	114.52	172.70	237.31	320.11
0.95	116.63	180.78	255.64	350.83
1.26	117.42	187.88	267.94	362.84
1.58	119.53	192.97	272.60	368.50
1.89	121.54	195.99	272.31	367.91
2.21	124.17	196.73	269.97	362.69
2.52	125.85	195.04	264.21	356.80
2.84	125.79	190.57	258.90	348.26
3.15	124.73	187.59	255.10	342.32
3.47	123.16	185.78	251.97	340.57
3.78	121.89	184.18	250.07	338.83
4.10	120.64	183.06	249.14	338.02
4.41	119.80	182.47	247.28	337.52
4.73	119.20	181.97	248.78	337.47
5.04	118.54	181.47	248.66	337.58
5.67	117.57	180.66	248.08	338.10
6.30	116.47	179.43	246.46	336.65
6.93	115.29	177.97	244.54	334.16
7.56	114.41	176.45	242.20	331.21
8.19	112.87	174.15	239.58	327.56
10.71	108.29	167.87	229.55	312.62
13.23	105.35	163.07	222.57	303.33
15.75	103.13	159.68	216.55	295.05
18.27	101.15	155.97	211.72	286.88
20.79	100.49	153.47	207.74	282.73
23.31	99.71	151.80	206.27	279.43
25.83	99.18	151.65	204.67	276.71
28.35	98.61	150.75	203.17	274.95
30.87	98.12	150.30	202.54	273.41
33.39	98.23	149.33	201.52	272.68

GLATTE OBERFLAECHE MIT 30.2% QUERSCHNITTSVERSPERRUNG

* RE *	9.37E2	1.35E3	1.75E3	2.98E3	3.95E3	5.91E3
X/DH	NU	NU	NU	NU	NU	NU
-10.71	7.94	8.89	9.87	12.76	15.10	20.56
-9.45	7.98	8.90	9.88	12.72	15.04	20.52
-8.19	8.03	8.90	9.89	12.60	15.02	20.47
-6.93	8.08	8.88	9.91	12.51	14.97	20.30
-5.67	8.17	8.85	9.93	12.33	14.87	20.08
-4.41	8.27	8.86	10.00	12.28	14.62	20.00
-3.78	8.28	8.85	9.99	12.31	14.49	19.94
-3.15	8.29	8.91	10.02	12.31	14.51	19.99
-2.52	8.36	9.03	10.05	12.42	14.62	20.17
-1.89	8.51	9.19	10.19	12.63	14.79	20.29
-1.26	8.74	9.54	10.44	13.11	15.38	20.97
-0.63	9.16	10.34	11.21	14.11	16.52	22.61
-0.32	9.63	10.92	11.92	14.92	17.64	23.97
0.0	10.22	11.51	12.72	15.97	18.82	25.63
0.32	10.88	12.28	13.58	17.08	20.24	27.41
0.63	11.42	12.99	14.34	18.25	21.44	29.27
0.95	11.83	13.56	14.89	19.13	22.72	30.40
1.26	12.08	13.88	15.28	19.63	23.40	31.58
1.58	12.13	13.94	15.39	19.88	23.75	31.91
1.89	12.09	13.84	15.33	19.87	23.71	31.94
2.21	11.97	13.68	15.18	19.78	23.57	31.81
2.52	11.83	13.51	15.03	19.74	23.48	31.97
2.84	11.70	13.43	14.99	19.82	23.70	32.33
3.15	11.66	13.38	15.05	20.03	24.16	33.03
3.47	11.67	13.50	15.21	20.38	24.72	33.69
3.78	11.75	13.67	15.42	20.91	25.35	34.21
4.10	11.86	13.84	15.68	21.43	25.79	34.45
4.41	11.93	13.98	15.93	21.82	26.08	34.52
4.73	12.01	14.09	16.20	22.11	26.20	34.33
5.04	12.05	14.15	16.35	22.17	26.22	34.00
5.67	12.07	14.17	16.44	22.03	26.03	33.36
6.30	12.02	14.05	16.36	21.55	25.38	32.23
6.93	11.91	13.86	15.88	20.68	24.15	30.46
7.56	11.84	13.45	15.42	19.63	22.94	29.34
8.19	11.50	13.08	14.86	18.82	22.08	28.15
9.45	11.16	12.43	14.15	17.86	20.97	26.59
10.71	10.92	11.90	13.41	16.85	19.55	25.21
11.97	10.67	11.39	12.85	15.99	18.67	24.03
13.23	10.37	11.05	12.36	15.40	17.92	23.48
14.49	10.25	10.66	12.14	15.01	17.35	22.85
15.75	10.13	10.37	11.84	14.64	16.89	22.21
17.01	9.91	10.19	11.56	14.27	16.47	21.82
18.27	9.91	10.06	11.33	13.99	16.18	21.51
19.53	10.03	9.99	11.15	13.87	15.85	21.14
20.79	10.11	9.91	10.99	13.68	15.75	20.88
22.05	10.17	9.83	10.97	13.52	15.70	20.66
23.31	10.10	9.75	10.89	13.33	15.46	20.44
24.57	10.11	9.69	10.84	13.19	15.35	20.23
25.83	10.16	9.64	10.77	13.12	15.34	20.04
27.09	10.26	9.57	10.74	13.01	15.32	19.94
28.35	10.35	9.53	10.68	12.90	15.23	19.93
29.61	10.49	9.58	10.67	12.93	15.18	19.98
30.87	10.56	9.54	10.66	12.91	15.21	19.97
32.13	10.62	9.59	10.60	12.86	15.05	19.95
33.39	10.67	9.61	10.55	12.85	14.86	19.93

GLATTE OBERFLAECHE MIT 30.2% QUERSCHNITTSVERSPERRUNG

* RE *	7.51E3	1.13E4	1.99E4	2.71E4	3.75E4	3.88E4
X/DH	NU	NU	NU	NU	NU	NU
-10.71	24.56	33.73	53.69	68.03	88.61	91.88
-9.45	24.54	33.65	53.52	67.97	88.51	91.37
-8.19	24.48	33.68	53.29	67.99	87.86	90.72
-6.93	24.45	33.55	52.95	67.69	87.76	90.23
-5.67	24.39	33.42	52.62	66.99	87.14	89.37
-4.41	24.32	33.36	52.52	66.51	86.93	89.03
-3.78	24.20	33.35	52.54	66.55	86.64	89.16
-3.15	24.14	33.30	52.40	66.50	86.59	89.15
-2.52	24.15	33.38	52.46	66.58	86.44	89.18
-1.89	24.39	33.53	52.68	66.79	86.54	89.06
-1.26	25.05	34.23	53.53	67.62	87.57	90.07
-0.63	26.47	36.17	56.03	70.40	90.12	93.61
-0.32	28.02	38.26	58.48	72.73	93.20	98.11
0.0	29.64	40.80	61.97	76.48	97.53	106.39
0.32	32.16	43.66	65.38	81.52	102.96	123.94
0.63	33.92	45.79	68.21	84.31	106.15	134.22
0.95	35.49	47.33	70.05	86.61	108.91	143.79
1.26	36.69	48.72	70.80	87.42	110.66	150.01
1.58	37.24	49.09	71.06	87.78	112.23	151.43
1.89	37.25	49.27	71.37	89.03	115.03	146.90
2.21	37.20	49.11	72.29	90.62	118.43	146.79
2.52	37.46	49.55	74.07	93.78	122.46	149.05
2.84	38.01	50.60	76.20	96.65	123.11	147.06
3.15	38.88	51.78	77.25	97.17	122.91	142.97
3.47	39.60	52.38	77.39	96.55	121.41	138.23
3.78	39.96	52.53	76.95	95.31	119.86	134.53
4.10	40.10	52.45	76.40	93.97	118.08	130.94
4.41	39.99	52.23	75.31	92.54	116.43	127.84
4.73	39.68	51.54	74.18	91.46	114.92	124.73
5.04	39.23	50.84	72.86	90.29	112.94	122.50
5.67	38.09	49.14	70.97	88.11	110.79	118.13
6.30	36.52	47.49	69.11	86.10	109.03	114.45
6.93	35.30	45.78	67.35	84.10	106.63	111.16
7.56	33.76	44.09	65.54	82.03	104.83	109.64
8.19	32.81	42.73	63.78	80.11	102.74	107.94
9.45	30.84	40.91	61.40	77.49	99.31	104.51
10.71	29.12	38.97	59.00	75.09	96.57	101.56
11.97	28.03	37.82	57.06	72.88	94.40	99.89
13.23	27.05	36.74	55.96	71.69	92.70	98.02
14.49	26.51	36.11	55.27	70.51	91.34	96.63
15.75	25.86	35.35	54.43	70.07	90.38	95.44
17.01	25.50	35.01	53.90	69.22	89.54	94.75
18.27	25.12	34.29	53.35	68.60	88.77	93.95
19.53	24.80	34.18	53.00	68.02	88.27	92.59
20.79	24.62	34.07	53.05	67.91	87.87	92.38
22.05	24.36	34.04	52.93	67.52	87.62	92.17
23.31	24.22	34.06	52.99	67.17	87.23	91.93
24.57	24.18	33.92	52.90	67.22	87.08	91.15
25.83	24.13	33.92	52.50	67.00	86.89	90.95
27.09	24.08	33.95	52.31	66.73	86.46	90.67
28.35	24.10	33.95	52.23	66.55	86.17	90.44
29.61	24.03	34.12	52.14	66.54	85.74	90.75
30.87	24.06	34.07	51.94	66.50	85.55	90.36
32.13	23.94	34.02	51.84	66.12	85.46	90.23
33.39	23.91	35.40	51.60	65.92	85.28	90.17

GLATTE OBERFLAECHE MIT 30.2% QUERSCHNITTSVERSERRUNG

* RE *	4.56E4	7.30E4	1.25E5	1.71E5
X/DH	NU	NU	NU	NU
-10.71	102.56	153.14	226.54	284.21
-9.45	102.14	152.92	225.90	283.48
-8.19	101.82	152.09	223.62	282.97
-6.93	101.16	151.17	221.21	281.37
-5.67	100.42	149.23	219.38	276.81
-4.41	100.21	147.99	218.86	275.22
-3.78	100.23	148.38	218.82	276.14
-3.15	99.99	148.24	218.96	276.56
-2.52	99.96	148.52	218.31	275.64
-1.89	99.78	148.14	217.89	275.14
-1.26	100.56	148.41	218.48	274.85
-0.63	103.16	152.75	221.96	276.76
-0.32	106.65	158.27	229.88	284.88
0.0	111.05	171.20	248.13	309.14
0.32	117.31	203.39	307.26	387.65
0.63	121.95	220.42	342.56	431.16
0.95	124.23	226.69	354.51	440.71
1.26	125.73	230.64	367.42	454.48
1.58	127.65	230.45	372.57	460.43
1.89	132.52	234.72	373.01	468.65
2.21	137.20	248.71	391.73	498.86
2.52	140.91	256.54	403.98	514.30
2.84	141.28	251.01	390.77	499.62
3.15	140.75	239.04	370.78	471.83
3.47	138.63	230.43	352.97	451.26
3.78	136.02	221.76	340.73	435.32
4.10	133.40	215.45	331.09	422.52
4.41	132.12	210.63	320.48	408.61
4.73	130.87	205.46	314.39	400.92
5.04	129.74	201.24	308.08	394.63
5.67	127.73	194.83	298.68	381.18
6.30	125.08	189.47	290.75	370.50
6.93	122.92	186.39	284.48	363.22
7.56	120.10	182.94	280.15	357.06
8.19	118.82	179.61	275.20	349.68
9.45	115.73	174.87	266.71	338.80
10.71	113.25	170.21	259.34	329.28
11.97	109.76	166.54	254.69	322.91
13.23	107.59	164.12	250.20	314.56
14.49	106.01	161.13	245.21	309.51
15.75	105.16	159.29	242.00	303.78
17.01	104.42	157.65	238.01	301.00
18.27	103.30	155.21	234.23	293.49
19.53	102.06	152.60	230.81	288.05
20.79	101.94	151.61	229.19	286.85
22.05	101.56	150.45	227.41	284.98
23.31	101.13	150.28	225.38	282.73
24.57	100.60	149.87	225.11	283.00
25.83	99.82	148.79	223.39	280.26
27.09	98.96	148.09	222.44	277.73
28.35	99.04	148.11	222.06	276.40
29.61	98.90	146.71	220.38	274.45
30.87	98.72	146.72	219.69	273.56
32.13	98.27	146.50	220.13	273.09
33.39	98.06	145.94	219.36	271.49

GLATTE OBERFLAECHE MIT 34.8% QUERSCHNITTSVERSPERRUNG

* RE *	6.18E2	8.97E2	1.37E3	1.96E3	3.03E3	4.12E3
X/DH	NU	NU	NU	NU	NU	NU
-10.71	6.55	7.36	8.50	9.84	11.86	14.23
-9.45	6.63	7.40	8.53	9.84	11.85	14.12
-8.19	6.69	7.42	8.53	9.77	11.73	14.03
-6.93	6.70	7.45	8.50	9.72	11.58	13.85
-5.67	6.73	7.43	8.49	9.68	11.48	13.70
-4.41	6.78	7.45	8.47	9.66	11.44	13.63
-3.78	6.82	7.50	8.51	9.67	11.45	13.64
-3.15	6.93	7.58	8.58	9.74	11.51	13.70
-2.52	7.02	7.72	8.74	9.88	11.62	13.81
-1.89	7.19	7.98	9.00	10.15	11.86	14.11
-1.26	7.46	8.45	9.46	10.69	12.66	14.90
-0.63	8.02	9.15	10.50	11.98	14.18	16.62
-0.32	8.60	9.91	11.38	13.15	15.61	18.56
0.0	9.32	10.89	12.64	14.64	17.76	20.92
0.32	10.27	12.11	14.39	16.89	20.59	24.35
0.63	11.12	13.16	16.10	18.68	24.53	27.89
0.95	11.68	13.85	16.96	20.23	26.19	30.48
1.26	11.94	14.30	17.61	21.19	27.13	32.09
1.58	11.86	14.10	17.61	21.39	27.09	32.80
1.89	11.24	13.17	16.61	19.97	25.90	31.07
2.21	10.67	12.58	15.88	19.26	25.40	30.44
2.52	10.35	12.13	15.42	19.07	25.59	30.69
2.84	10.08	11.65	15.04	18.81	25.44	30.42
3.15	9.83	11.43	14.84	18.57	25.08	30.15
3.47	9.65	11.27	14.75	18.57	25.14	30.11
3.78	9.49	11.22	14.82	18.64	24.95	30.00
4.10	9.37	11.16	14.87	18.70	24.94	29.61
4.41	9.26	11.09	14.97	18.67	24.82	29.25
4.73	9.17	11.05	15.02	18.55	24.55	28.51
5.04	9.13	10.99	15.00	18.47	24.03	27.95
5.67	8.94	10.77	14.84	17.95	23.44	26.72
6.30	8.81	10.72	14.46	17.24	22.38	25.51
6.93	8.72	10.53	13.97	16.51	21.31	24.26
7.56	8.60	10.41	13.58	15.95	20.08	22.82
8.19	8.56	10.18	13.34	15.41	19.24	21.85
9.45	8.42	9.92	12.61	14.32	17.78	20.56
10.71	8.32	9.51	12.13	13.71	16.90	19.39
11.97	8.26	9.21	11.48	13.07	15.89	18.31
13.23	8.23	9.15	10.96	12.61	15.03	17.53
14.49	8.13	8.95	10.61	12.09	14.54	16.89
15.75	8.03	8.85	10.34	11.70	14.01	16.36
17.01	7.92	8.80	10.25	11.38	13.60	15.95
18.27	7.88	8.67	10.10	11.18	13.28	15.47
19.53	7.80	8.55	9.98	10.96	12.88	15.17
20.79	7.74	8.58	9.89	10.77	12.88	15.04
22.05	7.70	8.51	9.77	10.64	12.69	14.97
23.31	7.72	8.50	9.62	10.52	12.59	14.83
24.57	7.76	8.50	9.45	10.45	12.46	14.73
25.83	7.78	8.53	9.40	10.35	12.41	14.58
27.09	7.85	8.48	9.35	10.27	12.30	14.49
28.35	7.92	8.50	9.32	10.21	12.17	14.40
29.61	7.92	8.53	9.28	10.18	12.11	14.34
30.87	7.96	8.53	9.28	10.17	12.02	14.26
32.13	8.00	8.53	9.37	10.13	11.97	14.20
33.39	7.91	8.51	9.38	10.12	11.95	14.10

GLATTE OBERFLAECHE MIT 34.8% QUERSCHNITTSVERSPERRUNG

* RE *	6.47E3	9.68E3	1.42E4	2.69E4	4.02E4	5.65E4
X/DH	NU	NU	NU	NU	NU	NU
-10.71	20.00	27.85	37.97	63.74	88.39	122.00
-9.45	19.90	27.78	37.81	63.53	88.25	121.97
-8.19	19.77	27.63	37.56	62.89	87.71	121.06
-6.93	19.68	27.54	37.37	62.57	87.08	120.06
-5.67	19.52	27.27	37.05	62.18	86.25	119.02
-4.41	19.49	27.25	36.96	61.79	86.33	118.46
-3.78	19.52	27.23	37.02	61.73	85.98	118.20
-3.15	19.59	27.29	37.12	61.72	85.91	118.44
-2.52	19.73	27.54	37.28	61.96	86.23	118.59
-1.89	20.00	27.97	37.78	62.21	86.40	118.38
-1.26	20.85	29.19	39.31	63.08	87.36	119.72
-0.63	23.38	32.23	42.26	67.16	91.73	124.97
-0.32	25.82	34.96	45.78	72.31	98.11	131.60
0.0	29.21	39.25	51.25	79.98	108.65	146.43
0.32	34.08	45.85	60.37	92.74	124.21	171.72
0.63	38.59	51.61	68.07	104.50	140.83	194.38
0.95	40.90	56.29	72.57	109.36	148.69	200.78
1.26	44.15	59.40	74.71	112.71	150.53	205.13
1.58	44.54	59.44	75.91	113.46	152.73	210.25
1.89	42.40	57.23	73.64	112.67	154.77	215.93
2.21	42.25	57.68	74.40	115.51	160.39	226.65
2.52	42.72	58.23	75.86	120.02	168.66	240.53
2.84	41.92	57.09	75.74	120.67	168.60	239.54
3.15	41.37	56.29	74.22	117.99	164.66	230.88
3.47	40.69	55.37	72.43	113.93	157.24	219.88
3.78	40.13	54.25	70.12	109.81	151.74	211.78
4.10	39.19	52.80	67.69	106.23	145.12	204.03
4.41	38.49	51.48	65.80	103.12	140.88	196.84
4.73	37.65	49.93	63.85	99.87	136.11	191.36
5.04	36.57	48.76	62.05	97.01	131.96	186.31
5.67	34.47	45.76	58.73	92.42	126.15	177.25
6.30	32.95	43.87	56.12	88.05	120.42	170.04
6.93	31.59	41.66	53.34	83.98	116.06	163.95
7.56	29.92	39.73	51.12	81.09	112.24	159.24
8.19	28.83	38.28	49.40	78.27	108.72	155.11
9.45	26.68	36.04	46.53	74.60	103.58	148.37
10.71	25.33	33.98	44.70	71.89	99.93	143.59
11.97	24.14	32.62	42.86	70.00	98.29	139.95
13.23	23.30	31.65	41.85	68.59	95.98	137.47
14.49	22.55	30.80	41.25	67.57	93.63	134.81
15.75	22.05	30.13	40.51	66.34	92.30	133.04
17.01	21.61	29.71	39.85	65.64	90.87	131.02
18.27	21.27	29.26	39.22	64.59	89.93	129.11
19.53	20.94	28.80	38.94	64.03	88.88	127.49
20.79	20.70	29.31	38.73	63.98	88.56	127.36
22.05	20.62	28.46	38.48	63.79	87.84	126.46
23.31	20.49	28.28	38.22	63.36	87.28	126.18
24.57	20.31	28.12	38.02	62.93	87.11	125.09
25.83	20.12	27.99	37.77	62.69	86.41	125.02
27.09	20.00	27.87	37.72	62.46	86.00	124.08
28.35	19.97	27.79	37.63	62.43	85.73	124.21
29.61	19.87	27.86	37.65	62.30	85.72	124.15
30.87	19.82	27.68	37.66	62.12	85.77	123.89
32.13	19.80	27.62	37.73	61.95	85.69	123.42
33.39	19.74	27.54	37.64	61.92	85.42	123.11

GLATTE OBERFLAECHE MIT 34.8% QUERSCHNITTSVERSPERRUNG

* RE *	7.97E4	1.27E5	1.71E5
X/DH	NU	NU	NU
-10.71	157.83	232.70	290.34
-9.45	157.77	233.78	290.56
-8.19	156.59	232.65	287.89
-6.93	155.43	231.09	286.24
-5.67	153.58	228.05	283.11
-4.41	152.76	227.65	280.96
-3.78	152.85	227.45	282.09
-3.15	152.70	227.25	282.29
-2.52	152.96	228.30	283.00
-1.89	152.92	228.10	283.88
-1.26	153.97	228.35	283.91
-0.63	160.84	234.32	286.98
-0.32	168.18	246.13	303.14
0.0	187.30	275.94	337.84
0.32	220.16	336.54	412.49
0.63	252.09	376.69	462.97
0.95	256.18	383.63	464.61
1.26	257.38	383.85	458.31
1.58	265.66	395.70	473.23
1.89	279.89	418.36	513.97
2.21	297.93	453.97	569.89
2.52	317.20	477.92	598.82
2.84	313.77	480.40	601.09
3.15	302.17	458.87	567.83
3.47	288.41	431.87	535.00
3.78	275.92	407.46	509.87
4.10	265.14	391.86	487.00
4.41	255.82	377.56	469.29
4.73	247.97	364.73	456.78
5.04	241.34	354.94	445.77
5.67	229.33	339.89	424.49
6.30	220.59	323.91	407.35
6.93	212.24	314.91	394.84
7.56	206.57	305.27	381.70
8.19	200.52	295.30	371.79
9.45	193.30	283.41	356.27
10.71	186.26	273.72	342.01
11.97	181.97	265.41	332.21
13.23	177.87	259.70	325.27
14.49	174.60	254.37	319.19
15.75	172.56	250.04	312.16
17.01	170.13	245.86	308.21
18.27	167.84	241.92	303.45
19.53	165.61	238.01	297.56
20.79	165.75	237.38	297.32
22.05	164.38	235.88	295.10
23.31	163.17	234.69	293.36
24.57	162.38	232.67	291.88
25.83	161.72	230.96	289.96
27.09	160.68	230.10	288.93
28.35	160.65	228.60	288.17
29.61	160.62	228.92	287.28
30.87	160.17	228.30	286.08
32.13	159.78	228.12	285.31
33.39	159.15	227.89	284.44

RAUHE OBERFLAECHE MIT 25.3% QUERSCHNITTSVERSPERRUNG

* RE *	7.36E2	1.30E3	2.09E3	3.51E3	4.57E3
X/DH	NU	NU	NU	NU	NU
-10.27	7.57	8.80	10.67	15.20	21.57
-9.06	7.69	8.84	10.66	15.21	21.68
-7.85	7.72	8.84	10.66	15.14	21.76
-6.65	7.72	8.85	10.59	14.99	21.76
-5.44	7.72	8.89	10.54	14.94	21.85
-4.23	7.76	8.90	10.50	14.84	21.96
-3.63	7.70	8.79	10.43	14.72	21.88
-3.02	7.68	8.80	10.43	14.70	21.90
-2.42	7.74	8.82	10.45	14.74	21.94
-1.81	7.83	8.90	10.55	14.86	22.09
-1.21	8.00	9.09	10.72	15.22	22.53
-0.60	8.33	9.47	11.20	15.85	23.24
-0.30	8.58	9.81	11.64	16.31	24.02
0.0	8.90	10.18	12.10	16.98	24.84
0.30	9.18	10.56	12.55	17.61	25.54
0.60	9.47	10.87	13.02	18.03	26.07
0.91	9.65	11.11	13.32	18.27	26.47
1.21	9.73	11.26	13.44	18.40	26.77
1.51	9.76	11.29	13.48	18.44	26.92
1.81	9.76	11.26	13.44	18.38	27.01
2.11	9.75	11.19	13.40	18.37	27.16
2.42	9.74	11.15	13.40	18.45	27.60
2.72	9.69	11.15	13.49	18.74	28.10
3.02	9.64	11.18	13.65	19.25	28.66
3.32	9.54	11.25	13.97	19.80	29.23
3.63	9.44	11.33	14.27	20.42	29.57
3.93	9.33	11.43	14.65	21.09	29.81
4.23	9.27	11.55	15.10	21.64	29.84
4.53	9.26	11.66	15.45	21.93	29.67
4.83	9.22	11.77	15.88	22.16	29.48
5.44	9.23	11.93	16.31	22.27	29.10
6.04	9.22	12.05	16.51	22.15	28.36
6.65	9.11	12.06	16.49	21.78	27.57
7.25	8.98	12.01	16.30	21.20	26.77
7.85	8.88	11.90	15.96	20.72	26.10
10.27	8.80	11.42	15.05	19.07	24.24
12.69	8.76	11.16	14.08	17.92	23.12
15.11	8.74	10.76	13.25	17.09	22.50
17.52	8.58	10.36	12.58	16.26	22.09
19.94	8.58	10.12	12.12	15.78	21.77
22.36	8.49	9.92	11.66	15.49	21.66
24.77	8.44	9.82	11.38	15.28	21.76
27.19	8.46	9.70	11.19	15.19	21.61
29.61	8.51	9.60	11.09	15.00	21.57
32.02	8.47	9.53	10.90	14.80	21.60

RAUHE OBERFLAECHE MIT 25.3% QUERSCHNITTSVERSERRUNG

* RE *	6.48E3	9.69E3	1.61E4	2.44E4	3.00E4
X/DH	NU	NU	NU	NU	NU
-10.27	32.48	50.28	81.52	119.36	155.79
-9.06	32.68	50.42	81.80	120.23	156.76
-7.85	32.71	50.28	81.88	120.68	156.17
-6.65	32.58	50.14	81.53	119.79	155.97
-5.44	32.35	49.95	81.41	119.13	156.55
-4.23	32.17	49.69	80.71	119.14	156.15
-3.63	32.08	49.57	80.34	118.60	155.54
-3.02	32.06	49.47	80.50	118.27	156.30
-2.42	32.05	49.34	80.13	118.02	156.60
-1.81	32.18	49.51	80.00	117.56	156.63
-1.21	32.62	49.90	80.55	118.55	157.96
-0.60	33.55	51.41	82.98	122.24	161.49
-0.30	34.57	52.92	85.85	127.76	166.81
0.0	35.86	55.15	89.65	135.33	176.79
0.30	37.02	57.40	94.93	144.14	189.88
0.60	38.01	60.95	100.41	149.36	196.64
0.91	39.04	63.28	102.47	149.87	196.07
1.21	40.26	64.82	103.00	149.55	196.25
1.51	40.90	65.53	102.66	148.42	194.89
1.81	41.50	65.32	100.85	144.74	190.12
2.11	42.05	64.75	98.58	141.19	183.94
2.42	42.40	63.54	96.10	136.31	179.43
2.72	42.47	62.43	94.59	133.39	175.87
3.02	42.37	61.54	93.60	132.95	174.98
3.32	42.09	60.95	93.78	132.70	175.31
3.63	41.82	60.45	92.39	131.99	175.28
3.93	41.39	59.96	92.18	132.20	175.62
4.23	41.04	59.65	91.97	131.68	175.68
4.53	40.45	59.13	91.44	131.17	175.03
4.83	40.15	58.79	91.24	130.92	175.08
5.44	39.34	57.80	90.45	129.73	174.86
6.04	38.44	56.71	89.03	128.30	173.44
6.65	37.51	55.48	87.58	127.12	171.72
7.25	36.36	54.38	86.55	125.69	169.56
7.85	35.76	53.50	85.66	124.35	168.48
10.27	34.46	51.97	83.85	122.23	167.27
12.69	33.52	50.70	82.94	121.69	167.88
15.11	32.85	50.45	83.01	121.66	169.57
17.52	32.56	49.90	82.72	121.54	169.79
19.94	32.32	49.30	82.29	120.80	170.12
22.36	32.18	49.58	81.82	120.60	171.86
24.77	32.12	49.57	82.08	121.19	174.06
27.19	32.00	49.45	81.60	121.43	175.56
29.61	32.16	49.60	81.88	122.71	178.29
32.02	32.21	49.75	82.56	123.05	180.20

RAUHE OBERFLAECHE MIT 25.3% QUERSCHNITTSVERSERRUNG

* RE *	4.02E4	4.30E4	7.74E4	1.14E5	1.73E5
X/DH	NU	NU	NU	NU	NU
-10.27	177.75	209.67	335.72	449.52	613.41
-9.06	178.76	211.68	337.86	453.11	616.84
-7.85	180.01	212.11	337.19	449.67	613.75
-6.65	178.70	212.14	335.24	449.15	619.39
-5.44	178.40	211.09	335.01	450.53	614.46
-4.23	178.09	210.85	336.06	449.46	607.83
-3.63	176.96	210.01	333.45	445.82	603.94
-3.02	176.92	210.83	334.59	445.97	606.80
-2.42	176.88	210.27	333.18	443.71	604.32
-1.81	176.51	210.67	333.13	443.59	603.81
-1.21	177.23	212.35	336.67	446.94	607.22
-0.60	181.55	217.50	343.30	456.43	614.42
-0.30	187.39	226.66	357.38	473.69	636.08
0.0	198.97	241.75	380.55	503.39	680.37
0.30	214.25	258.51	406.04	532.29	718.71
0.60	218.29	265.19	410.83	543.30	733.79
0.91	217.67	262.02	405.97	534.03	718.38
1.21	217.70	261.51	404.86	534.90	721.59
1.51	215.43	260.03	403.46	537.72	728.47
1.81	209.17	250.94	390.70	518.73	706.24
2.11	202.12	241.94	376.28	499.89	672.52
2.42	195.67	234.71	366.94	490.08	661.39
2.72	192.51	231.36	362.01	481.27	651.02
3.02	193.00	231.40	361.88	483.24	650.97
3.32	193.13	231.77	363.75	487.13	657.47
3.63	193.47	231.72	362.82	484.35	653.72
3.93	194.23	232.35	363.39	483.80	651.30
4.23	194.25	232.98	364.77	487.06	656.07
4.53	193.86	232.06	362.53	483.03	649.08
4.83	193.58	231.79	362.70	480.61	646.54
5.44	193.07	231.15	360.84	479.10	648.20
6.04	191.10	229.35	359.35	480.63	650.19
6.65	190.68	226.80	354.97	476.48	639.97
7.25	187.90	223.71	351.64	472.10	633.65
7.85	186.52	222.76	351.86	474.37	640.15
10.27	184.27	220.88	347.86	472.61	634.68
12.69	185.20	222.29	349.03	470.26	633.12
15.11	185.26	224.43	354.12	476.64	643.24
17.52	185.79	225.55	353.84	479.15	648.42
19.94	184.90	225.76	356.44	483.38	655.72
22.36	186.38	227.35	361.80	493.58	667.69
24.77	187.87	229.72	364.27	499.88	673.44
27.19	188.69	232.36	367.03	504.07	680.88
29.61	190.99	237.87	372.29	515.68	695.83
32.02	192.70	239.98	378.69	523.37	703.31

RAUHE OBERFLAECHE MIT 30.2% QUERSCHNITTSVERSPERRUNG

* RE *	6.95E2	1.04E3	1.28E3	1.88E3	2.72E3	3.44E3
X/DH	NU	NU	NU	NU	NU	NU
-10.27	8.03	9.09	9.56	11.16	14.01	17.66
-9.06	8.15	9.18	9.65	11.24	14.06	17.67
-7.85	8.28	9.28	9.71	11.30	14.04	17.60
-6.65	8.39	9.35	9.77	11.34	14.08	17.57
-5.44	8.50	9.45	9.83	11.38	14.12	17.54
-4.23	8.64	9.57	9.79	11.43	13.91	17.59
-3.63	8.53	9.61	9.76	11.41	13.93	17.43
-3.02	8.53	9.60	9.72	11.41	13.94	17.38
-2.42	8.59	9.58	9.78	11.43	13.99	17.41
-1.81	8.67	9.67	9.88	11.51	14.03	17.44
-1.21	8.90	9.88	10.11	11.71	14.24	17.63
-0.60	9.31	10.21	10.55	12.22	14.95	18.37
-0.30	9.68	10.55	10.97	12.80	15.62	19.03
0.0	10.08	11.13	11.61	13.52	16.67	20.35
0.30	10.57	11.80	12.19	14.47	17.72	21.60
0.60	11.09	12.34	12.71	15.11	18.53	22.52
0.91	11.38	12.71	13.04	15.48	19.19	23.28
1.21	11.62	12.90	13.30	15.83	19.82	24.14
1.51	11.73	12.99	13.38	15.95	20.11	24.74
1.81	11.73	13.00	13.36	15.96	20.26	25.08
2.11	11.62	12.94	13.26	15.95	20.35	25.41
2.42	11.45	12.85	13.16	15.95	20.48	25.75
2.72	11.39	12.78	13.11	16.04	20.70	26.20
3.02	11.40	12.77	13.17	16.21	21.09	26.78
3.32	11.45	12.82	13.29	16.50	21.63	27.53
3.63	11.54	12.93	13.46	16.89	22.29	28.15
3.93	11.63	13.12	13.69	17.38	22.93	28.54
4.23	11.70	13.29	13.92	17.79	23.50	28.78
4.83	11.49	13.55	14.32	18.37	23.94	28.85
5.44	11.22	13.66	14.46	18.48	23.76	28.47
6.04	11.00	13.69	14.49	18.32	23.26	27.88
6.65	10.82	13.60	14.42	17.97	22.59	27.10
7.25	10.67	13.54	14.33	17.68	21.45	26.15
7.85	10.48	13.47	13.95	17.11	20.66	25.03
9.06	10.07	13.06	13.38	16.24	19.57	23.66
10.27	9.98	12.67	12.99	15.69	18.53	22.75
11.48	9.90	12.23	12.51	14.84	17.81	21.90
12.69	9.77	11.91	12.16	14.23	17.03	20.78
13.90	9.77	11.66	11.72	13.82	16.51	20.10
15.11	9.66	11.38	11.58	13.50	16.11	19.46
16.31	9.57	11.13	11.40	13.07	15.99	19.18
17.52	9.60	11.11	11.27	12.78	15.89	18.73
18.73	9.51	11.06	11.07	12.63	15.74	18.17
19.94	9.52	10.85	10.93	12.43	15.53	17.67
21.15	9.51	10.75	10.83	12.08	15.38	17.51
22.36	9.51	10.62	10.63	11.88	15.20	17.33
23.56	9.43	10.56	10.47	11.80	15.13	17.17
24.77	9.50	10.61	10.43	11.67	15.02	17.13
25.98	9.66	10.73	10.40	11.54	14.88	17.14
27.19	9.81	10.85	10.57	11.54	14.88	17.13
28.40	9.99	11.01	10.73	11.60	14.89	17.14
29.61	10.20	11.27	10.92	11.73	14.88	17.11
30.81	10.23	11.39	11.03	11.71	14.82	17.10
32.02	10.32	11.50	11.07	11.73	14.72	16.97

RAUHE OBERFLAECHE MIT 30.2% QUERSCHNITTSVERSERRUNG

* RE *	4.78E3	5.94E3	8.96E3	1.31E4	1.94E4
X/DH	NU	NU	NU	NU	NU
-10.27	24.78	31.33	51.87	74.62	107.01
-9.06	24.98	31.53	51.74	74.81	107.45
-7.85	25.16	31.66	52.01	75.05	107.57
-6.65	25.32	31.70	52.05	75.27	107.78
-5.44	25.40	31.79	52.15	75.38	107.59
-4.23	25.46	31.85	52.12	75.63	107.96
-3.63	25.36	31.69	51.64	74.62	107.27
-3.02	25.34	31.71	51.30	74.45	107.14
-2.42	25.39	31.83	51.44	74.76	107.40
-1.81	25.50	31.90	51.23	74.64	107.35
-1.21	25.86	32.26	51.61	75.17	108.00
-0.60	27.16	33.40	53.16	77.12	110.70
-0.30	28.29	34.72	55.17	79.22	114.05
0.0	29.87	36.94	58.65	84.17	120.58
0.30	31.52	39.23	62.80	90.47	132.63
0.60	33.02	41.24	67.26	97.71	141.01
0.91	34.09	43.05	70.51	101.10	142.25
1.21	35.38	44.61	72.36	102.04	142.69
1.51	36.15	45.62	72.97	102.18	142.43
1.81	36.80	46.38	73.19	102.22	141.77
2.11	37.48	46.92	73.00	101.35	139.12
2.42	37.93	46.97	71.98	99.14	135.46
2.72	38.30	46.86	70.61	96.75	132.70
3.02	38.61	46.62	69.47	94.91	129.99
3.32	38.71	46.27	68.43	93.31	128.53
3.63	38.61	45.84	67.58	92.50	127.66
3.93	38.48	45.49	66.81	91.69	127.02
4.23	37.97	44.85	65.74	91.11	126.06
4.83	36.97	43.76	64.85	90.11	125.02
5.44	36.26	42.45	63.47	88.32	123.28
6.04	34.88	41.03	62.08	86.52	121.89
6.65	33.19	39.14	60.98	85.56	120.33
7.25	31.86	38.17	59.82	84.21	118.96
7.85	30.70	37.44	58.33	82.51	117.42
9.06	29.27	36.28	57.10	81.14	114.30
10.27	27.93	34.41	55.87	80.32	112.18
11.48	27.09	33.49	54.19	78.21	109.68
12.69	26.46	32.37	53.53	77.01	109.34
13.90	26.10	31.98	52.88	76.58	108.94
15.11	25.84	31.76	51.90	76.20	108.43
16.31	25.69	31.58	51.30	76.07	108.16
17.52	25.28	31.37	50.95	75.48	107.66
18.73	25.05	31.28	50.98	75.34	107.70
19.94	24.94	31.08	50.96	74.71	107.28
21.15	24.65	30.79	51.05	74.52	107.49
22.36	24.57	30.66	50.96	75.14	107.82
23.56	24.58	30.80	50.80	75.28	108.12
24.77	24.58	30.93	50.58	75.16	107.79
25.98	24.65	30.98	50.62	75.59	107.76
27.19	24.73	30.89	50.13	74.86	107.18
28.40	24.81	31.07	50.36	74.94	107.31
29.61	24.94	31.23	50.59	74.75	107.36
30.81	24.85	31.12	50.53	74.45	106.94
32.02	24.74	30.88	50.31	74.15	106.83

RAUHE OBERFLAECHE MIT 30.2% QUERSCHNITTSVERSERRUNG

* RE *	2.85E4	4.63E4	7.11E4	1.13E5	1.70E5
X/DH	NU	NU	NU	NU	NU
-10.27	144.06	220.72	320.97	451.91	613.92
-9.06	145.09	222.31	322.75	453.34	618.71
-7.85	145.29	223.50	324.35	454.89	620.18
-6.65	145.39	223.83	324.90	455.30	619.81
-5.44	145.70	222.87	324.59	455.77	617.14
-4.23	146.24	223.57	323.82	457.69	619.83
-3.63	145.68	224.17	323.00	454.90	616.21
-3.02	145.46	224.31	324.71	457.87	625.65
-2.42	146.33	226.43	323.88	454.80	618.51
-1.81	146.21	223.43	323.68	452.61	615.66
-1.21	146.54	225.18	325.87	457.57	621.20
-0.60	151.12	232.05	334.22	466.82	633.18
-0.30	155.81	239.13	345.83	485.03	655.03
0.0	167.15	257.71	371.62	516.98	698.78
0.30	182.11	279.51	403.85	567.77	770.10
0.60	192.17	288.12	412.18	581.53	783.81
0.91	193.22	286.15	407.60	571.50	765.69
1.21	192.92	285.89	405.48	569.77	766.72
1.51	192.05	283.58	402.40	564.95	764.24
1.81	191.00	277.06	393.05	552.92	747.01
2.11	186.30	268.12	382.35	535.39	719.00
2.42	179.78	260.91	371.66	520.80	697.25
2.72	175.86	257.27	369.35	512.60	686.53
3.02	173.63	257.28	363.57	513.60	689.91
3.32	172.15	256.73	363.21	513.44	691.42
3.63	170.85	256.37	361.53	510.38	684.03
3.93	170.02	256.95	363.02	512.25	688.62
4.23	169.20	255.83	361.86	513.03	688.03
4.53	168.15	253.98	358.74	508.05	679.06
4.83	166.26	253.92	357.30	503.51	675.28
5.44	164.83	252.48	353.76	497.73	668.75
6.04	162.88	250.94	352.08	495.45	667.20
6.65	161.51	247.58	348.19	491.85	659.09
7.25	158.58	244.31	343.92	484.71	653.72
7.85	156.23	243.14	340.92	481.90	648.85
10.27	153.87	242.07	338.95	483.09	648.37
12.69	151.32	243.63	345.83	486.95	656.56
15.11	149.90	247.26	349.66	498.46	667.52
17.52	148.96	248.78	347.74	498.90	671.58
19.94	148.23	248.54	346.80	498.99	675.68
22.36	148.35	250.97	349.27	503.61	685.42
24.77	147.66	252.72	352.53	504.76	680.79
27.19	148.32	254.98	353.42	508.98	687.82
29.61	146.95	260.90	359.49	518.79	697.92
32.02	147.73	263.19	360.57	522.57	702.25

RAUHE OBERFLACHE MIT 34.8% QUERSCHNITTSVERSPERRUNG

* RE *	6.45E2	1.17E3	1.52E3	2.02E3	2.65E3	4.02E3
X/DH	NU	NU	NU	NU	NU	NU
-10.27	7.02	8.36	9.19	10.10	12.15	17.86
-9.06	7.10	8.39	9.21	10.13	12.09	17.98
-7.85	7.19	8.46	9.19	10.13	12.09	18.00
-6.65	7.25	8.45	9.19	10.10	12.02	18.06
-5.44	7.32	8.45	9.18	9.99	11.87	18.03
-4.23	7.40	8.44	9.15	9.91	11.84	17.99
-3.63	7.36	8.38	9.16	9.91	11.83	17.89
-3.02	7.38	8.44	9.18	9.97	11.83	17.82
-2.42	7.44	8.52	9.26	10.06	11.90	17.90
-1.81	7.59	8.67	9.47	10.22	12.06	18.18
-1.21	7.85	8.98	9.89	10.69	12.58	18.82
-0.60	8.36	9.80	10.74	11.96	13.60	21.03
-0.30	8.89	10.61	11.60	12.84	14.93	22.79
0.0	9.54	11.53	12.69	14.26	16.64	25.27
0.30	10.39	12.66	14.08	16.06	18.83	28.91
0.60	10.97	13.50	15.23	17.63	20.83	31.81
0.91	11.38	14.10	15.79	18.82	22.21	34.22
1.21	11.70	14.57	16.38	19.70	23.24	35.65
1.51	11.60	14.59	16.54	19.94	23.65	36.23
1.81	11.28	14.19	16.18	19.44	23.10	35.21
2.11	11.02	13.92	16.13	19.39	23.02	35.58
2.42	10.82	13.81	16.23	19.68	23.56	36.78
2.72	10.50	13.54	16.17	19.75	23.72	36.69
3.02	10.33	13.38	16.12	19.76	23.64	35.71
3.32	10.27	13.32	16.20	19.89	23.67	35.13
3.63	10.20	13.39	16.36	20.03	23.67	34.65
3.93	10.12	13.48	16.52	20.16	23.69	34.02
4.23	10.06	13.57	16.63	20.25	23.64	33.41
4.53	10.08	13.64	16.68	20.19	23.49	32.72
4.83	10.01	13.60	16.58	20.04	23.23	32.19
5.44	9.92	13.55	16.30	19.58	22.40	30.65
6.04	9.80	13.46	15.83	18.81	21.30	28.86
6.65	9.60	13.08	15.24	17.94	20.27	27.85
7.25	9.48	12.77	14.64	17.32	19.21	26.53
7.85	9.32	12.50	14.10	16.58	18.43	25.48
9.06	9.20	12.13	13.50	15.33	17.28	24.16
10.27	9.08	11.75	12.86	14.41	16.34	23.09
11.48	9.01	11.38	12.35	13.92	15.61	21.76
12.69	8.82	11.02	11.74	13.39	14.85	20.94
13.90	8.81	10.65	11.29	12.88	14.20	20.40
15.11	8.87	10.15	10.95	12.31	13.85	20.03
16.31	8.81	9.85	10.67	11.96	13.47	19.77
17.52	8.75	9.64	10.47	11.69	13.13	19.56
18.73	8.64	9.44	10.25	11.46	12.83	19.27
19.94	8.63	9.31	10.03	11.20	12.56	19.06
21.15	8.60	9.21	9.97	11.02	12.36	18.84
22.36	8.52	9.20	9.85	10.80	12.24	18.40
23.56	8.51	9.23	9.74	10.72	12.10	18.39
24.77	8.54	9.22	9.66	10.70	11.94	18.39
25.98	8.59	9.21	9.68	10.64	11.86	18.36
27.19	8.60	9.27	9.64	10.57	11.75	18.29
28.40	8.59	9.26	9.60	10.53	11.68	18.25
29.61	8.62	9.24	9.57	10.41	11.59	18.18
30.81	8.70	9.20	9.56	10.36	11.56	18.03
32.02	8.68	9.13	9.49	10.29	11.43	17.41

RAUHE OBERFLACHE MIT 34.8% QUERSCHNITTSVERSPERRUNG

* RE *	6.84E3	9.82E3	1.38E4	1.71E4	2.48E4
X/DH	NU	NU	NU	NU	NU
-10.27	33.98	50.98	70.90	83.58	117.54
-9.06	34.03	51.05	71.18	83.49	118.28
-7.85	34.09	51.04	71.62	83.35	118.48
-6.65	34.02	50.97	71.40	82.94	117.52
-5.44	33.92	50.87	71.25	82.87	117.43
-4.23	33.91	50.88	71.24	83.40	117.66
-3.63	33.87	50.56	70.82	83.37	117.54
-3.02	33.91	50.55	70.97	83.49	117.18
-2.42	34.08	50.91	71.16	83.61	117.30
-1.81	34.34	50.95	71.01	83.62	117.02
-1.21	35.25	51.80	72.18	84.79	119.20
-0.60	37.51	55.35	76.33	89.58	125.27
-0.30	40.60	59.51	81.20	94.52	132.72
0.0	44.88	65.94	90.64	105.21	147.26
0.30	51.17	74.69	101.25	117.17	165.63
0.60	55.85	78.61	107.08	122.19	169.35
0.91	58.35	82.01	109.29	122.20	169.37
1.21	59.92	84.11	110.95	120.16	165.72
1.51	60.45	84.06	110.49	119.39	164.13
1.81	58.07	81.20	106.26	119.18	163.48
2.11	57.75	80.29	104.97	118.53	162.83
2.42	57.60	79.05	102.95	116.08	157.96
2.72	56.94	77.57	101.44	113.43	153.51
3.02	55.72	75.64	99.26	111.88	150.58
3.32	54.36	73.32	96.89	109.40	148.88
3.63	52.93	71.65	95.10	108.12	147.72
3.93	51.85	70.38	94.22	107.68	146.58
4.23	50.69	69.10	92.60	106.44	144.98
4.53	49.48	67.98	91.18	105.40	143.85
4.83	48.53	67.09	90.15	104.73	142.79
5.44	46.87	65.32	88.40	103.07	140.56
6.04	44.57	63.33	86.41	100.90	137.53
6.65	42.72	61.59	84.52	98.73	134.32
7.25	41.48	59.81	82.36	97.37	131.85
7.85	40.46	58.45	80.42	95.34	130.04
9.06	38.57	56.20	78.59	92.69	127.48
10.27	37.68	54.67	76.49	90.56	125.20
11.48	36.85	53.53	74.98	89.65	122.92
12.69	36.09	52.85	74.14	88.13	121.89
13.90	35.84	52.32	74.01	87.38	120.89
15.11	35.38	51.76	73.09	86.46	120.21
16.31	35.48	51.34	72.38	85.62	119.87
17.52	35.14	50.94	71.79	85.24	119.05
18.73	35.06	50.90	71.78	85.05	118.32
19.94	34.88	50.38	71.23	84.34	117.29
21.15	34.96	50.39	71.00	84.47	117.36
22.36	34.80	50.35	71.16	84.44	116.89
23.56	34.64	50.14	71.07	84.29	117.27
24.77	34.36	50.13	71.02	83.82	117.64
25.98	34.42	49.98	71.23	83.68	118.12
27.19	34.14	49.72	70.65	83.22	117.48
28.40	34.24	49.68	70.42	82.90	116.93
29.61	34.15	49.39	70.37	83.18	116.92
30.81	33.95	49.30	70.10	82.85	115.99
32.02	33.71	49.28	70.01	82.77	115.68

RAUHE OBERFLACHE MIT 34.8% QUERSCHNITTSVERSERRUNG

* RE *	3.70E4	4.80E4	8.60E4	1.16E5	1.66E5
X/DH	NU	NU	NU	NU	NU
-10.27	162.88	225.58	367.16	500.27	594.63
-9.06	163.80	227.37	368.06	498.22	594.84
-7.85	163.18	227.46	368.96	500.38	594.03
-6.65	162.93	228.20	369.37	502.23	598.74
-5.44	163.26	228.62	370.34	500.17	595.33
-4.23	163.72	230.36	373.93	501.56	598.94
-3.63	163.59	229.66	373.30	501.38	598.35
-3.02	163.82	229.95	375.12	503.82	603.73
-2.42	164.05	230.91	374.75	503.37	599.01
-1.81	163.92	230.54	373.55	500.83	599.15
-1.21	165.82	232.35	376.20	508.31	605.69
-0.60	174.07	244.20	389.31	519.94	620.64
-0.30	184.07	258.78	410.07	551.27	659.15
0.0	204.42	290.25	465.03	617.49	735.20
0.30	228.54	326.53	522.69	713.78	842.10
0.60	233.65	335.22	523.77	717.72	852.28
0.91	232.74	321.15	511.64	680.84	818.81
1.21	228.29	312.85	499.15	676.60	782.12
1.51	226.82	315.75	488.99	658.60	786.39
1.81	227.04	315.56	492.66	659.12	784.27
2.11	227.72	318.83	501.66	680.64	816.58
2.42	221.28	309.08	487.73	663.57	802.12
2.72	216.02	301.05	473.24	639.81	774.26
3.02	211.78	297.52	468.06	633.44	763.67
3.32	209.63	292.19	462.21	623.14	758.68
3.63	207.90	288.08	456.13	611.23	739.33
3.93	206.38	285.86	452.43	605.42	730.21
4.23	205.44	284.94	449.53	603.95	731.71
4.53	202.69	282.02	441.63	595.50	716.87
4.83	202.14	279.31	438.16	588.18	710.90
5.44	197.91	275.36	429.69	576.65	700.68
6.04	195.18	270.32	423.96	571.02	697.34
6.65	191.07	263.81	416.85	560.39	678.51
7.25	188.05	259.90	411.33	555.95	672.55
7.85	184.68	255.70	405.35	550.00	664.86
9.06	180.70	249.70	394.47	537.58	649.55
10.27	178.33	246.27	390.28	529.69	644.17
11.48	176.45	243.93	390.90	529.94	647.79
12.69	174.94	240.72	388.87	524.33	639.80
13.90	173.99	238.31	384.69	522.22	634.66
15.11	172.65	237.35	384.86	524.53	635.82
16.31	171.07	236.04	382.62	521.92	632.81
17.52	169.78	234.82	381.20	517.60	629.01
18.73	168.88	236.06	382.44	519.93	633.04
19.94	168.76	234.43	378.13	515.29	622.34
21.15	169.35	233.67	377.78	514.83	624.27
22.36	169.20	233.76	378.68	515.76	627.02
23.56	169.06	234.20	380.96	519.12	630.78
24.77	168.79	233.61	381.98	516.92	630.61
25.98	169.91	234.91	384.84	521.00	637.09
27.19	169.39	232.78	381.27	517.31	628.29
28.40	169.12	233.56	380.91	520.00	627.79
29.61	168.72	233.48	380.56	519.60	631.81
30.81	167.34	233.23	380.73	519.49	628.43
32.02	167.94	233.50	377.76	514.51	622.27