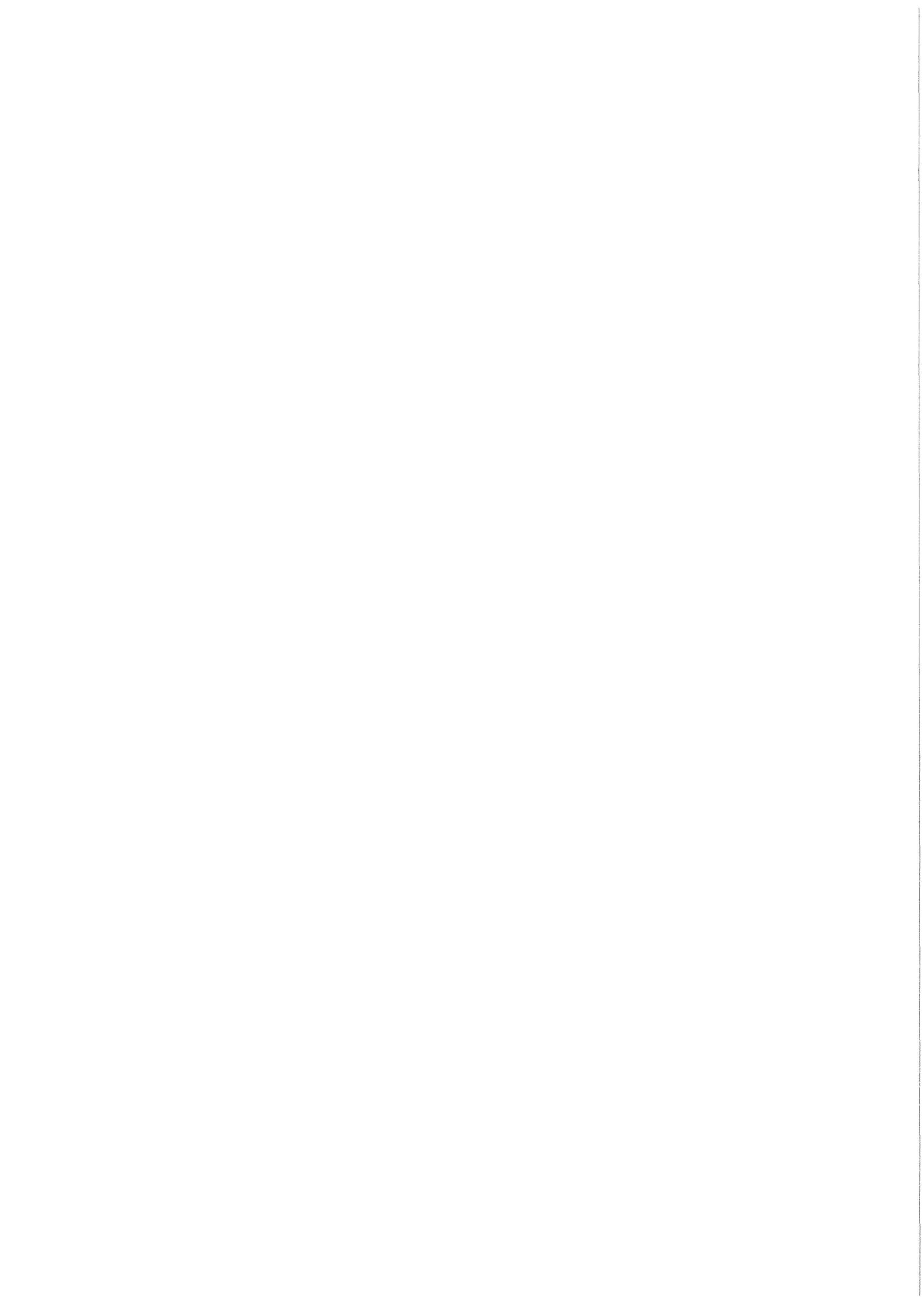


KfK 3813
Dezember 1984

Vergleich von Ergebnissen verschiedener Hitzdraht-Meßverfahren

K. Rehme
Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Schneller Brüter

Kernforschungszentrum Karlsruhe



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Schneller Brüter

KfK 3813

Vergleich von Ergebnissen verschiedener Hitz-
draht-Meßverfahren

K. Rehme

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

Eine voll-automatische Meßanlage ermöglichte, Hitzdraht-Untersuchungen in einem Wandkanal eines Stabbündels durchzuführen, wobei verschiedene Hitzdraht-Sonden zum Einsatz kamen. Dies gestattete nicht nur den Vergleich der Ergebnisse verschiedener Sonden, sondern auch den Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Auswertemethoden. Einzeldraht und Doppeldrahtsonden wurden getestet sowohl mit unlinearisiertem als auch mit linearisiertem Ausgangssignal. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, daß die Messungen mit einer Hitzdrahtsonde mit geradem Draht und einer Sonde mit schrägem Draht, die in fünf verschiedenen Orientierungen zur Strömung verwendet wurde, die zuverlässigsten Ergebnisse liefern, wenn die Daten nach der von Hooper vorgeschlagenen Methode ausgewertet werden.

Comparison between results obtained by different hot-wire methods

Abstract

A fully automated rig enabled hot-wire measurements in a wall subchannel of a rod bundle by different hot-wire probes. Thus, not only a comparison of the results of different probes was possible but also of different evaluation methods. Probes with single wires and double wire probes were tested both with non-linearized and linearized output. The comparison between the results shows that measurements using a hot-wire probe with one straight wire and a probe with one slanting wire applied in five different orientations to the flow produced the most reliable results if the data are evaluated by the method proposed by Hooper.

1. Einleitung

Für die experimentelle Ermittlung von Strömungsgeschwindigkeiten und Geschwindigkeitsschwankungen bei turbulenter Strömung mit Hitzdrähten werden in der Literatur verschiedene Methoden vorgeschlagen. Diese Methoden unterscheiden sich durch die Verwendung verschiedener Hitzdrahtsonden, durch die Art des Betriebs der Sonden und durch die unterschiedlichen Auswerteverfahren.

Ziel der Untersuchungen ist jeweils, den kompletten Reynoldsen Spannungstensor bei turbulenter Strömung experimentell zu bestimmen. Als Hitzdrahtsonden werden benutzt:

- Einzeldrahtsonden, und zwar mit zur Hauptströmungsrichtung senkrechten (geraden) sowie unter 45° geneigten (schrägen) Hitzdrähten
- Zweidraht-Sonden (X-Drähte) mit in zueinander parallelen Ebenen liegenden unter $\pm 45^\circ$ geneigten Hitzdrähten oder mit je einem geraden und schrägen Draht, die in zueinander parallelen Ebenen liegen.

Für spezielle Aufgaben werden auch Mehrdraht-Sonden benutzt. Der Betrieb der Hitzdrähte unterscheidet sich darin, ob die der Geschwindigkeit proportionale Ausgangsspannung der Meßbrücke, die den Hitzdraht auf konstanter Temperatur hält, linearisiert wird oder nicht.

Die unterschiedlichen Auswerteverfahren ergeben sich aus den verschiedenen Ansätzen zur effektiven Kühlgeschwindigkeit am Hitzdraht.

In der Regel wird zur experimentellen Untersuchung der turbulenten Strömung nur ein Verfahren, eine Sondenform und eine Betriebsart ausgewählt, da die Messungen mit Hitzdrähten sehr aufwendig sind und viel Zeit erfordern. Durch die Automatisierung der Steuerung und Meßwerterfassung der Hitzdraht-Meßtechnik /1/ ist es ermöglicht worden, unterschiedliche Verfahren in kurzer Zeit an der gleichen

Geometrie anzuwenden und die Ergebnisse nach den unterschiedlichen Verfahren miteinander zu vergleichen.

Die vorliegende Untersuchung bezieht sich auf:

- Messungen mit Einzeldrahtsonden und zwar:

1) mit nicht linearisiertem Ausgangssignal ;

Diese Messungen wurden nach drei verschiedenen Verfahren ausgewertet:

a) nach dem von Kjellström vorgeschlagenen Verfahren /2/, das bei den bisherigen Messungen stets benutzt wurde /3/,

b) nach einem modifizierten Verfahren, das im Gegensatz zu dem Verfahren nach Kjellström erlaubt, die Korrelation $\overline{v'w'}$ zu ermitteln /1/, in den Abbildungen gekennzeichnet mit "A", sowie

c) nach dem von Hooper /4/ vorgeschlagenen und verwendeten Verfahren, in den Abbildungen gekennzeichnet mit "B",

2) mit linearisiertem Ausgangssignal;

Diese Messungen werden ausgewertet mit einem Verfahren von Acrivlellis /5/, das sogenannte konventionelle-Verfahren, in den Abbildungen gekennzeichnet mit "C".

Die einzelnen Auswerteverfahren und die Rechenprogramme sind von Vosáhlo /6/ ausführlich beschrieben worden.

2. Versuchsgeometrie

Die untersuchte Geometrie ist im Querschnitt in Abb.1 dargestellt. Vier parallele Rohre von $D=139.0$ mm sind in einem Rechteckkanal von 167×700 mm so angeordnet, daß sich im ausgemessenen Bereich das Stababstandsverhältnis P/D gleich dem Wandabstandsverhältnis W/D von $P/D=W/D=1.1007$ ergab. Die Länge des Kanals beträgt $L_K=7800$ mm.

Der hydraulische Durchmesser des ausgemessenen Wandkanals beträgt $D_h = 55.89$ mm; damit ergibt sich für die Meßposition, die ca. 30 mm stromaufwärts vom Kanalende liegt, eine Einlauflänge von $L/D_h = 139$. Die Versuche wurden mit Luft durchgeführt. Die Versuchsanlage und die Durchführung der Experimente, die vollautomatisch durch einen Rechner gesteuert werden, ist in /1/ ausführlich beschrieben. Die Reynoldszahl im Wandkanal betrug $Re = 8.42 \times 10^4$.

3. Ergebnisse und Diskussion

Der ausgemessene symmetrische Teil des Wandkanals (Abb.1) ist in zwei Teile aufgeteilt. Die Trennung erfolgt an der Linie maximalen Wandabstandes /1/. Der Teil des Wandkanals, der dem Stab benachbart ist, wird in Polarkoordinaten (r/ϕ) ausgemessen; dabei wird die Position $\phi=0$ als im engsten Abstand zwischen den Stäben gewählt. Der Teil des Wandkanals, der der Kanalwand benachbart ist, wird in kartesischen Koordinaten (x/y) ausgemessen mit y als dem Wandabstand; die Position $x=0$ mm wird als engster Abstand zwischen Stab und Kanalwand gewählt. Die Meßergebnisse in den beiden Teilen des Wandkanals werden als einzelne Profile getrennt dargestellt, dabei wird die axiale Strömungsgeschwindigkeit auf den Mittelwert im Wandkanal bezogen und alle Turbulenzgrößen werden auf die lokale, an der Wand des jeweiligen Profils gemessene Wandschubspannungsgeschwindigkeit bezogen. Außerdem werden die Meßergebnisse im gesamten Wandkanal in Höhenliniendarstellung gezeigt. Hierbei werden die axiale Strömungsgeschwindigkeit auf die über den Strömungsquerschnitt gemittelte Geschwindigkeit bezogen, während die Turbulenzgrößen mit der Wandschubspannungsgeschwindigkeit für $\phi=0$ grad, also am Stab am engsten Abstand zwischen den Stäben, normiert wird.

Die Höhenliniendarstellungen für die Auswertungen der Einzeldrahtmessungen nach Acrivlellis, Hooper und Kjellström sind in /6/ enthalten, so daß dieser Bericht nur einige Höhenliniendarstellungen enthält, bei denen die Meßwerte nach dem modifizierten Kjellström Verfahren ausgewertet wurden.

3.1 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit

Die mit Pitotrohren gemessenen zeitlichen Mittelwerte der Strömungsgeschwindigkeit sind als Funktion des relativen Wandabstandes y/L (L = Länge des Geschwindigkeitsprofils zwischen Wand und Position der Maximalgeschwindigkeit) in Abb.2 für den Teil des Strömungskanals, der dem Stab benachbart ist (r/ϕ) und in Abb.3 für den der Kanalwand benachbarten Teil (x/y) dargestellt. Die gemessenen Geschwindigkeitsverteilungen zeigen, daß das Minimum der Strömungsgeschwindigkeit im Spalt zwischen Stab und Wand auftritt ($\phi = 90$ grd bzw. $x = 0$ mm). Im gleich großen Spalt zwischen den Stäben ist die Geschwindigkeit deutlich höher, wie auch aus dem Isotachenbild (Abb.4) hervorgeht. Einflüsse von Sekundärströmungen sind nicht zu erkennen.

Mit einem Rechenprogramm wurde aus den Meßwerten die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Wandkanal durch Integration ermittelt. Diese Geschwindigkeit ergab sich zu

$$u_m = 23.69 \text{ ms}^{-1},$$

während am fest eingebauten Pitotrohr eine Geschwindigkeit von

$$u_{\text{REF}} = 26.97 \text{ ms}^{-1}$$

während der Messungen konstant gehalten wurde.

Mit dem hydraulischen Durchmesser des Wandkanals von

$$D_h = 55.886 \text{ mm}$$

ergibt sich die mittlere Reynoldszahl der Untersuchung zu

$$\text{Re} = 8.42 \times 10^4.$$

3.2 Wandschubspannung

Abb.5 zeigt die mit Prestonrohren gemessenen Wandschubspannungsverteilungen an Stab- und Kanalwand. Die dargestellten Wandschubspannungen sind auf den Mittelwert der Wandschubspannung im ausgemessenen Teil des Wandkanals bezogen. Dieser Mittelwert ergab sich aus den Einzelmessungen durch Integration zu

$$\tau_{Wav} = 1.425 \text{ Nm}^{-2}.$$

Während die Wandschubspannungen im Spalt zwischen dem Stab und der Kanalwand an beiden Wänden ($\phi = 90 \text{ grd}$ bzw. $x = 0 \text{ mm}$) etwa den gleichen Wert haben, ist die Wandschubspannung entsprechend der höheren Strömungsgeschwindigkeit im Spalt zwischen den Stäben deutlich höher.

3.3 Dimensionslose Geschwindigkeitsprofile

Die gemessenen Geschwindigkeitsprofile sind in dimensionsloser Darstellung in Abb.6 für die dem Stab benachbarte Strömungszone und in Abb.7 für die der Kanalwand benachbarte Strömungszone aufgetragen. Die Geschwindigkeit u wurde mit der örtlichen Wandschubspannungsgeschwindigkeit

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (1)$$

zu

$$u^+ = \frac{u}{u^*} \quad (2)$$

und der Wandabstand y zu

$$y^+ = \frac{y \cdot u^*}{\nu} \quad (3)$$

dimensionslos gemacht.

Zum Vergleich ist das bekannte Wandgesetz der Geschwindigkeitsverteilung in Kreisrohren von Nikuradse /7/

$$u^+ = 2.5 \ln y^+ + 5.5 \quad (4)$$

als durchgezogene Linie in die Abbildungen eingetragen. Die Meßergebnisse liegen sehr nahe beim Wandgesetz von Nikuradse im wandnahen Bereich. Auffällig ist die geringe Streuung der Meßwerte nahe der Kanalwand.

3.4 Turbulenzintensitäten und kinetische Energie der Turbulenz

3.4.1 Axiale Turbulenzintensität

Die gemessenen Profile der axialen Turbulenzintensität bezogen auf die lokale Wandschubspannungsgeschwindigkeit sind in Abb.8 für den Bereich nahe der Stabwand (r/ϕ) dargestellt für drei verschiedene Methoden:

A nicht-linearisierte Ausgangsspannung, Auswertung nach der modifizierten Kjellström-Methode

B nicht-linearisierte Ausgangsspannung, Auswertung nach Hooper

C linearisierte Ausgangsspannung, Auswertung nach Acrivlellis.

Die entsprechenden Profile für den Bereich nahe der Kanalwand zeigt Abb.9. Die Ergebnisse zeigen, daß die axiale Turbulenzintensität - wie erwartet - in Wandnähe am größten ist, nämlich etwa das 2.1 ÷ 2.4 fache der Wandschubspannungsgeschwindigkeit. Diese Größenordnung ist aus Messungen an Kreisrohren bekannt. Der Abfall der Turbulenzintensität mit dem Wandabstand ist jedoch wesentlich schwächer als bei Kreisrohren. Dabei ist in einigen Bereichen die Turbulenzintensität nahezu konstant über den Strömungsquerschnitt.

Die axiale Turbulenzintensität steigt in Umfangsrichtung des Stabes vom Spalt zwischen den Stäben ($\phi = 0$ grd) auf ein relatives Maximum bei $\phi = 15$ bis 20 grd an und fällt dann auf ein Minimum für $\phi=35$ bis 40 grd ab, also im Bereich der größten Ausdehnung des Strömungsquerschnittes. Danach steigt die Turbulenzintensität auf ein zweites Maximum bei $\phi = 65$ grd an und fällt zum Spalt zwischen Wand und Stab kontinuierlich ab. Ganz entsprechend steigt die axiale Turbulenzintensität entlang der Stabwand von $x = 0$ mm auf ein Maximum bei $x = 30$ bis 35 mm an und fällt bis zur Symmetrielinie ($x = 76.5$ mm) kontinuierlich ab. Die Unterschiede in den Ergebnissen für die verschiedenen Auswertemethoden sind vernachlässigbar für die Methoden A und B. Nach der Methode C (linearisiert) ergeben sich Differenzen bis zu 5%. Die Differenzen der Ergebnisse nach der Originalmethode von Kjellström, im folgenden mit D bezeichnet, und den Ergebnissen nach A und B liegen innerhalb von 1%; die Werte nach D sind etwas kleiner.

Die Höhenliniendarstellungen zeigen daher für alle Methoden sehr ähnliche Strukturen. Abb. 10 zeigt die Höhenlinien nach Methode A, die Ergebnisse nach den Methoden B, C und D sind in /6/ enthalten. Beim Vergleich der Höhenlinienbilder ist zu beachten, daß die Symbole für die Höhenlinien in Abb.10 nicht mit denen aus /6/ übereinstimmen. Deutlich erkennbar ist das Gebiet, in dem die axiale Turbulenzintensität nahezu konstant über den Querschnitt ist ($\phi = 50-65$ grd, $x = 30-45$ mm).

3.4.2 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand

Die Turbulenzintensitäten senkrecht zur Wand sind in Abb. 11 für den Bereich nahe der Stabwand und in Abb. 12 für den Bereich nahe der Kanalwand dargestellt.

Die Ergebnisse nach den Methoden A und B zeigen Abweichungen bis 7%, dabei fällt auf, daß die Ergebnisse nach Methode B nahe der Stabwand (r/ϕ) etwas höher als nach A sind, nahe der Kanalwand (x/y) ist das Ergebnis umgekehrt. Nahe der Stabwand streuen die Ergebnisse nach den Methoden A und B stark:

Für $\phi = 0-30$ grd fallen die Werte von 1.1 an der Wand auf 0.9 im Bereich größten Wandabstandes ab (Methode A), für $\phi \geq 35$ grd sind die Ergebnisse der Turbulenzintensität niedriger, zwischen 0.9 und 0.7. Die vermutete Ursache für den Abfall ist eine mögliche Drift des schrägen Hitzdrahtes von den Eichwerten. Für den Bereich nahe der Kanalwand (x/y) tritt ein derartiger Effekt nicht auf. Es scheint daher notwendig zu sein, nicht nur vor und nach einem Meßzyklus zu eichen, sondern auch zwischendurch.

Die Ergebnisse nach Methode C zeigen im Bereich nahe der Stabwand keine starke Streuung. Sie sind für r/ϕ höher als nach Methode A, für x/y jedoch deutlich niedriger. Die Höhenlinien der Turbulenzintensität senkrecht zur Wand sind viel gleichmäßiger als bei früheren Untersuchungen (Abb.13). Allerdings fällt auf, daß zwischen den Meßwerten nahe der Stabwand (r/ϕ) und nahe der Kanalwand (x/y) ein Bruch besteht.

Die Ergebnisse nach Methode D sind etwa niedriger als nach A, und zwar bis zu 2%.

3.4.3 Turbulenzintensität parallel zur Wand

Abb. 14 zeigt die gemessenen Turbulenzintensitäten parallel zur Stabwand, Abb. 15 die Meßwerte nahe der Kanalwand. In Wandnähe liegen die Meßergebnisse nach A und B bei $1.5 \div 1.7$, die Meßwerte nach C jedoch höher, $1.8 \div 1.9$. Nur im Bereich des maximalen Wandabstandes fallen die Turbulenzintensitäten parallel zur Wand ähnlich wie bei Kreisrohren ab, z.B. für $\phi = 35$ und 40 grd und

$x \geq 70$ mm. In allen übrigen Gebieten ist der Abfall mit wachsendem Wandabstand schwächer; in den Spalten zwischen den Stäben ($\phi = 0$ bzw. 90 grad und $x = 0$ mm) sind die Turbulenzintensitäten parallel zur Wand entweder konstant über den Querschnitt oder die Meßwerte steigen mit wachsendem Wandabstand an, z.B. für $\phi > 80$ grad. Dieses Verhalten war auch bei früheren Untersuchungen in Stabbündeln unterschiedlicher Geometrie beobachtet worden /8/.

Die Ergebnisse nach den Methoden A und B unterscheiden sich um bis zu 10%, wobei die Ergebnisse nach A niedriger sind im Bereich nahe der Stabwand, hingegen höher als nach B im Bereich nahe der Stabwand. Die Ergebnisse nach C sind bis zu 35% höher als nach A; dagegen sind die Ergebnisse nach D bis zu 3% niedriger als nach A.

Das Bild der Höhenlinien nach A, Abb.16, zeigt einen sehr gleichmäßigen Verlauf der Höhenlinien, allerdings ist eine Verschiebung der Höhenlinien an der Linie größten Wandabstandes deutlich sichtbar. Derartige Verschiebungen ergeben sich ebenfalls in den Höhenliniendarstellungen der Ergebnisse nach B,C und D /6/. Im Gebiet nahe dem Spalt zwischen Stab- und Kanalwand ist die hohe und relativ konstante Turbulenzintensität parallel zur Wand deutlich sichtbar.

3.4.5 Kinetische Energie der Turbulenz

Die gemessene kinetische Energie der Turbulenz

$$\overline{k'^2} = \frac{1}{2} \left[\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right]$$

bezogen auf das Quadrat der lokalen Wandschubspannungsgeschwindigkeit (Abb. 17 und 18) fällt mit wachsendem Wandabstand nur im Gebiet der größten Ausdehnung des Querschnitts ($\phi = 35 \div 40$ grad bzw. $x \geq 70$ mm) vergleichbar zu den Kreisrohrwerten stark ab.

In den übrigen Gebieten ist der Abfall mit wachsendem Wandabstand z.T. wesentlich schwächer. Insbesondere für $\phi = 60 - 70$ grad und $x = 25 - 30$ mm ist der Abfall sehr schwach, so daß sich an der Linie maximalen Wandabstandes Werte von 3.5 - 4 ergeben. In unmittelbarer Wandnähe liegen die Meßwerte höher als beim Kreisrohr.

Die Ergebnisse nach A und B unterscheiden sich um bis zu 6%. Dabei ergibt sich wie bereits für die Turbulenzintensitäten senkrecht und parallel zur Wand, daß die kinetische Energie der Turbulenz nach A ausgewertet, niedriger ist im Bereich des Stabes und höher im Bereich der Kanalwand als die entsprechenden Werte ausgewertet nach B.

Die Auswertung der linearisierten Ausgangssignale (Methode C) ergibt Werte, die bis zu 50% höher liegen als nach A. Die Ergebnisse nach D sind bis zu 4% kleiner als nach A.

Bei den Vergleichen ist zu beachten, daß die Resultate nach B eine andere Skala aufweisen als nach A und C.

Das Höhenlinienbild der Meßwerte nach A zeigt Abb.19. Das Bild zeigt deutlich das Gebiet höher kinetischer Energie bei $\phi = 60-70$ grad bzw. $x = 25 - 30$ mm. Die Höhenlinien zeigen leichte Sprünge an der Linie maximalen Wandabstandes.

3.5 Schubspannungen und Korrelationskoeffizienten

3.5.1 Schubspannung senkrecht zur Wand

Die gemessenen turbulenten Schubspannungen senkrecht zu den Wänden sind in Abb. 20 und 21 dargestellt. In Wandnähe folgen die Werte recht gut einer linearen Schubspannungsverteilung. Da der Strömungsquerschnitt senkrecht zur Stabwand mit wachsendem Wandabstand leicht anwächst, sollten die Profile in Abb. 20 leicht nach unten gekrümmt sein. Dieser Verlauf ist nicht überall vorhanden, vor allem deswegen, weil durch die gewählten Koordinaten (r/ϕ im Bereich

der Stabwand und entsprechend für Abb. 21 x/y im Bereich der Kanalwand) mit wachsendem Wandabstand ein wachsender Teil der azimuthalen turbulenten Schubspannung mitgemessen wird. In den engsten Querschnitten ist dieser Effekt am ehesten vernachlässigbar. Tatsächlich verlaufen die Ergebnisse der radialen Schubspannung für $\phi \geq 60$ grad bzw. $x \geq 70$ mm schwach gekrümmt. Insgesamt gesehen unterscheiden sich die Schubspannungen senkrecht zur Wand, die mit den verschiedenen Methoden ausgewertet sind, nur wenig. Alle Differenzen liegen innerhalb 6%. Auffällig ist wiederum die Auffächerung der Daten für r/ϕ nach den Methoden A und B, d.h. das sind die gleichen experimentellen Ergebnisse. Dieser Effekt ist vermutlich auf Drift im Anemometer zurückzuführen, wie bereits unter 3.4.2 erwähnt. Beim Vergleich der Ergebnisse zwischen Methode A und B zeigt sich wiederum der Effekt, daß die Werte nach A für r/ϕ kleiner sind als nach B, für x/y die Tendenz jedoch umgekehrt ist. Die nach Methode D ausgewerteten Ergebnisse stimmen praktisch mit denen nach A überein.

3.5.2 Schubspannung parallel zur Wand

Die Abb. 22 und 23 zeigen die ermittelten Schubspannungen parallel zu den Wänden. Die gemessene Schubspannung zeigt in Wandnähe Werte, die gegen Null gehen. Im wandfernen Bereich steigt die azimuthale Schubspannung mehr oder weniger stark an. Es ergibt sich in vernünftiger Weise, daß das Vorzeichen der azimuthalen Schubspannung wechselt an der Position, wo der Gradient der mittleren axialen Geschwindigkeit in Umfangsrichtung verschwindet ($\phi \approx 35 - 40$ grad, Abb.25). Weiterhin zeigt sich anhand der Meßdaten, daß im Spalt zwischen Stab und Kanalwand ($\phi = 90$ grad bzw. $x = 0$ mm) die azimuthale Schubspannung ebenso gegen Null geht, wie nahe der Symmetrielinie des Wandkanals an der Kanalwand ($x = 77.0$ mm) und für $\phi = 0$ grad. Das beweist, daß die Strömung im ausgemessenen Teil des Wandkanals praktisch nicht von den Nachbarkanälen beeinflusst war. Maximalwerte der azimuthalen Schubspannung ergeben sich in den Gebieten des maximalen Gradienten der Strömungsgeschwindigkeit in Umfangsrichtung, wie zu erwarten ist ($\phi = 10-15$ grad,

$\phi = 65 - 70$ grad sowie $x = 25 - 30$ mm). In diesen Gebieten liegt ebenfalls eine hohe kinetische Energie der Turbulenz vor. Dieser Effekt wird durch den starken zyklischen Impulsaustausch zwischen den Unterkanälen hervorgerufen /8/. Beim Vergleich der Ergebnisse nach den verschiedenen Methoden ergibt sich, daß die Werte nach B bis zu 5% größer als nach A sind, die Werte nach C dagegen bis 15%. Ebenso liegen die Werte nach D bis 15% höher als die Werte nach A, hervorgerufen durch die Vernachlässigung der transversen Schubspannung $-\overline{v'w'}$. Insgesamt gesehen ergeben sich für die Ergebnisse nach den verschiedenen Verfahren praktisch keine großen Differenzen.

3.5.3 Transversale Schubspannung

Die transversalen Schubspannungen sind in Abb. 24 und 25 dargestellt. Sie sind insgesamt gesehen sehr klein und zeigen eine starke Streuung. Es fällt auf, daß die Ergebnisse nach allen Methoden für $x=77$ mm, sowie für $\phi = 35 - 40$ grad, d.h. in Gebieten größten Wandabstandes im Querschnitt praktisch Null sind. Diese Werte sind für die verschiedenen Methoden aus unterschiedlichen Positionen des Hitzdrahtes zur Strömung bestimmt: mit der Bezeichnung der Position von /1/ für:

Methode A: Mittelwert aus 2 und 4

Methode B: Mittelwert aus 2

Methode C: Mittelwert aus 4 und 6

Die jeweils höchsten Werte ergeben sich nach Methode C mit Maximalwerten für $x = 10 - 15$ mm, sowie $\phi = 10 - 15$ grad und $\phi \geq 75$ grad. Nach A ergeben sich ebenfalls die Maximalwerte für $x = 10 - 15$ mm, jedoch ist der Wert kleiner als bei C.

Die transversale Schubspannung ist mit der größten Unsicherheit behaftet und weist die kleinsten Werte auf.

Nach der Methode D (Kjellströms Originalmethode) werden die Schubspannungen in transversaler Richtung vernachlässigt.

3.5.4 Korrelationskoeffizient R_{uv}

Die gemessenen Korrelationskoeffizienten der Schubspannung in Richtung senkrecht zur Wand (Abb. 26 und 27)

$$R_{uv} = \frac{-\overline{u'v'}}{\sqrt{\overline{u'^2}} \cdot \sqrt{\overline{v'^2}}} \quad (5)$$

zeigen einen ähnlichen Verlauf wie bei Kreisrohren. Über einen großen Bereich des Strömungsquerschnitts liegt dieser Korrelationskoeffizient bei etwa 0.4 - 0.5. Im wandfernen Bereich liegen die Korrelationskoeffizienten z.T. höher als beim Kreisrohr, was auf die gewählten Koordinaten zurückgeführt werden muß, wodurch die gemessene Position der Nullschubspannung relativ weit vom Ort der Maximalgeschwindigkeit entfernt liegt.

Für die verschiedenen Methoden ergeben sich kaum Unterschiede, wenn man davon absieht, daß bei Methode A und B die Korrelationskoeffizienten für $\phi = 35 - 45$ grd in Wandnähe relativ hohe Werte aufweisen. Diese Abweichung muß auf Meßfehler zurückgeführt werden. Bei Methode C sind die Korrelationskoeffizienten für die Zone nahe der Stabwand (r/ϕ) niedriger als nach den Methoden A und B.

3.5.5 Korrelationskoeffizient R_{uw}

Die ermittelten Korrelationskoeffizienten der Schubspannung parallel zu den Wänden (Abb. 28 und 29)

$$R_{uw} = \frac{-\overline{u'w'}}{\sqrt{\overline{u'^2}} \sqrt{\overline{w'^2}}} \quad (6)$$

zeigen den für Stabbündel typischen Verlauf. In Wandnähe gehen die Korrelationskoeffizienten gegen Null und sie steigen mit wachsendem Wandabstand z.T. stark an. Für alle Methoden sind die Korrelationskoeffizienten praktisch gleich. Die Maximalwerte ergeben sich zu <0.6 .

3.6 Quellterm für die axiale Wirbelstärke

Die Differenz der Turbulenzintensitäten in Richtung parallel und senkrecht zur Wand $-\rho(\overline{w'^2} - \overline{v'^2})$ wird als Quellterm für die axiale Wirbelstärke angesehen /9/. Die Ergebnisse für den untersuchten Wandkanal zeigen, daß die Differenz der Normalspannungen sich deutlich von den Ergebnissen für Kreisrohre unterscheidet (Abb.30 und 31). Ein ähnlicher Verlauf wie im Kreisrohr ist nur für die Gebiete des größten Wandabstandes im Strömungsquerschnitt zu beobachten ($\phi=30-40$ grad) bzw. $x=65-77$ mm). Das starke Anwachsen der Turbulenzintensität parallel zur Wand insbesondere in den engen Spalten des Strömungsquerschnittes ohne den entsprechenden Anstieg der Turbulenzintensität senkrecht zur Wand läßt die Differenz der Normalspannungen in den engen Querschnitten stark anwachsen. Das ist besonders deutlich im Spalt zwischen Stab- und Kanalwand ($\phi=75-90$ grad) bzw. $x=0-15$ mm). Jedoch ist auch erkennbar, daß im Spalt zwischen den Stäben ($\phi = 0-10$ grad) die Differenz der Normalspannungen nicht mit wachsendem Wandabstand abfällt.

Für die verschiedenen Methoden ergeben sich ganz ähnliche Ergebnisse. Jedoch sind die Daten nach A für r/ϕ kleiner als nach B, hingegen für x/y (nahe der Kanalwand) ist die Tendenz umgekehrt. Die Werte nach C sind stets höher als nach A und B, was auf die sehr hohen Turbulenzintensitäten parallel zur Wand bei der Messung und Auswertung nach C zurückgeführt werden muß.

Die Höhenliniendarstellung (Abb.32) zeigt ein sehr einheitliches Bild, aus dem die hohen Werte für die Differenz der Normalspannungen im Spalt zwischen Stab und Kanalwand deutlich hervorgehen.

3.7 Wirbelviskositäten

Aus den Daten für die turbulenten Schubspannungen und aus der Verteilung des zeitlichen Mittelwertes der Strömungsgeschwindigkeit in axialer Richtung wurden die Wirbelviskositäten in Richtung senkrecht und parallel zu den Wänden gemäß den Definitionsgleichungen ermittelt. Dazu wurde das Rechenprogramm EPSI /10/ verwendet, in dem die zur Berechnung erforderlichen Geschwindigkeitsgradienten berechnet werden. Es wird durch jeweils drei Meßwerte für die mittlere Geschwindigkeit eine Parabel 2. Ordnung gelegt und die Ableitung am betrachteten Ort ermittelt. Die gemessenen Geschwindigkeits- und Schubspannungsverteilungen werden dabei verwendet, wie sie gemessen wurden, es wird also keinerlei Glättung der Meßdaten vorgenommen.

3.7.1 Wirbelviskosität senkrecht zur Wand

Die Wirbelviskosität senkrecht zur Wand ergibt sich in dimensionsloser Form zu:

$$\epsilon_Y^+ = \frac{\epsilon_Y}{Lu^*} = \frac{-\partial \overline{u'v'}/\tau_w}{\frac{\partial (u/u_{REF})}{\partial (r/L)}} \cdot \frac{u^*}{u_{REF}} \quad (7)$$

Hierin ist $u^* = \sqrt{\tau_w/\rho}$ die Wandschubspannungsgeschwindigkeit an der betrachteten Umfangsposition und L ist die Länge des Geschwindigkeitsprofils zwischen der Wand und dem Ort der Maximalgeschwindigkeit.

Die ermittelten Wirbelviskositäten sind in Abb. 33 und 34 dargestellt. Im Vergleich mit der Wirbelviskosität im Kreisrohr sind die gemessenen Wirbelviskositäten im wandfernen Bereich durchweg höher. Hier wirken sich die wegen der gewählten Koordinaten relativ zu hoch gemessenen Schubspannungen aus. Die größere Streuung wird natürlich auch durch die sehr kleinen Geschwindigkeitsgradienten bewirkt. In Wandnähe stimmen die ermittelten Wirbelviskositäten senkrecht zur Wand sehr gut mit den Kreisrohrwerten überein.

Bei allen drei Auswertemethoden ergibt sich praktisch der gleiche Verlauf der Wirbelviskositäten.

3.7.2 Wirbelviskosität parallel zur Wand

Die Wirbelviskosität parallel zur Wand ergibt sich in dimensionsloser Form zu:

$$\varepsilon_{\phi}^{+} = \frac{\varepsilon_{\phi}}{Lu^{*}} = \frac{-\rho \overline{u'w'} / \tau_w}{\frac{r}{L} \frac{\partial (u/u_{REF})}{\partial \phi}} \frac{u^{*}}{u_{REF}} \quad (8)$$

Wie bei den früheren Messungen /11,12/ unterscheiden sich die Ergebnisse für die Wirbelviskosität parallel zur Wand ganz erheblich von denen senkrecht zur Wand. Die ermittelten Werte sind in Abb. 35 und 36 dargestellt. Die Wirbelviskositäten parallel zur Wand sind sehr stark ortsabhängig und zwar sowohl in zur Wand senkrechter Richtung als auch besonders in Umfangsrichtung. So ergeben sich Maximalwerte der Wirbelviskosität parallel zur Wand nahe den engsten Querschnitten zwischen den Stäben ($\phi = 0 - 15$ grad) und zwischen Stab- und Kanalwand ($\phi = 80 - 90$ grad bzw. $x = 0 - 15$ mm).

Unmittelbar in den Spalten zwischen den Stäben ($\phi = 0$ grad) und zwischen Stab- und Kanalwand ($\phi = 90$ grad bzw. $x = 0$ mm) sind die Wirbelviskositäten nicht definiert, da der Geschwindigkeitsgradient in Umfangsrichtung gegen Null geht. Das gleiche gilt für die Symmetrielinie bei $x = 79.8$ mm und für $\phi \approx 35 - 40$ grad.

Die Ergebnisse, die aufgrund der verschiedenen Methoden ermittelt wurden, unterscheiden sich nur wenig. In den engen Spalten ergeben sich Anisotropiekoeffizienten von größer als 50.

4. Schlußfolgerungen

Der Vergleich der Ergebnisse von Hitzdrahtmessungen in einem Wandkanal eines Stabbündels mit unterschiedlichen Sonden und nach verschiedenen Auswertemethoden hat die folgenden Ergebnisse gebracht:

- Für Messungen mit Einzeldraht-Sonden mit unlinearisiertem Ausgangssignal ergeben sich nach der Auswertemethode nach Hooper und der modifizierten Methode von Kjellström nur geringe Abweichungen, die innerhalb der experimentellen Unsicherheit liegen. Da die in die Auswertung eingehenden Koeffizienten bei der Hooper-Methode alle aufgrund der Eichung bestimmt werden, scheint die Hooper-Methode die beste zu sein. Wie die Ergebnisse für das Gebiet nahe der Stabwand zeigen, ist es erforderlich, nicht nur vor und nach der Messung eine Eichung der Hitzdrähte - insbesondere des schrägen Drahtes wegen der langen Versuchszeit - vorzunehmen, sondern auch zwischendurch.
- Die Messungen mit Einzeldraht-Sonden mit linearisiertem Ausgangssignal nach der konventionellen Acrivlellis-Methode liefert abweichende Ergebnisse. Das wird auf zwei Ursachen zurückgeführt: Erstens zeigt der verwendete Linearisator eine relative starke Drift während der Experimente, die die Ergebnisse verfälschen und zweitens ist der zusätzliche elektronische Baustein, der Linearisator, auch eine generelle zusätzliche Fehlerquelle.

- Die Ergebnisse, die mit der Originalmethode von Kjellström ermittelt werden, weichen nur geringfügig - innerhalb der experimentellen Unsicherheiten von den Ergebnissen mit Einzeldrahtsonden mit unlinearisiertem Ausgangssignal ab, die nach der Hooper-Methode und nach der modifizierten Kjellström-Methode ermittelt wurden. Die einzigen Unterschiede ergeben sich daraus, daß bei der Originalmethode von Kjellström die transversale Schubspannung vernachlässigt wird, wodurch die Schubspannung parallel zu den Wänden überschätzt wird. Für die verwendete Geometrie sind jedoch die ermittelten transversalen Schubspannungen klein. Damit ist gezeigt, daß das bislang bei Hitzdraht-Messungen verwendete Verfahren (Originalmethode Kjellström) zuverlässige experimentelle Werte geliefert hat.

- Die Ergebnisse, die mit einer Zweidrahtsonde mit zwei schrägen Drähten (X-Draht) ermittelt wurden, zeigen, daß zwar nur Messungen in 3 Positionen erforderlich sind, um den kompletten Reynoldsen Spannungstensor zu bestimmen. Jedoch ergab sich, daß es erforderlich ist, die Axialkomponente der Turbulenzintensität mit einem geraden Draht zu bestimmen, damit stets vernünftige Ergebnisse erzielt werden. Die Ergebnisse mit Zweidrahtsonden werden nicht in diesem Bericht diskutiert.

- Die Hooper-Sonde mit je einem geraden und einem schrägen Draht hat nicht die Nachteile der X-Drahtsonden. Jedoch ist der Durchmesser der Sonde so groß, daß Messungen in Wandnähe nicht möglich sind. Die Einzeldrahtsonden erlauben als kleinsten Wandabstand 1,3 mm, hingegen liegt dieser Abstand bei der verwendeten Hooper-Sonde bei 3 mm.

Als Ergebnis dieser Studie kann daher empfohlen werden, für Hitzdraht-Messungen Einzeldraht-Sonden zu verwenden mit nicht-linearisiertem Ausgangssignal und die Daten nach der von Hooper vorgeschlagenen Methode auszuwerten.

Referenzen:

- /1/ K. Rehme,
Rechnergesteuerte Versuchsanlage zur Messung von Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen mit Hitzdrähten, KfK 3744, Kernforschungszentrum Karlsruhe (1984).
- /2/ B. Kjellström,
Studies of turbulent flow parallel to a rod bundle of triangular array, Report AE-487, Studsvik (1974).
- /3/ K. Rehme,
Experimentelle Untersuchung der turbulenten Strömung in einem Wandkanal eines Stabbündels, KfK 2441, Kernforschungszentrum Karlsruhe (1977).
- /4/ J.D. Hooper,
Fully developed turbulent flow through a rod cluster, Ph.D. Thesis, University of N.S.W., Australia (1980)
- /5/ M. Acrivlellis,
Finding the spatial flow field by means of hot-wire anemometry, DISA-Information No.22, S.15-28 (1977).
- /6/ L. Vosáhlo,
Computer programs for evaluation of turbulence characteristics from hot-wire measurements, KfK 3743, Kernforschungszentrum Karlsruhe (1984).
- /7/ J. Nikuradse,
Gesetzmäßigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Röhren VDI Forsch. Heft No. 356 (1932).
- /8/ J.D. Hooper and K. Rehme,
Large-scale structural effects in developed turbulent flow through closely-spaced rod arrays, J. Fluid Mech. 145, 305-337 (1984).

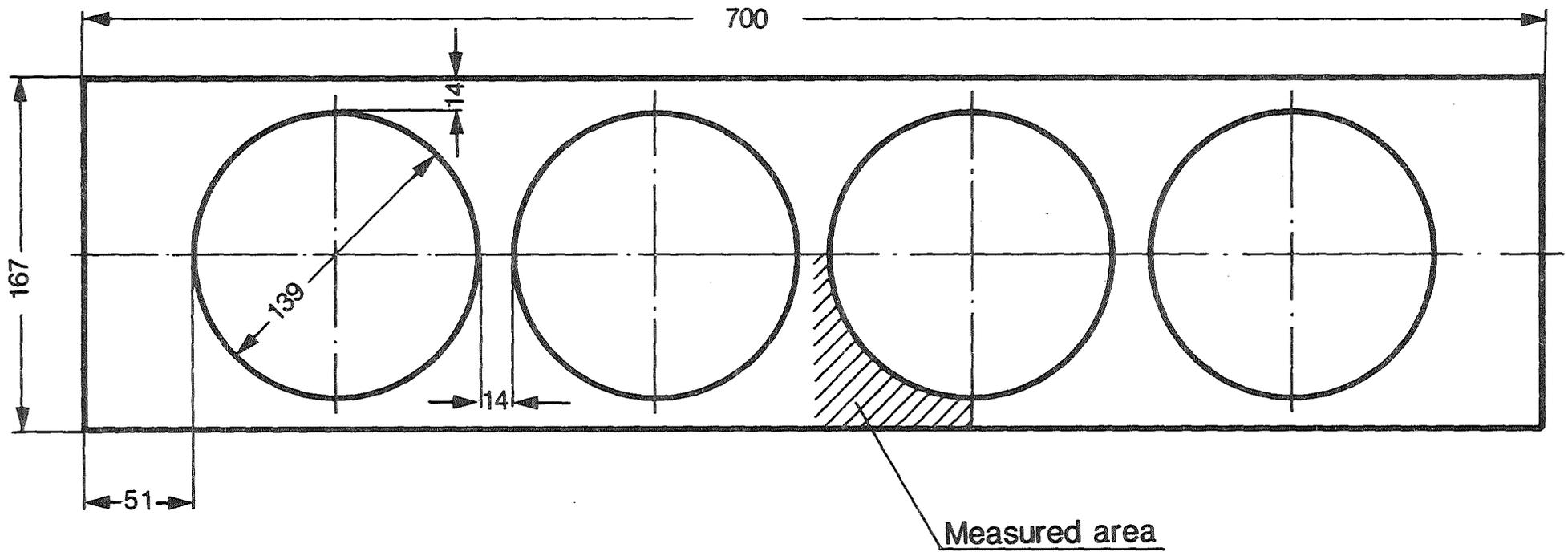
- /9/ M.A. Hague et al.,
An observation on the origin of secondary flow in straight
noncircular ducts, Wärme- und Stoffübertragung 17, 93-95
(1983).
- /10/ Ch. Hausmann und M. Mangelmann,
(unveröffentlicht)
- /11/ K. Rehme,
Turbulent momentum transport in rod bundles, Nucl. Eng.
Design 62 (1-3), 137-146 (1980).
- /12/ K. Rehme,
Distributions of velocity and turbulence in a parallel flow
along an asymmetric rod bundle, Nucl. Technology 59, 148-159
(1982).

Nomenklatur:

D	m	Stabdurchmesser
$\frac{D_h}{k'}$	$m^2 s^{-2}$	hydraulischer Durchmesser kinetische Energie der Turbulenz
L	m	Länge des Profils zwischen Wand und Maximal- geschwindigkeit
L_k	m	Länge des Versuchskanals
P	m	Stababstand
r	m	Radius
R_{uv}	-	Korrelationskoeffizient uv
R_{uw}	-	Korrelationskoeffizient uw
Re	-	Reynolds-Zahl
u	ms^{-1}	Geschwindigkeitskomponente in axialer Richtung
u'	ms^{-1}	Schwankungsgeschwindigkeit in axialer Richtung
u_{REF}	ms^{-1}	Referenzgeschwindigkeit
u_m	ms^{-1}	mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Kanal
u^*	ms^{-1}	Schubspannungsgeschwindigkeit
u^+	-	dimensionslose Geschwindigkeit
v'	ms^{-1}	Schwankungsgeschwindigkeit senkrecht zur Wand
w'	ms^{-1}	Schwankungsgeschwindigkeit parallel zur Wand
W	m	Wandabstand
x	m	Position entlang der Kanalwand
y	m	Abstand von der Wand
y^+	-	dimensionsloser Wandabstand
ϵ	$m^2 s^{-1}$	Wirbelviskosität
ϵ^+	-	dimensionslose Wirbelviskosität
ϕ	grad	Umfangskoordinate
ρ	$kg m^{-3}$	Dichte
ν	$m^2 s^{-1}$	kinematische Viskosität
τ_w	Nm^{-2}	Wandschubspannung
$\tau_{w_{av}}$	Nm^{-2}	mittlere Wandschubspannung

Indizes

y senkrecht zur Wand
 ϕ parallel zur Wand



$P/D = 1.1007$
 $W/D = 1.1007$



Abb. 1 Geometrie des Versuchskanals

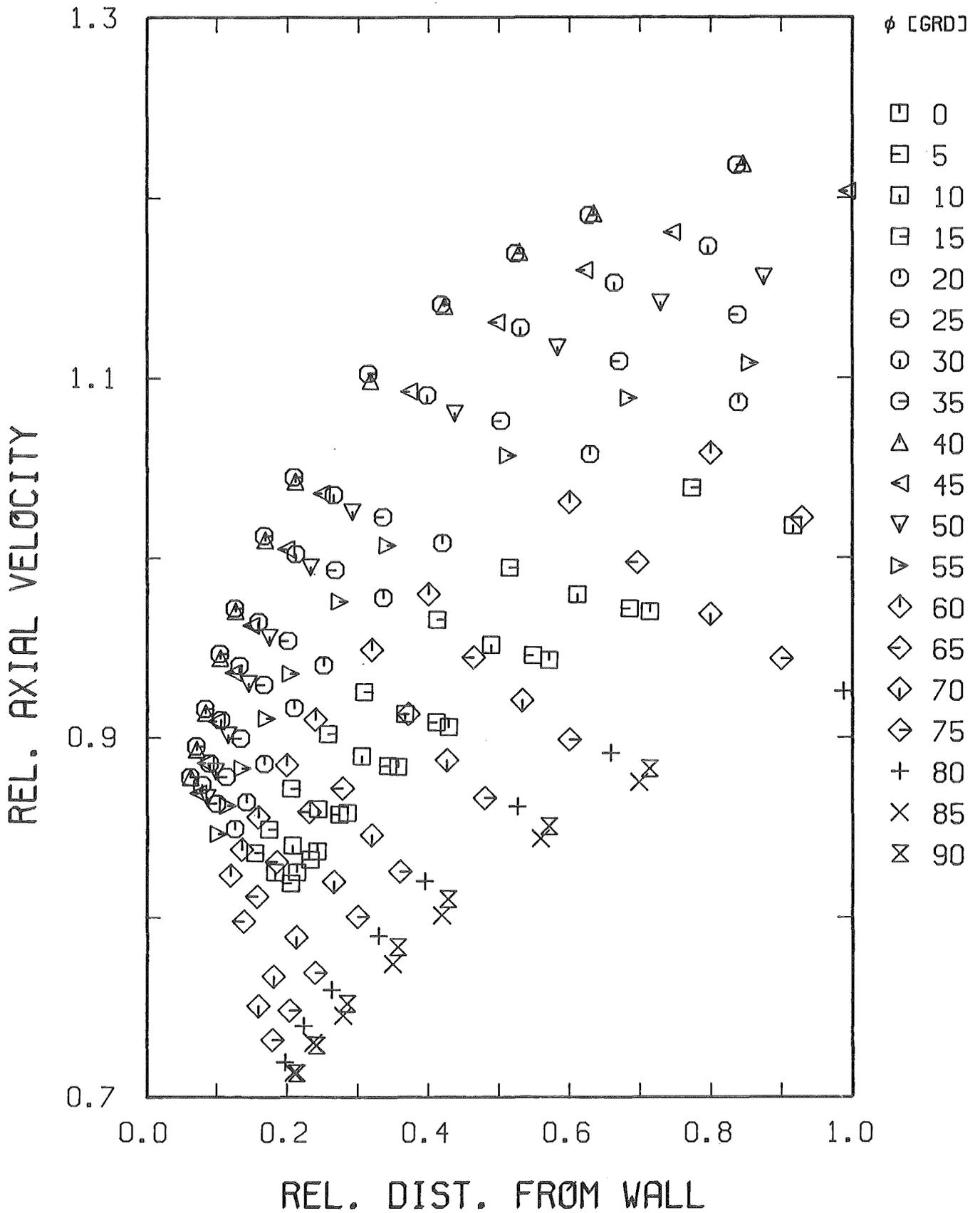


Abb. 2

Axiale Geschwindigkeit bezogen auf die mittlere Geschwindigkeit (r/ϕ)

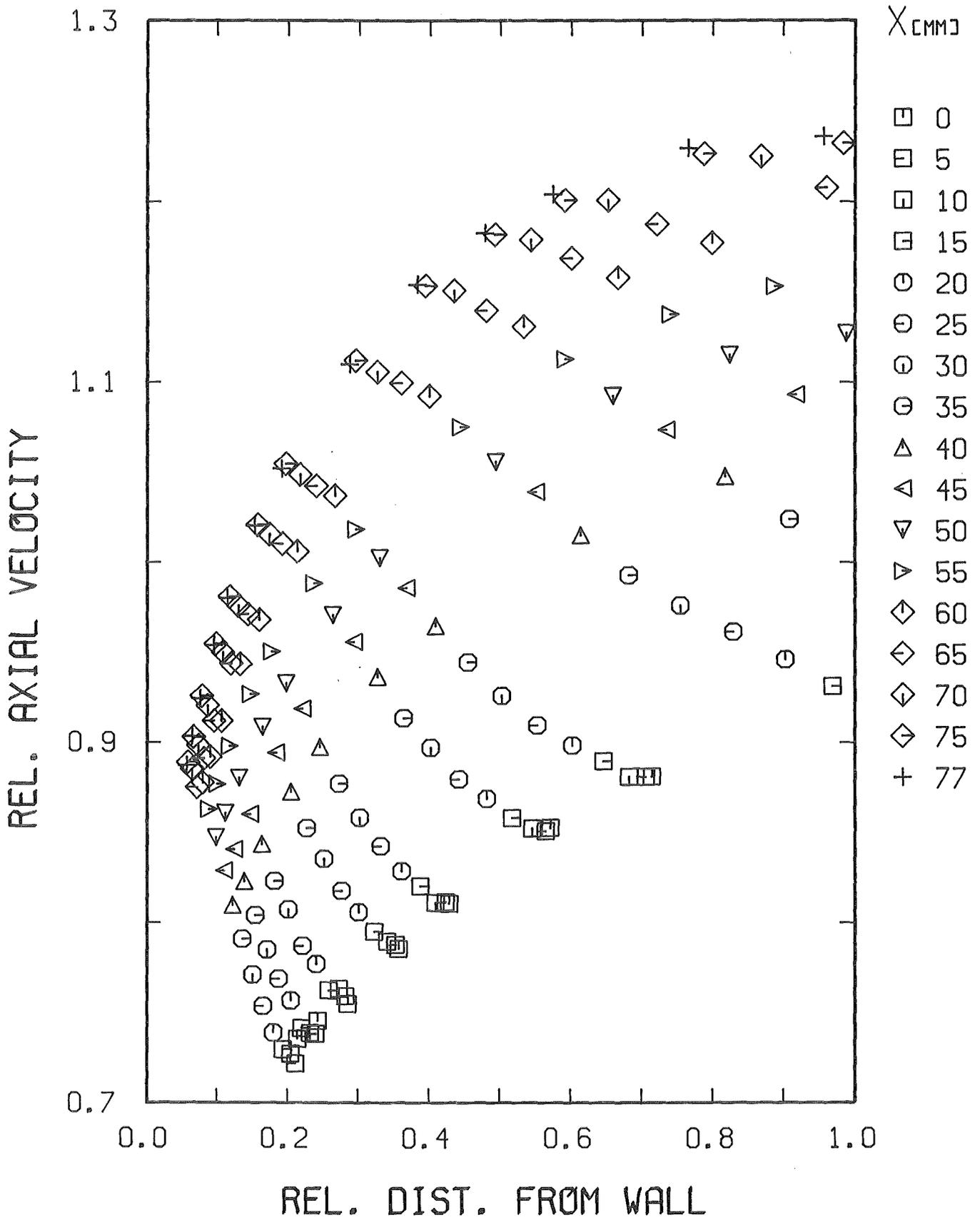


Abb. 3

Axiale Geschwindigkeit bezogen auf die mittlere Geschwindigkeit (x/y)

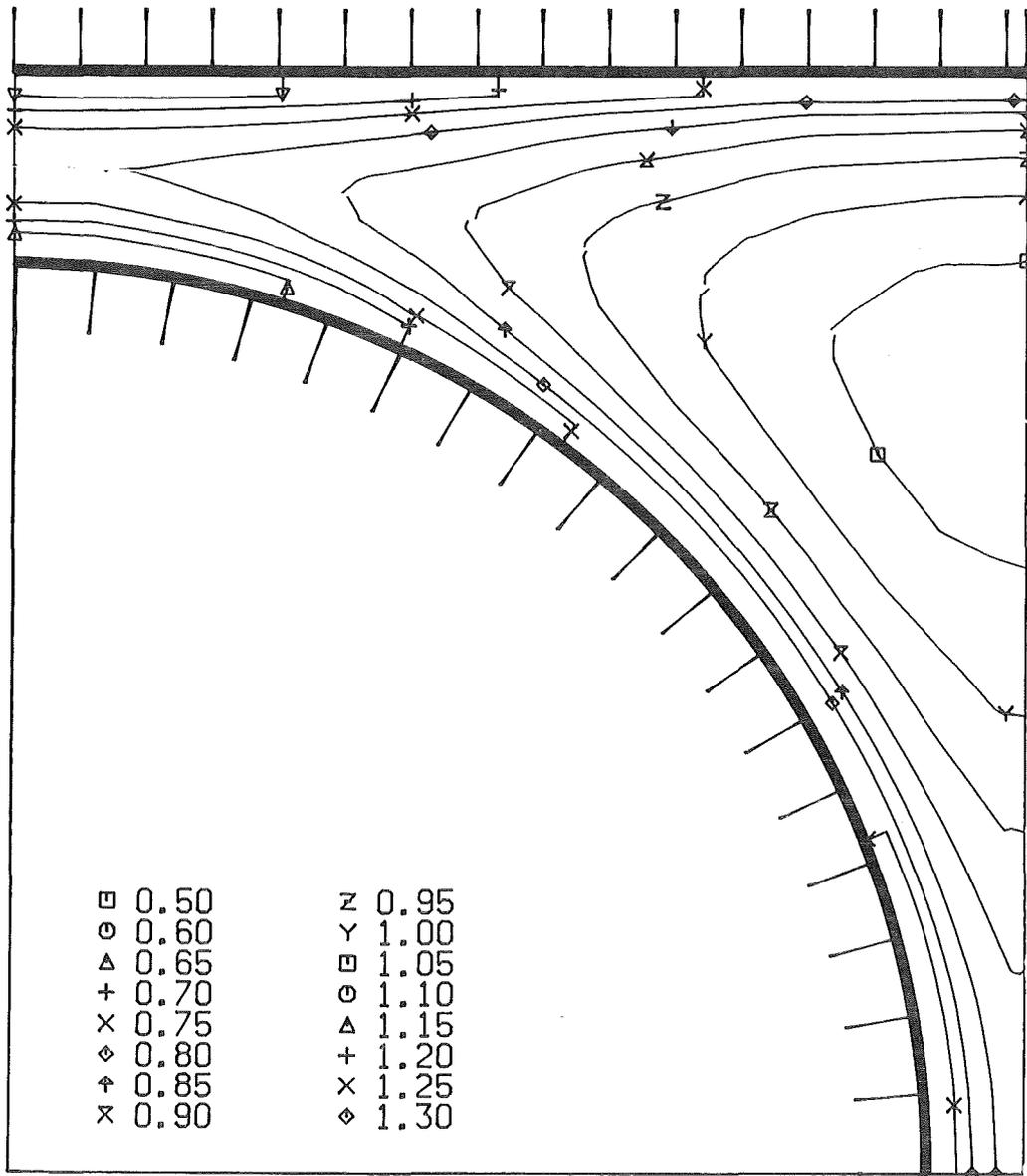
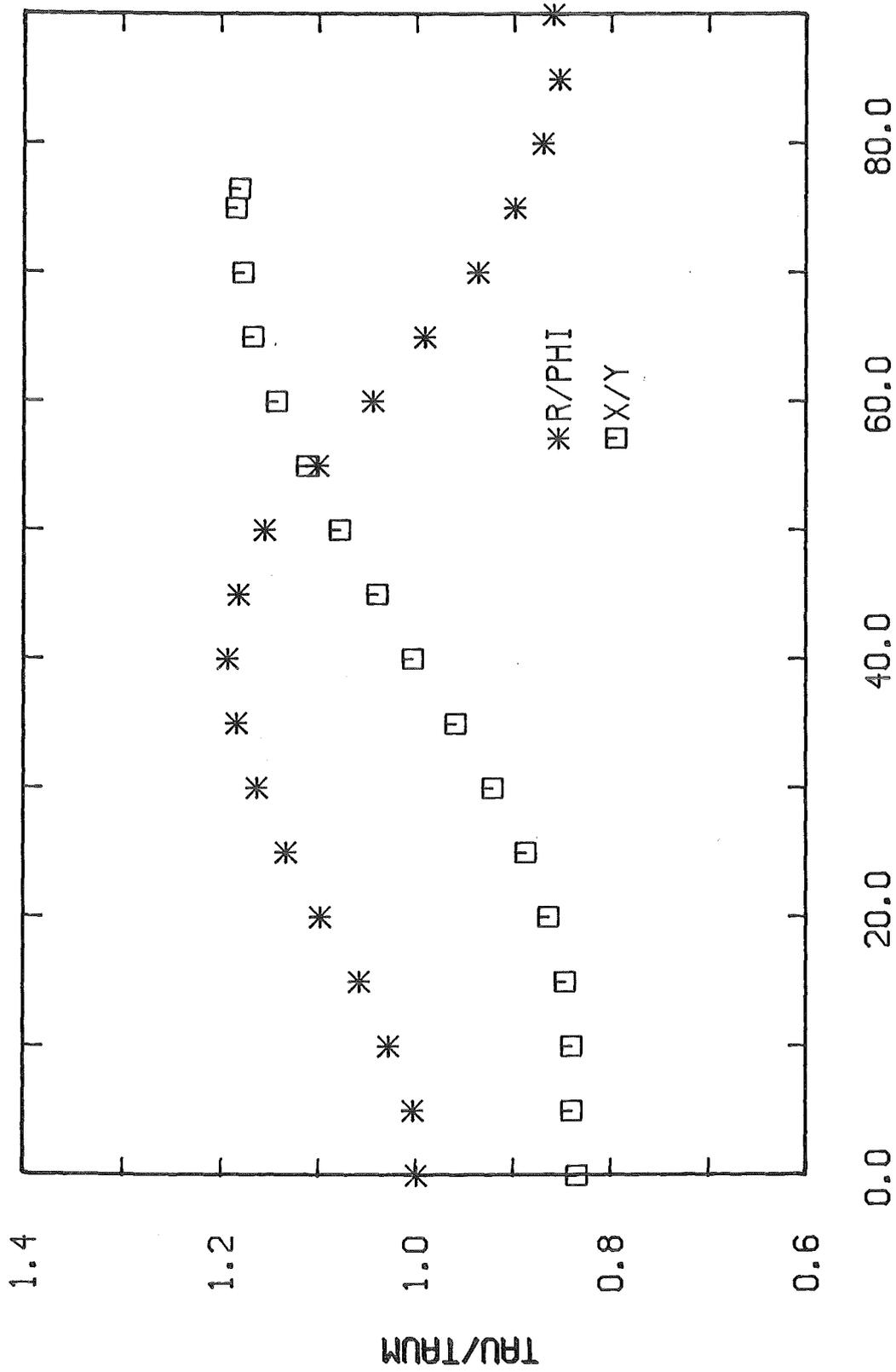


Abb. 4

Axiale Geschwindigkeit bezogen auf die Referenzgeschwindigkeit (Höhenlinien)



X/MM/, PHI/GRD/



Abb. 5 Gemessene Wandschubspannungen

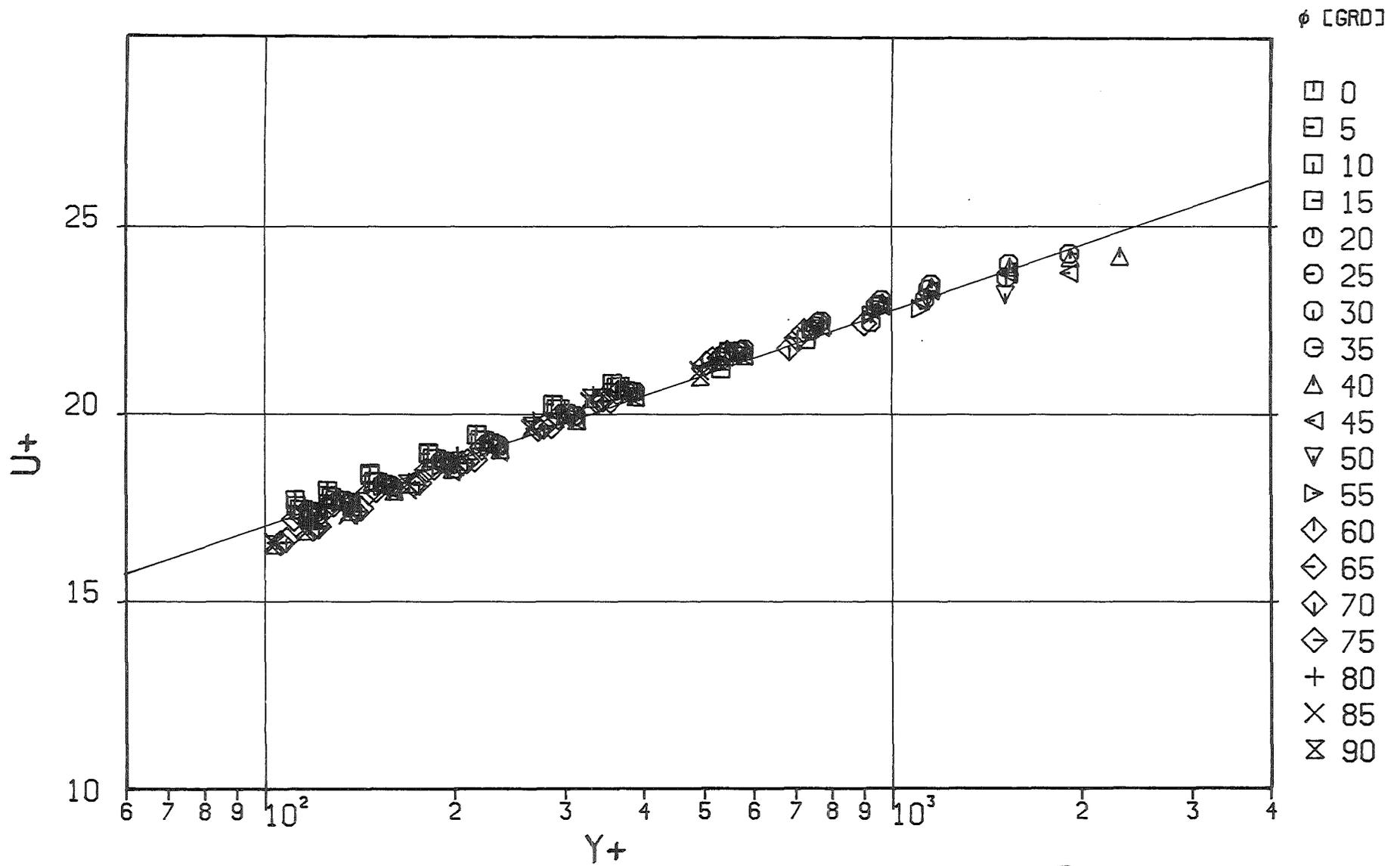


Abb. 6

Dimensionslose Geschwindigkeitsprofile (r/ϕ)

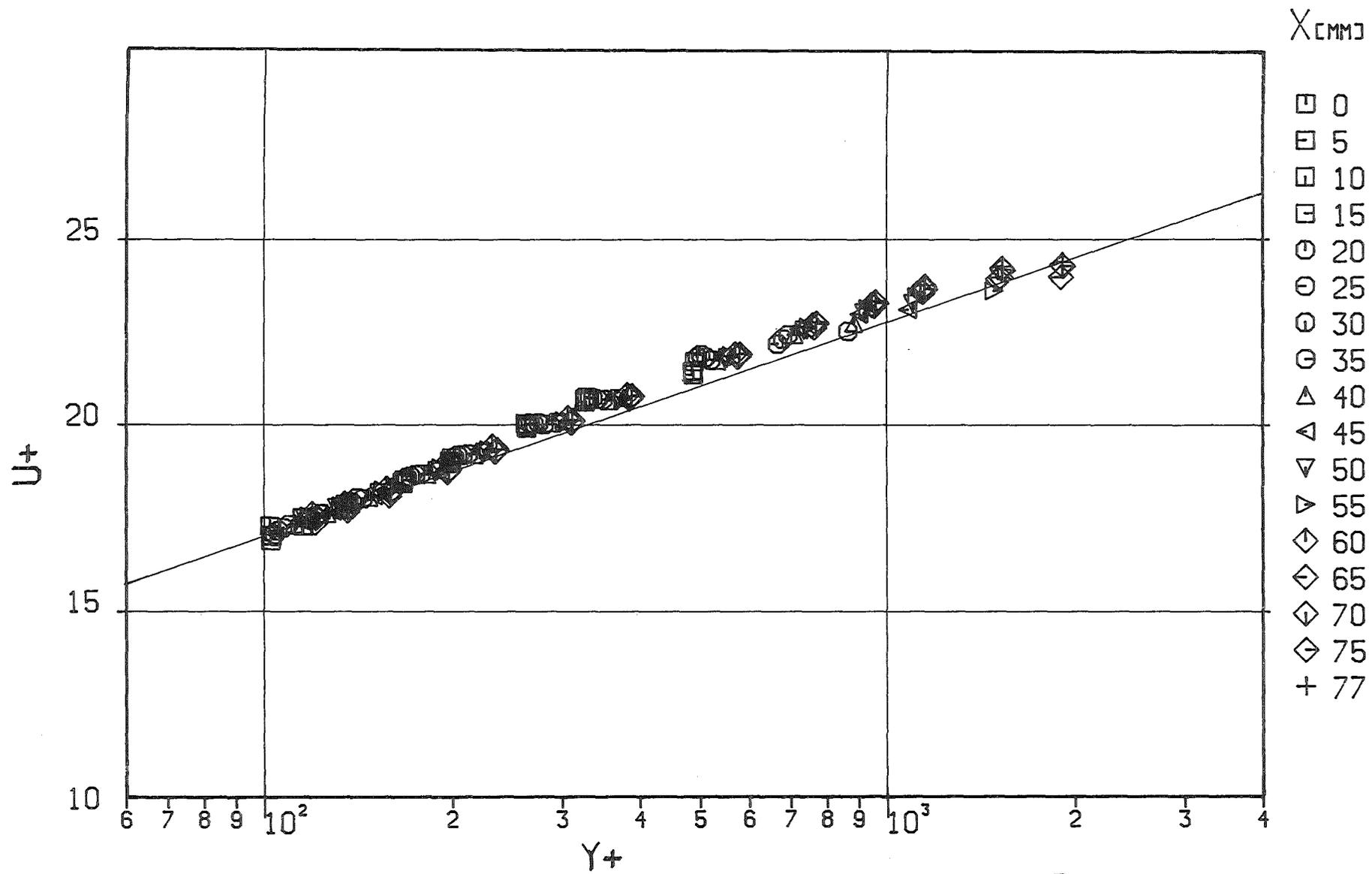


Abb. 7 Dimensionslose Geschwindigkeitsprofile (x/y)

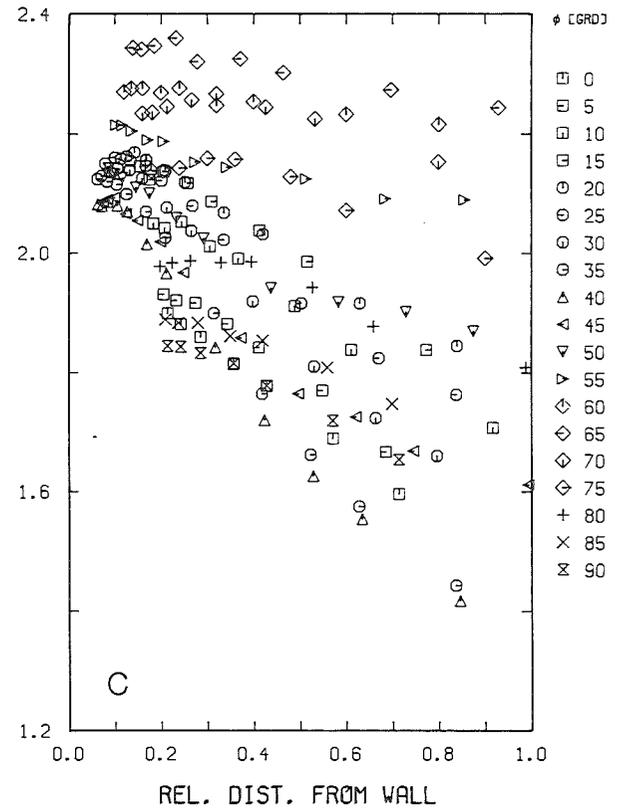
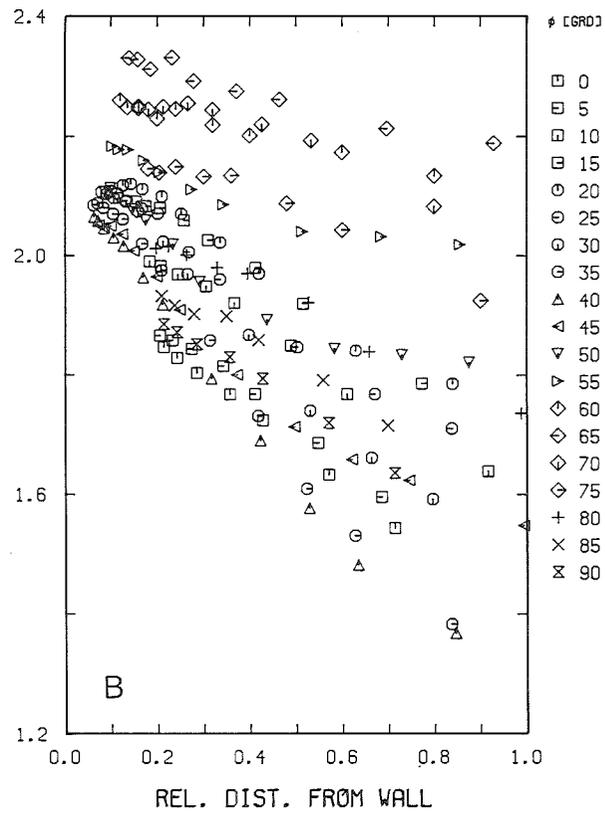
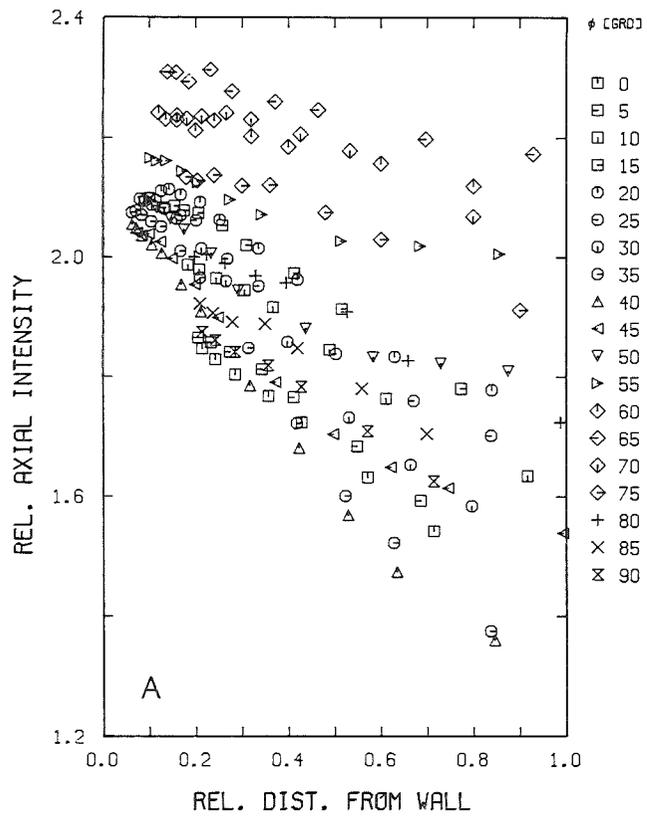


Abb. 8 Axiale Turbulenzintensität bezogen auf die lokale Wandschubspannungsgeschwindigkeit (r/ϕ)

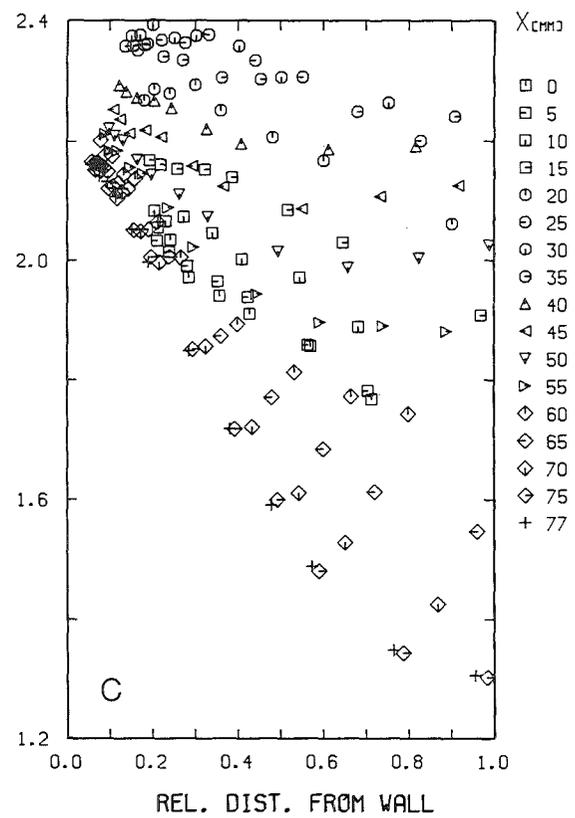
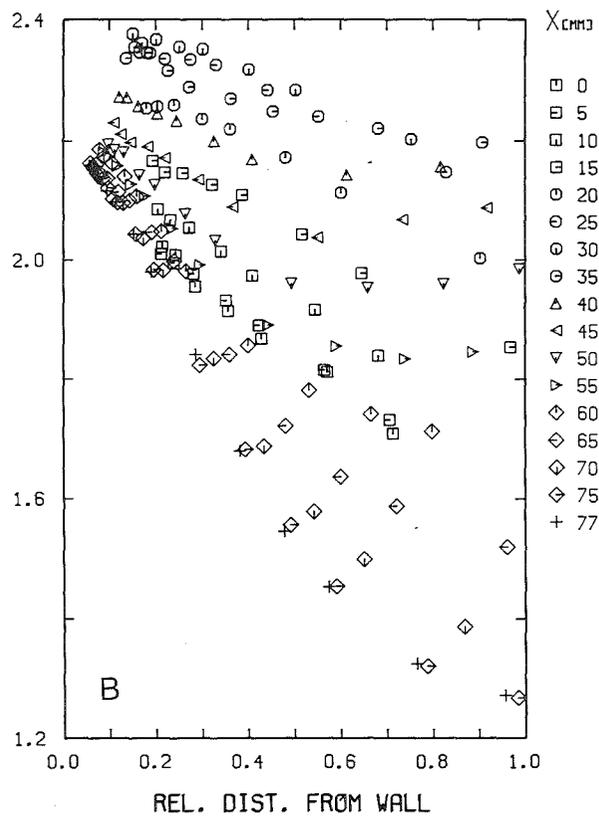
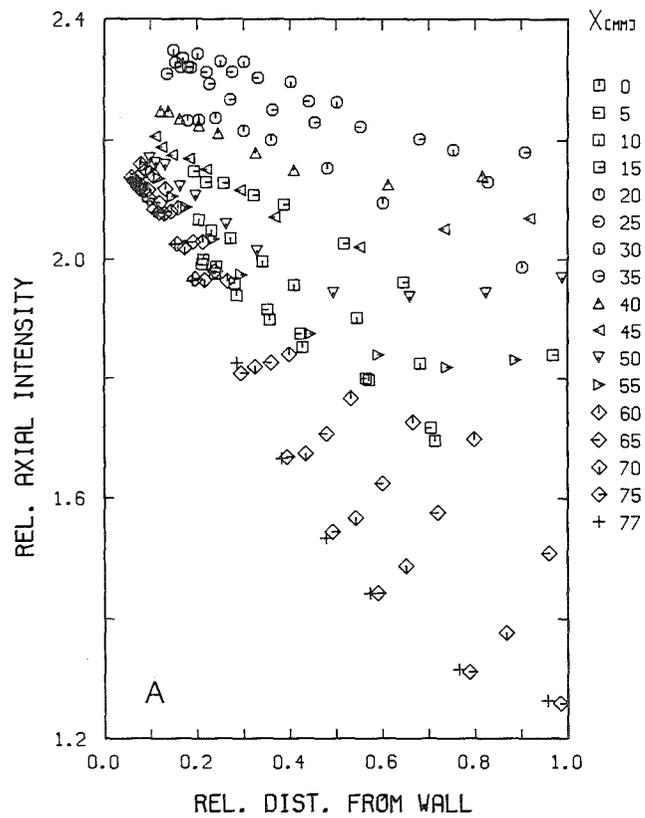
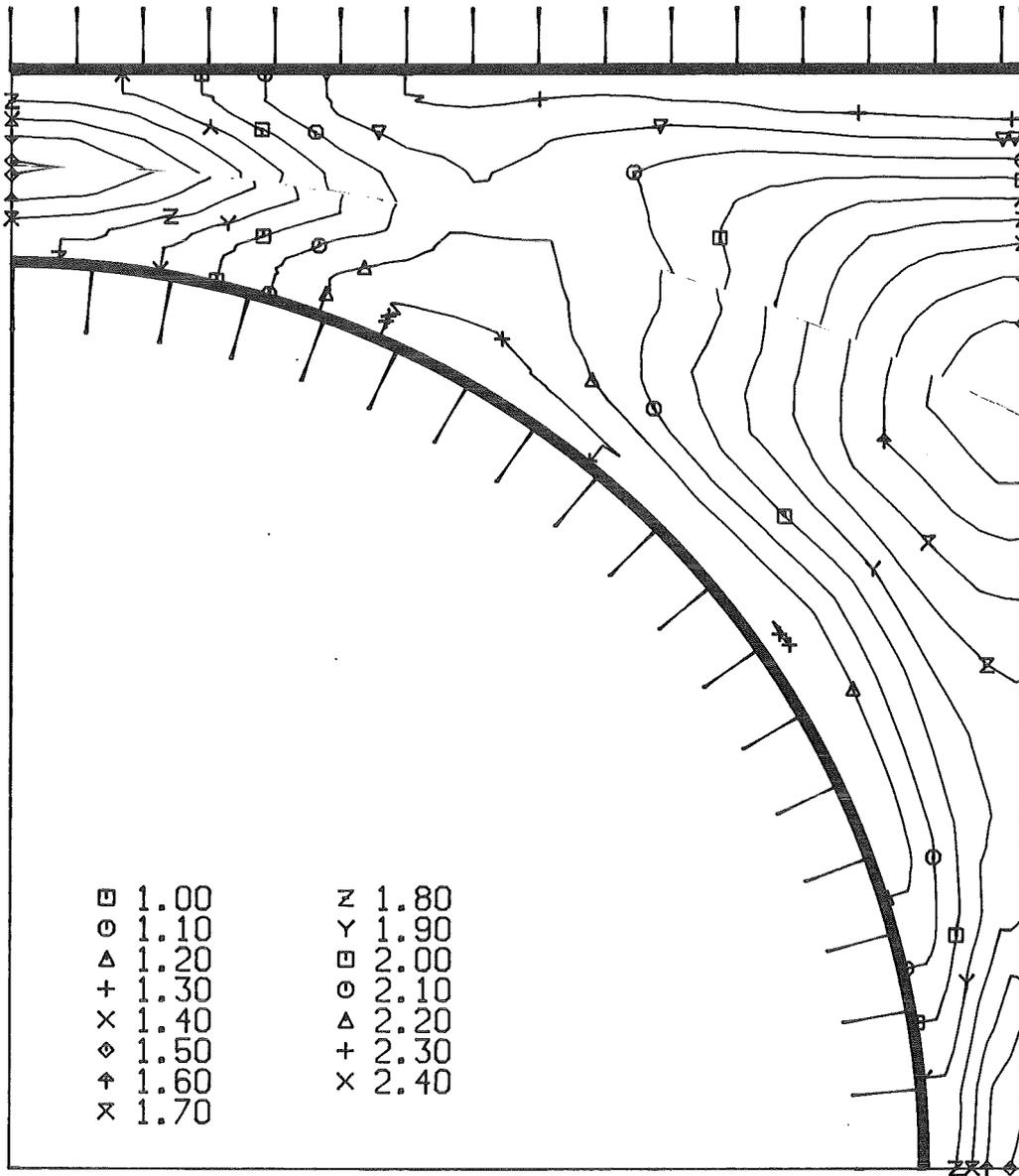


Abb. 9

Axiale Turbulenzintensität bezogen auf die lokale Wandschubspannungsgeschwindigkeit (x/y)



KfK

Abb.10

Axiale Turbulenzintensität bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit (Höhenlinien)

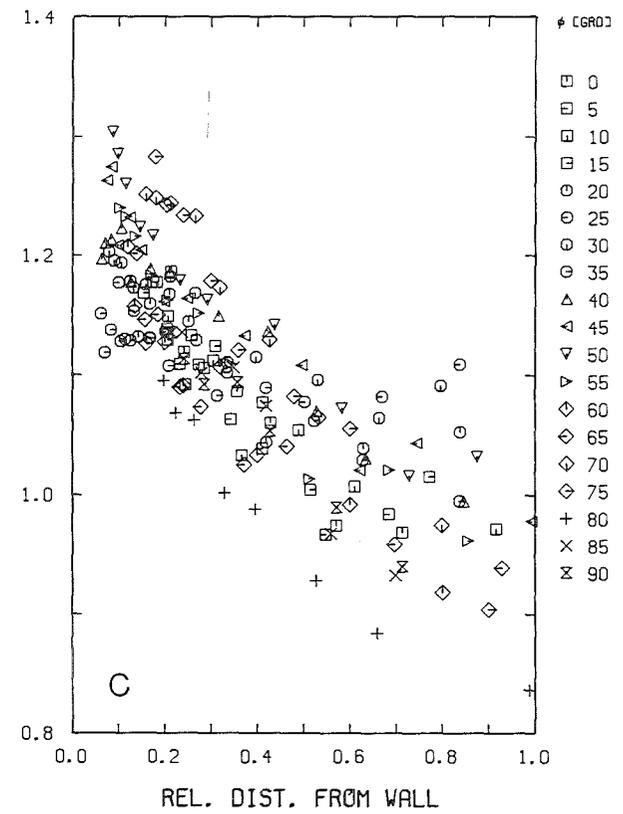
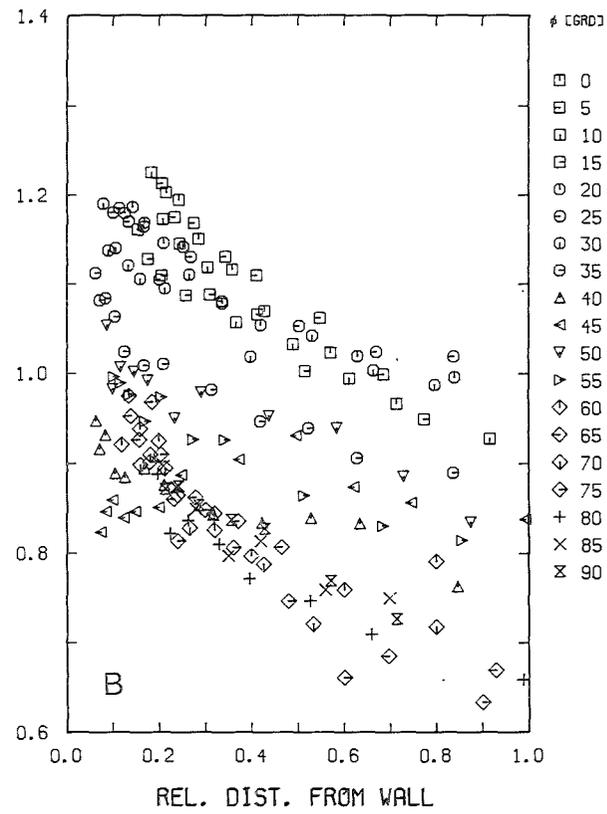
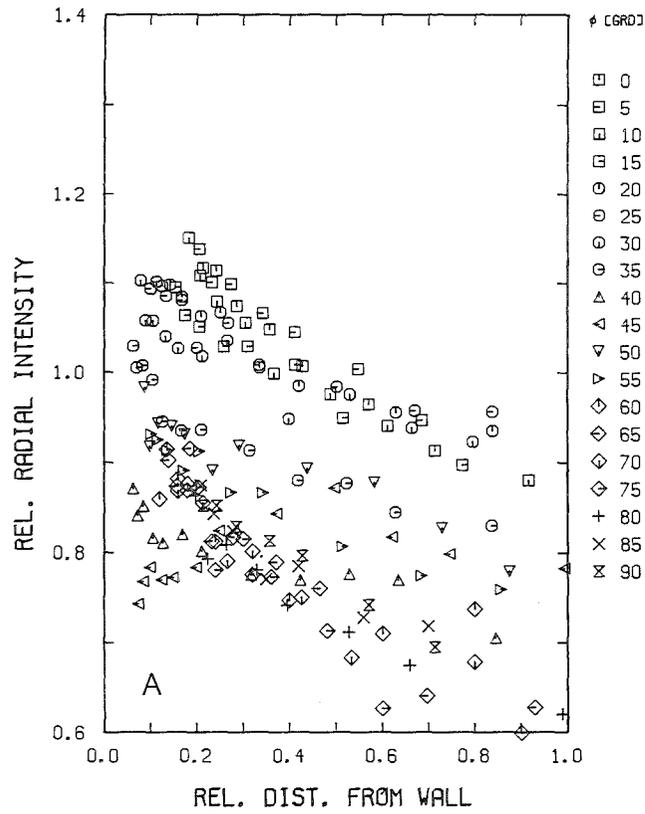


Abb.11

Turbulenzintensität senkrecht zur Wand bezogen auf die lokale Wandschubspannungsgeschwindigkeit (r/ϕ)

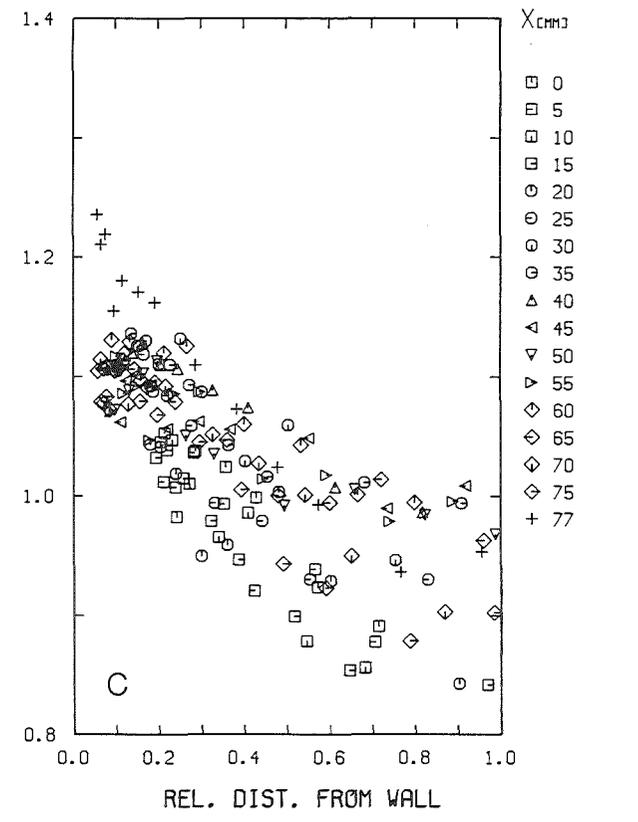
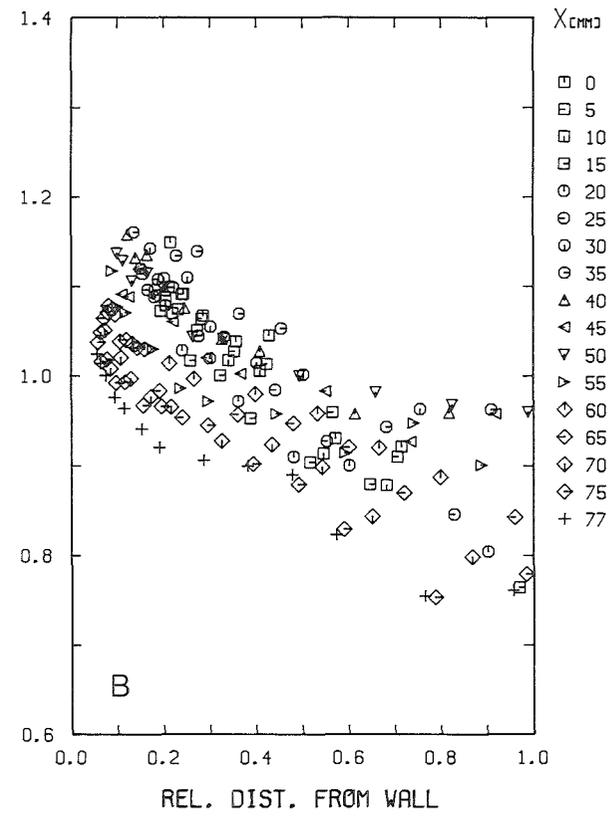
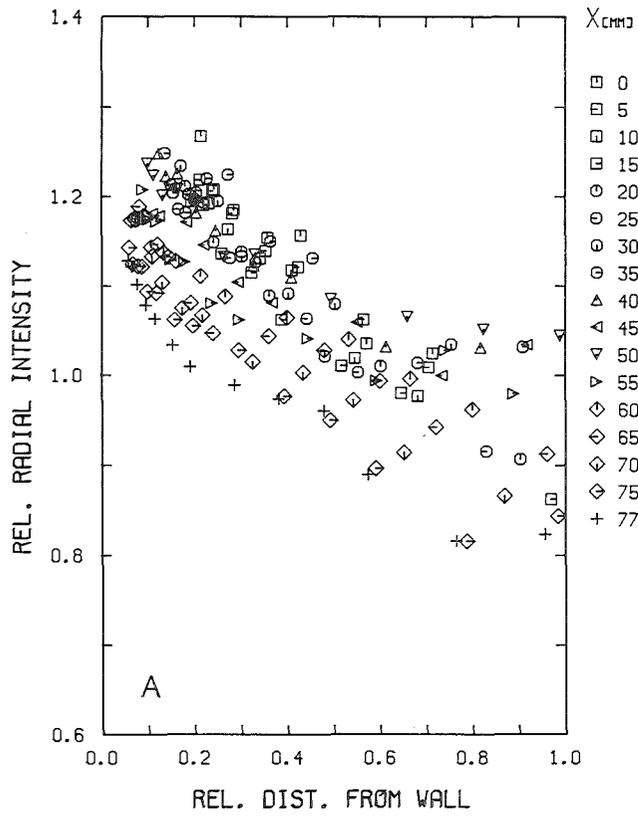
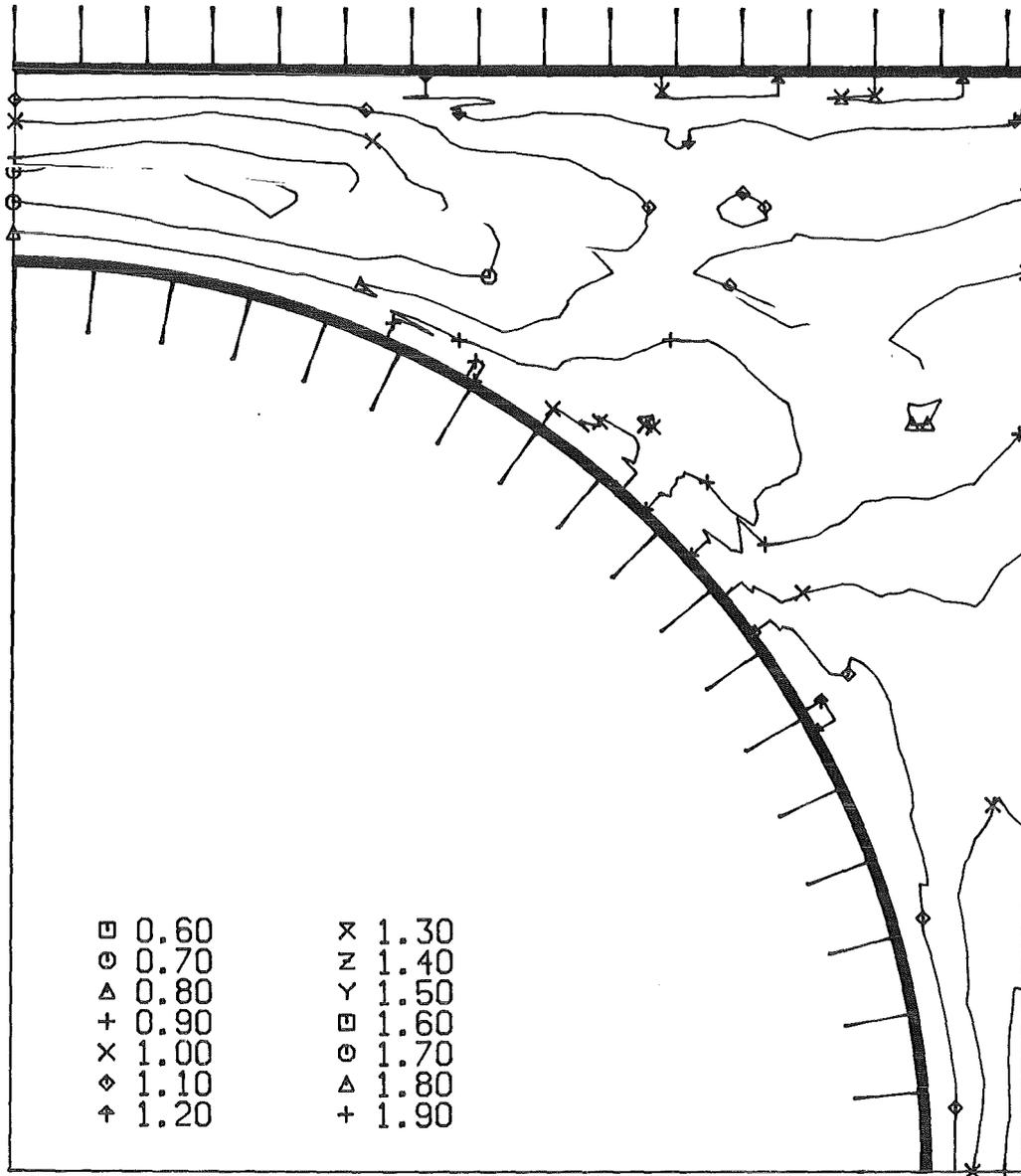


Abb.12

Turbulenzintensität senkrecht zur Wand bezogen auf die lokale Wandschubspannungsgeschwindigkeit (x/y)



KfK

Abb.13 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit (Höhenlinien)

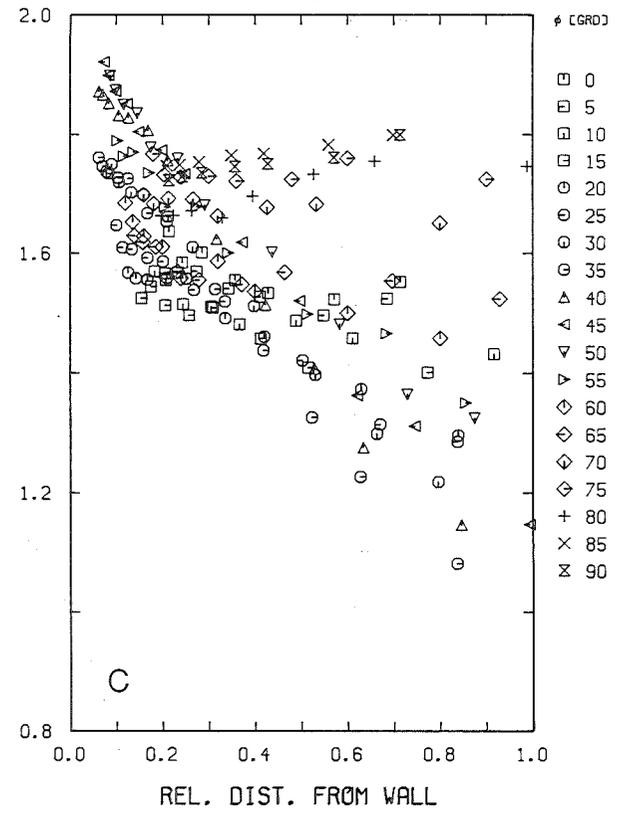
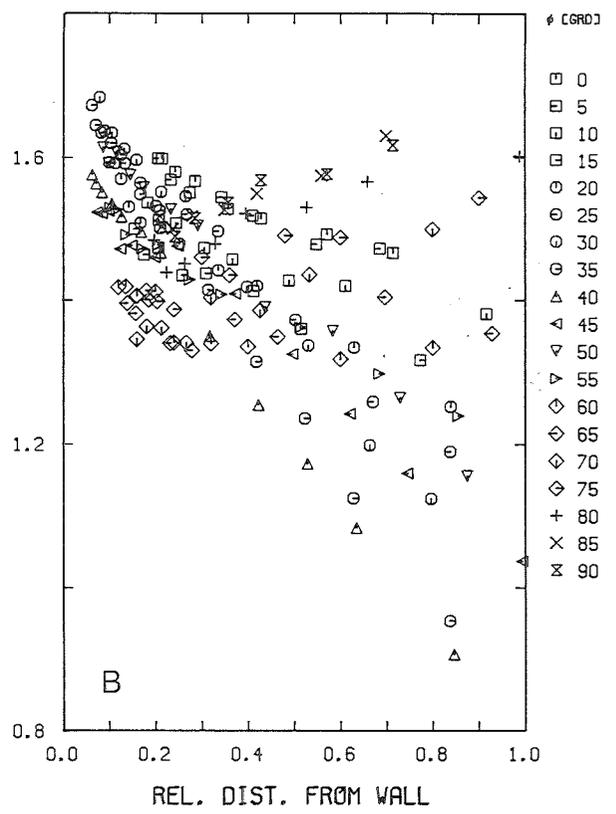
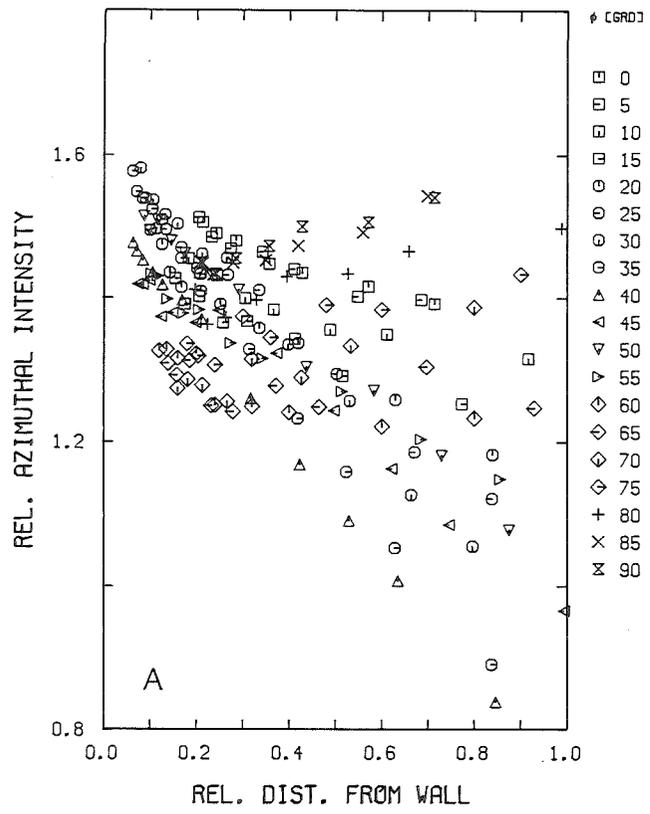


Abb.14

Turbulenzintensität parallel zur Wand bezogen auf die lokale Wandschubspannungsgeschwindigkeit (r/ϕ)

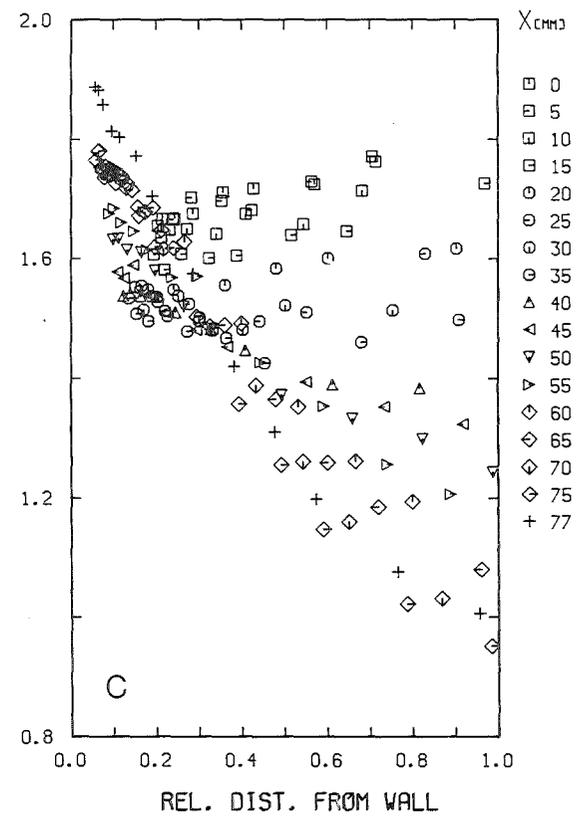
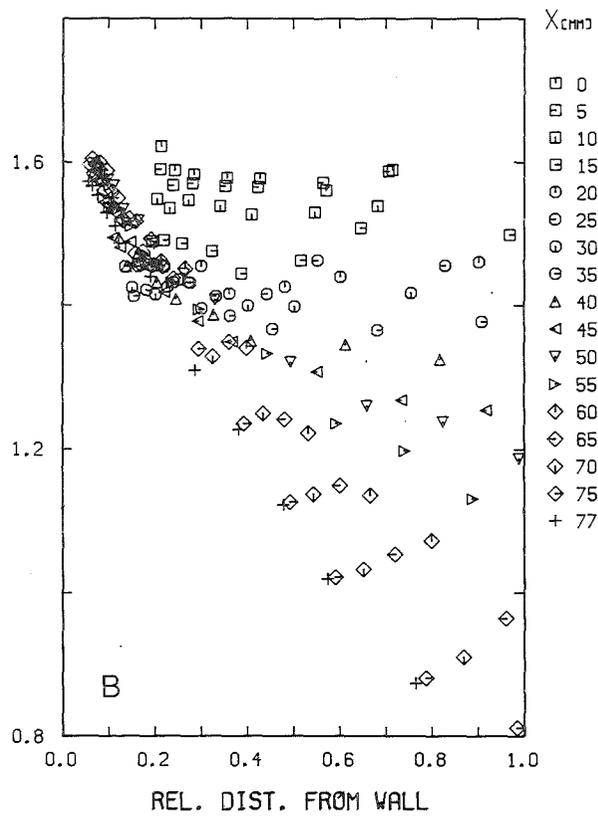
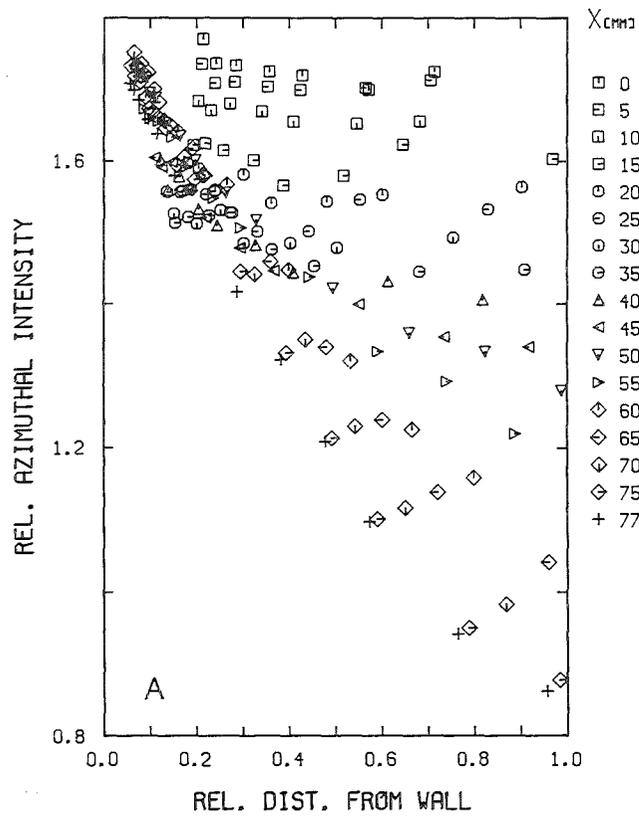
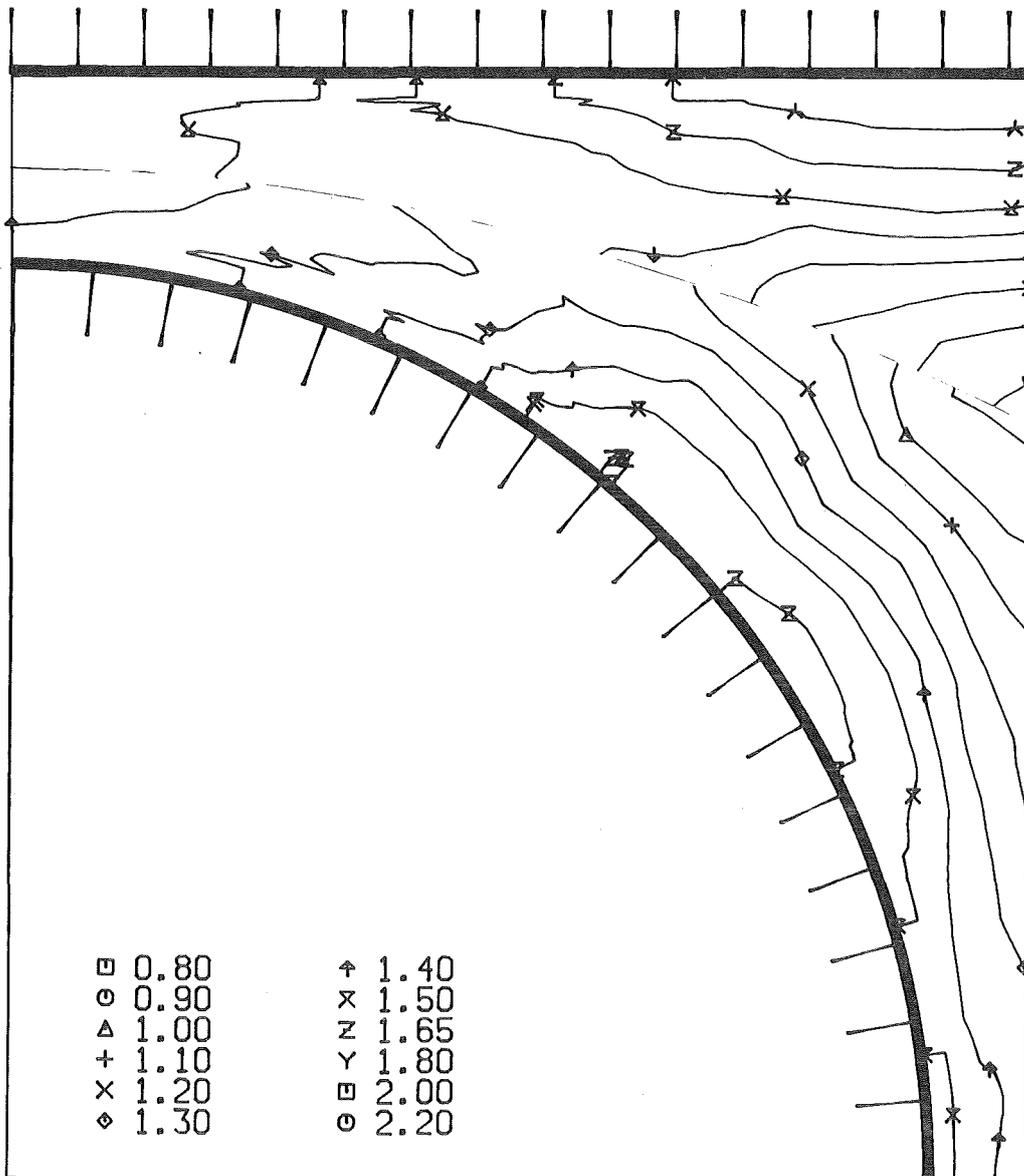


Abb.15

Turbulenzintensität parallel zur Wand bezogen auf die lokale Wandschubspannungsgeschwindigkeit (x/y)



KfK

Abb.16

Turbulenzintensität parallel zur Wand bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit (Höhenlinien)

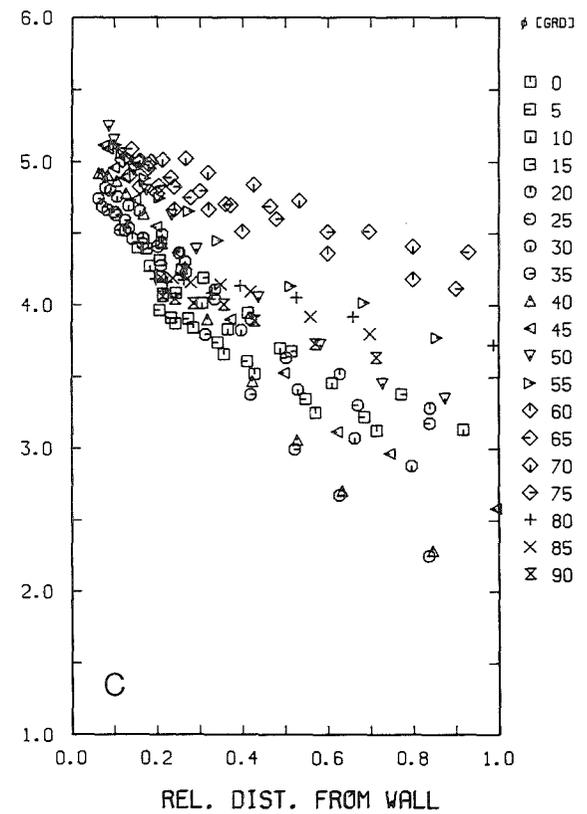
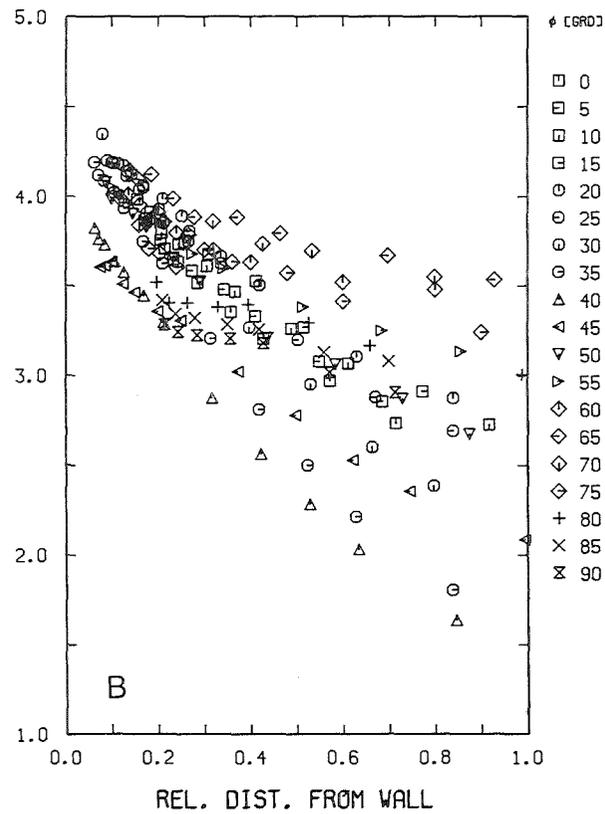
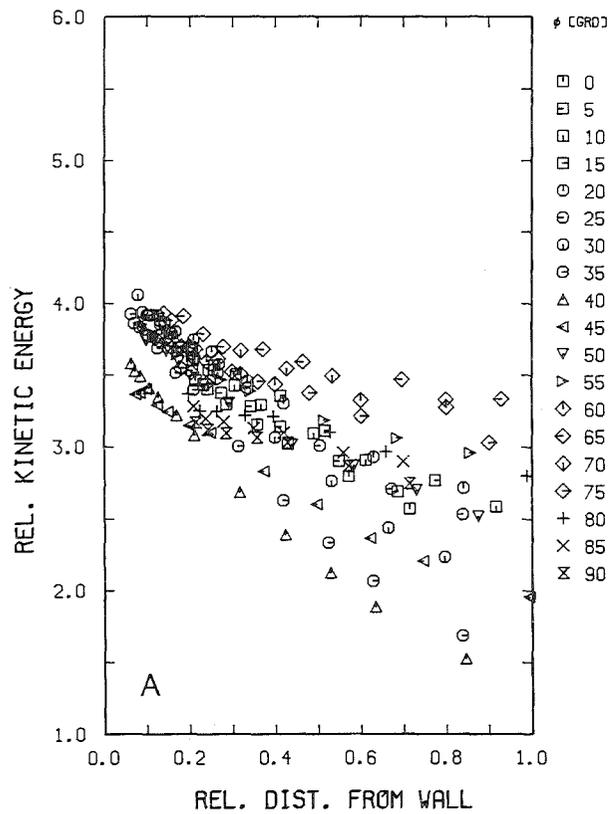


Abb.17

Kinetische Energie der Turbulenz bezogen auf das Quadrat der lokalen Wandschubspannungsgeschwindigkeit (r/ϕ)

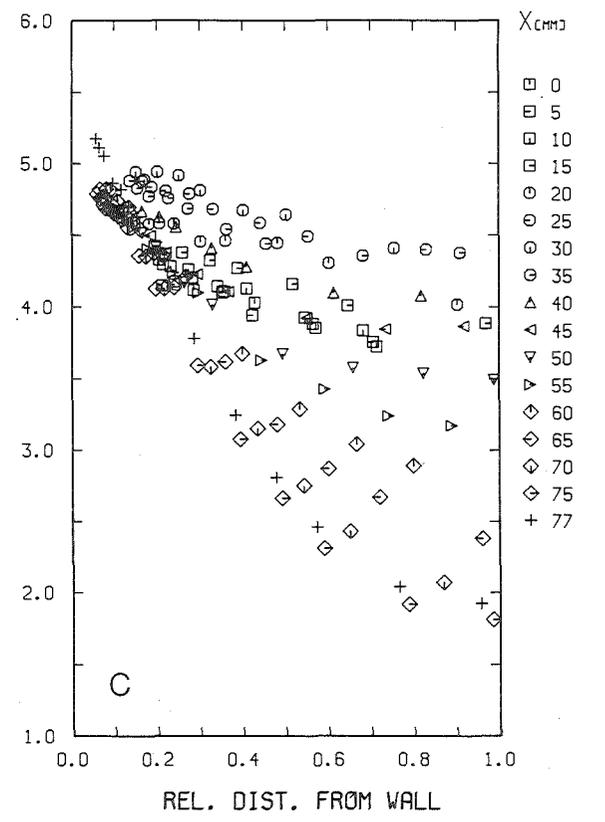
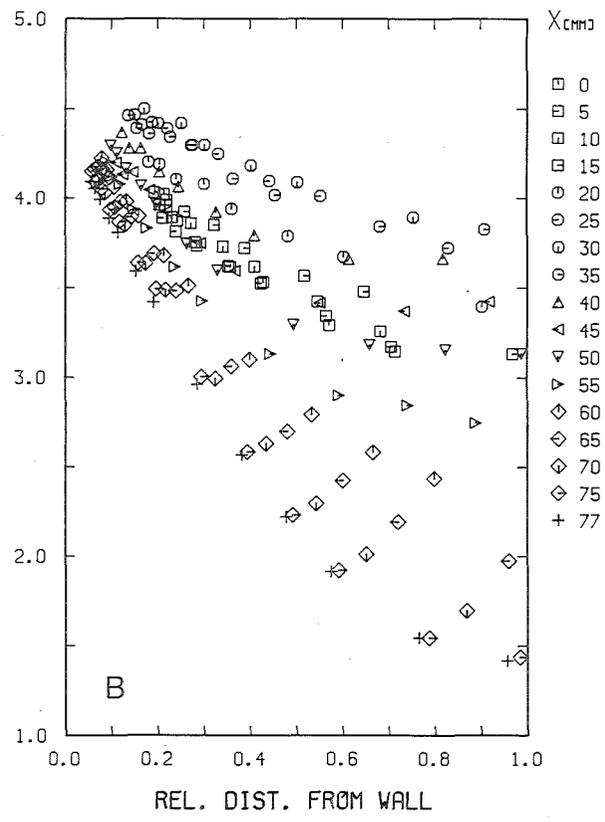
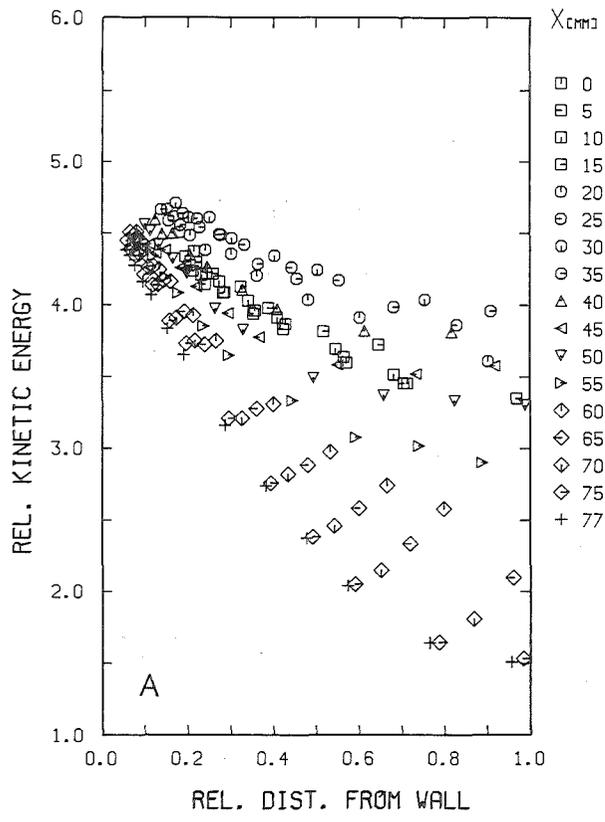
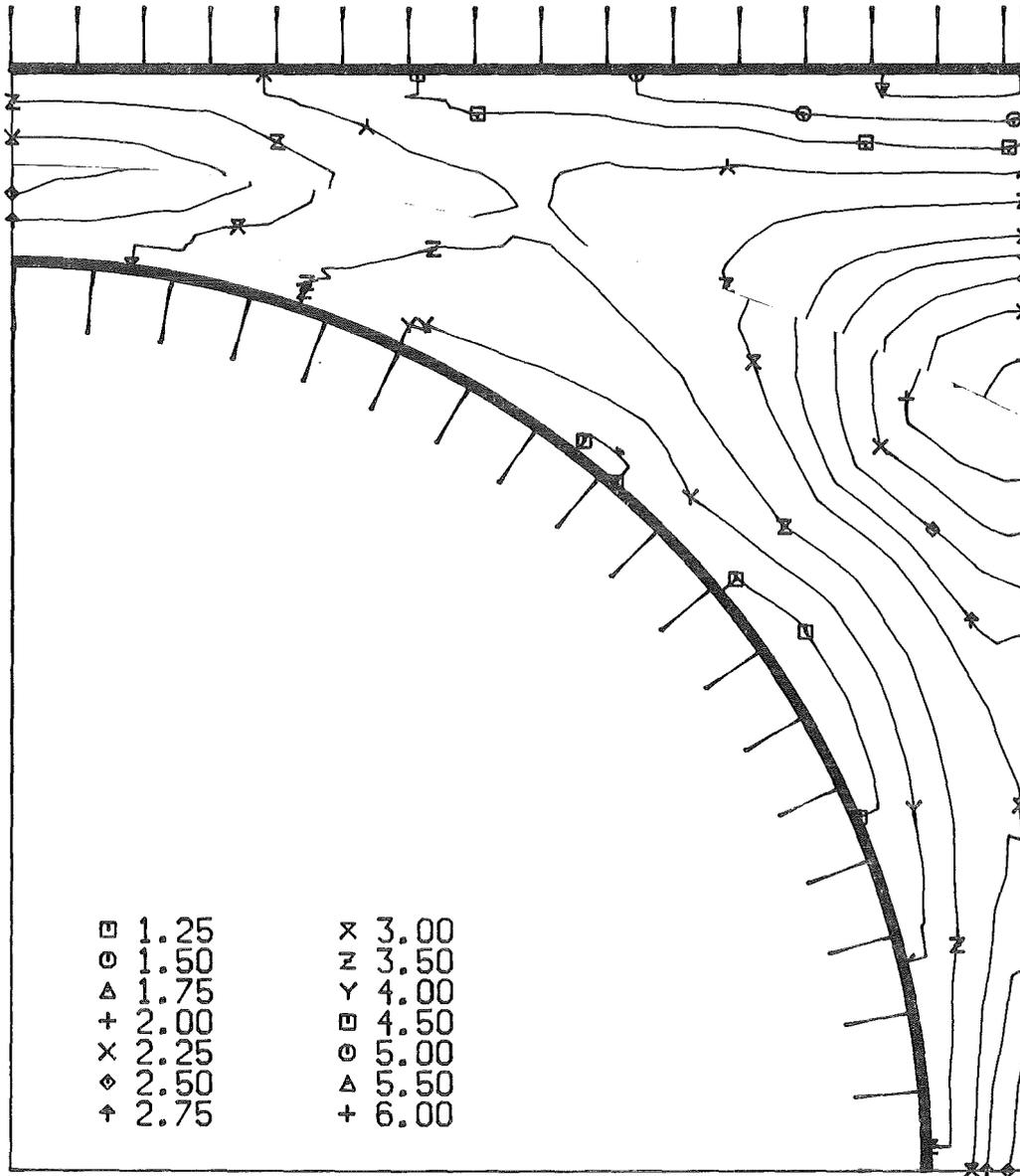


Abb.18

Kinetische Energie der Turbulenz bezogen auf das Quadrat der lokalen Wandschubspannungsgeschwindigkeit (x/y)



KfK

Abb.19

Kinetische Energie der Turbulenz bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit (Höhenlinien)

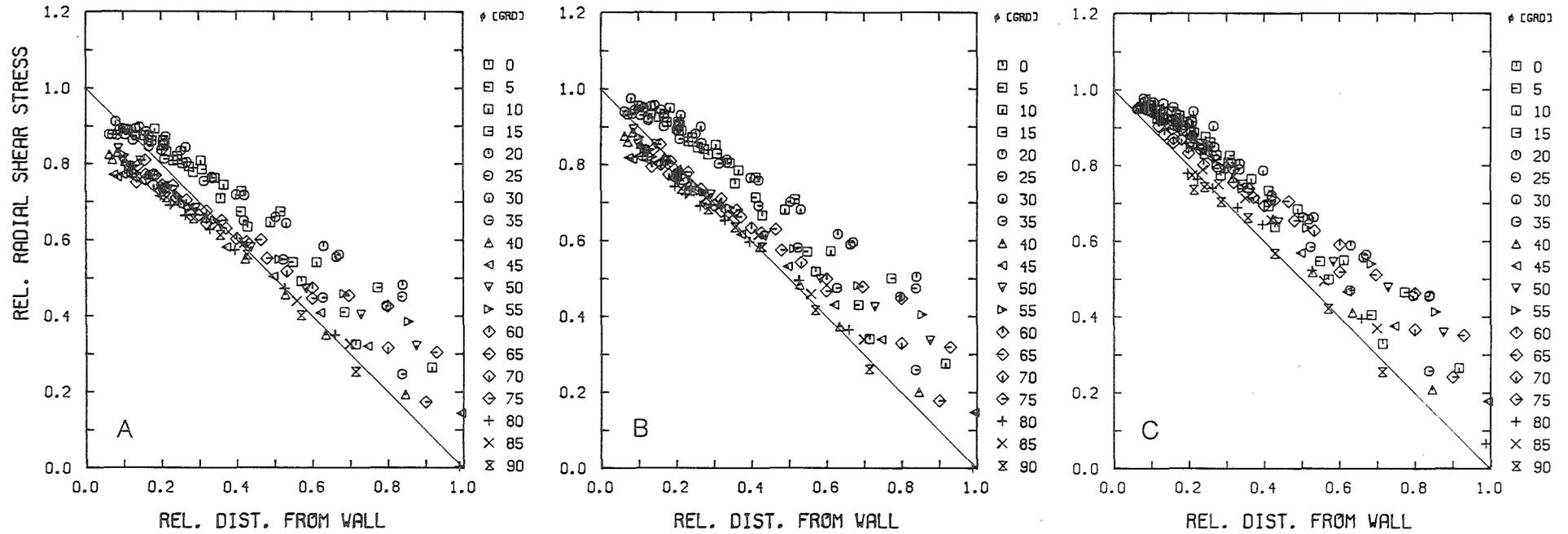


Abb.20

Schubspannung senkrecht zur Wand bezogen auf die lokale Wandschubspannungsgeschwindigkeit (r/ϕ)

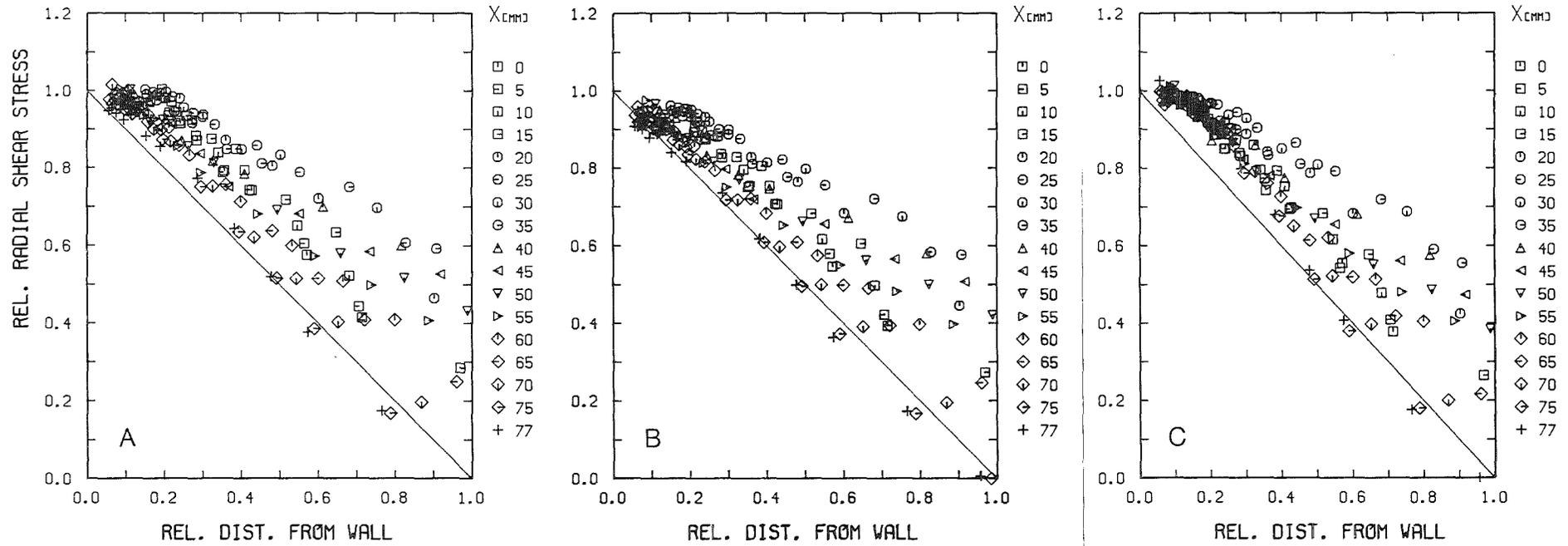


Abb.21

Schubspannung senkrecht zur Wand bezogen auf die lokale Wandschubspannungsgeschwindigkeit (x/y)

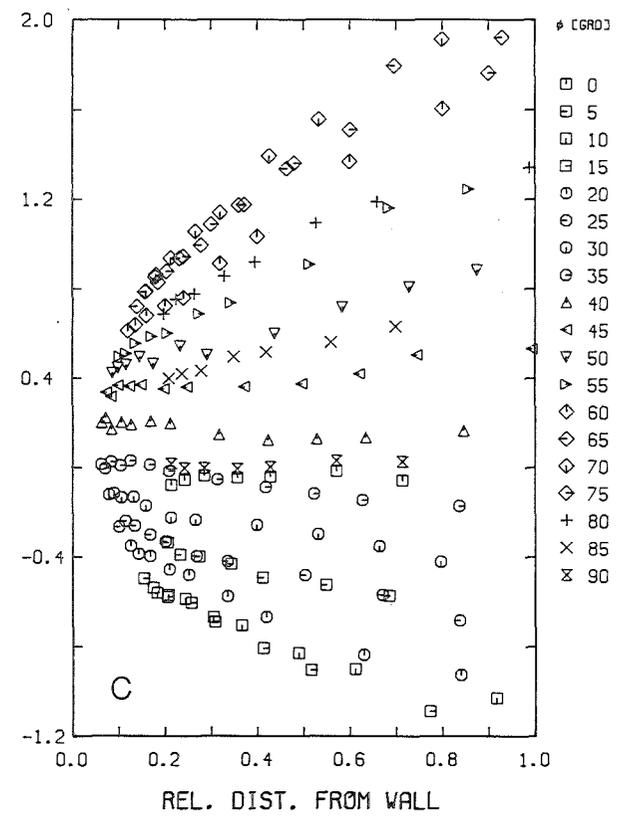
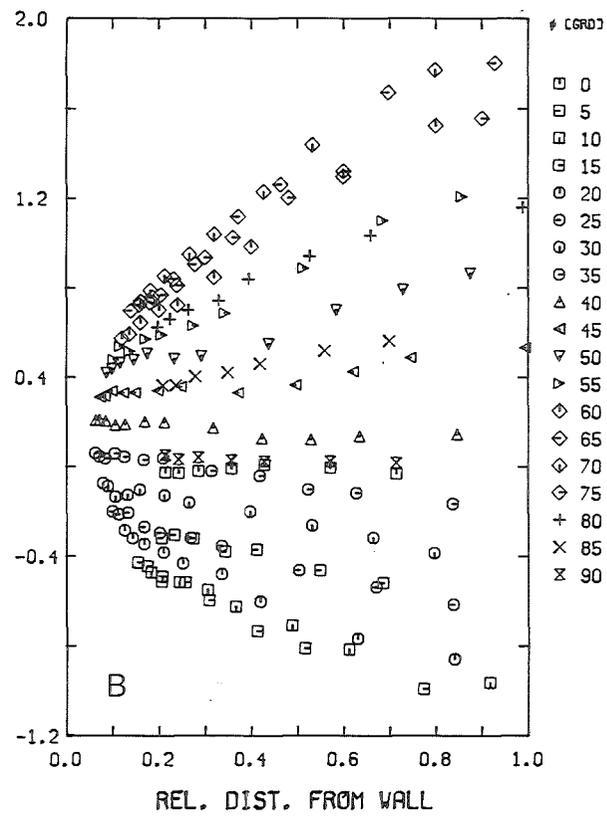
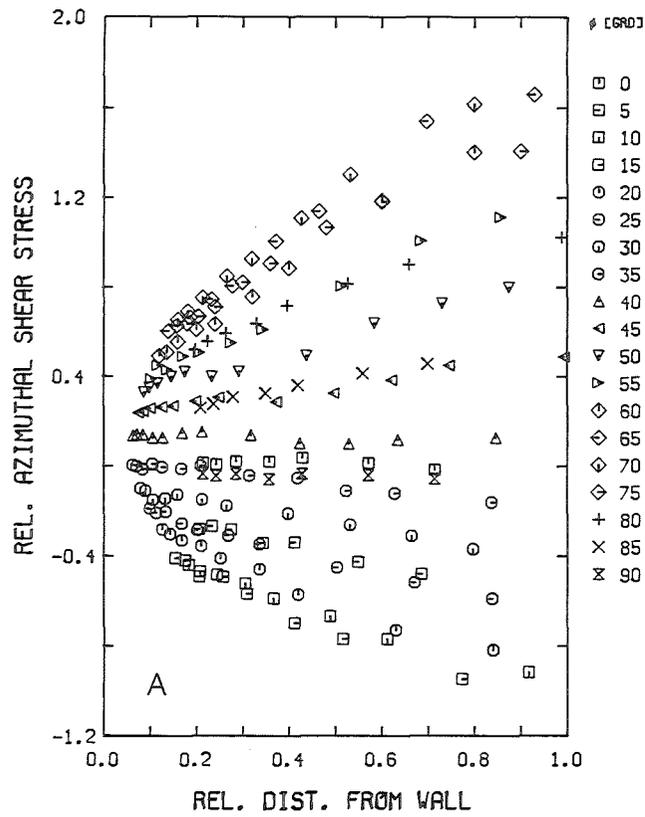


Abb.22 Schubspannung parallel zur Wand bezogen auf die lokale Wandschubspannungsgeschwindigkeit (r/ϕ)

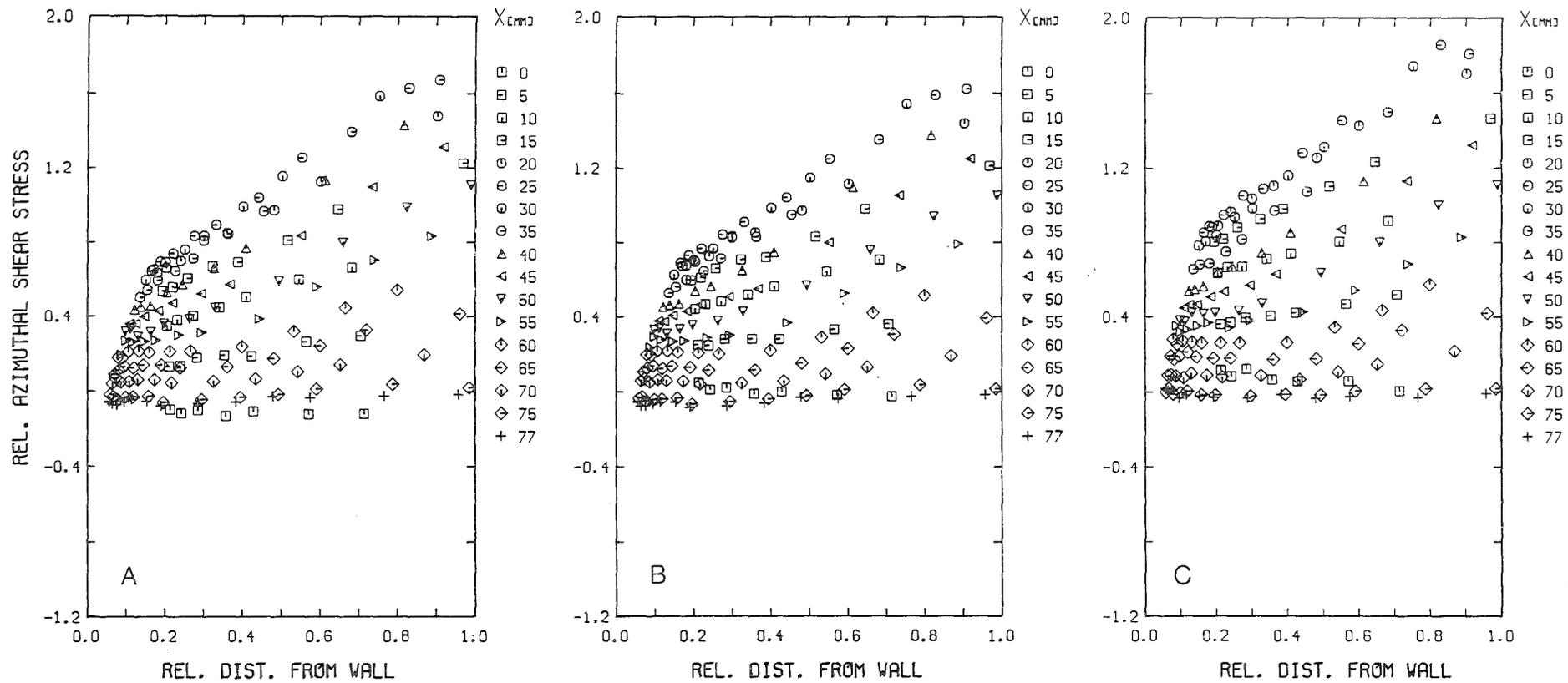
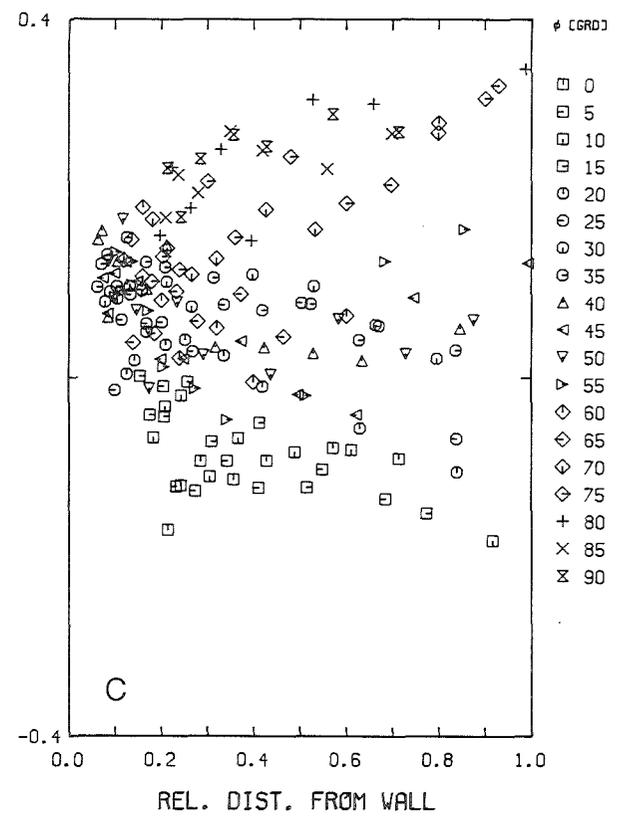
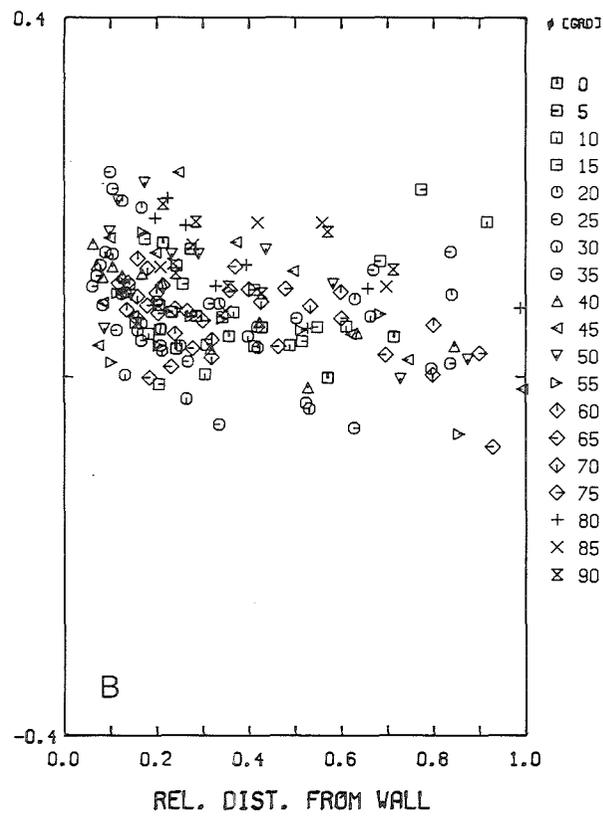
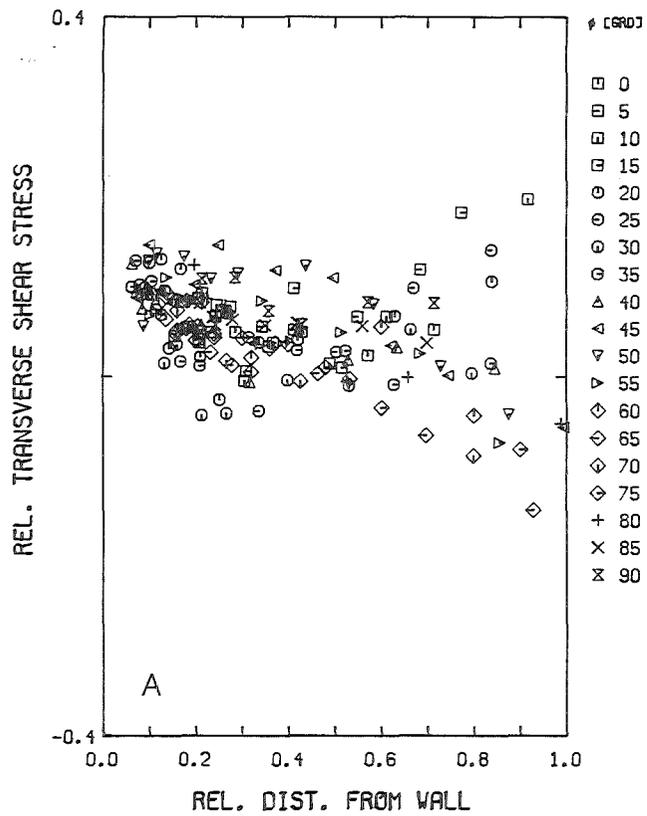


Abb.23 Schubspannung parallel zur Wand bezogen auf die lokale Wandschubspannungsgeschwindigkeit (x/y)



KfK

KfK

KfK

Abb.24 Transversale Schubspannung bezogen auf die lokale Wandschubspannungsgeschwindigkeit (r/ϕ)

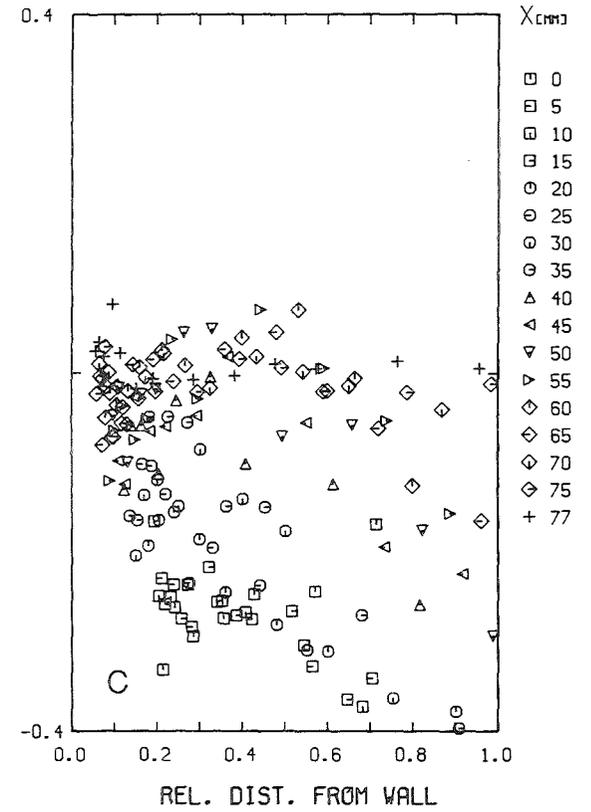
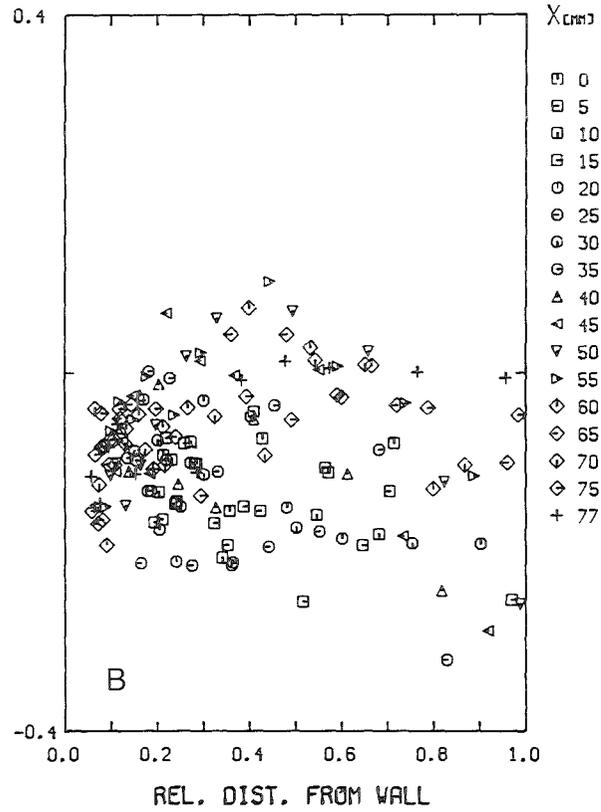
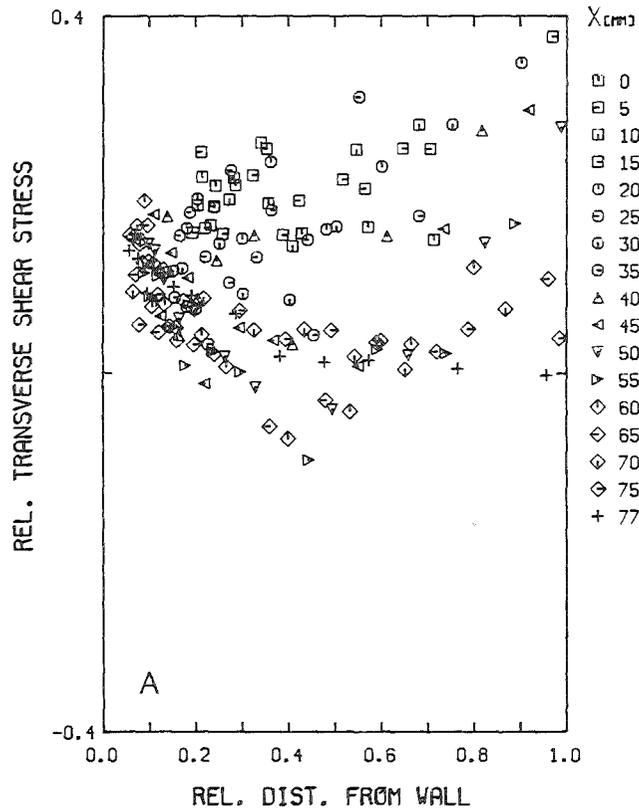


Abb.25 Transversale Schubspannung bezogen auf die lokale Wandschubspannungsgeschwindigkeit (x/y)

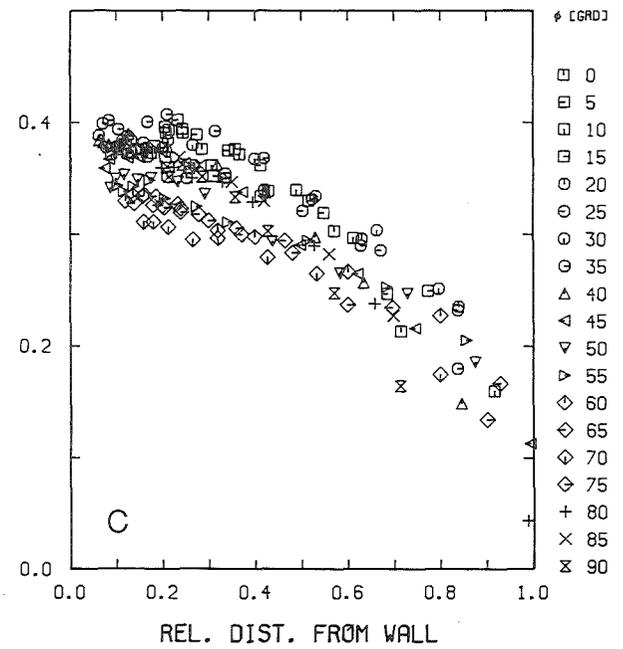
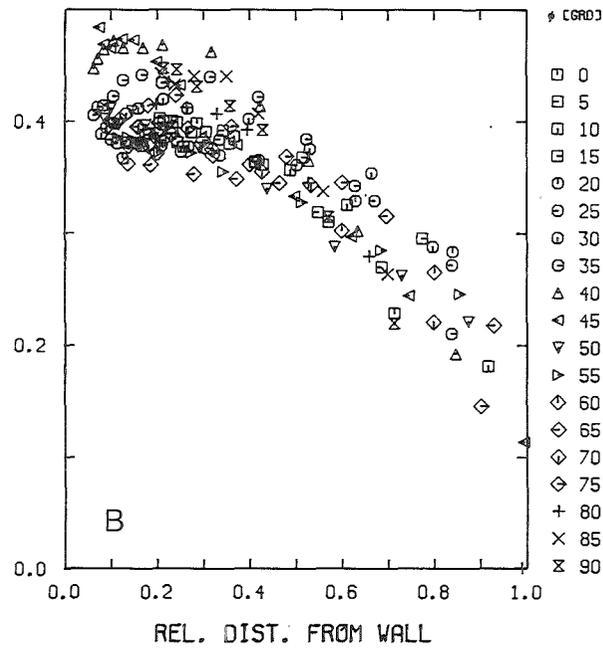
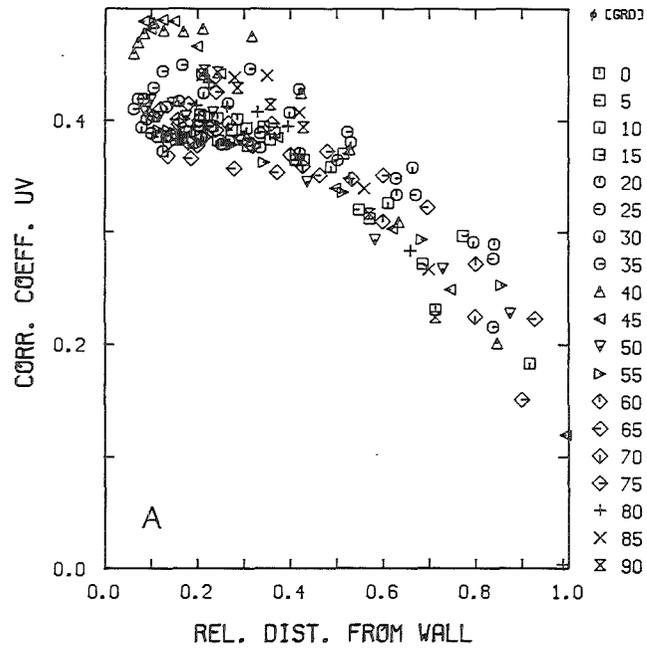


Abb.26 Korrelationskoeffizient R_{uv} (r/ϕ)

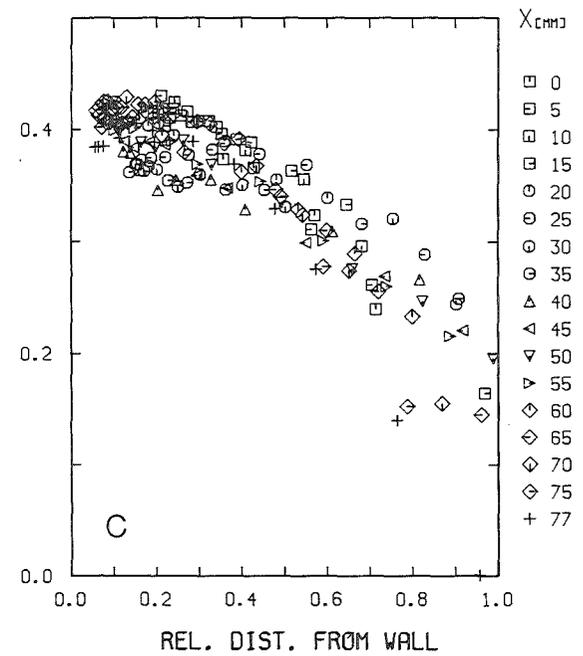
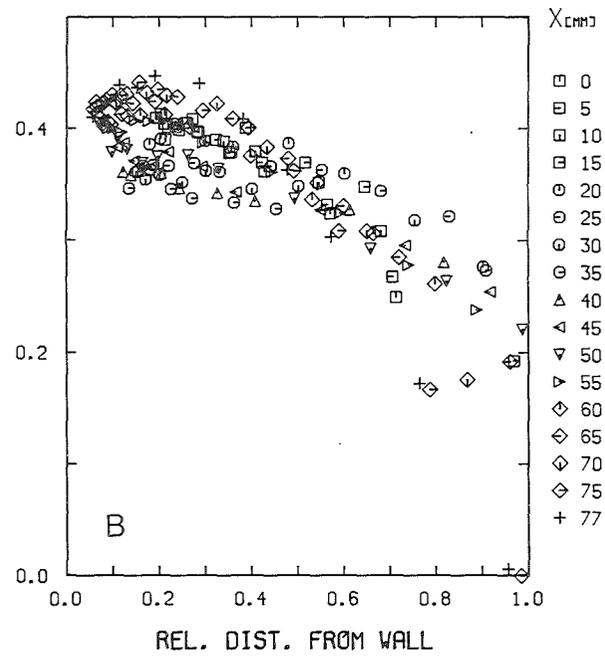
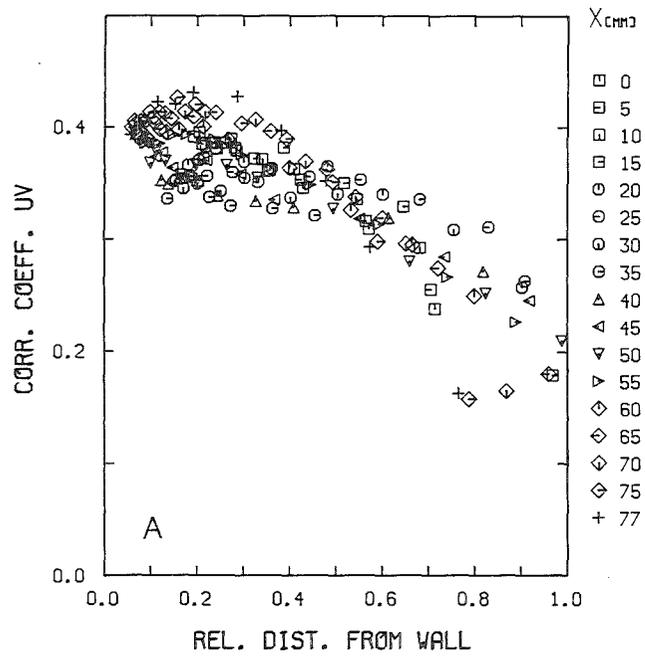


Abb.27 Korrelationskoeffizient R_{uv} (x/y)

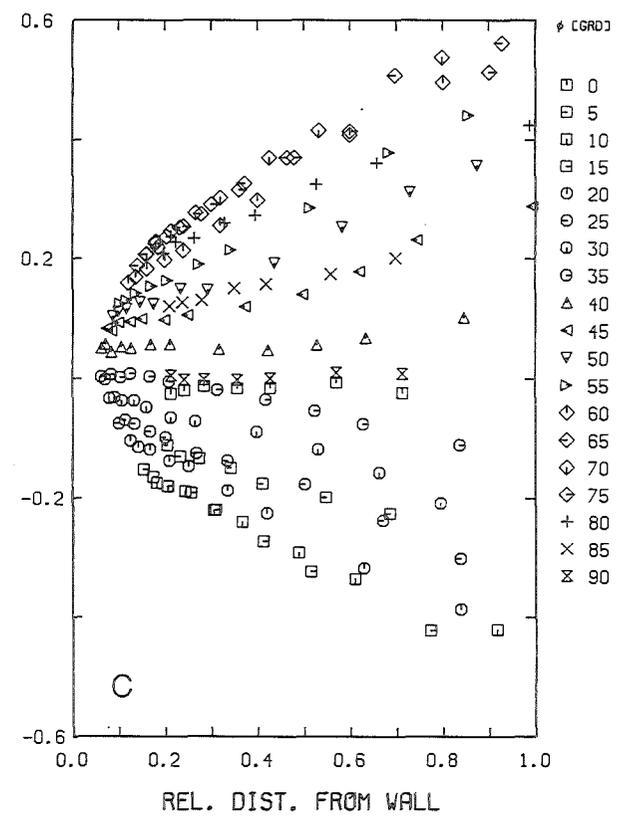
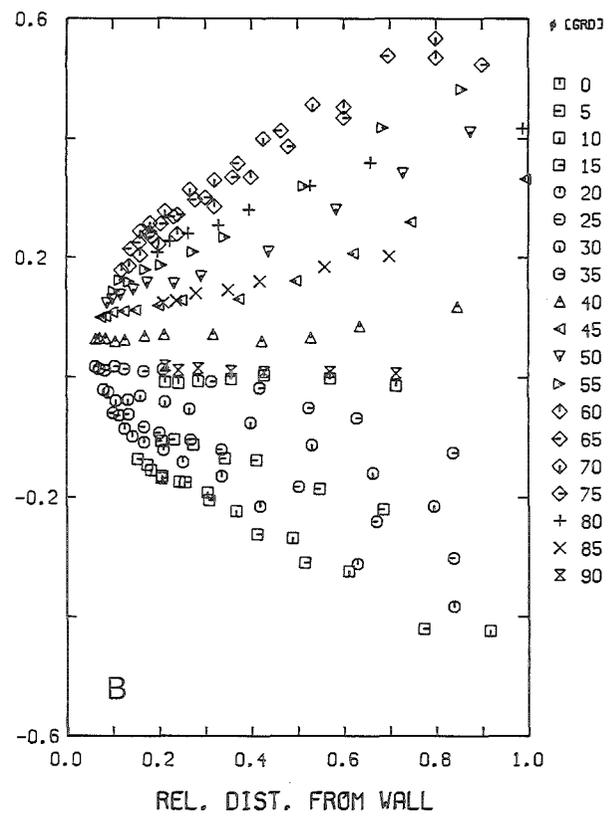
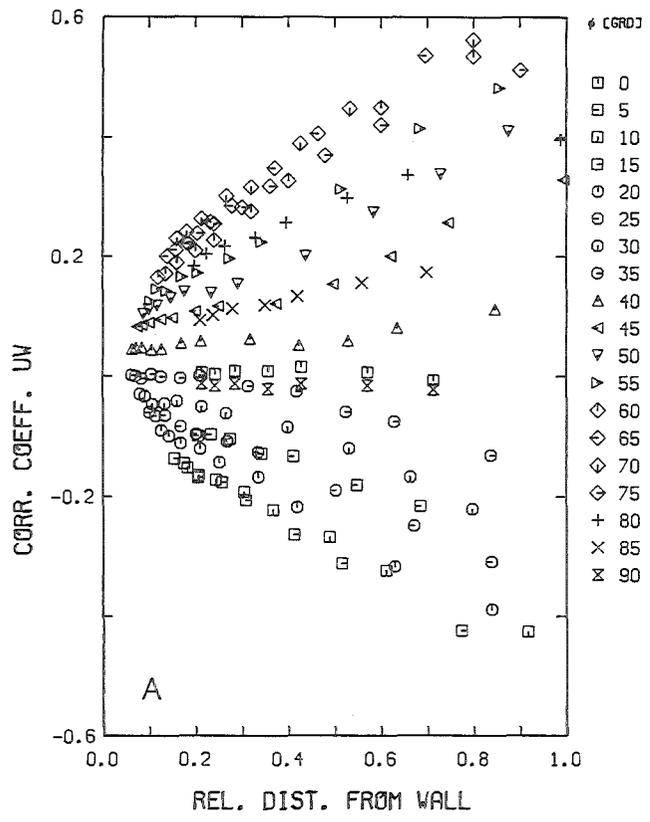


Abb.28 Korrelationskoeffizient R_{uw} (r/ϕ)

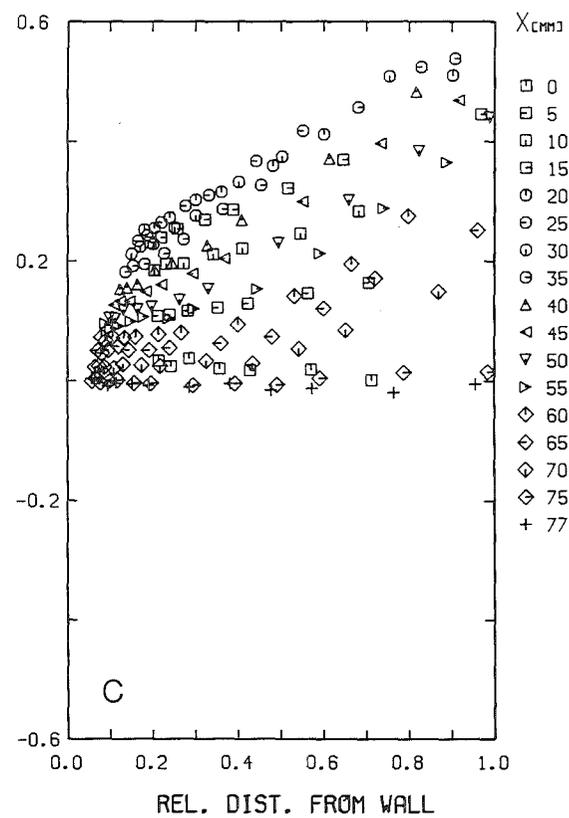
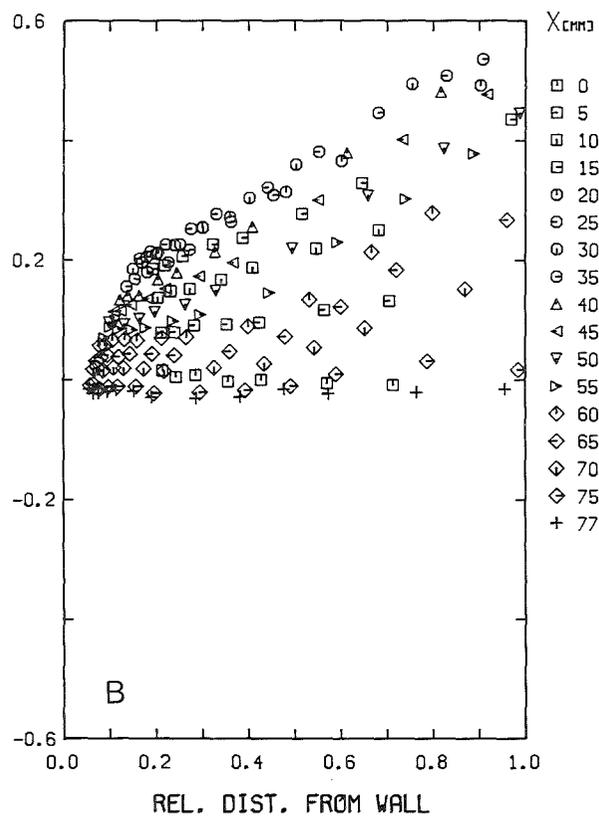
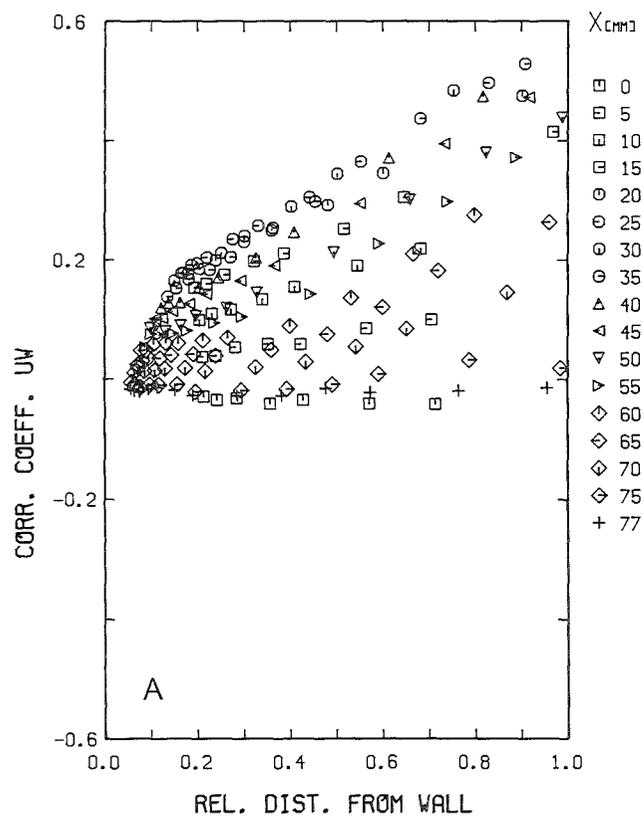


Abb.29 Korrelationskoeffizient R_{uw} (x/y)

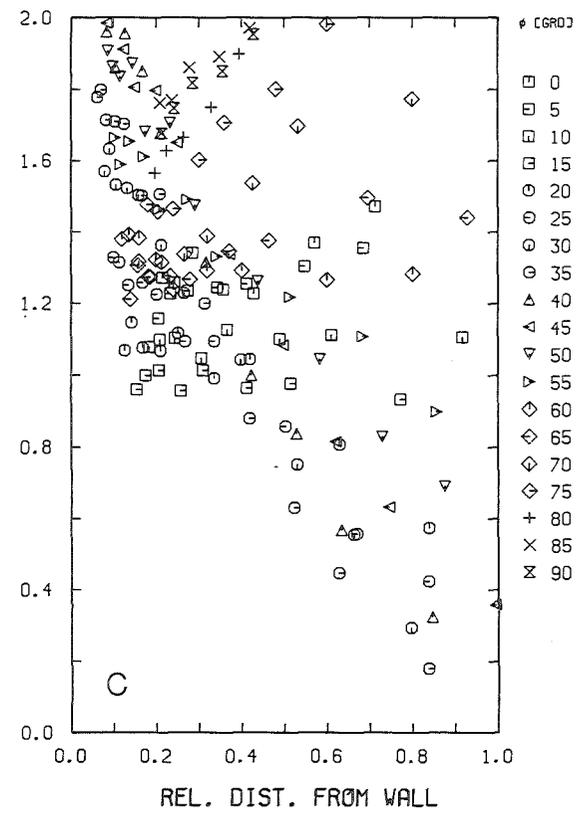
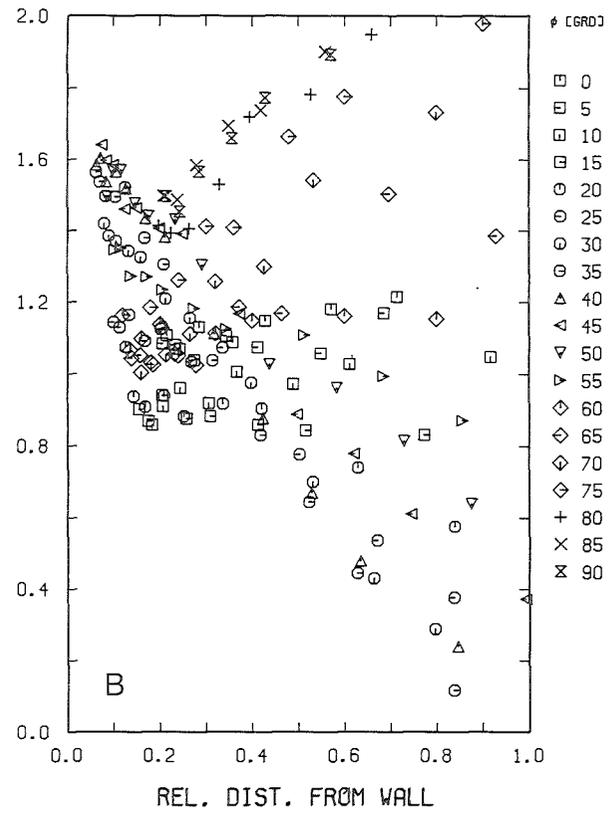
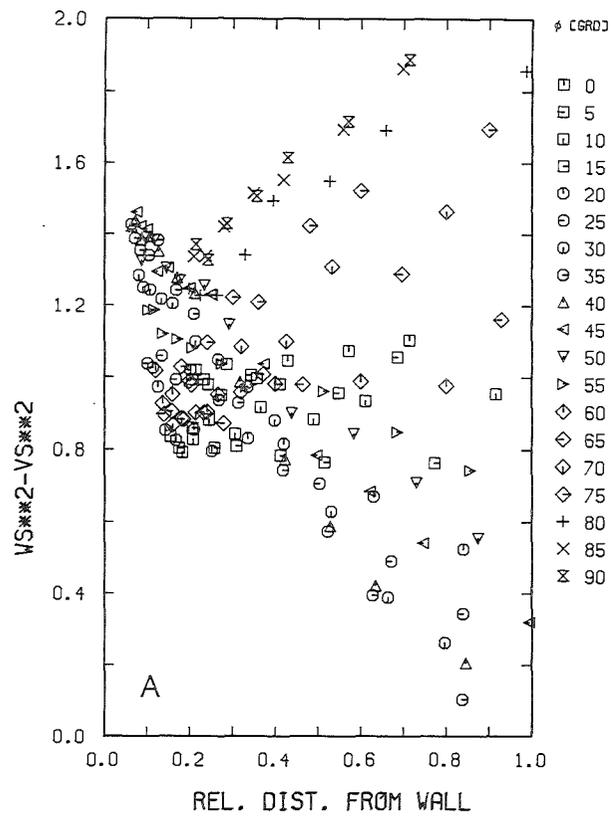


Abb.30 Differenz der Turbulenzintensitäten in Richtung parallel und senkrecht zur Wand (r/ϕ)

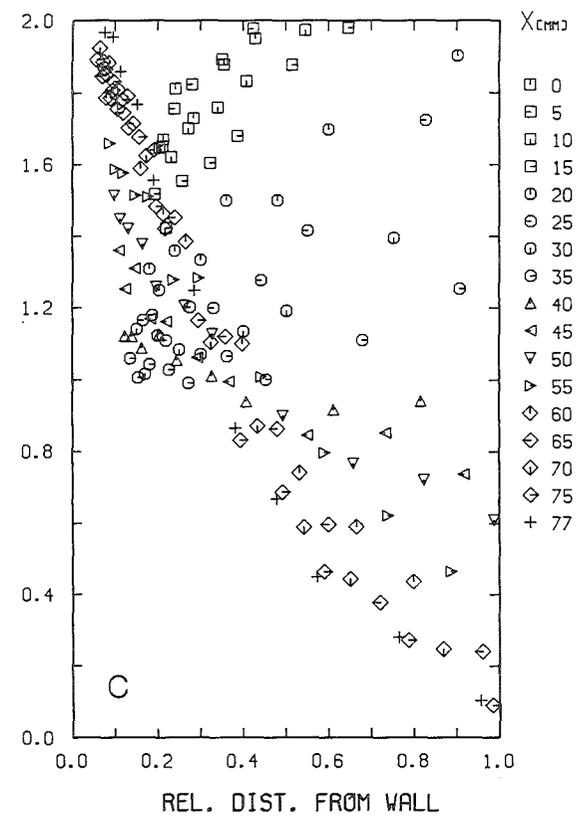
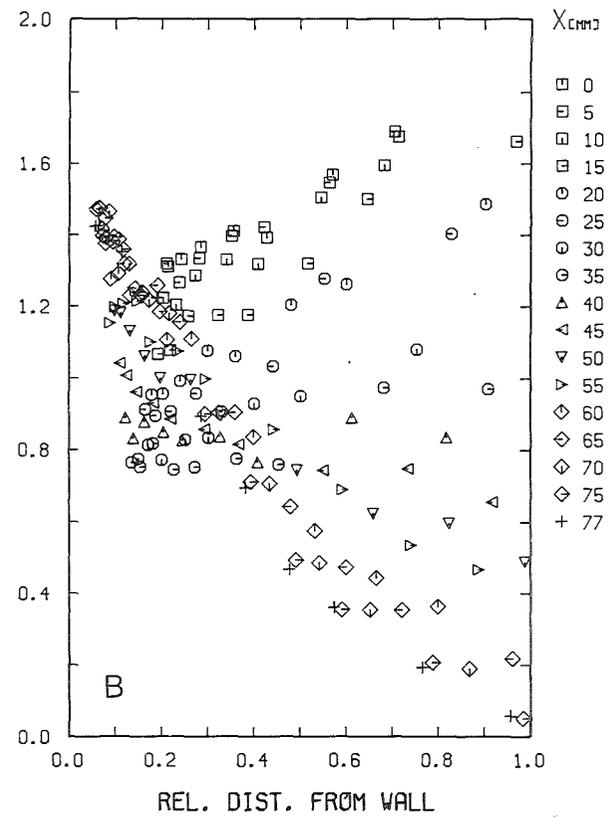
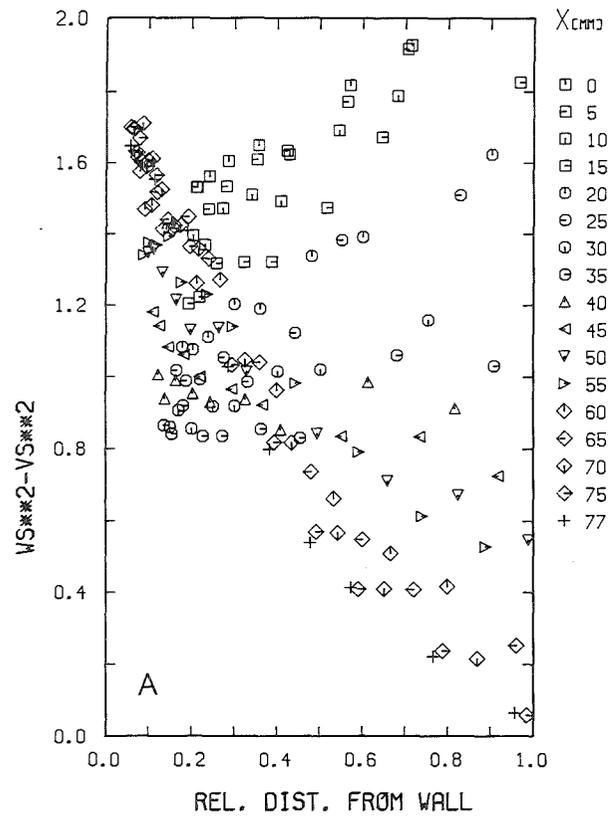


Abb.31 Differenz der Turbulenzintensitäten in Richtung parallel und senkrecht zur Wand (x/y)

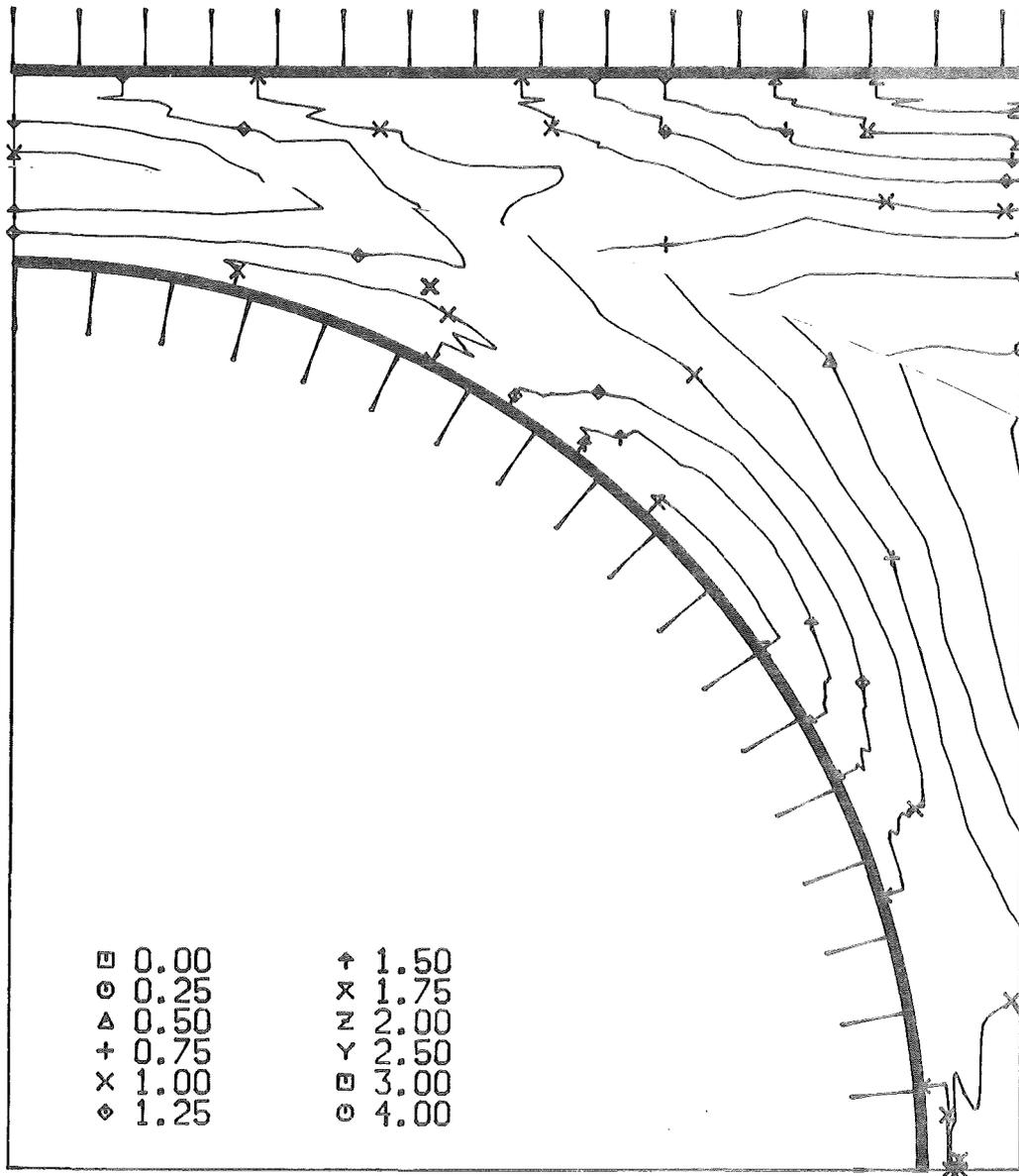


Abb.32 Differenz der Turbulenzintensitäten in Richtung parallel und senkrecht zur Wand (Höhenlinien)

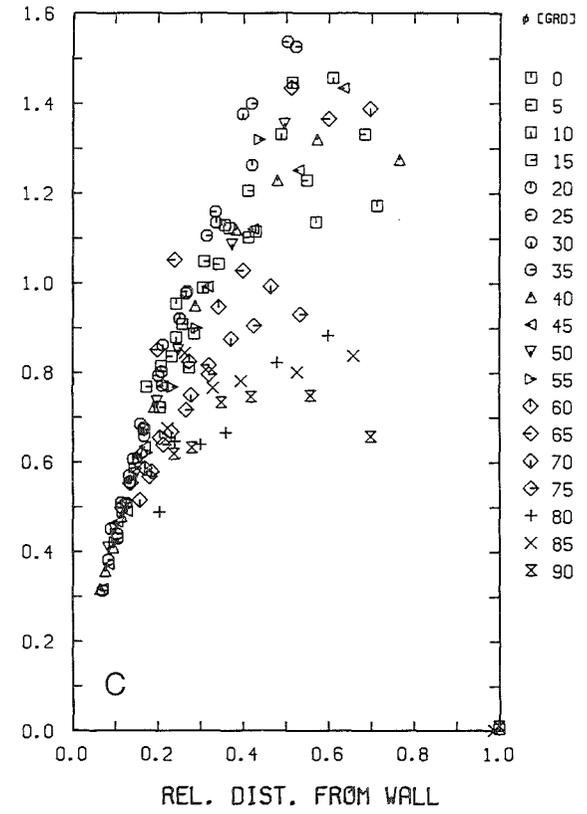
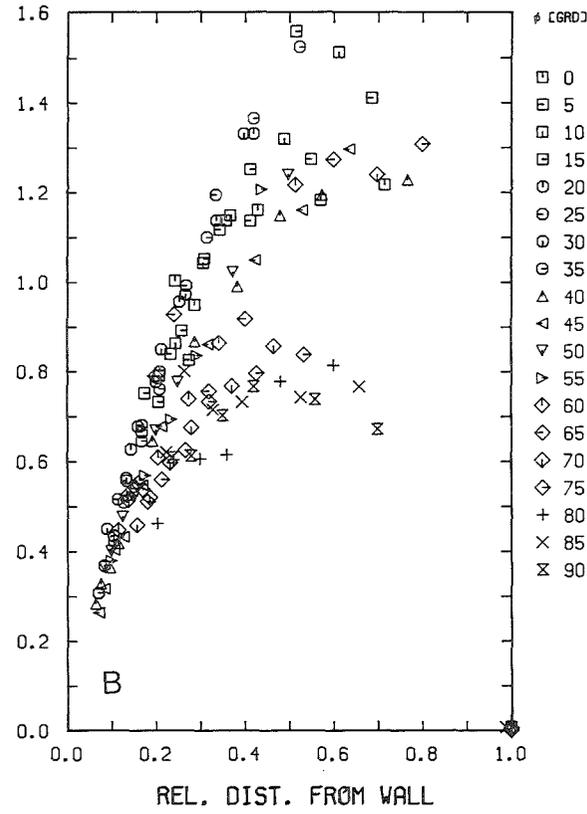
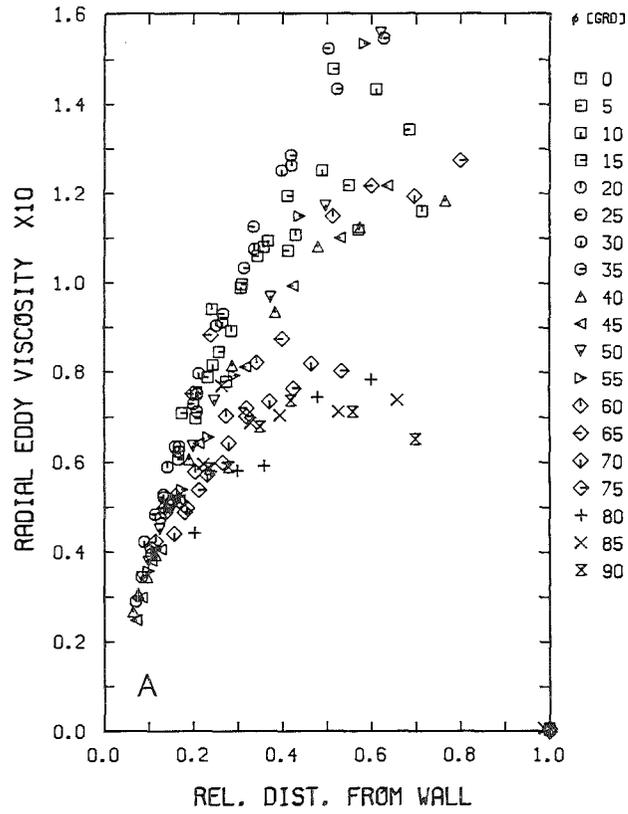


Abb.33 Wirbelviskosität senkrecht zur Wand (r/ϕ)

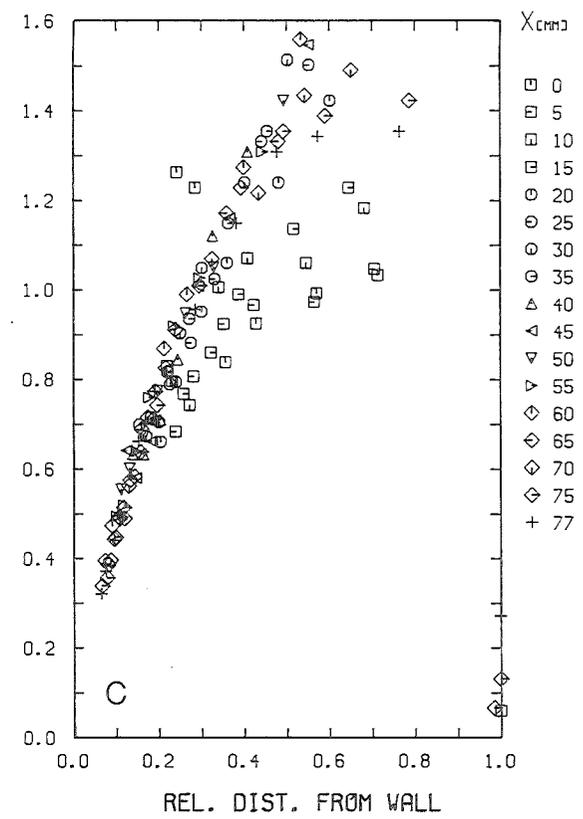
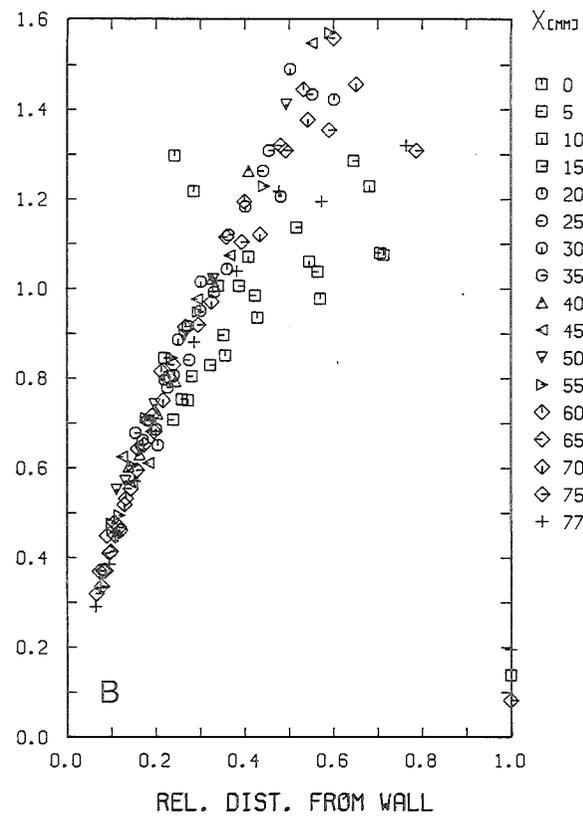
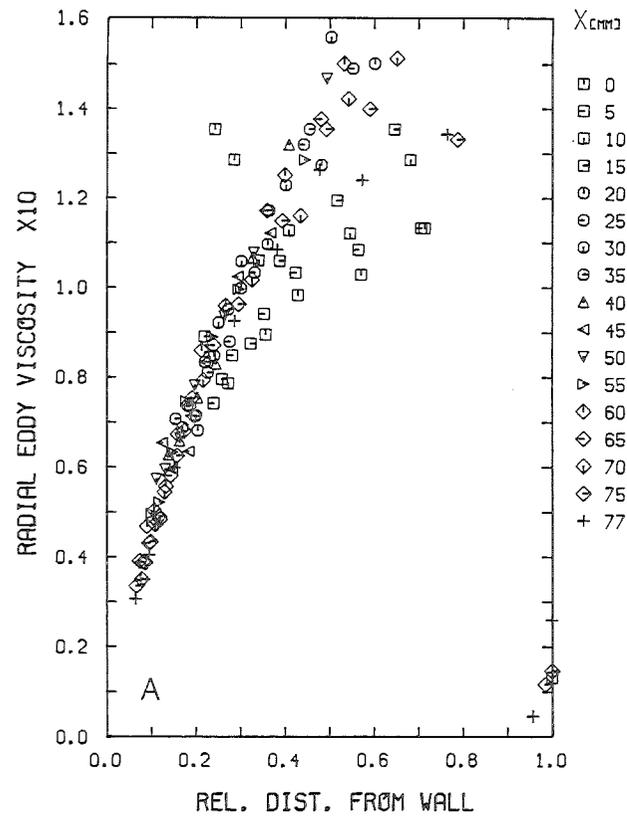


Abb.34 Wirbelviskosität senkrecht zur Wand (x/y)

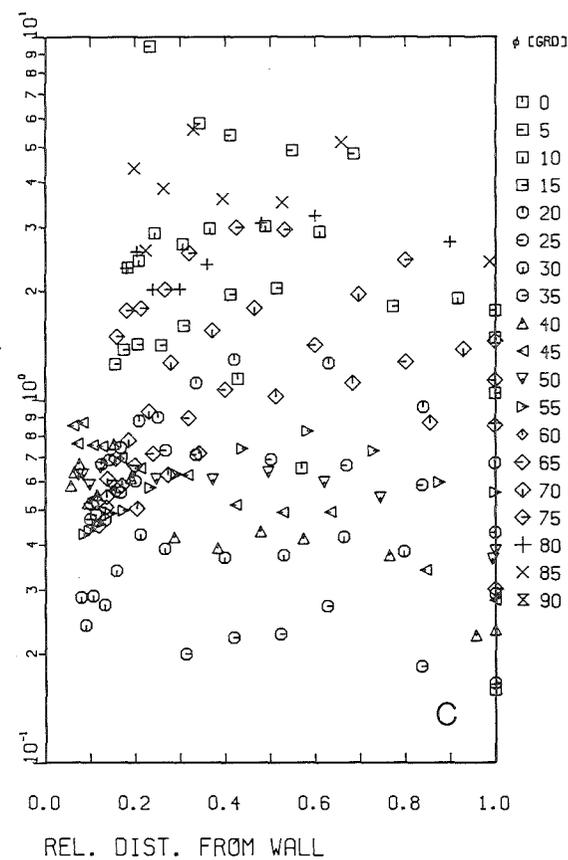
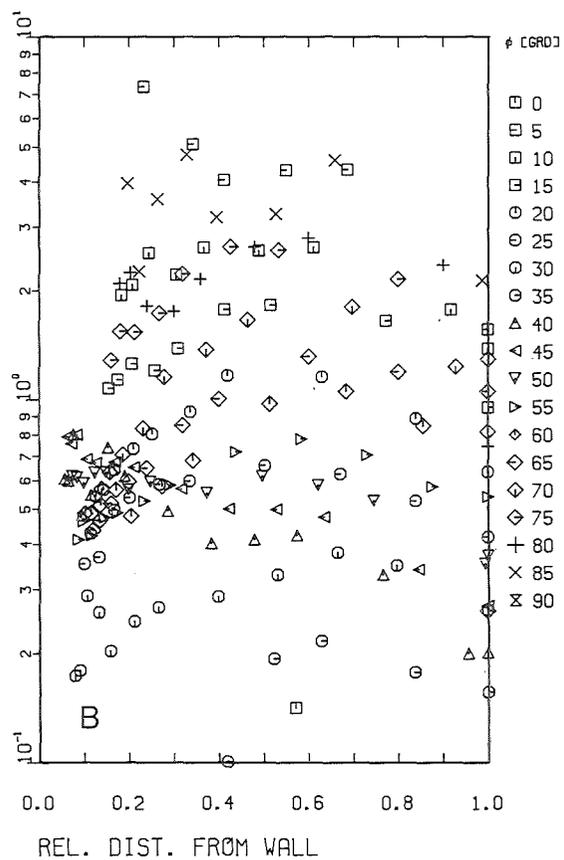
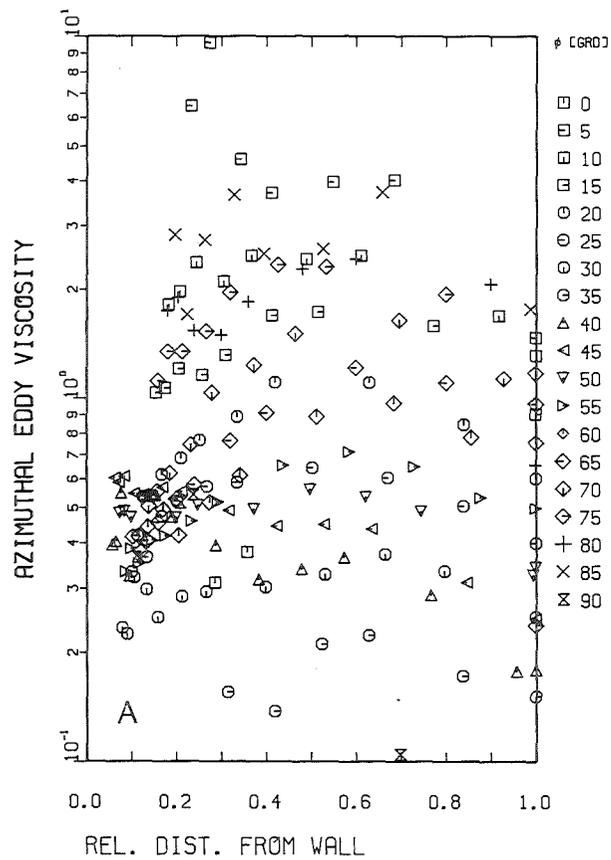


Abb.35 Wirbelviskosität parallel zur Wand (r/ϕ)

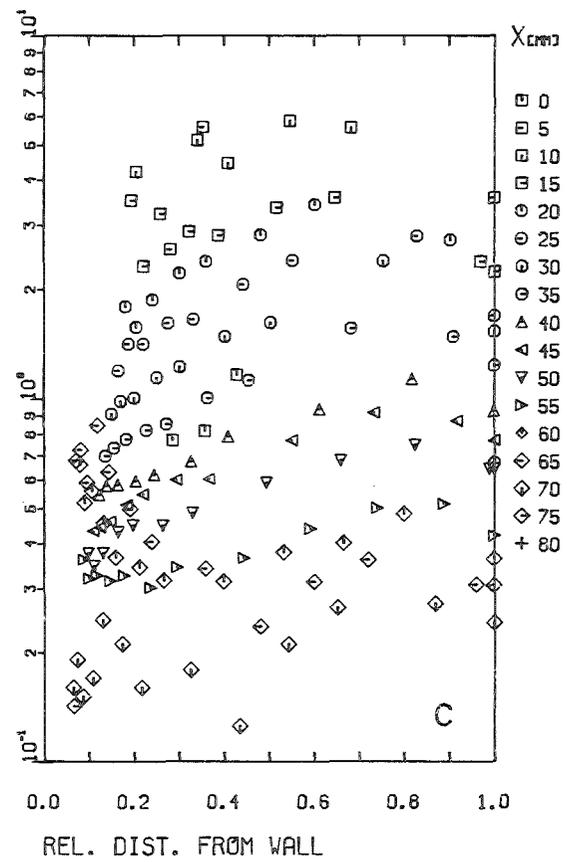
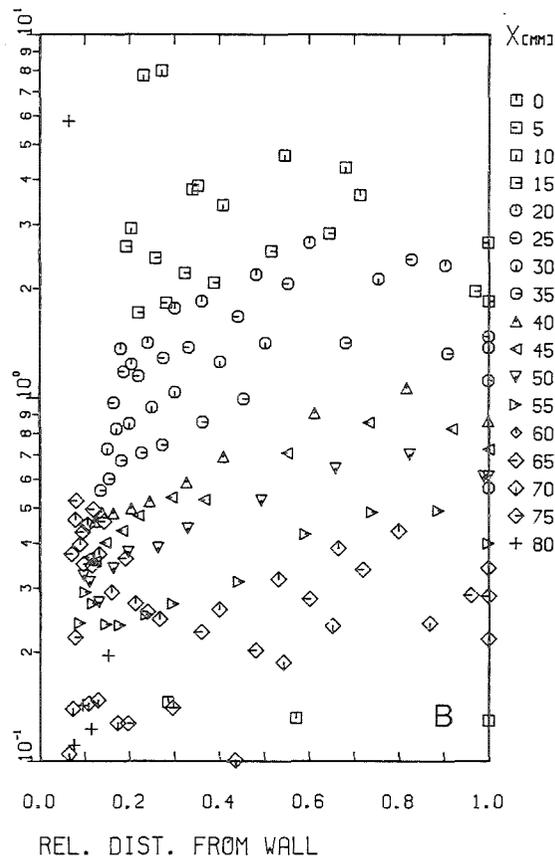
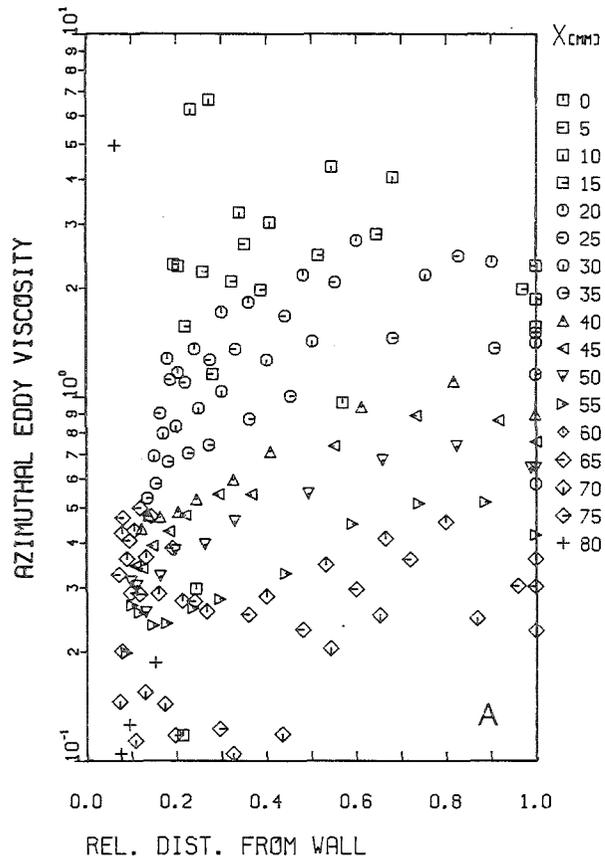


Abb.36 Wirbelviskosität parallel zur Wand (x/y)