

KfK 5007
April 1992

Turbulente Strömung durch Wandkanäle von Stabbündeln ($P/D = 1,12$ $W/D = 1,06$)

L. Meyer, K. Rehme
Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Nukleare Sicherheitsforschung

Kernforschungszentrum Karlsruhe

Kernforschungszentrum Karlsruhe
Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Nukleare Sicherheitsforschung

KfK 5007

Turbulente Strömung durch Wandkanäle
von Stabbündeln ($P/D = 1,12$, $W/D = 1,06$)

L. Meyer, K. Rehme

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

An einem Stabbündel aus vier parallelen Stäben in einem Rechteckkanal wurden Geschwindigkeits- Wandschubspannungs- und Turbulenzverteilungen im Wandkanal ($P/D = 1,12$ und $W/D = 1,06$) gemessen. Die Messungen der Turbulenzstruktur wurden mit zwei verschiedenen Methoden vorgenommen. Verwendet wurden die Hitzdraht-Methode mit Einzeldrähten und analoger Signalverarbeitung und die Methode mit X-Drähten und digitaler Signalverarbeitung. Außerdem wurden in einem Wandkanal mit gleicher Geometrie in einem 37-Stabbündel die gleichen Messungen durchgeführt.

Alle Meßergebnisse stimmen weitgehend überein, was sowohl eine Bestätigung der beiden Meßmethoden als auch der 4-Stabgeometrie zur Simulation eines Wandkanals ist.

Turbulent Flow Through Wall Subchannels of Rod Bundles ($P/D = 1,12$, $W/D = 1,06$)

Abstract

Measurements of the mean velocity, of the wall shear stresses, and of the turbulence have been performed in a wall subchannel ($P/D = 1,12$, $W/D = 1,06$) of a rod bundle of four parallel rods. The structure of turbulence has been measured by two different methods. Both, the hot-wire method with single wires and analog signal processing and the method with X-wires and digital signal processing have been applied. Moreover, the same measurements have been performed in a wall subchannel of a bundle of 37 rods with the same geometry.

All results show fair agreement, which corroborates both measurement methods as well as the bundle of four rods for the simulation of a wall subchannel.

1. Einleitung

Für Wandkanäle von Stabbündeln wurden Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen für eine Reihe von Geometrien gemessen [1]. Dazu wurden vier Stäbe verwendet, die parallel in einem Rechteckkanal angeordnet waren. Für die Geometrie der Wandkanäle des 37-Stabbündels HERA [2] liegen keine Ergebnisse an einem 4-Stabbündel vor. Im 37-Stabbündel beträgt das Stababstandsverhältnis $P/D = 1.12$ und das Wandabstandsverhältnis $W/D = 1.06$.

Damit Unterschiede in der Turbulenzstruktur in den Wandkanälen eines 4-Stabbündels und eines 37-Stabbündels klar festgestellt werden können, wurden Messungen an einem 4-Stabbündel mit $P/D = 1.12$ und $W/D = 1.06$ durchgeführt. Außerdem wurde die Turbulenzstruktur am 4-Stabbündel mit zwei verschiedenen Methoden gemessen. Dadurch ist ein Vergleich der Ergebnisse beider Methoden möglich. Verwendet wurden die Hitzdraht-Methode mit Einzeldrähten und analoger Signalverarbeitung [3] und die Methode mit X-Drähten mit digitaler Signalverarbeitung [4].

2. Versuchsaufbau

2.1 4-Stabbündel

Das 4-Stabbündel besteht aus vier parallelen Rohren von $D = 139.0$ mm Durchmesser, die symmetrisch in einem Rechteckkanal mit den Abmessungen 700×155.8 mm angeordnet waren (Abb. 1). Das Stababstandsverhältnis betrug $P/D = 1.12$ und das Wandabstandsverhältnis $W/D = 1.06$. Der Kanal ist ebenso wie die vier Rohre aus vier Schüssen zusammengesetzt. Die gesamte Länge beträgt $L = 7800$ mm. In den engen Spalten zwischen den Rohren bzw. zwischen Rohren und der Kanalwand sind die Rohre an drei axialen Positionen durch Abstandshalterstifte von 2 mm Durchmesser fixiert.

Strömungsmedium ist Luft, die über einen Schalldämpfer und ein Filter von einem Radialgebläse in die Teststrecke gefördert wird. Der Antriebsmotor für das

Radialgebläse ist drehzahlregelbar. Zwischen dem Radialgebläse und der Teststrecke ist ein weiterer Filter eingebaut, der sicherstellt, daß Partikel größer als $1 \mu\text{m}$ nicht in die Teststrecke gelangen. Am Eintritt in die Teststrecke sorgt ein Strömungsgleichrichter für eine gleichmäßige Anströmung und für die Vernichtung des in der Strömung durch die Umlenkung vorhandenen Dralls.

Die Messungen erfolgen im offenen Austrittsquerschnitt des Kanals, etwa 20 mm stromaufwärts. Die Meßpositionen sind in Abb. 3 a gezeigt. In der Meßebene beträgt das Verhältnis Länge zu hydraulischem Durchmesser $L/D_h = 160$. Die Reynoldszahl der Untersuchung betrug $Re = 6.36 \times 10^4$.

2.2 37-Stabbündel

Das Stabbündel besteht aus 37 parallelen Stäben von $D = 140.0$ mm Durchmesser in hexagonaler Anordnung in einem Sechskantkanal (Abb. 2). Die gesamte Länge des Stabbündels beträgt $L = 11,50$ m. Das Stababstandsverhältnis ist $P/D = 1.12$ und das Wandabstandsverhältnis $W/D = 1.06$. Das ganze Stabbündel ist aus fünf gleich langen Teilen zusammengesetzt. Die Abstandshalter in den Spalten sind 4 mm dick und haben eine axiale Länge von 15 mm.

Strömungsmedium ist Luft von Umgebungsdruck und -temperatur, die durch ein Radialgebläse angetrieben wird. Vor Eintritt in die Teststrecke wird die Luft gefiltert und Partikel größer $1 \mu\text{m}$ werden entfernt. Die Eintrittsstrecke in das Stabbündel besteht aus einem Wabengitter und mehreren feinen Sieben.

Die Messungen erfolgen an einer Position 20 mm stromaufwärts vom Austritt, an den Punkten, die in Abb. 3 b gezeigt sind.

3. Durchführung und Auswertung

Gemessen wurden:

- der zeitliche Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit mit Pitotrohren,
- die Wandschubspannung mit Prestonrohren, sowie
- der komplette Reynoldsche Spannungstensor mit Hitzdrähten.

Für die Pitotrohr-Messungen werden selbstgefertigte Staudrucksonden von $d_p = 0.62$ mm Außendurchmesser verwendet; die gleichen Sonden werden ebenfalls für die Prestonrohr-Messungen eingesetzt.

3.1 Einzeldraht-Methode

Für die Hitzdrahtmessungen mit Einzeldrähten wurde ein DISA-Anemometer benutzt. Die Messungen werden ohne Linearisator durchgeführt. Die Hitzdrähte werden mit großer Präzision selbst hergestellt, wobei eine Schweißapparatur der Fa. DANTEC verwendet wird. Als Hitzdrahtsonden werden Einzeldrahtsonden mit geradem bzw. schrägem (45°) Draht eingesetzt.

Der gesamte Versuchsablauf wird von einem Rechner vollautomatisch gesteuert, dazu wurde ein IBM-PC/XT eingesetzt. Der IBM-PC/XT war mit einem A/D-Wandler, an den die Datenleitungen über eine Verteilerleiste angeschlossen sind, hochgrüstet. Die Steuerprogramme sind in FORTRAN geschrieben und werden mit dem IBM-Professional FORTRAN übersetzt. Das auf dem PC/XT verwendete Betriebssystem ist DOS 3.0. Die Basisversion der Steuerprogramme ist in /7/ ausführlich dokumentiert.

Der ausgemessene symmetrische Teil eines Wandkanals (Abb. 1 und Abb. 3 a) wird in zwei Bereiche geteilt. Die Aufteilung erfolgt längs der Linie des maximalen senkrechten Wandabstandes von Stab- und Kanalwand. Der Bereich, der dem Stab benachbart ist, wird in zylindrischen Koordinaten (r/ϕ) ausgemessen, der Bereich nahe der Kanalwand in kartesischen Koordinaten (x/y). Die Messungen in den beiden Bereichen erfolgen zeitlich nacheinander. Die Verteilung der Meßpunkte ist dabei so gewählt, daß sich das ausgemessene Gebiet beider Bereiche leicht überlappt. Im Bereich nahe der Stabwand ist der Abstand zwischen den Traversen senkrecht zur Wand 5 grd, im Bereich nahe der Kanalwand 5 mm. Auf jeder Traverse ist die Punktdichte nahe den Wänden erhöht, weil die Gradienten der Meßgrößen dort höher sind. Für die vorliegende Geometrie wurden im Bereich nahe der Stabwand 229 und nahe der Kanalwand 205 Meßpunkte verwendet. Die Messungen mit dem Pitotrohr, dem Prestonrohr und den Hitzdrähten erfolgen ebenfalls zeitlich nacheinander. Der gerade Hitzdraht ist bei den Messun-

gen parallel zur Wand angeordnet, während mit dem schrägen Hitzdraht Messungen in sieben um jeweils 45 grad versetzte Positionen erfolgen /5/.

Die Drehzahl des Gebläsemotors wird vom Rechner so geregelt, daß bei Änderungen von Luftdruck und -temperatur die Reynoldszahl an einem festen Ort innerhalb $\pm 0.15 \%$ konstant gehalten wird. Als Ort wurde eine Position in einem Eckkanal des Stabbündels gewählt, an der die Strömungsgeschwindigkeit mit einem Pitotrohr (fest eingebautes Pitotrohr) gemessen wird. Die Ausgangsspannungen der Drucktransmitter für den Barometerstand und den Staudruck am fest eingebauten Pitotrohr sowie des Temperaturfühlers (PT 100) werden als Mittelwert aus 500 Einzelmessungen bestimmt. Dabei wird eine Standardabweichung von 0.6 % zugelassen, d. h. falls die Standardabweichung aus 500 Einzelmessungen größer als 0.6 % ist, wird die Messung wiederholt. Die Standardabweichung bei der Messung von Barometerstand und Lufttemperatur ist i.a. kleiner 0.3 %.

Bei den Pitotrohr- bzw. Prestonrohrmessungen wird die Ausgangsspannung des Drucktransmitters als Mittelwert aus 5 000 Einzelmessungen bestimmt. Die dabei zugelassene Standardabweichung beträgt 0.6 %.

Für die Hitzdrahtmessungen wird bei beiden Sonden (gerader und schräger Hitzdraht) zu Beginn der Messungen als Referenztraverse entlang der Wand der jeweils wandnächste Meßpunkt gemessen, bevor die wandsenkrechten Traversen abgefahren werden. Beim schrägen Hitzdraht wird dabei nur die erste Winkelposition des Hitzdrahtes (von 7) verwendet.

Der Wechselspannungsanteil der Anemometerbrücke wird vor der Messung auf eine Höhe verstärkt, die dem Maximalwert des verwendeten A/D-Konverters entspricht. Danach werden Gleich- und Wechselspannungsanteil des Hitzdrahtsignals gemessen, wobei der Wechselspannungsanteil über ein RMS-Meter mit 10s Integrationszeit gemittelt wird. Alle Meßwerte werden aus 5000 Einzelmessungen bestimmt. Dabei wird die zugelassene Standardabweichung für den RMS-Wert bei der Referenztraverse und bei dem entsprechenden Meßwert auf den wandsenkrechten Traversen auf 0.6 % eingestellt. Bei den übrigen Messungen wird die zulässige Standardabweichung auf 1.2 % gesetzt. Falls nach vier Messungen die gesetzte Standardabweichung nicht unterschritten wurde, wird sie im 0.3 % auf 0.9 % bzw. 1.5 % erhöht. Eine Erhöhung der Standardabweichung ist

selten erforderlich, zuweilen dann, wenn die Witterungsbedingungen (Wind) sehr ungünstig sind. Für den Gleichspannungsanteil der Brückenspannung wird stets eine Standardabweichung von 0.6 % zugelassen.

Alle Meßdaten, einschließlich der jeweiligen Meßwerte von Barometerstand, Lufttemperatur und Staudruck am fest eingebauten Pitotrohr, werden auf einem Datafile der an den Rechner angeschlossenen Festplatte abgespeichert. Nach Beendigung der Messungen werden die Daten über eine PCOX-Karte auf die Großrechenanlage IBM3090/Siemens 7890 zur Auswertung übertragen.

Die Meßergebnisse werden mit dem HDRA-Rechenprogramm /3/ ausgewertet. Für die Hitzdraht-Messungen wird dabei die von Hooper /6/ vorgeschlagene Methode verwendet, allerdings mit dem Unterschied, daß alle in die Auswertung eingehenden Konstanten des Abkühlungsgesetzes (Abhängigkeit der Hitzdrahtbrücken-Ausgangsspannung von der Strömungsgeschwindigkeit) durch Eichungen bestimmt werden. Aus der Richtungsempfindlichkeit bei der Anströmung des schrägen Hitzdrahtes wird der effektive Winkel des Hitzdrahtes bestimmt. Vor der eigentlichen Auswertung werden alle Meßergebnisse korrigiert. Die Korrekturen sind ausführlich in /7/ beschrieben.

3.2 X-Draht-Methode

Die X-Draht Meßsonde ist eine modifizierte DANTEC Sonde 55P61. Die X-Drähte sind 1.2 mm lang, haben 5 µm Durchmesser und einen Abstand von 0.35 mm. Die Eichung und Auswertungsmethode benutzt Look-Up Tabellen [8] wie von Lueptow et al. [9] beschrieben.

Die Messungen werden vollautomatisch durchgeführt. Der Durchsatz und die Sondenverstellung werden mit einem HP-RS25 C Mikrorechner gesteuert. Die X-Draht Sonde hängt an einem DANTEC 55M System. Ein TSI-IFA-100 wird zur Signalkonditionierung benutzt.

Die Hitzdrahtsignale werden mit einer Abtastfrequenz von 2 kHz pro Kanal mit einer DT 2828-Karte digitalisiert mit einer 12-bit Auflösung und einem maxima-

len Eingangssignal von 5 Volt. Pro Kanal werden 96 000 Werte registriert in einer Meßzeit von 48 s. Die Rohdaten werden durch DMA in den erweiterten Speicher des Rechners geladen. Die Auswertung aller Korrelationen dauert etwa 1 min. An jedem Meßpunkt wird die Sonde auf jeweils zwei Positionen gedreht um die Geschwindigkeitskomponenten senkrecht und parallel zur nächsten Wand zu messen.

Ebenso wie im 4-Stabkanal wird der Wandkanal in zwei Bereiche unterteilt (Abb. 3 b). Der dem Stab benachbarte Bereich wird in zylindrischen Koordinaten (r/Φ) ausgemessen, und der Bereich, der der Kanalwand benachbart ist, in kartesischen Koordinaten. In jeder zur jeweiligen Wand senkrechten Traverse liegen zehn Meßpunkte, wobei die Position der jeweils wandfernsten Punkte aufeinanderfallen. An diesen Punkten wird die Messung einmal bezogen auf die Kanalwand und einmal bezogen auf die Stabwand, durchgeführt, was sich durch die verschiedenen Richtungsvektoren der v- und w-Geschwindigkeitskomponenten ausdrückt.

Die wandnächste Position betrug 1.4 mm, die anderen Wandabstände liegen auf Potentiallinien. Der Abstand zwischen den Meßpunkten wird mit steigendem Wandabstand größer. Die Gesamtzahl der Meßpunkte beträgt 120 im Wandunterkanal und 190 im Stabunterkanal.

4. Ergebnisse

4.1 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit

4-Stabbündel

Um die Symmetrie der Strömungsverteilung zu überprüfen, wurde die Geschwindigkeitsverteilung mit Pitotrohren in zwei Wandkanälen, also in vier Quadranten, gemessen. Abbildung 4 zeigt die Isotachen der gemessenen Geschwindigkeit, bezogen auf den Mittelwert in allen vier Quadranten ($u_m = 20.56 \text{ ms}^{-1}$). Die Verteilung ist relativ gut symmetrisch. Die mittleren Geschwindigkeiten in den einzelnen Quadranten weichen nur um $\pm 1.1 \%$ vom Mittelwert über alle Quadranten ab. Die in den vier Quadranten an identischen Positionen gemessenen Geschwindigkeiten stimmen besser als $\pm 2 \%$ überein.

Die übrigen Messungen wurden wegen der guten Symmetrie nur in einem Quadranten durchgeführt. Die Verteilung der gemessenen mittleren Strömungsgeschwindigkeit senkrecht zu den Wänden in beiden Gebieten (nahe der Stabwand

r/Φ und nahe der Kanalwand x/y) zeigt Abb. 5. Die dabei verwendeten Koordinaten sind so definiert, daß $\Phi = 0^\circ$ im Spalt zwischen den Stäben und $\Phi = 90^\circ$ im Spalt zwischen Stab und Kanalwand liegt. Im Bereich nahe der Kanalwand ist $x = 0$ mm im Spalt zwischen Stab und Kanalwand und $x = 78$ mm auf der Symmetrielinie des Wandkanals. Die Geschwindigkeiten sind auf die mittlere Geschwindigkeit im ausgemessenen Quadranten bezogen ($u_m = 20.64 \text{ ms}^{-1}$). Aus der Abbildung ist deutlich zu erkennen, daß die minimale Geschwindigkeit nicht genau im Spalt zwischen Stab und Kanalwand auftritt ($\Phi = 90^\circ$ bzw. $x = 0$ mm), sondern bei etwa $\Phi = 85^\circ$ bzw. $x = 5$ mm. Das wird darauf zurückgeführt, daß die Unterkäle an den kurzen Seiten des Rechteckkanals deutlich größer waren als im Inneren des Stabbündels. Dadurch ist die Geschwindigkeit in diesen Kanälen höher und die Geschwindigkeiten in den Nachbarkanälen werden angehoben. Daß dieser Effekt symmetrisch in allen Quadranten auftritt, erkennt man in Abb. 4.

Eine Höhenliniendarstellung der mit Pitotrohren gemessenen mittleren Geschwindigkeit in dem einen Quadranten ist in Abb. 6 dargestellt; dabei sind die Meßwerte auf die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Quadranten bezogen.

37-Stabbündel

Die mittleren Geschwindigkeiten im Wandkanal des 37-Stabbündels sind in Abb. 7 und 8 dargestellt. Man sieht in Abb. 7, daß die minimale Geschwindigkeit im engsten Spalt auftritt, also bei $x = 0$ mm und $\Phi = 90^\circ$. Auch bei $\Phi = 0^\circ$ im Spalt zwischen den Stäben ist ein relatives Minimum. Ein Vergleich der Isolinien der mittleren Geschwindigkeit zwischen 4-Stabkanal (Abb. 6) und 37-Stabbündel (Abb. 8) zeigt im Wandbereich eine fast identische Verteilung, während im Bereich zwischen den Stäben die Geschwindigkeit im 4-Stabkanal höher ist.

4.2 Wandschubspannung

Die mit Prestonrohren gemessene Wandschubspannungsverteilung ist in Abb. 9 für alle vier Quadranten des 4-Stabkanals und einen ganzen Wandkanal des 37-Stabbündels dargestellt. Dabei sind die Daten auf den Mittelwert in allen vier Quadranten bzw. den ganzen Wandkanal bezogen. Die Wandschubspannungen an den Stabwänden zeigt Abb. 9 a, die Verteilung an den Kanalwänden Abb. 9 b. Die Wandschubspannungsverteilung, die gegenüber Asymmetrien viel empfindlicher ist als die Geschwindigkeitsverteilung, zeigt ebenfalls, daß die Strömungsverteilung relativ gut symmetrisch ist. Dabei ist die Wandschubspannung im

Wandkanal aus den Quadranten Q2 + Q3 (s. Abb 1) höher als im Wandkanal aus den Quadranten Q1 + Q4 und zwar für beide Stäbe (R1 und R2) im 4-Stabkanal. Deutlich ist auch zu sehen, daß im 4-Stabkanal die Minima der Wandschubspannung nicht im Spalt zwischen Stab und Kanalwand auftreten ($\Phi = \pm 90^\circ$, $x = \pm 78$ mm), sondern bei $\Phi \approx 80 - 85^\circ$ bzw. $x \approx 70 - 75$ mm. Für die detailliert ausgemessenen Unterkanäle ist die Wandschubspannungsverteilung in Abb. 10 dargestellt; die Meßwerte sind dabei auf den Mittelwert der Wandschubspannung in den Unterkanälen bezogen.

4.3 Turbulenzintensitäten und kinetische Energie der Turbulenz

Alle gemessenen Turbulenzdaten werden dargestellt über dem relativen Abstand von der Wand, definiert als dem senkrechten Abstand von der Meßposition zur Wand bezogen auf den größtmöglichen Abstand von der Wand. Die Turbulenzdaten werden dabei auf die lokale Wandschubspannungsgeschwindigkeit bezogen. Die Daten werden auch als Höhenlinien dargestellt, dabei werden sie auf den Mittelwert der Wandschubspannungsgeschwindigkeit bezogen.

Die **Turbulenzintensitäten in axialer Richtung** sind in den Abb. 11 bis 16 gezeigt. Die Daten, die mit der Einzeldraht-Methode gemessen wurden (Abb. 11) stimmen mit den Daten nach der X-Draht-Methode Abb. 12 ausgezeichnet überein. Im Spalt zwischen Stab und Kanalwand sind die axialen Turbulenzintensitäten sehr hoch und steigen mit wachsenden Abstand von der Wand an. Dieses Verhalten stimmt vollkommen mit anderen Meßergebnissen in engen Spalten von Stabbündeln überein [1]. Es wird auf die Strömungspulsation zwischen den Unterkanälen zurückgeführt. Das Gebiet hoher axialer Turbulenzintensität ist deutlich in den Höhenlinienbildern zu erkennen (Abb. 14 und 15).

Die axialen Turbulenzintensitäten im Wandbereich des 37-Stabbündels sind ähnlich denen des 4-Stabkanals (Abb. 13 und 16); auch ist der maximale Wert nahezu gleich, allerdings ist die Position der maximalen Intensität beim 37-Stabbündel näher am Spalt zwischen Stab und Wand. Wie die mittlere Geschwindigkeit ist auch die axiale Turbulenzintensität zwischen den Stäben im 4-Stabkanal höher als im Wandkanal des 37-Stabbündels.

Für die **Turbulenzintensität senkrecht zur Wand** (Abb. 17 bis 22) stimmen die nach den beiden Methoden gemessenen Werte nur im Gebiet zwischen den Stäben gut überein. Im Gebiet zwischen Stab- und Kanalwand weichen die nach der

Einzeldrahtmethode gemessenen Turbulenzintensitäten senkrecht zur Wand zu kleineren Werten hin ab. Die größten Abweichungen gibt es dort, wo die axiale Turbulenzintensität sehr groß ist. Diese Abweichungen wurden schon bei früheren Messungen festgestellt [10]. Die Fehler resultieren aus der Berechnung der Turbulenzintensität senkrecht zur Wand durch Subtraktion zweier großer Signale [11]. Die Höhenliniendarstellungen (Abb. 20 und 21) zeigen die Unterschiede deutlich.

Die Unterschiede zwischen den beiden Kanälen (Abb. 18, 19 und 21, 22) bei der Turbulenzintensität senkrecht zur Wand sind vernachlässigbar klein im gesamten Wandkanal.

Die **Turbulenzintensitäten parallel zur Wand**, die nach den zwei Methoden gemessen wurden, stimmen gut überein (Abb. 23 und 24). Die Höhenlinienbilder (Abb. 26 und 27) bestätigen das. Wie bei früheren Untersuchungen sind die Turbulenzintensitäten parallel zur Wand im engen Spalt zwischen Stab- und Kanalwand am größten auf der Linie größten senkrechten Abstands von beiden Wänden. Genau im Spalt ist die Turbulenzintensität parallel zur Wand am größten und höher als die axiale Turbulenzintensität.

Die entsprechenden Ergebnisse vom 37-Stabbündel sind ähnlich, allerdings mit etwas niedrigeren Werten in der Nähe des engsten Spaltes zwischen Stab und Wand (Abb. 25 und 28).

Die **kinetische Energie der Turbulenz** (Abb. 29 bis 34)

$$k^+ = \frac{1}{2} \left(\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2} \right) / u^{*2},$$

die durch das Quadrat der Wandschubspannungsgeschwindigkeit normiert ist, wird wesentlich durch die beiden größten Komponenten u und w bestimmt. Daher ist die Übereinstimmung der Daten mit den beiden Meßmethoden sehr gut, wenn man von geringen Abweichungen im Spalt zwischen Stab und Kanalwand absieht. Diese Abweichungen sind natürlich auf die zu kleinen Turbulenzintensitäten senkrecht zur Wand bei der Einzeldraht-Methode zurückzuführen.

Die kinetische Energie der Turbulenz ist sehr hoch im Spalt zwischen Stab und Kanalwand und dort praktisch unabhängig vom Wandabstand. Auch die Überein-

stimmung der Daten der beiden Kanäle ist gut, für die Unterschiede zwischen den beiden Kanälen gilt, das was zu den axialen Turbulenzintensitäten gesagt wurde.

4.4 Turbulente Schubspannungen und Korrelationskoeffizienten

Die gemessenen **turbulenten Schubspannungen senkrecht zur Wand** sind in Abb. 35 bis 40 dargestellt. Die Meßwerte nach der Einzeldraht-Methode sind im Mittel etwa 8 % höher. Die niedrigeren Werte, die durch die X-Draht Methode ermittelt wurden, sind wahrscheinlich auf Sondenfehler zurückzuführen. Die Länge und der Abstand der beiden Drähte waren noch zu groß für diese Meßaufgabe im starken Geschwindigkeitsgradienten. In Wandnähe gehen die Daten nach der Einzeldraht-Methode gegen das Quadrat der Wandschubspannungsgeschwindigkeit wie erwartet werden kann. Im wandfernen Bereich für $\Phi = 45 - 70^\circ$ bzw. $x = 20 - 55$ mm sind die gemessenen Schubspannungen senkrecht zur Wand höher als bei Kreisrohren. Die Ergebnisse sind in den Abb. 35 bis 37 für beide Unterkanäle positiv aufgetragen, d. h. die Richtung des positiven v -Vektors ist in beiden Fällen zur Wand gerichtet. Bei einem ortsfesten Koordinatensystem würden die Werte ihr Vorzeichen an der Nullschubspannungslinie ändern. Allerdings gehen hier bei den meisten Traversen die turbulenten Schubspannungen nicht auf null zurück, was an der Wahl der Koordinatenrichtung liegt. So wird ein Anteil von u_w mitgemessen und fälschlicherweise als uv interpretiert. Das wird besonders deutlich an den Stellen, an denen die azimuthale Schubspannung u_w besonders große Werte annimmt, bei $\Phi = 65^\circ$ und $x = 25$ mm. Die Höhenlinienbilder der Meßwerte für beide Meßmethoden sind sehr ähnlich (Abb. 38, 39). Ein Unterschied ergibt sich nur aus der Höhe der Meßwerte.

Die Ergebnisse für die **turbulente Schubspannung parallel zu den Wänden** stimmen ebenfalls für beide Meßmethoden recht gut überein. Die nach der Einzeldraht-Methode gemessenen Werte sind zum Teil etwas höher (Abb. 41 und 42). Auch die Ergebnisse beider Kanäle unterschieden sich wenig (Abb. 42 und 43), mit Ausnahme der Werte bei $x = 0$ mm, bzw. $\Phi = 90^\circ$, d.h. an der engsten Stelle zwischen Stab und Wand. Hier gibt es im 4-Stabkanal einen relativ hohen negativen Wert, der auf Asymmetrie zum benachbarten Unterkanal zurückzuführen ist. Die Höhenliniendarstellungen der Schubspannung parallel zur Wand (Abb. 44 und 46) zeigen die gleiche Struktur. Hohe Schubspannungen treten auf im Gebiet zwischen Stab und Kanalwand: genau dort, wo für die axiale Turbulen-

zintensität hohe Werte gemessen wurden. Die positive Richtung des w-Vektors in den Abb. 44 - 46 zeigt von rechts nach links bzw. von unten nach oben, parallel zu den Wänden.

Die Korrelationskoeffizienten senkrecht zur Wand (Abb. 47 bis 52)

$$R_{uv} = \frac{-\overline{uv}}{\sqrt{\overline{u^2}} \sqrt{\overline{v^2}}}$$

streuen nach der Einzeldraht-Methode im Gebiet zwischen Stab und Kanalwand stark wegen der fehlerhaften Bestimmung der Turbulenzintensität senkrecht zur Wand (Abb. 47). Im übrigen Gebiet stimmen die nach den zwei Methoden gemessenen Korrelationskoeffizienten recht gut überein (Abb. 48). In Wandnähe ergeben sich Werte von 0.4 bis 0.45 wie beim Kreisrohr. Die Höhenlinien der Korrelationskoeffizienten R_{uv} zeigen nur für die Messungen mit dem X-Draht eine plausible Struktur, wobei sie für die beiden Kanäle ähnliche Verteilung zeigen. Hinsichtlich der Auswirkung der Definition der Richtungsvektoren von v gilt für R_{uv} das gleiche wie für die turbulente Schubspannung uv .

Die Korrelationskoeffizienten parallel zur Wand (Abb. 53 bis 58)

$$R_{uw} = \frac{-\overline{uw}}{\sqrt{\overline{u^2}} \sqrt{\overline{w^2}}}$$

zeigen nach beiden Meßmethoden und in den beiden Kanälen ähnliche Verläufe (Abb. 53 und 55) mit Ausnahme der Traverse an der Position $x = 0$ mm, und spiegeln die gemessenen turbulenten Schubspannungen parallel zur Wand wider. Die Korrelations-Koeffizienten erreichen mit größer 0.6 recht hohe Werte. Diese hohen Werte treten im Gebiet zwischen Stab und Kanalwand auf. Die Höhenliniendarstellungen der Daten von allen drei Messungen (Abb. 56 und 58) zeigen die gleichen Struktur.

4.5 Frequenzanalyse

Im folgenden werden Ergebnisse verglichen, die aus Messungen an ausgewählten Punkten der jeweiligen Wandkanäle der beiden Stbbündel gewonnen wurden. Dabei handelt es sich um Untersuchungen zur Frequenzanalyse und zu Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der turbulenten Geschwindigkeitskomponenten.

Hooper und Rehme [12] haben gefunden, daß im Spalt zwischen Stab und Wand oder zwischen zwei Stäben eine quasi-periodische Schwankung der Strömung auftritt. Möller [13] hat dazu Parameterstudien durchgeführt und eine Beziehung zwischen der Schwankungsfrequenz, der Strömungsgeschwindigkeit und der Spaltbreite aufgestellt. Beide Untersuchungen wurden am 4-Stab-Kanal durchgeführt, so daß die Frage nahelag, ob die Schwankungen in gleicher Weise im 37-Stabbündel auftreten.

Abbildung 59 zeigt die autospektralen Leistungsdichten des wandparallelen und des axialen Geschwindigkeitsvektors an drei Meßpunkten im Spalt zwischen Stab und Wand des 4-Stabkanals.

Die Spektren beider Geschwindigkeitskomponenten haben ein Maximum bei etwa 48 Hz, mit Ausnahme des axialen Vektors an der engsten Stelle im Spalt.

Bei den Messungen im Spalt zwischen den Stäben, der doppelt so breit ist wie der Spalt zwischen Stab und Wand, sind die Maxima weniger ausgeprägt (Abb. 60) und die Frequenz liegt bei 35 Hz. Auch die kreuzspektralen Leistungsdichten in Abb. 61 zeigen einen ähnlichen Verlauf. Die gleichen Frequenzen spiegeln sich in der Funktion der Auto- und Kreuzkorrelationskoeffizienten (Abb. 62) wider. Die Funktion der Korrelationskoeffizienten im Spalt zwischen den Stäben ist hier nicht gezeigt, da sie nur eine schwache Periodizität aufweist.

Die entsprechenden Ergebnisse der Messungen im 37-Stabbündel sind in den Abb. 63 bis 66 dargestellt. Die Frequenz der großskaligen Geschwindigkeitsschwankungen im Wandspalt liegt hier bei 57 Hz, was aus den Abb. 63 und 65 zu entnehmen ist, während die Frequenz der Schwankung im Spalt zwischen den Stäben etwa 42 Hz beträgt (Abb. 64). Interessant ist, daß diese Frequenz, die ja zwischen allen Stäben im Bündel auftreten muß, auch in der autospektralen Leistungsdichte der axialen Geschwindigkeitskomponente an der engsten Stelle zwischen Stab und Wand zu finden ist (Abb. 63, G_{UU}).

In Abb. 67 ist die Kohärenzfunktion und der Phasenwinkel zwischen den axialen und wandparallelen Geschwindigkeitskomponenten dargestellt. Die Kohärenzfunktion an den Punkten 2 und 3 hat in der Nähe der Schwankungsfrequenz sehr

hohe Werte, was zeigt, daß die hohen Werte der azimuthalen Schubspannung (Abb. 44 bis 46) im wesentlichen durch diese großskalige Strömungsfluktuation durch den Spalt hervorgerufen wird. Das gleiche gilt im abgeschwächten Maße für den Spalt zwischen den Stäben (Abb. 68).

Für einen Vergleich dieser Ergebnisse mit denen von Möller [13] wird eine Strouhalzahl berechnet, mit der Frequenz der Schwankung, der Geschwindigkeit im engsten Querschnitt im Spalt, gemittelt über die Spaltweite, und dem Durchmesser der Stäbe:

$$\text{Str}_s = f D/u_s.$$

	4-Stabkanal		37-Stabbündel	
Frequenz /s ⁻¹	48	35	57	42
u _{sm} /ms ⁻¹	13.0	16.3	14.0	17.9
Str _s	0.485	0.300	0.570	0.328
Str _s ⁻¹	1.93	3.32	1.755	3.044
Str _s Möller ⁻¹	1.74	2.91	1.74	2.91

Möller gibt als Ausgleichskurve durch seine Daten die Beziehung:

$$\text{Str}_s^{-1} = 19.5 S/D + 0.57 \pm 10 \%$$

an. Die hier gefundenen Werte liegen innerhalb der Bandbreite seiner Ergebnisse, wobei zu berücksichtigen ist, daß bei der Bestimmung der gemittelten Geschwindigkeit aus verschiedenen Gründen eine Unsicherheit von etwa 6 % besteht.

4.6 Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen

Einen weiteren Einblick in die Turbulenzstruktur geben die Verteilungen der Wahrscheinlichkeitsdichte. Die Verbundwahrscheinlichkeitsdichte der axialen und der wandparallelen Geschwindigkeitskomponente zeigen die Abb. 69 und 70 für sechs Punkte im 4-Stabkanal. Für die Punkte 1 - 4 ist w parallel und v senkrecht zur Kanalwand, für die Punkte 5 und 6 entsprechend zur Stabwand. Die Wahrschein-

lichkeitsdichte ist nicht normiert und ohne Angabe von absoluten Häufigkeiten, da die Form der Isolinien das Wesentliche ist.

Die Verbundwahrscheinlichkeitsdichte der wandparallelen und axialen Geschwindigkeitsschwankungen in Punkt 1 im engsten Spalt zeigt deutlich die Struktur der Schwankung. Die Querkomponente (w) ist größer als die axiale (u), und die größten Quergeschwindigkeiten sind mit positiven axialen Geschwindigkeitsvektoren gekoppelt. Die wandsenkrechten Komponenten (v) sind dagegen klein und symmetrisch. Die Richtung des positiven Geschwindigkeitsvektors w ist vom Spalt in den Wandkanal gerichtet. Die größere Geschwindigkeit macht sich deutlich in der Asymmetrie in Punkt 1 bemerkbar; Strömungspulsationen aus dem benachbarten Unterkanal (Abb. 1) in den Wandkanal haben eine größere axiale Komponente als umgekehrt.

Im Punkt 2 ist keine Symmetrie mehr vorhanden und das Bild macht die hohen Werte der turbulenten Schubspannung uw an diesem Punkt anschaulich, die in diesem Bezugssystem negative Werte annimmt. Der Spalt liegt also links. Im Punkt 3 ist die wandparallele Geschwindigkeitskomponente natürlich symmetrisch, während die Verteilung von uv die typische Form einer turbulenten Schubspannung in der Nähe einer Wand zeigt. Die Wand liegt in diesem Bezugssystem links, und der Mittelwert uv ist negativ.

Punkt 4 liegt in etwa dort, wo die turbulenten Schubspannungen in beiden Richtungen den Wert 0 haben (vergl. Abb. 39 und 45). Auch im Spalt zwischen den Stäben hat die Verbundwahrscheinlichkeit von uw ein ähnliches Aussehen wie im Wandspalt; wegen der größeren Spaltbreite und damit verbundenen schwächeren Querkomponenten aber nicht so ausgeprägt (Abb. 70, Punkt 6).

Die Bilder der einzelnen Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der Abb. 71 und 72 lassen quantitative Aussagen über die Größe und Häufigkeit der Schwankungen zu. Die Verteilung $p(w)$ in Punkt 1 zeigt die typische Form einer nichtstochastischen Fluktuation mit einer Asymmetrie wegen des benachbarten Unterkanals.

Die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen, gemessen im Wandkanal des 37-Stabbündels, sind in den Abb. 73 bis 75 dargestellt. Die Verbundwahrscheinlichkeiten, die nur für uw gezeigt sind (Abb. 73), ähneln denen im 4-Stabkanal.

Bei den einzelnen Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen ist hervorzuheben, daß auch die axiale Geschwindigkeitskomponente in Punkt 3 die Periodizität erkennen läßt (Abb. 74).

Außerdem fällt auf, daß in Punkt 4 das Maximum der Wahrscheinlichkeitsdichte $p(u)$ bei positiven u liegt. Das bedeutet eine negative Schiefe (skewness) $S = u^3/\sigma^3$ mit $\sigma = (u^2)^{1/2}$. Das heißt, daß große negative Spitzen der axialen Geschwindigkeitsschwankung auftreten. Tatsächlich hat die Schiefe S in der Nähe von Punkt 4 ein Minimum wie man in Abb. 76 sieht.

Die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der azimuthalen Komponente zeigen meist eine positive Schiefe, besonders stark in den Punkten 2 und 3, was sich auch im Isolinienbild der Schiefe (Abb. 77) zeigt. Das bedeutet große Spitzen in der positiven w -Richtung (hier von links nach rechts, in den Spalt).

Interessant ist die Tatsache, daß die Schiefe im gesamten Unterkanal positiv ist, also auch in der Nähe des Spaltes zwischen den Stäben. Hier treten die großen Schwankungsspitzen also in Richtung weg vom Spalt auf (im Bild nach unten). Das gleiche Ergebnis zeigte sich im Vierstabkanal.

5. Schlußfolgerungen

Die Messungen der Turbulenzstruktur in einem Wandkanal eines Stabbündels mit $P/D = 1.12$ und $W/D = 1.06$ mit zwei verschiedenen Hitzdraht-Meßverfahren haben folgendes ergeben:

1. Die Ergebnisse früher durchgeführter Turbulenzmessungen in Wandkanälen von Stabbündeln werden für die vorliegende Geometrie voll bestätigt. Insbesondere ergibt sich im engen Spalt zwischen Stab und Kanalwand ($W/D = 1.06$), daß in Spaltnähe auf der Linie größten senkrechten Abstands von beiden Wänden hohe axiale Turbulenzintensitäten und turbulente Schubspannungen parallel zu den Wänden auftreten. Unmittelbar in Spaltmitte sind die Turbulenzintensitäten parallel zur Wand sehr hoch und höher als die axialen Turbulenzintensitäten. Die Turbulenzintensitäten in axialer Richtung und parallel zu den Wänden sind höher als an der Wand.
2. Die Messungen mit Einzeldrähten und mit X-Drähten führen im wesentlichen zu den gleichen Ergebnissen. Nur die Turbulenzintensitäten senkrecht zur Wand werden - wie seit langem bekannt - in den Gebieten mit sehr hohen axialen Turbulenzintensitäten falsch bestimmt, und zwar zu klein. Dies ist ein prinzipieller Fehler der Einzeldrahtmethode.

3. Der Vergleich der Meßergebnisse in den Wandkanälen eines 37-Stabbündels und eines 4-Stabbündels zeigt, daß nur geringe Unterschiede vorliegen. Ursache für die geringen Unterschiede sind im wesentlichen die unterschiedlichen Geometrien der Nachbarkanäle.
4. Die Frequenzanalyse der turbulenten Geschwindigkeitskomponenten zeigt charakteristische Frequenzen von quasi-periodischen Strömungspulsationen durch die Spalte auch beim 37-Stabbündel.

Die Autoren danken den Herren E. Mensinger und G. Wörner für die sorgfältige Durchführung und Auswertung der Versuche.

Nomenklatur

D	m	Stabdurchmesser
D_h	m	hydraulischer Durchmesser
d_p	m	Pitotrohr Außendurchmesser
f	s ⁻¹	Frequenz
k^+	m ² s ⁻²	kinetische Energie der Turbulenz
L	m	Kanallänge
P	m	Stabmittenabstand
R	-	Korrelationskoeffizient
r	m	radiale Koordinate
S	m	Spaltweite
Str_s	-	Strouhalzahl im Spalt
u	ms ⁻¹	Schwankungsgeschwindigkeit in axialer Richtung
u_m	ms ⁻¹	mittlere Geschwindigkeit
u_s	ms ⁻¹	mittlere Geschwindigkeit im Spalt
u^*	ms ⁻¹	Wandschubspannungsgeschwindigkeit
v	ms ⁻¹	Schwankungsgeschwindigkeit senkrecht zur Wand
W	m	Abstand zwischen Stab und Wand plus Stabdurchmesser
w	ms ⁻¹	Schwankungsgeschwindigkeit parallel zur Wand
x	m	Koordinate
Φ	rd	Winkelkoordinate

Literatur:

- [1] K. Rehme, Experimental observations of turbulent flow through subchannels of rod bundles, *Experimental Thermal and Fluid Science* 2, pp 341 - 349 (1989).
- [2] L. Meyer, Measurement of turbulent velocity and temperature in a central channel of a heated rod bundle, *KfK-Bericht Nr. 4818* (1991).
- [3] L. Vosáhlo, Computer programs for evaluation of turbulence characteristics from hot-wire measurements, *KfK-Bericht Nr. 3743* (1984).
- [4] L. Meyer, Kalibration einer 3-Draht Sonde für Messungen in nicht-isothermer Luftströmung, *KfK-Bericht Nr. 4707* (1990).
- [5] K. Rehme, Rechnergesteuerte Versuchsanlage zur Messung von Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen mit Hitzdrähten, *KfK-Bericht Nr. 3744* (1984).
- [6] J.D. Hooper, Fully developed turbulent flow through a rod cluster, Ph. D. Thesis, University of New South Wales, Sydney (Australia) (1980).
- [7] K. Rehme, Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen in Wandkanälen von Stabbündeln mit einem Gitterabstandshalter, *KfK-Bericht Nr. 4094* (1986).
- [8] L. Meyer, Calibration method of a three-wire probe for measurements in non-isothermal flow, *Int. Symp. of Engineering Turbulence Modelling and Measurements, Dubrovnik 1990* (s.a. *KfK-Bericht Nr. 4707*, 1990).
- [9] R.M. Lueptow, K.S. Breuer and J.H. Haritonidis, Computer-aided calibration of X-probes using a look-up table, *Exp. in Fluids* 6, pp. 115 - 118 (1988).

- [10] K. Rehme, Strömungsuntersuchungen im Wandkanal eines Stabbündels ($P/D = 1.036$, $W/D = 1.072$), KfK-Bericht Nr. 3361 (1982).

- [11] S.R. Wu, K. Rehme, Measurement of the structure of turbulence in symmetric wall subchannels with $P/D = 1.148$ and $W/D = 1.074$, KfK-Bericht Nr. 4466 (1988).

- [12] 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).

- [13] S. V. Möller, Experimentelle Untersuchungen der Vorgänge in engen Spalten zwischen den Unterkanälen von Stabbündeln bei turbulenter Strömung, KfK-Bericht Nr. 4501 (1989).

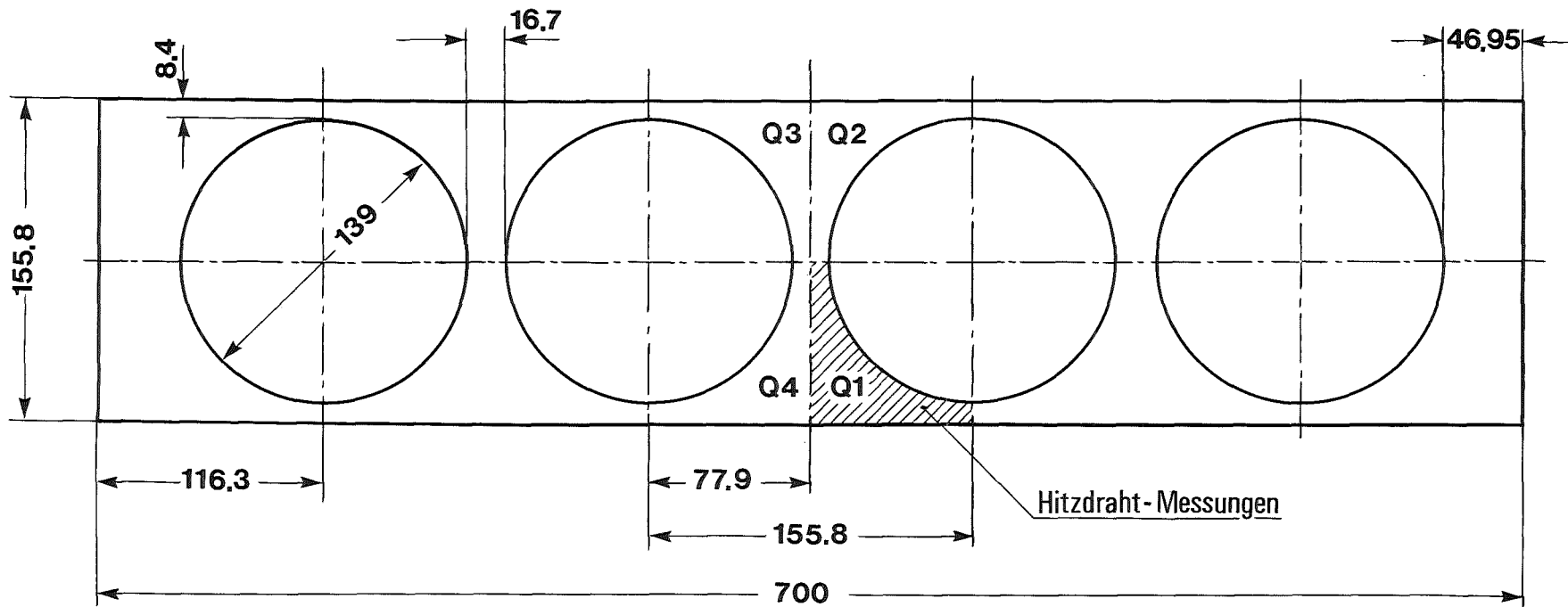
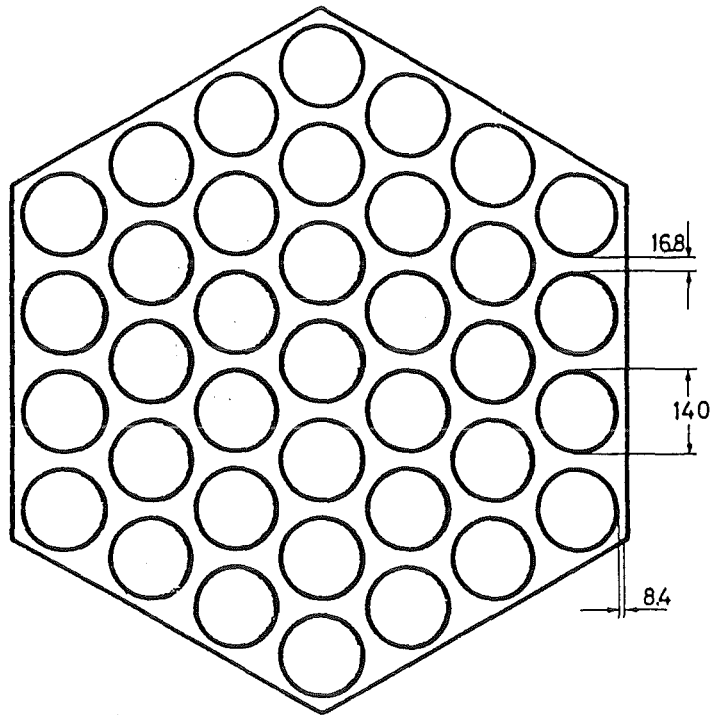


Abb. 1 Querschnitt des 4-Stabbündels



$P/D = 1.12$
 $W/D = 1.06$

Abb. 2 Querschnitt des 37-Stabbündels

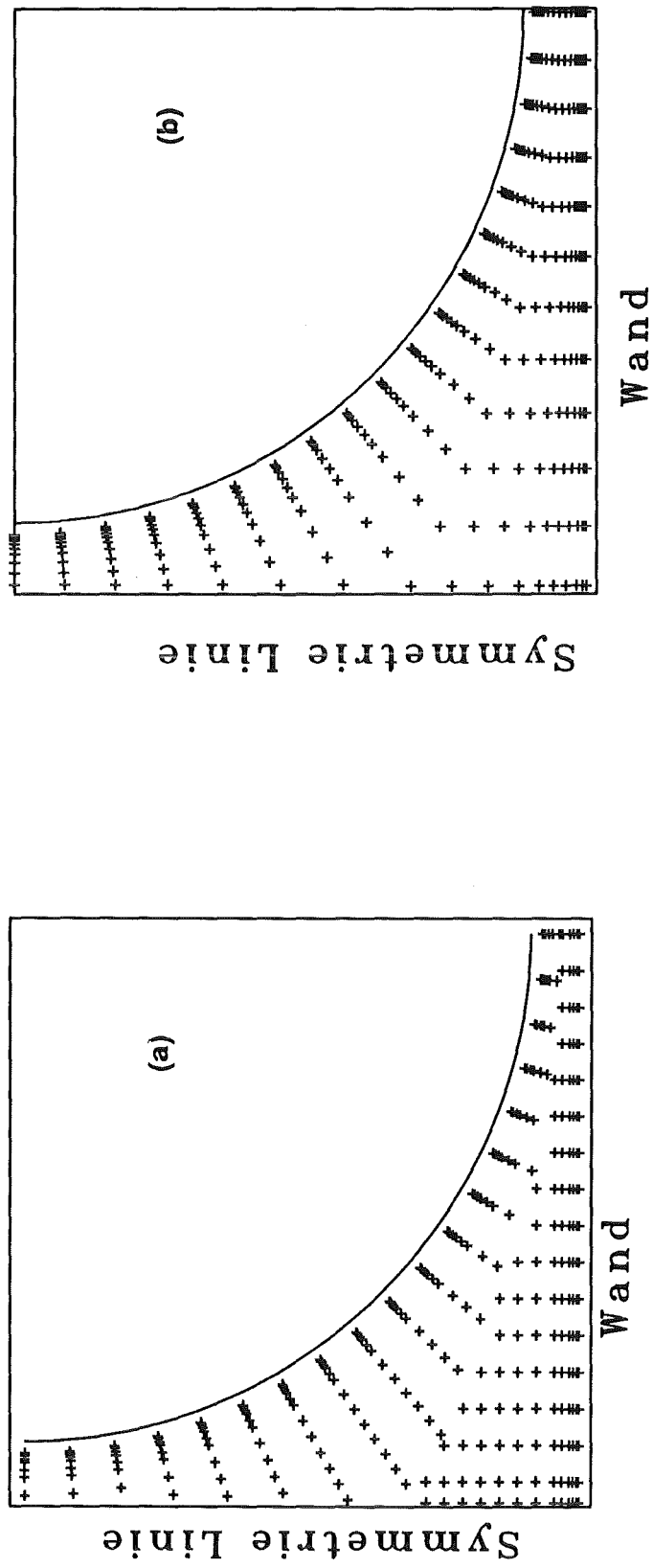


Abb. 3 Meßpositionen im 4-Stabbündel (a) und im 37-Stabbündel (b)

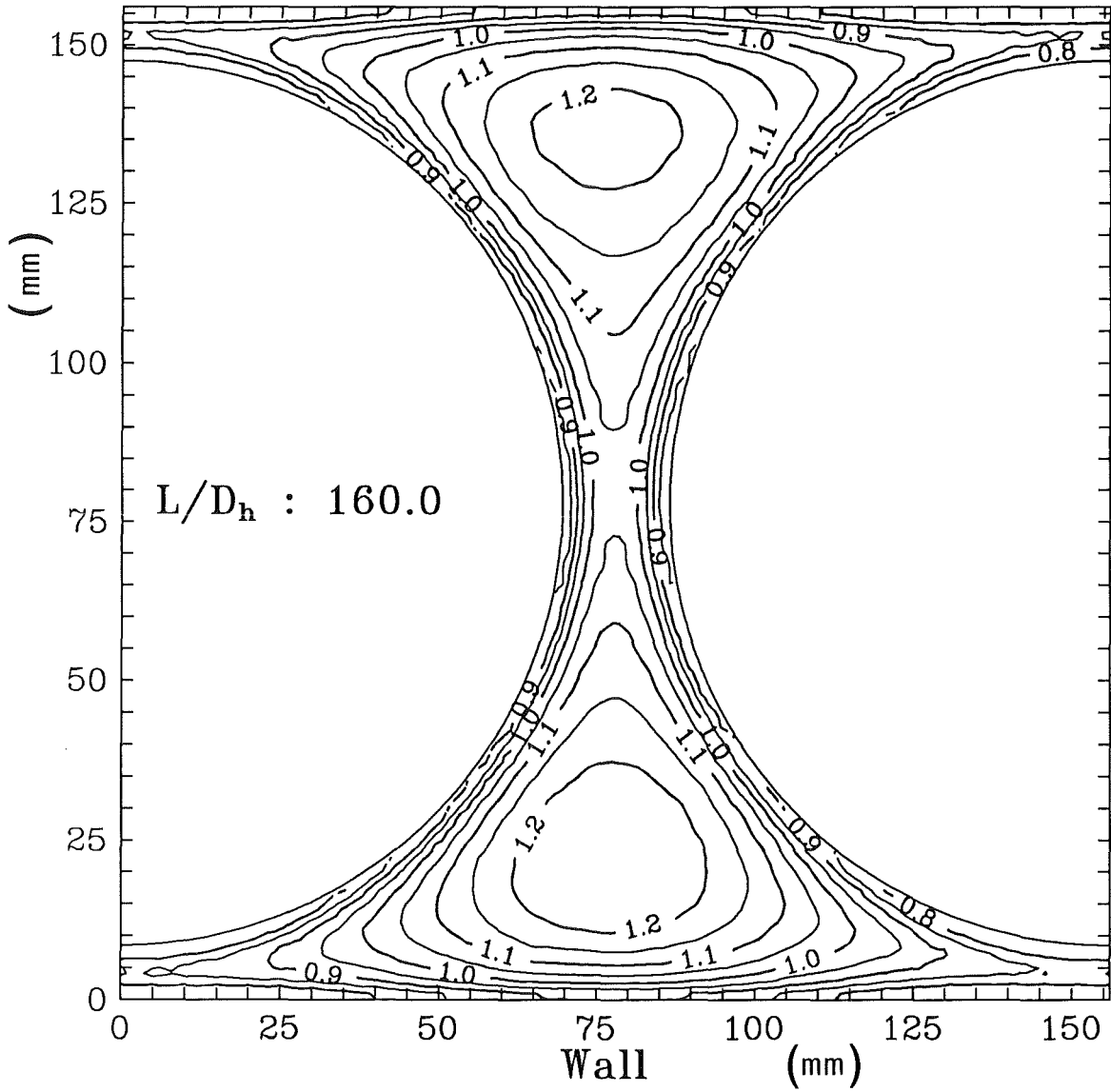


Abb. 4 Höhenlinien des zeitlichen Mittelwerts der Strömungsgeschwindigkeit bezogen auf die mittlere Geschwindigkeit in zwei Wandkanälen

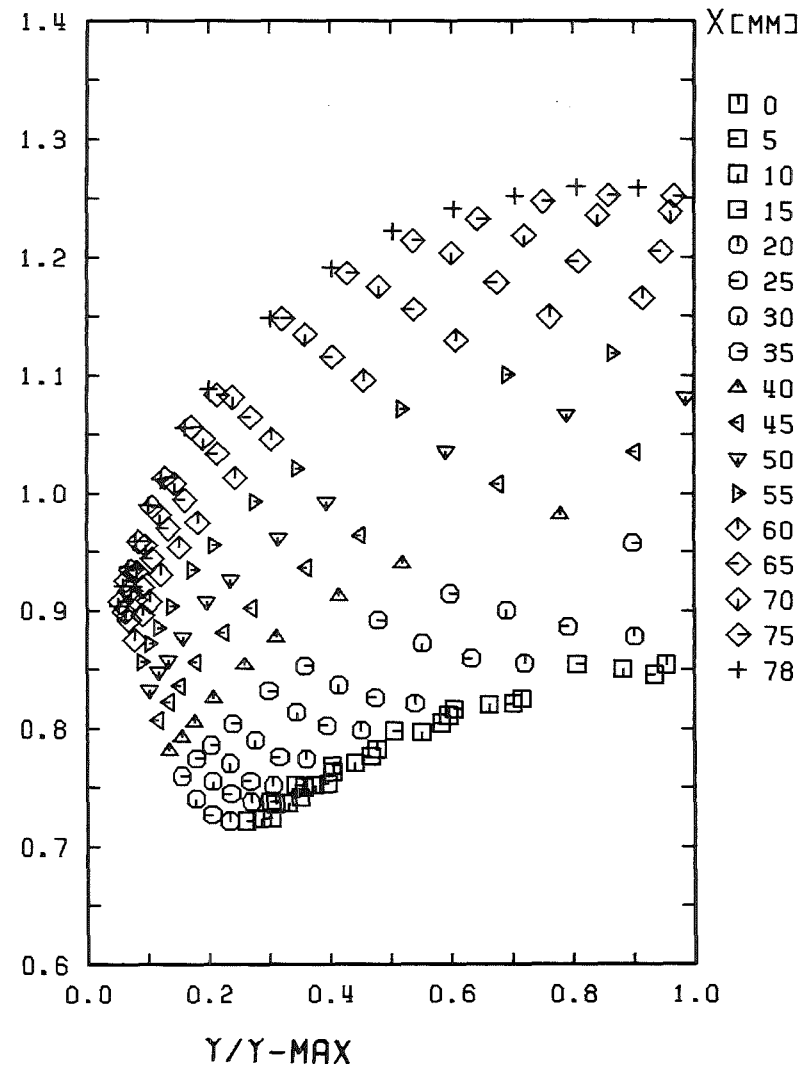
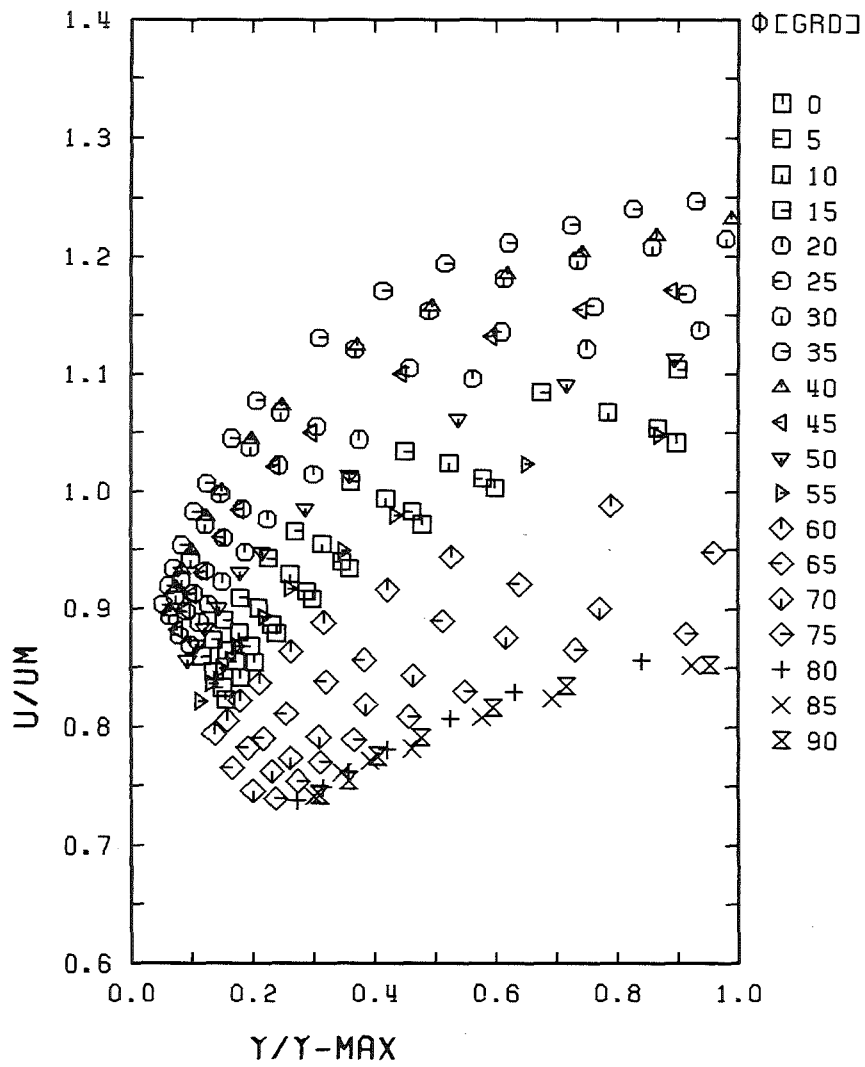


Abb. 5 Geschwindigkeitsverteilung senkrecht zu den Wänden im 4-Stabbündel

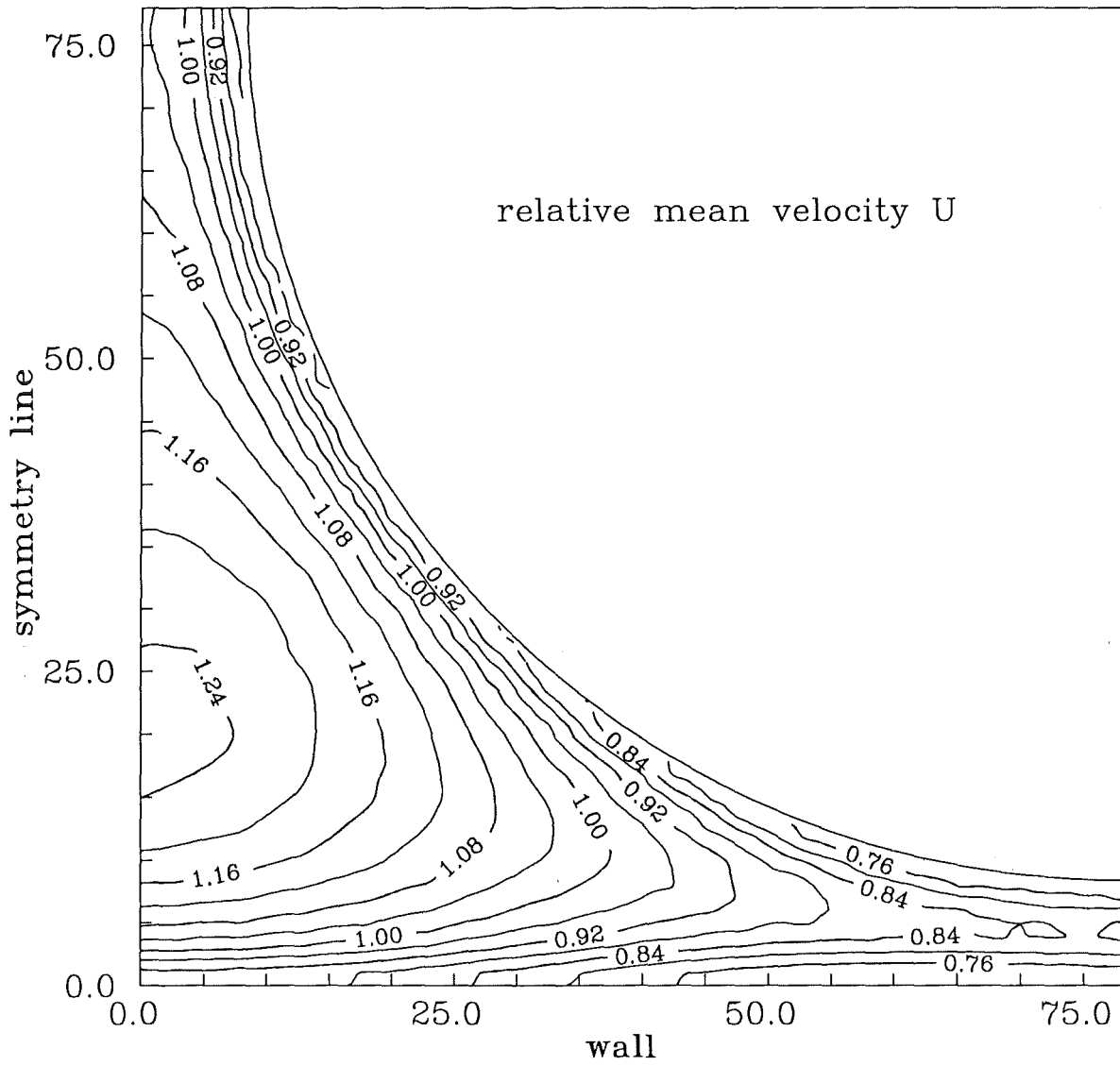


Abb. 6 Höhenlinien der Geschwindigkeitsverteilung im 4-Stabbündel

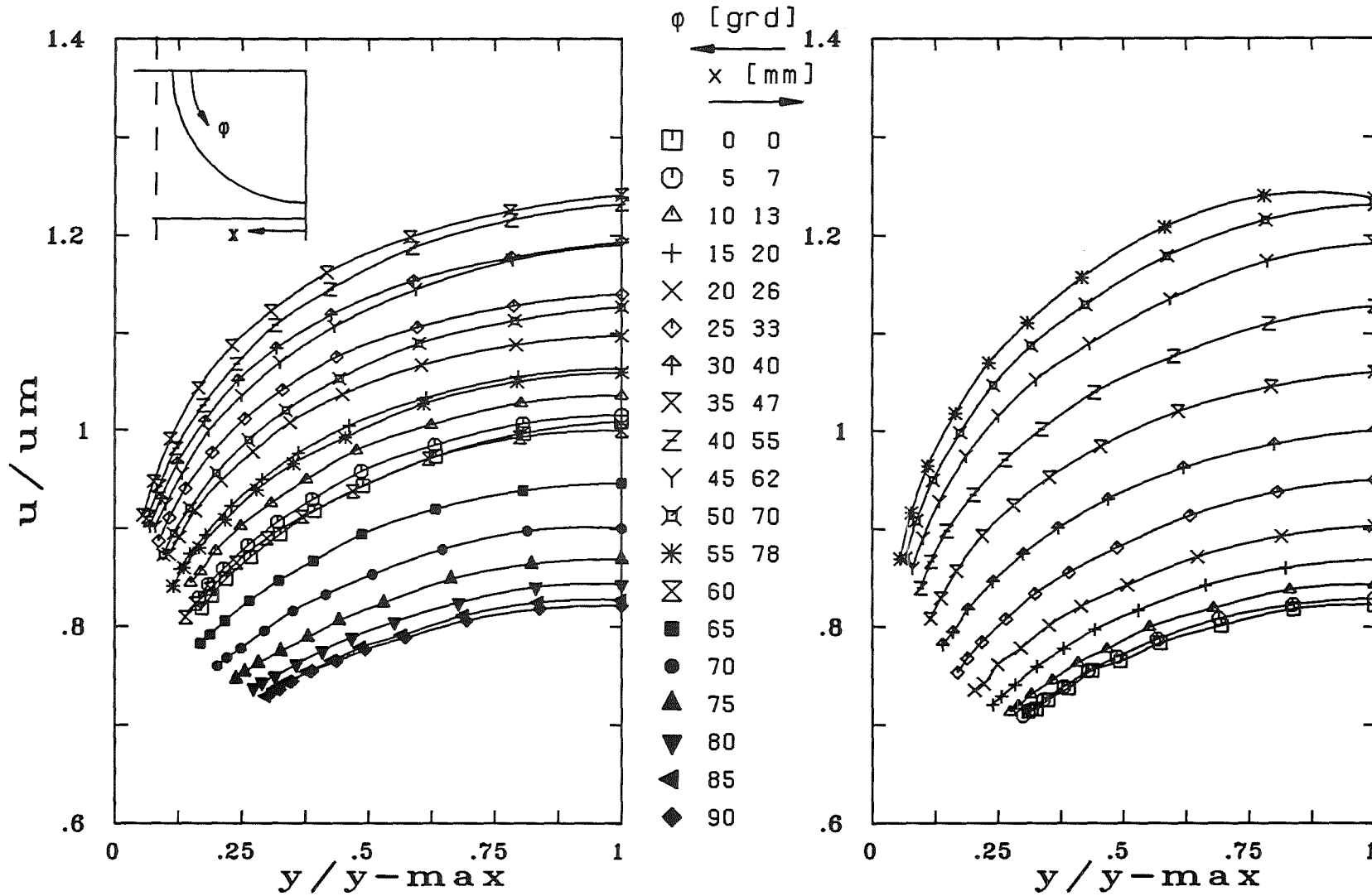


Abb. 7 Geschwindigkeitsverteilung senkrecht zu den Wänden im 37-Stabbündel

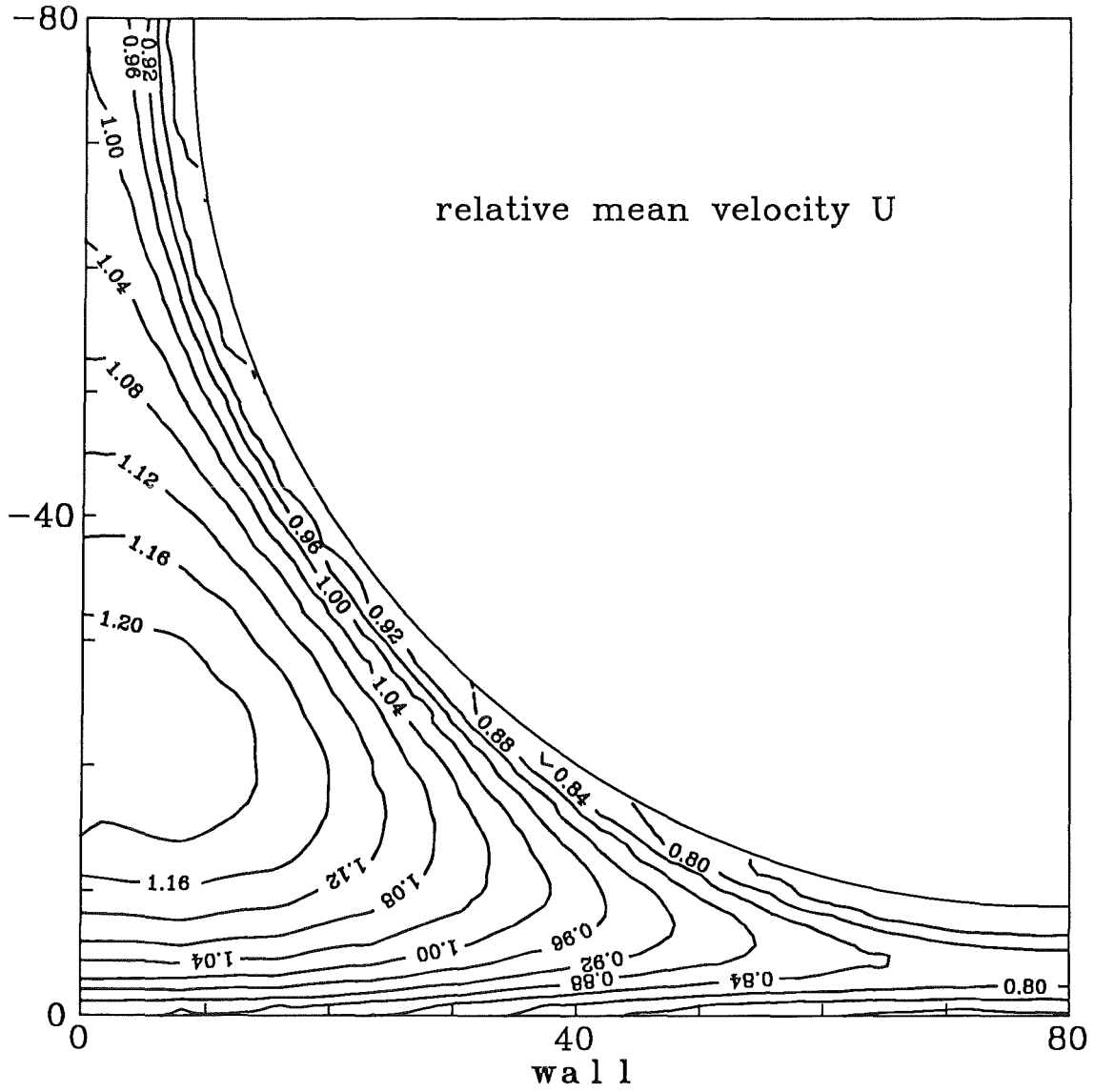


Abb. 8 Höhenlinien der Geschwindigkeitsverteilung im 37-Stabbündel

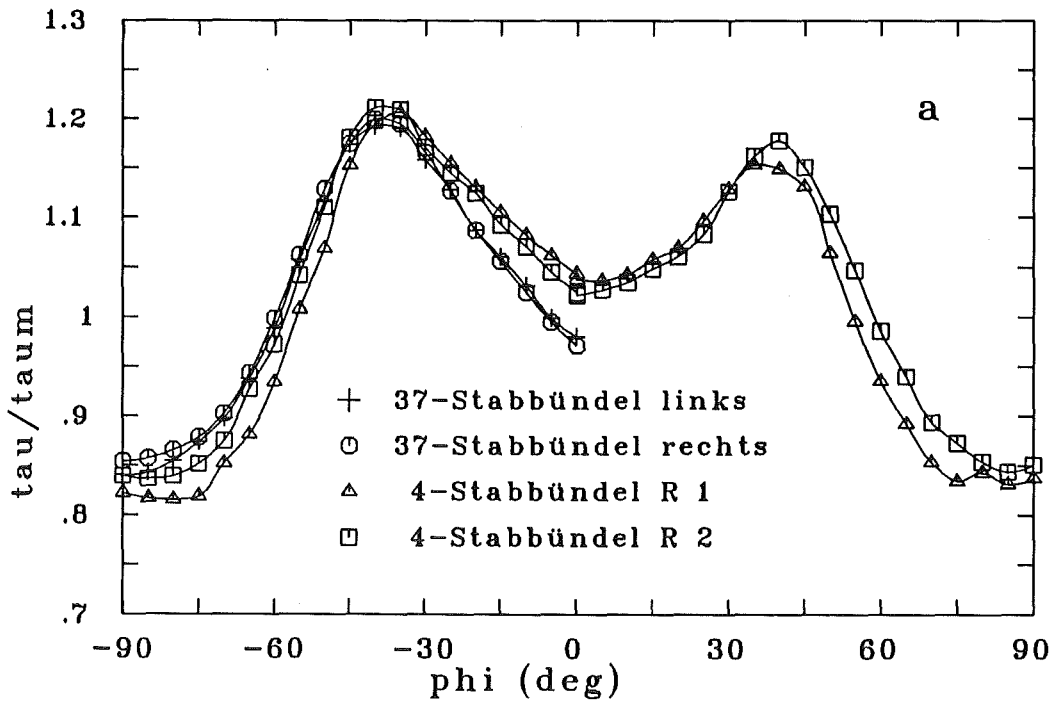
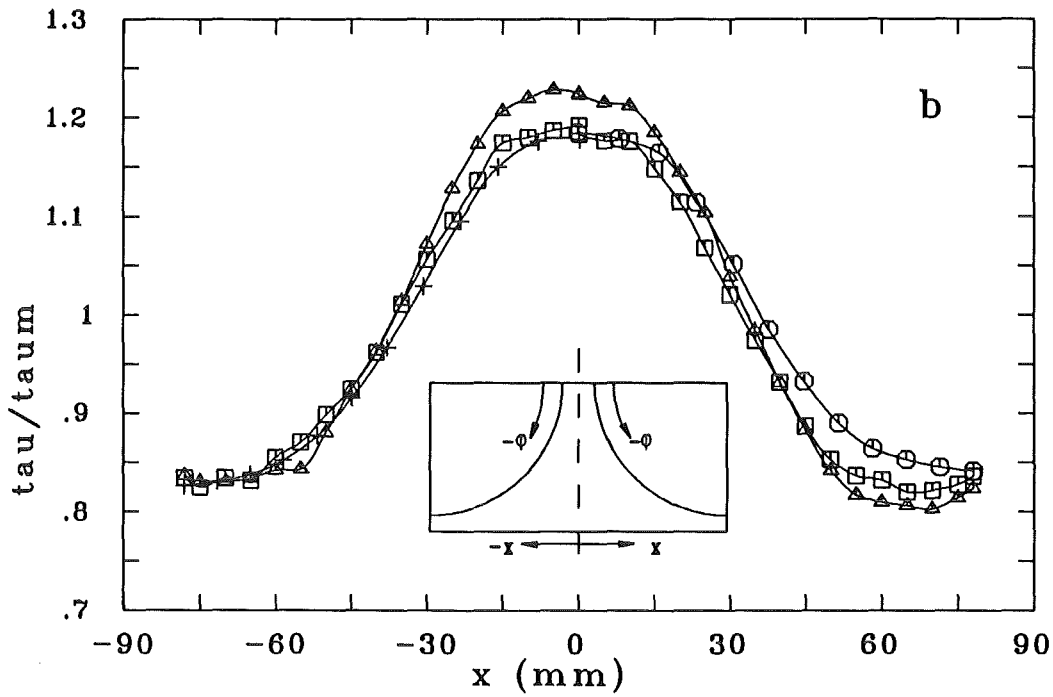


Abb. 9 Wandschubspannungsverteilungen bezogen auf den Mittelwert an den Stabwänden (a) und an den Kanalwänden (b) in beiden Stabbündeln

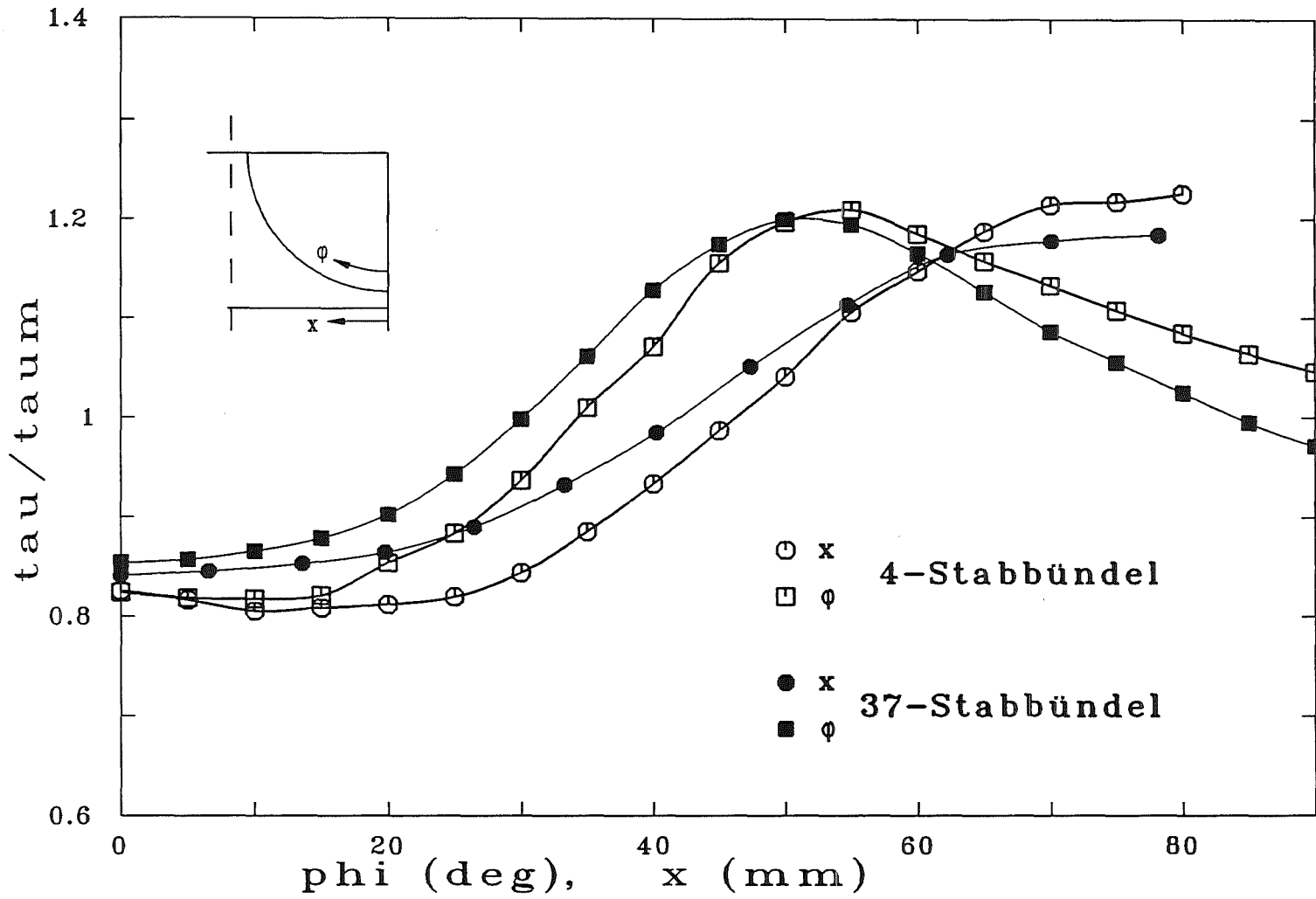


Abb.10 Wandschubspannungsverteilungen in einem Quadranten des 4-Stabbündels und des 37-Stabbündels

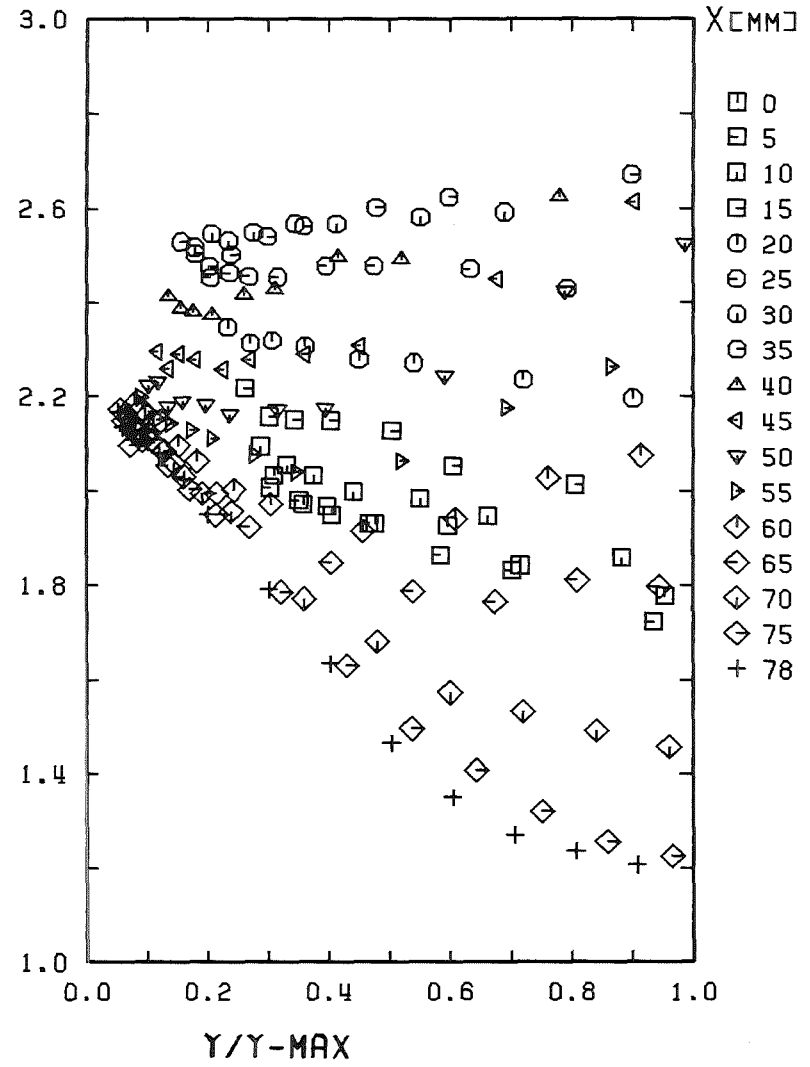
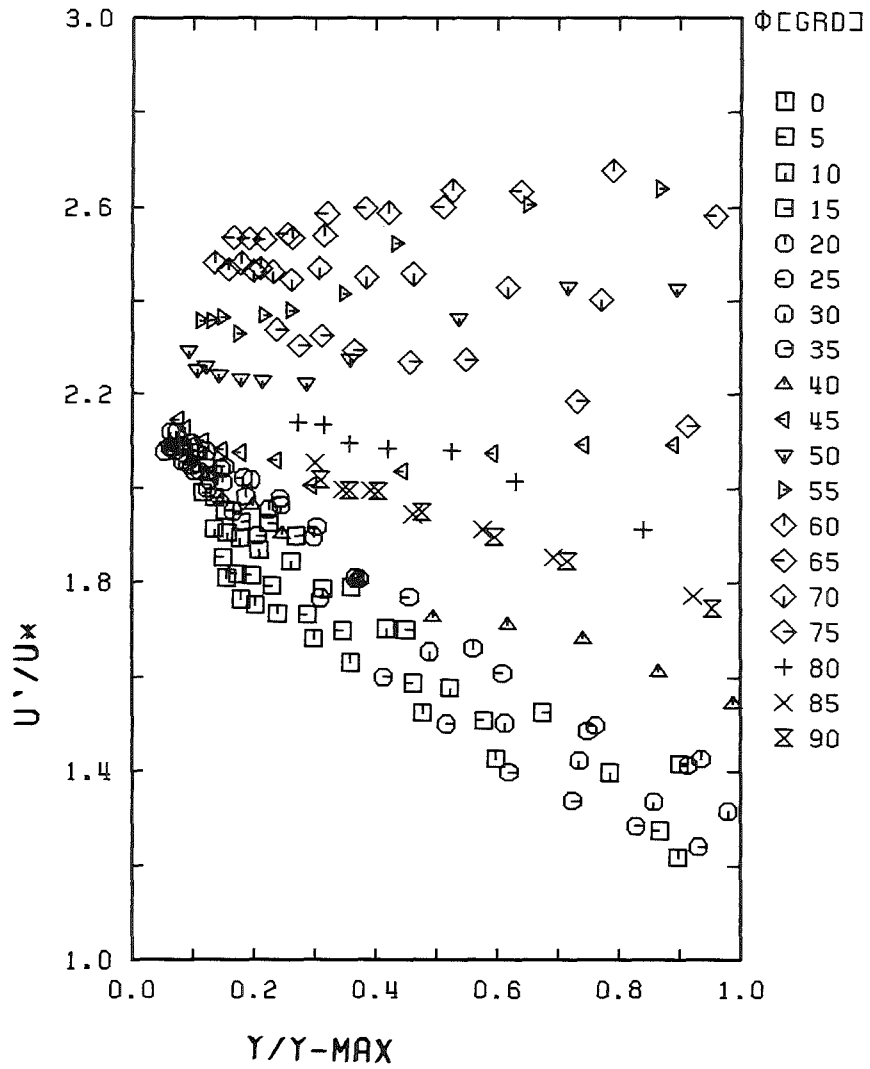


Abb.11 Axiale Turbulenzintensität als Funktion des Wandabstandes im 4-Stabbündel (Einzeldrahtmethode)

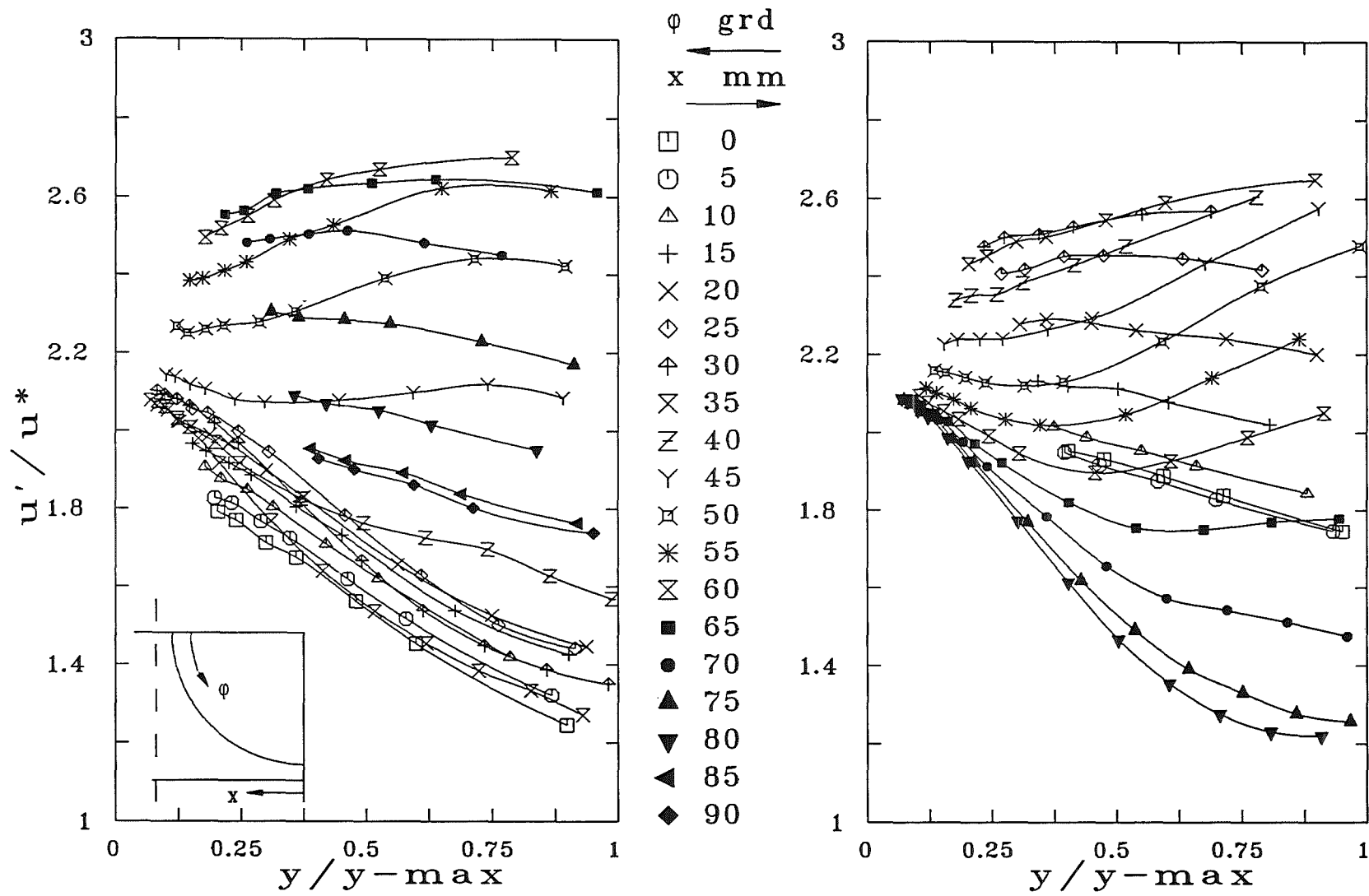


Abb.12 Axiale Turbulenzintensität als Funktion des Wandabstandes im 4-Stabbüdel (X-Drahtmethode)

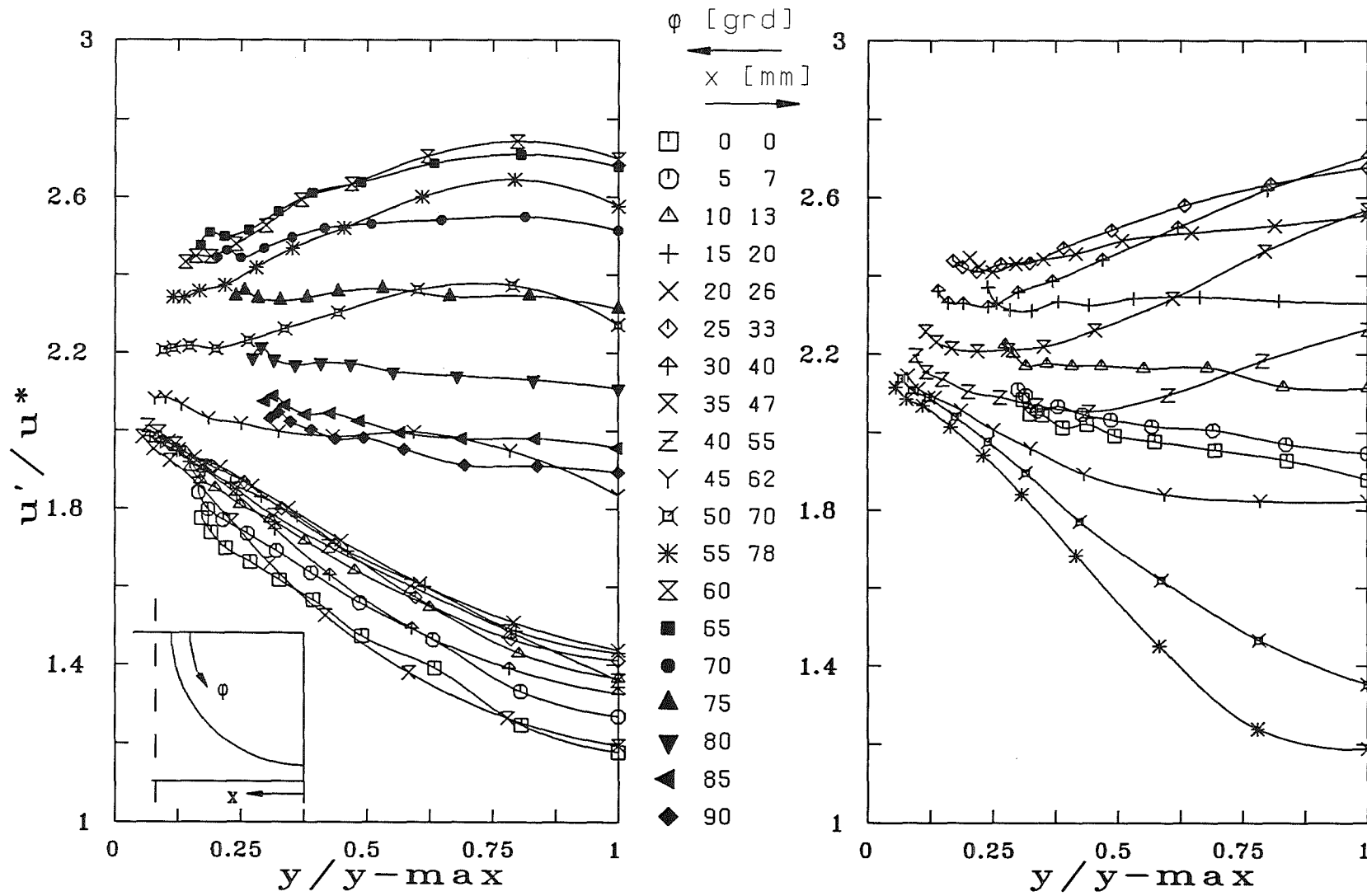


Abb.13 Axiale Turbulenzintensität als Funktion des Wandabstandes
 im 37-Stabbüdel (X-Drahtmethode)

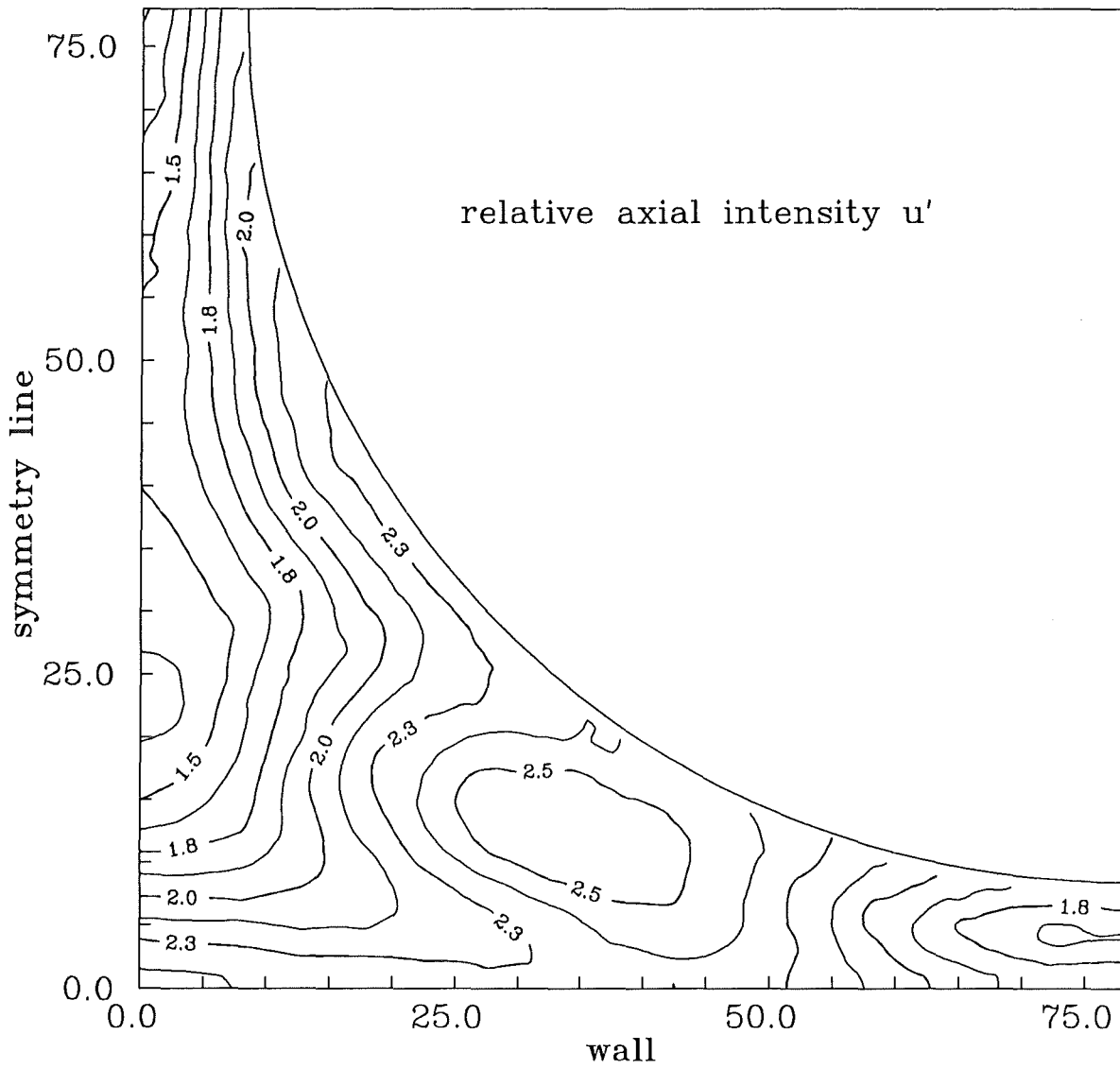


Abb.14 Höhenlinien der axialen Turbulenzintensität im 4-Stabbündel (Einzeldrahtmethode)

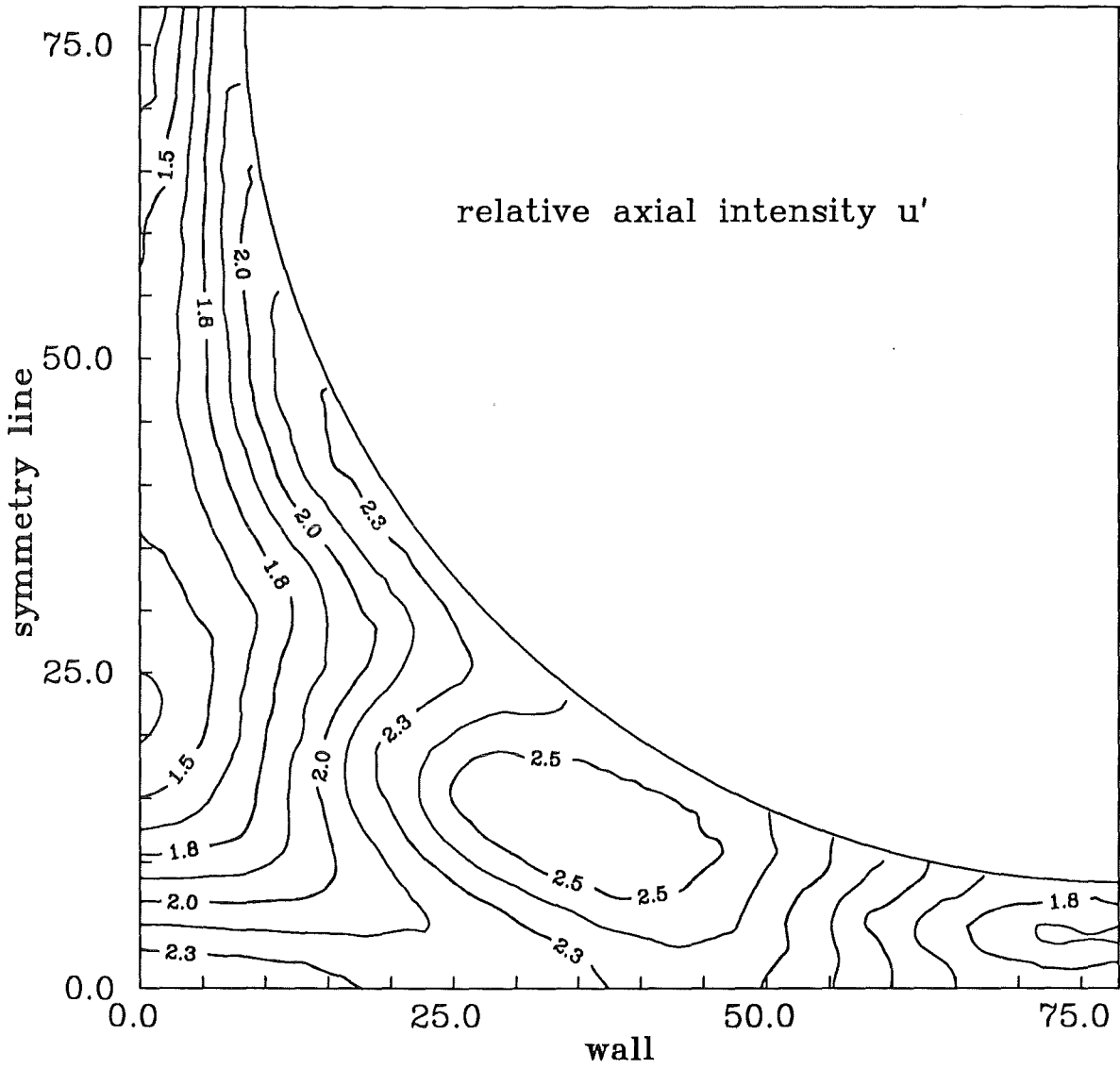


Abb.15 Höhenlinien der axialen Turbulenzintensität im 4-Stabbündel (X-Drahtmethode)

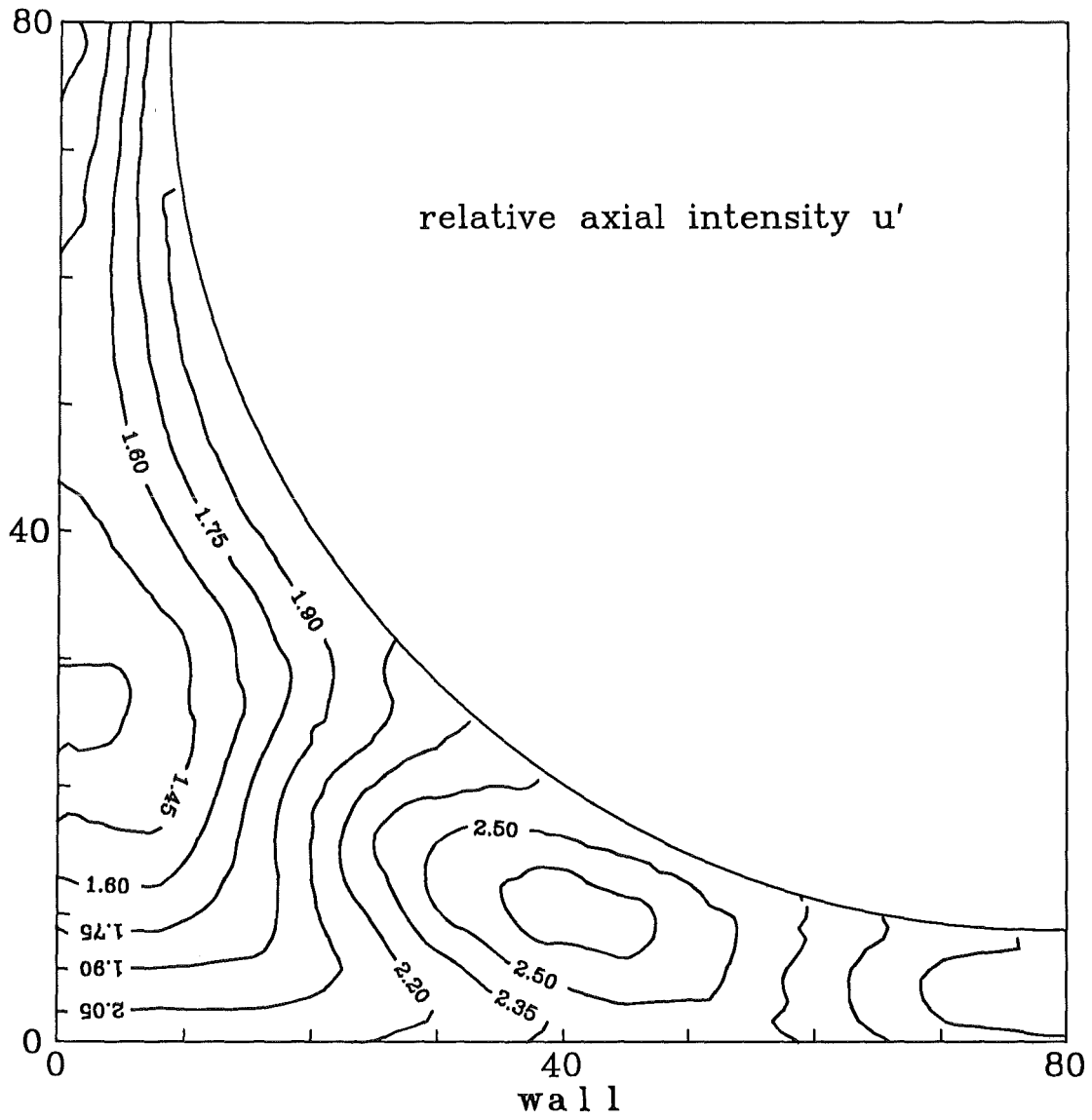


Abb.16 Höhenlinien der axialen Turbulenzintensität im 37-Stabbündel (X-Drahtmethode)

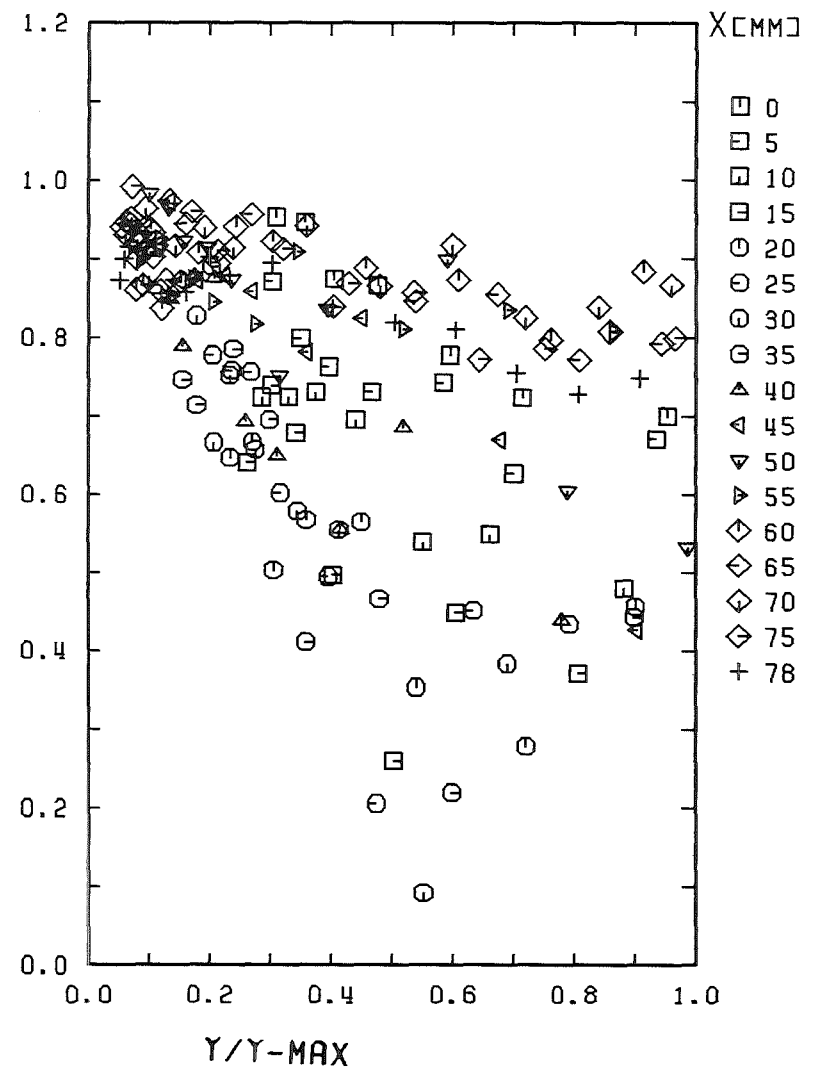
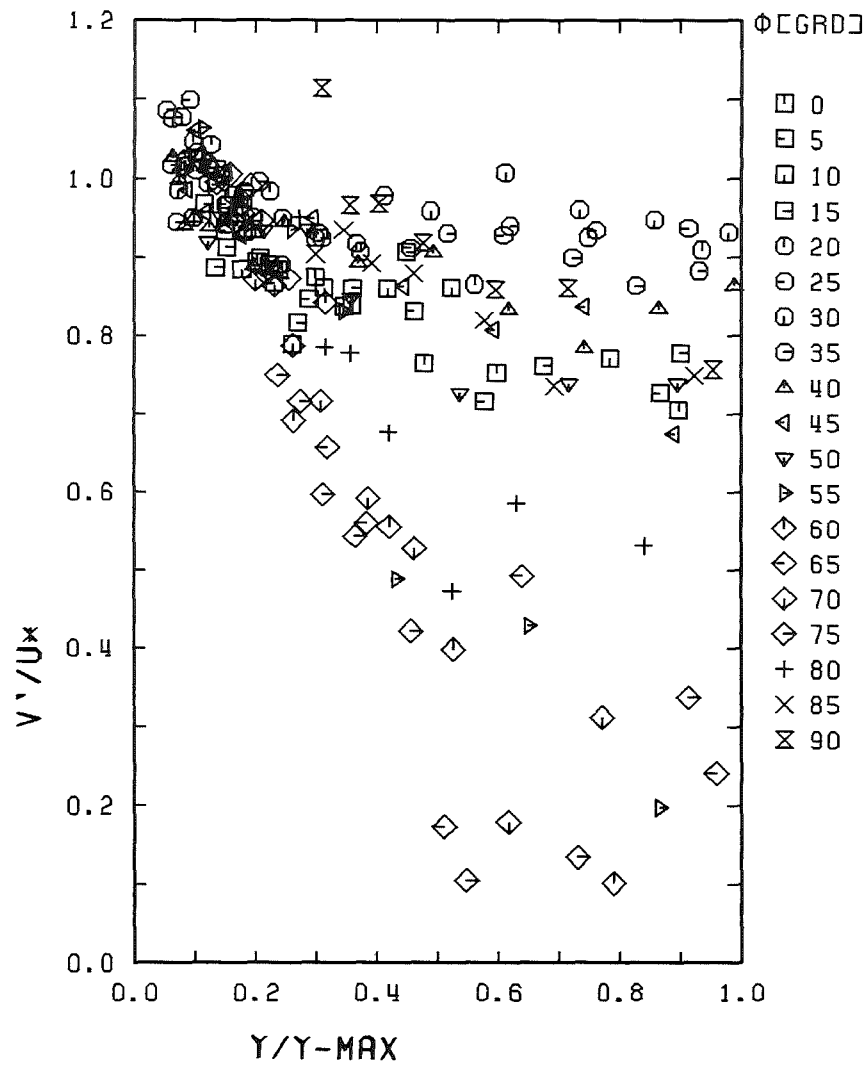


Abb.17 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand als Funktion des Wandabstandes im 4-Stabbündel (Einzeldrahtmethode)

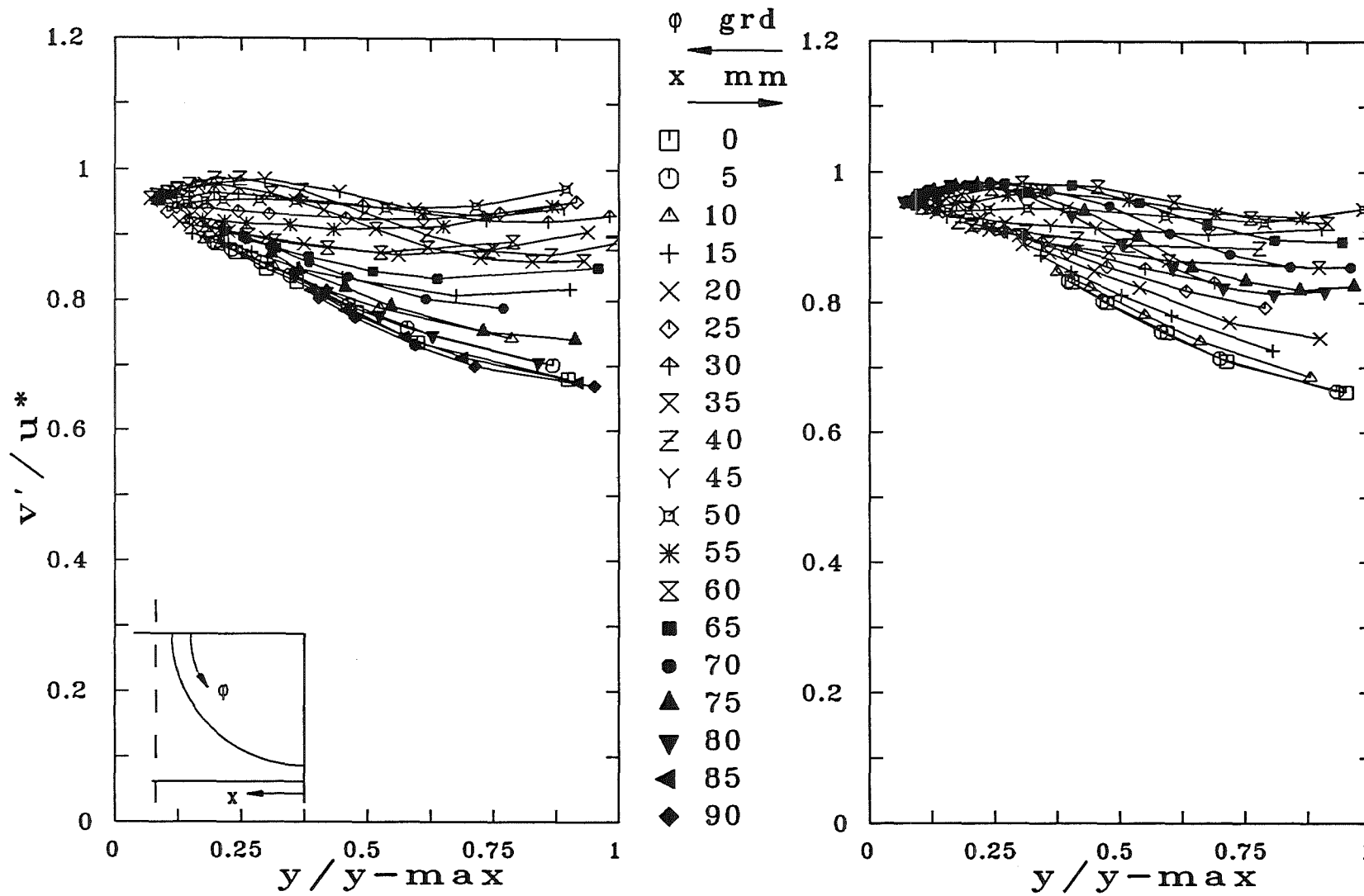


Abb.18 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand als Funktion des Wandabstandes im 4-Stabbüdel (X-Drahtmethode)

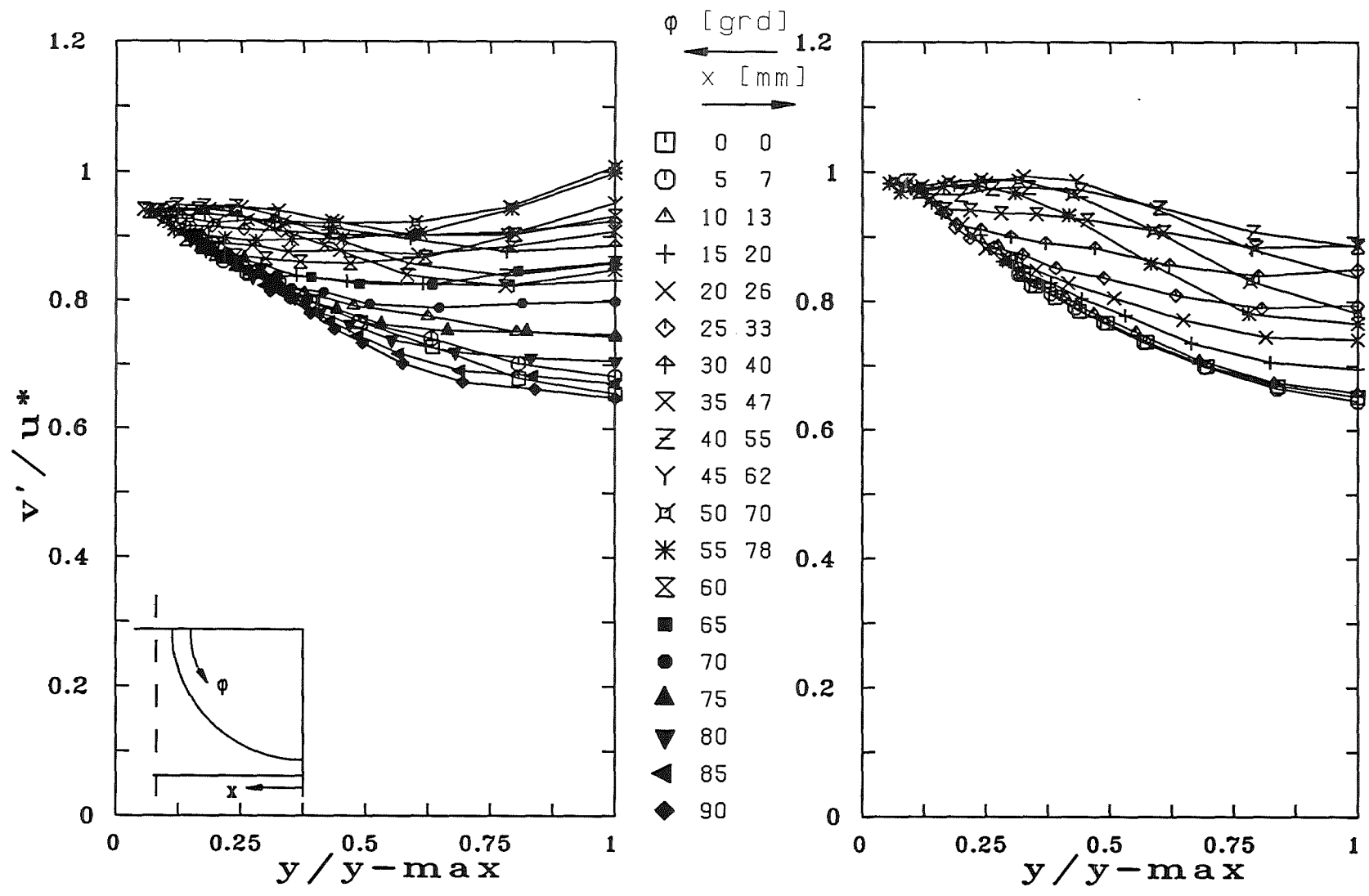


Abb.19 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand als Funktion des Wandabstandes
 im 37-Stab Bündel (X-Drahtmethode)

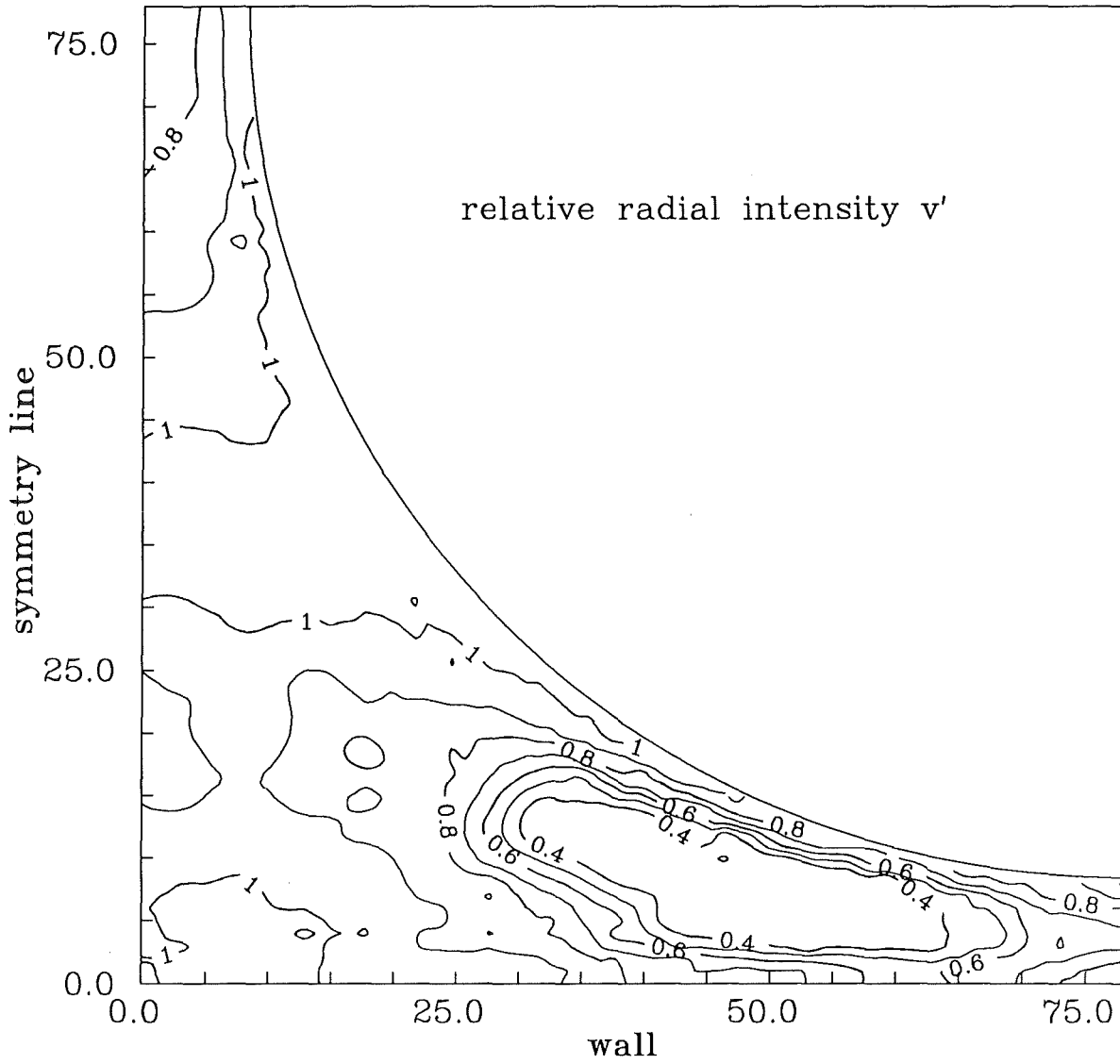


Abb.20 Höhenlinien der Turbulenzintensität senkrecht zur Wand im 4-Stabbündel (Einzeldrahtmethode)

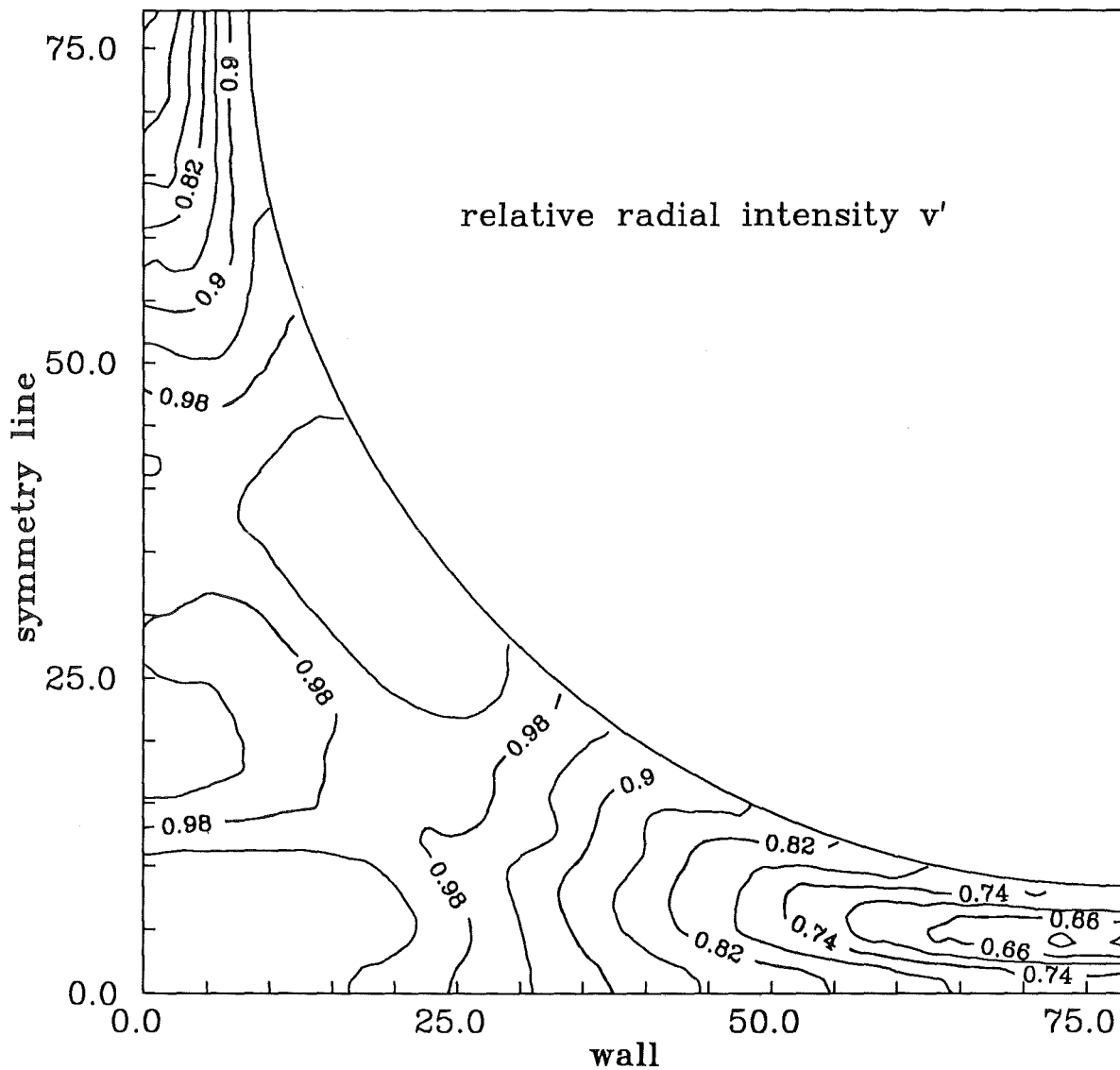


Abb.21 Höhenlinien der Turbulenzintensität senkrecht zur Wand im 4-Stabbündel (X-Drahtmethode)

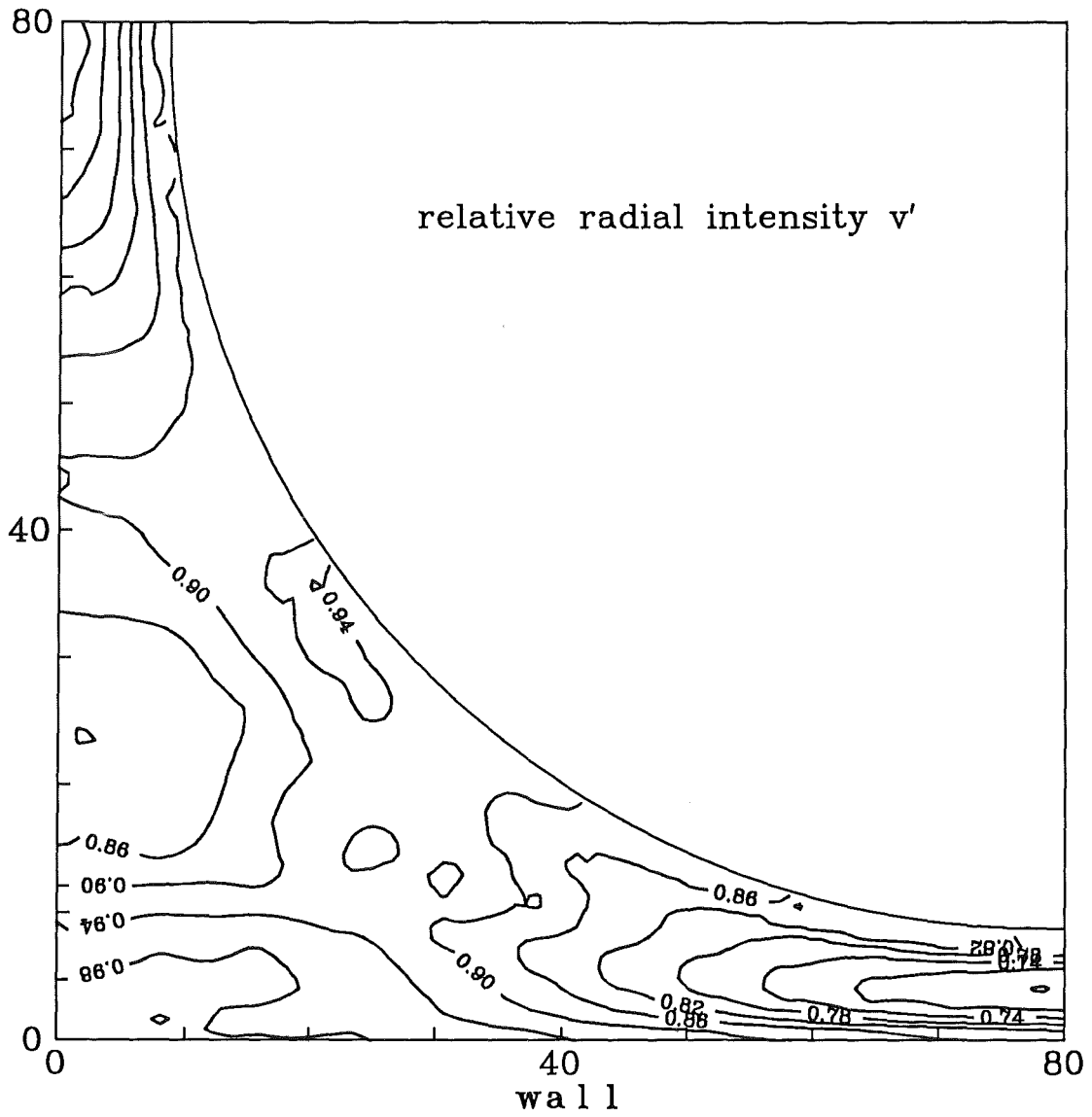


Abb.22 Höhenlinien der Turbulenzintensität senkrecht zur Wand im 37-Stabbündel (X-Drahtmethode)

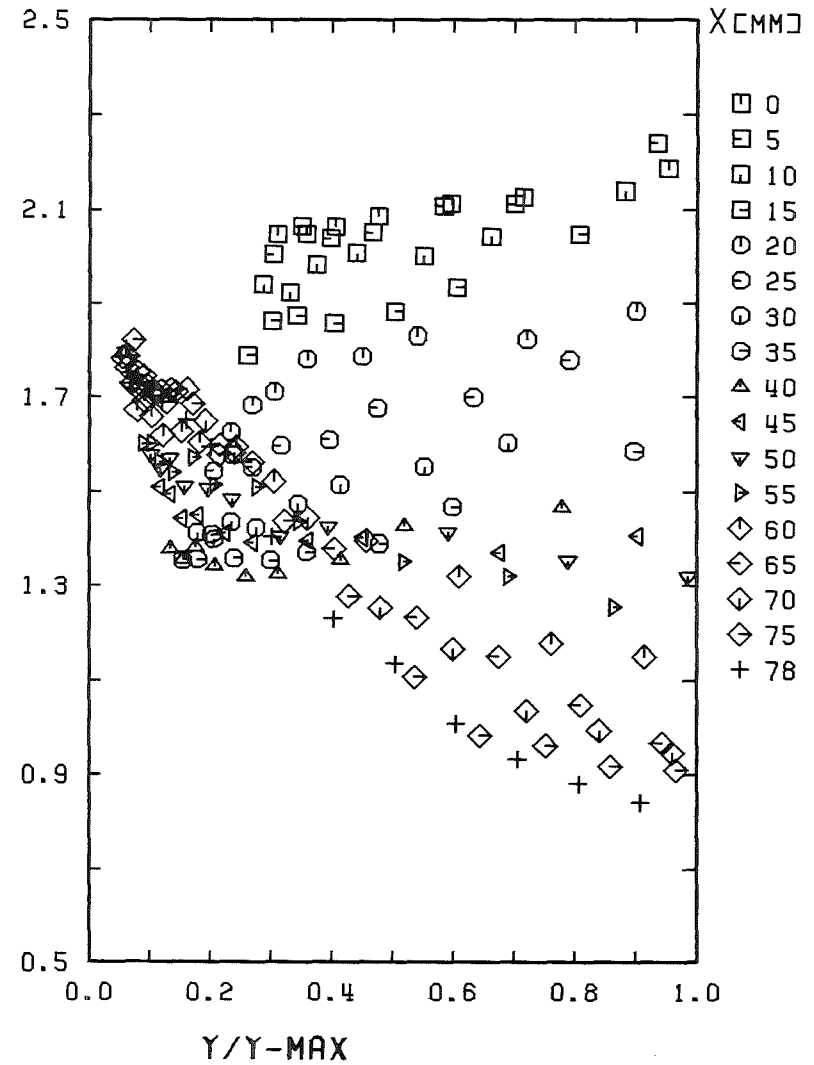
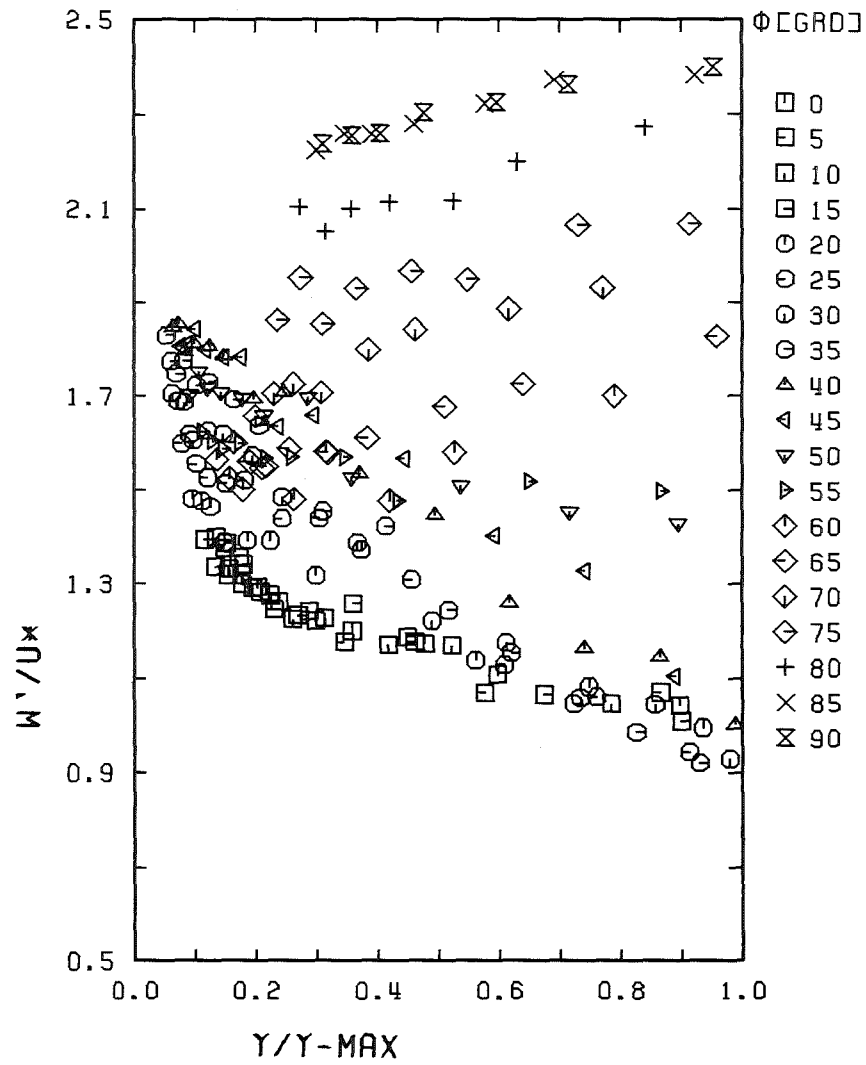


Abb.23 Turbulenzintensität parallel zur Wand als Funktion des Wandabstandes
 im 4-Stabbündel (Einzeldrahtmethode)

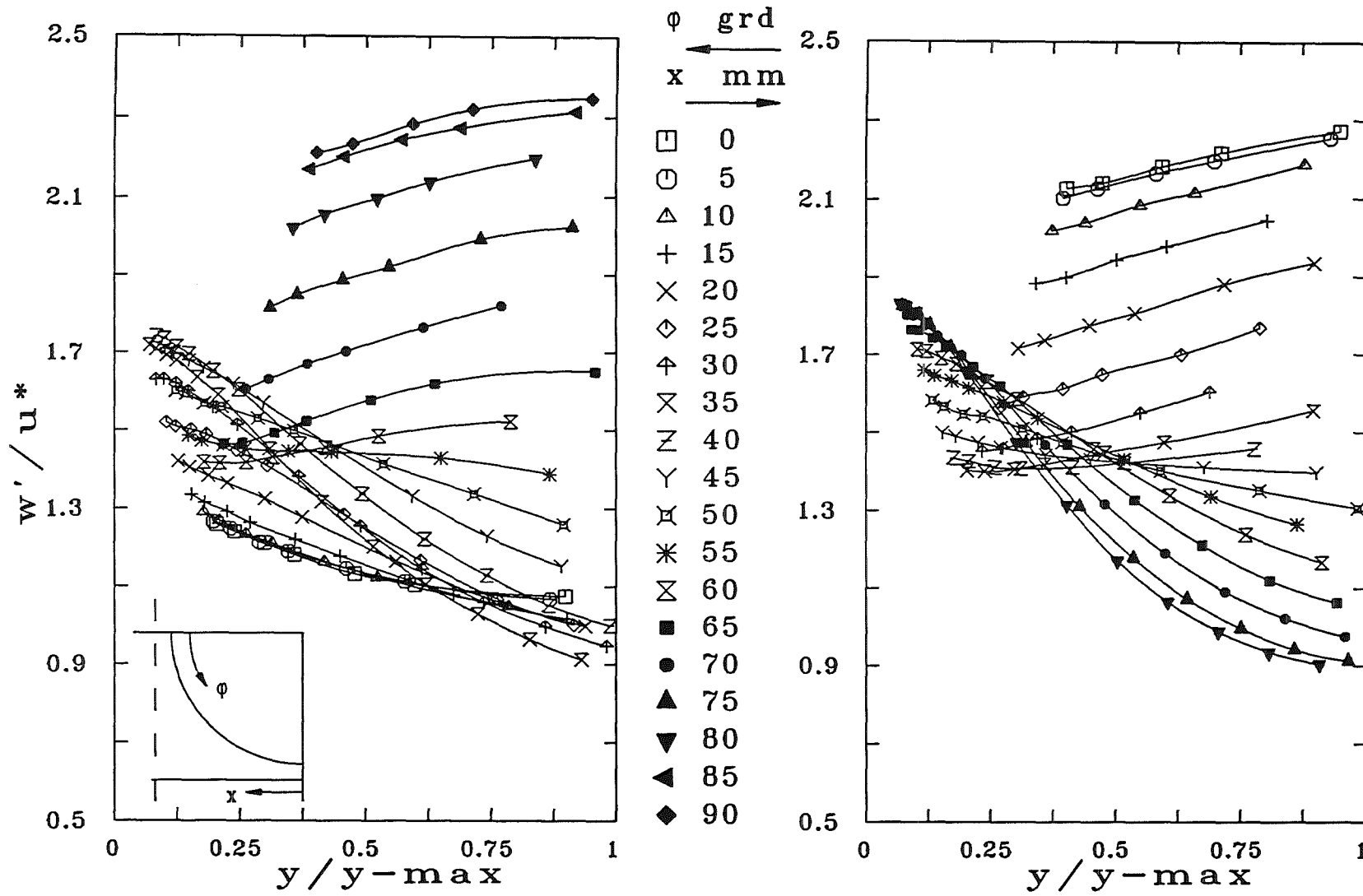


Abb.24 Turbulenzintensität parallel zur Wand als Funktion des Wandabstandes
 im 4-Stabbündel (X-Drahtmethode)

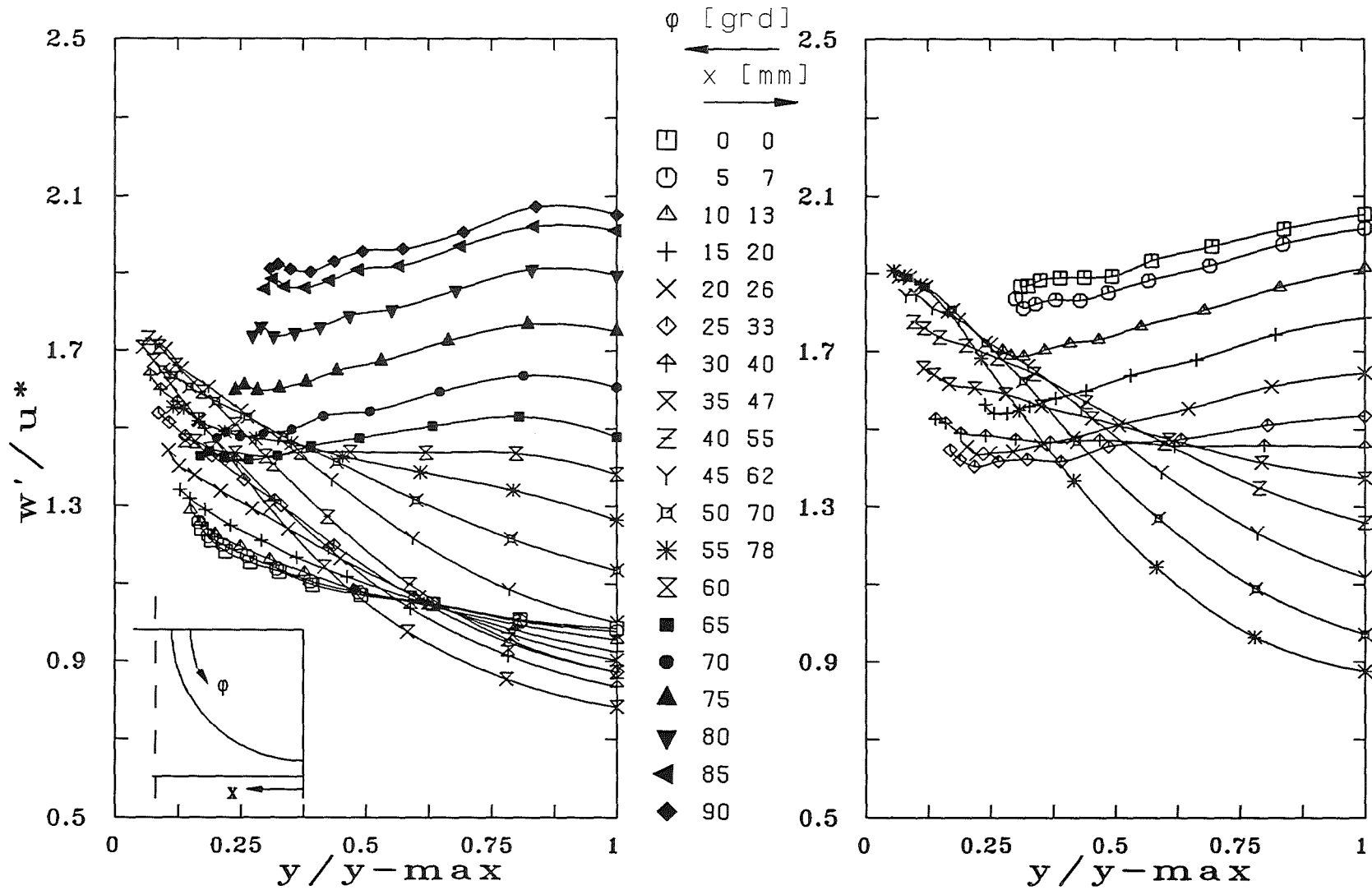


Abb.25 Turbulenzintensität parallel zur Wand als Funktion des Wandabstandes im 37-Stabbündel (X-Drahtmethode)

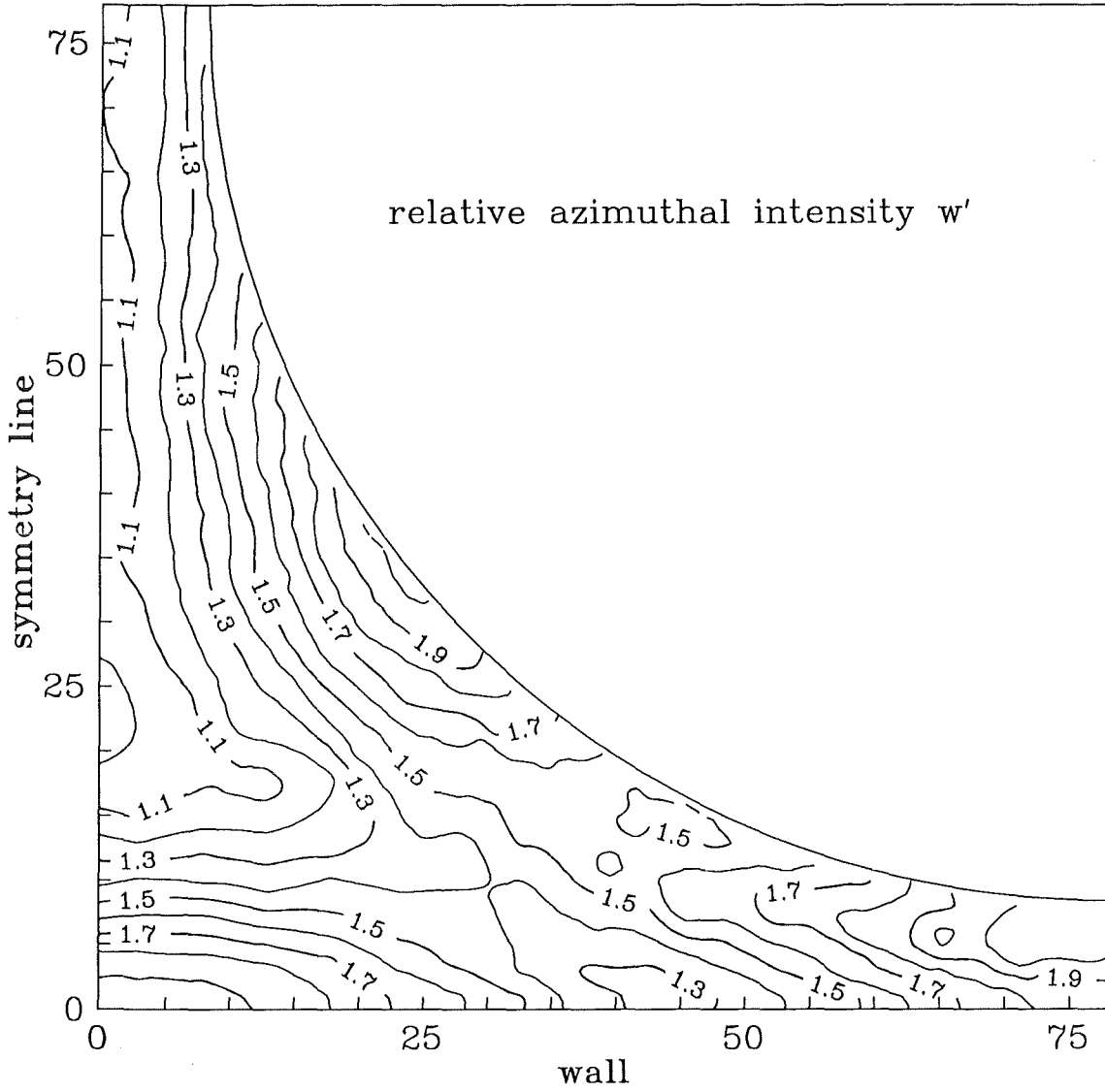


Abb.26 Höhenlinien der Turbulenzintensität parallel zur Wand im 4-Stabbündel (Einzeldrahtmethode)

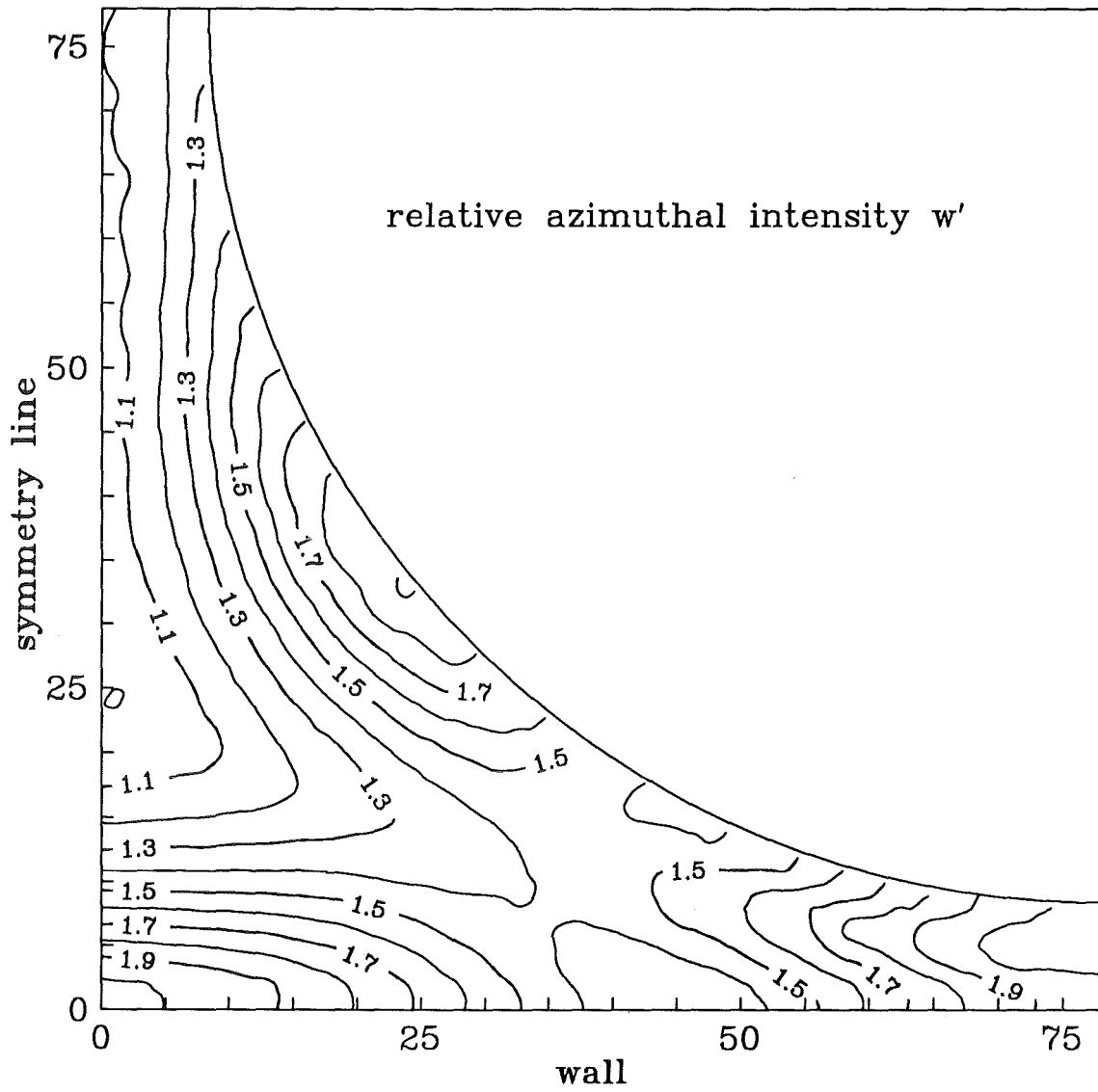


Abb.27 Höhenlinien der Turbulenzintensität parallel zur Wand im 4-Stabbündel (X-Drahtmethode)

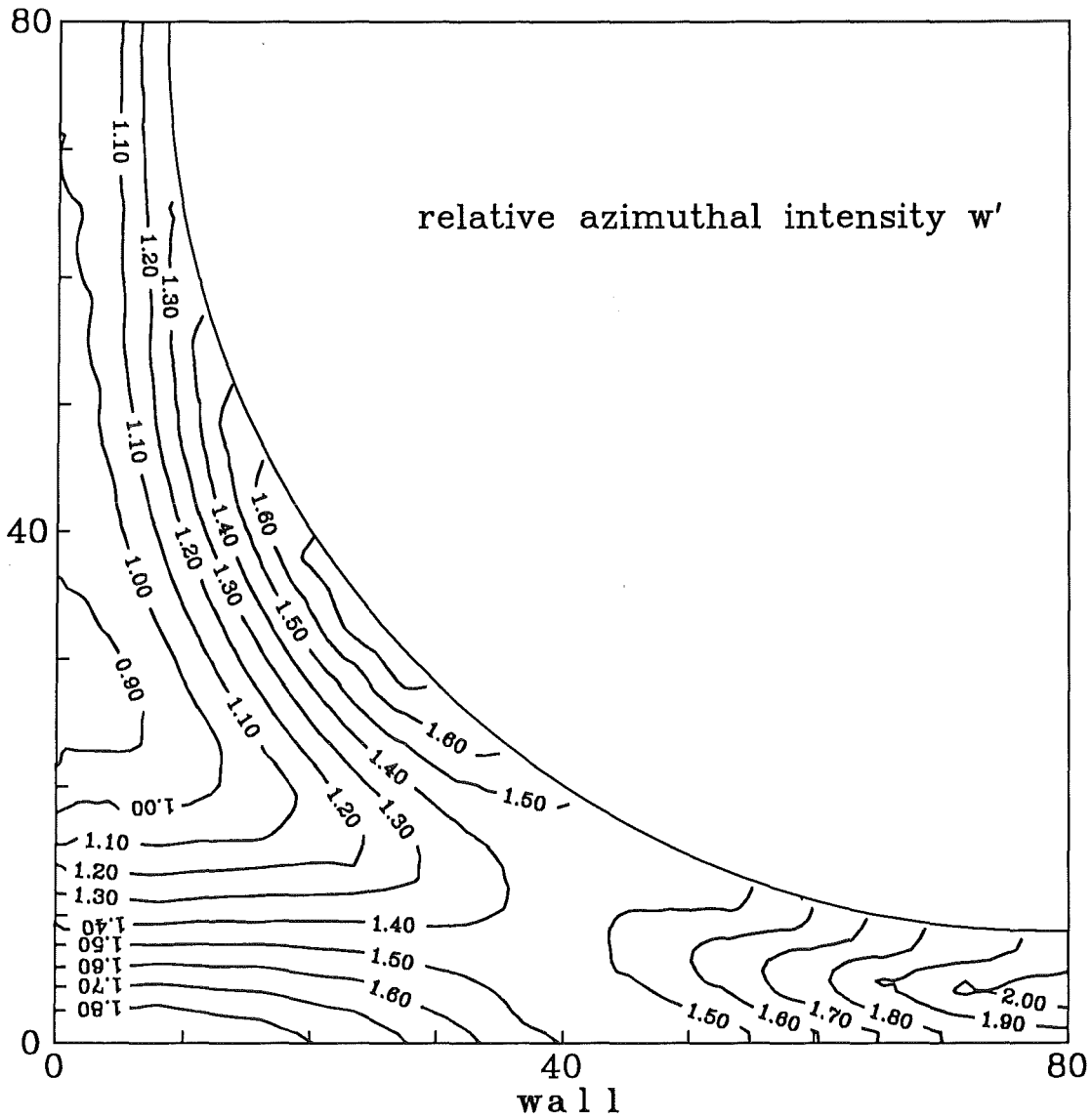


Abb.28 Höhenlinien der Turbulenzintensität parallel zur Wand im 37-Stabbündel (X-Drahtmethode)

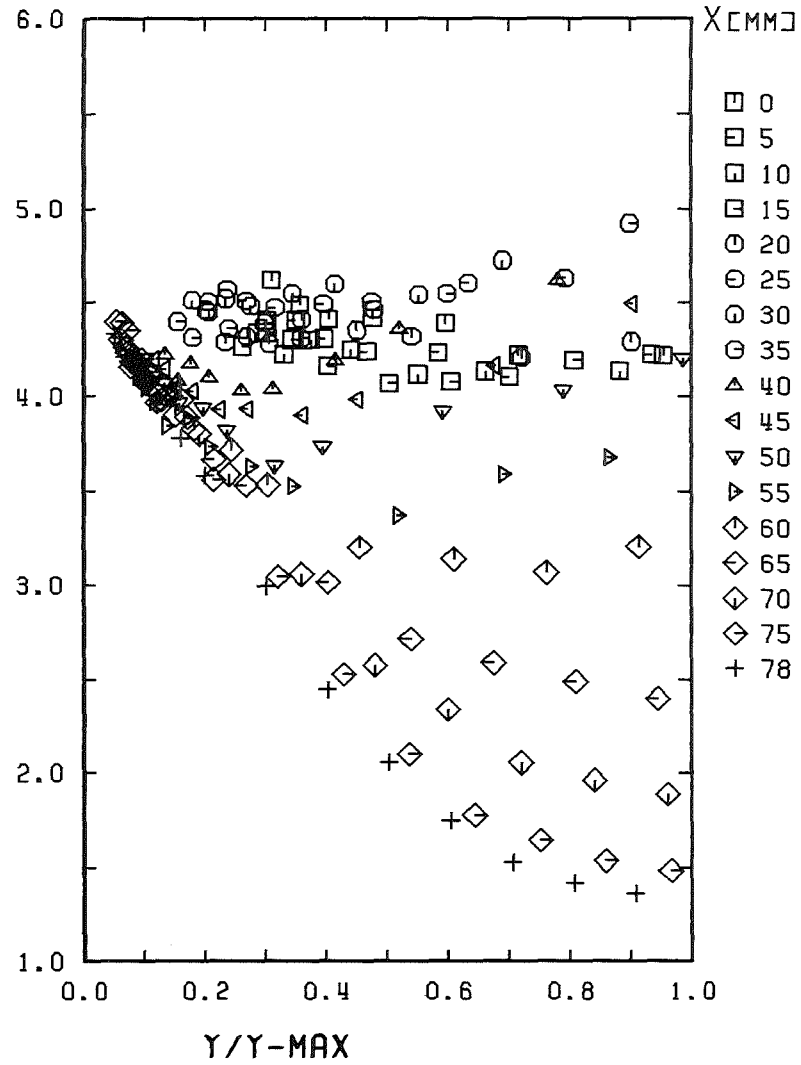
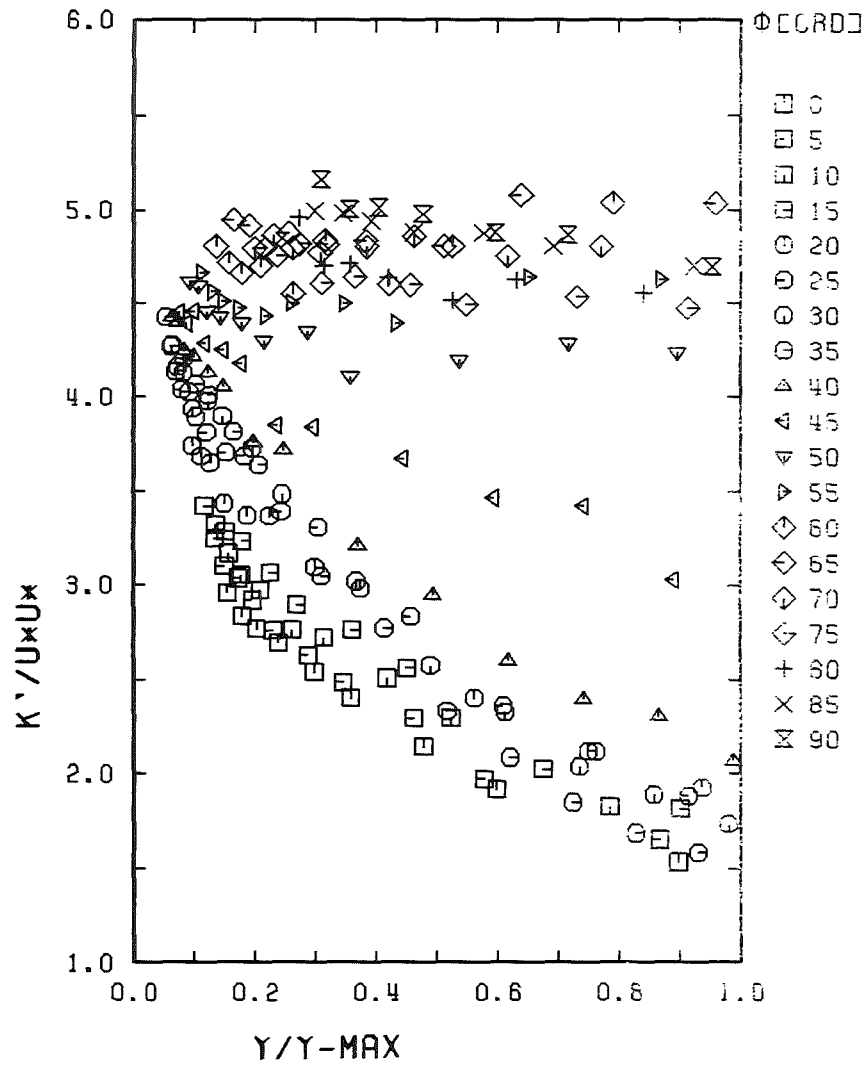


Abb.29 Kinetische Energie der Turbulenz als Funktion des Wandabstandes
 im 4-Stabbündel (Einzeldrahtmethode)

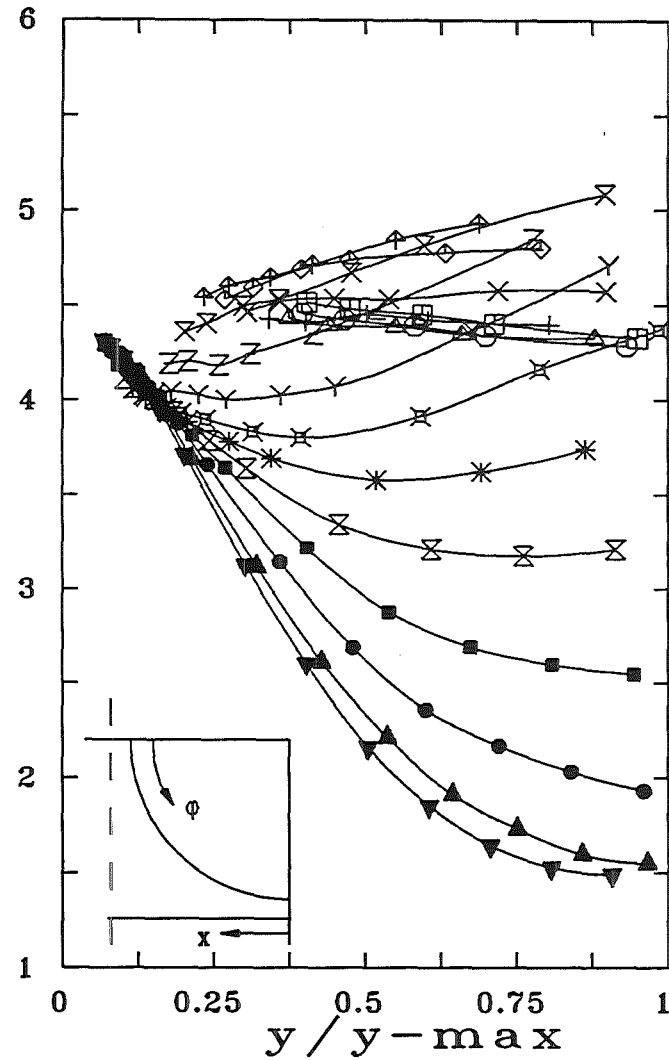
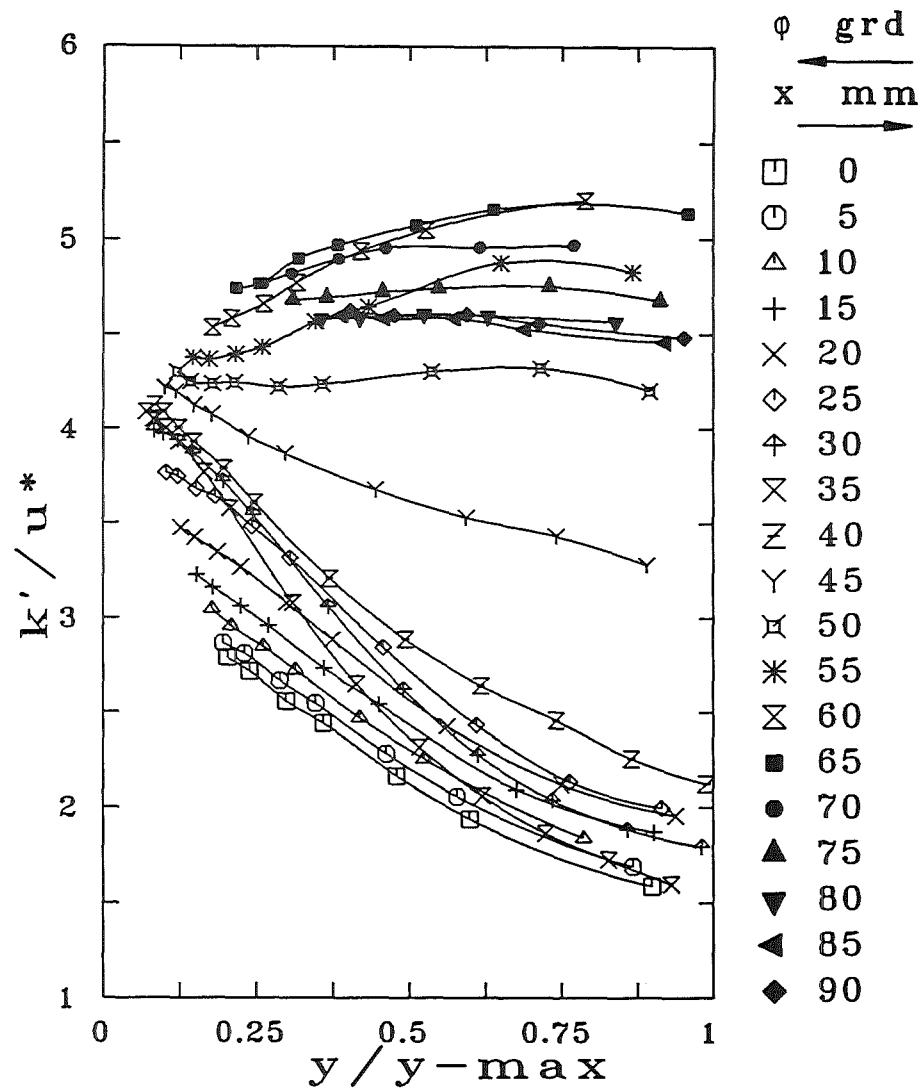


Abb.30 Kinetische Energie der Turbulenz als Funktion des Wandabstandes im 4-Stabbüdel (X-Drahtmethode)

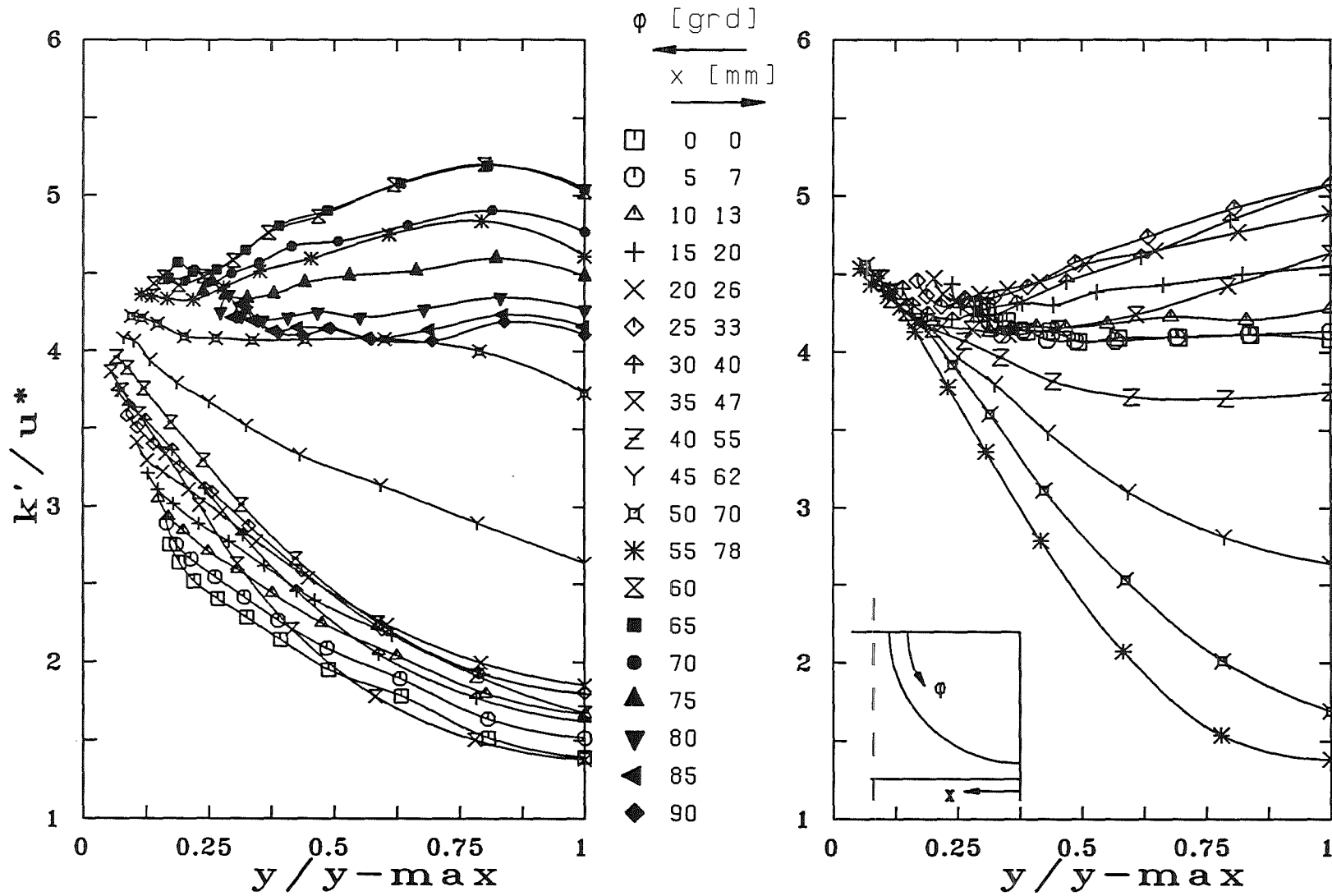


Abb.31 Kinetische Energie der Turbulenz als Funktion des Wandabstandes im 37-Stabbündel (X-Drahtmethode)

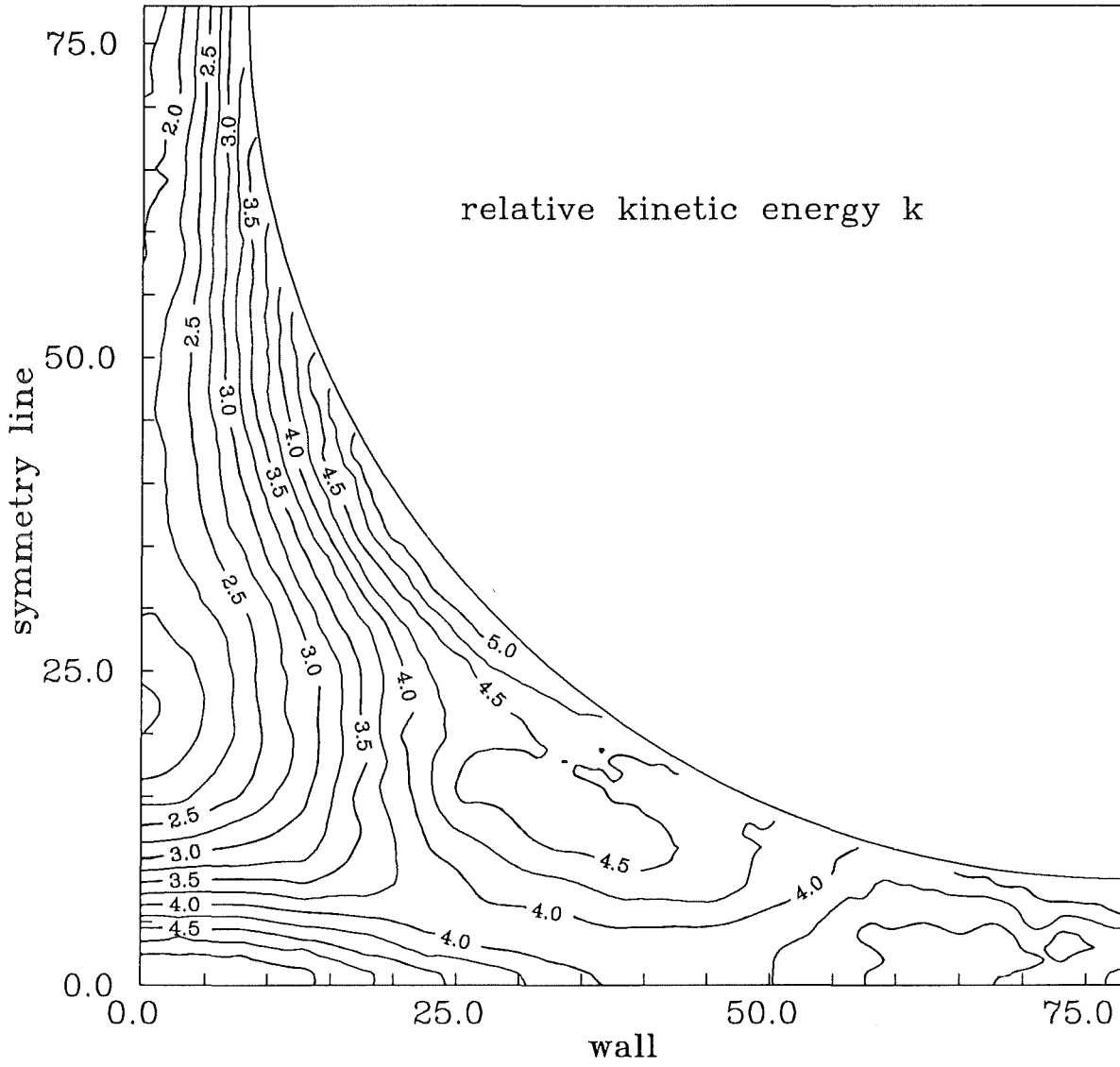


Abb.32 Höhenlinien der kinetischen Energie der Turbulenz im 4-Stabbündel (Einzeldrahtmethode)

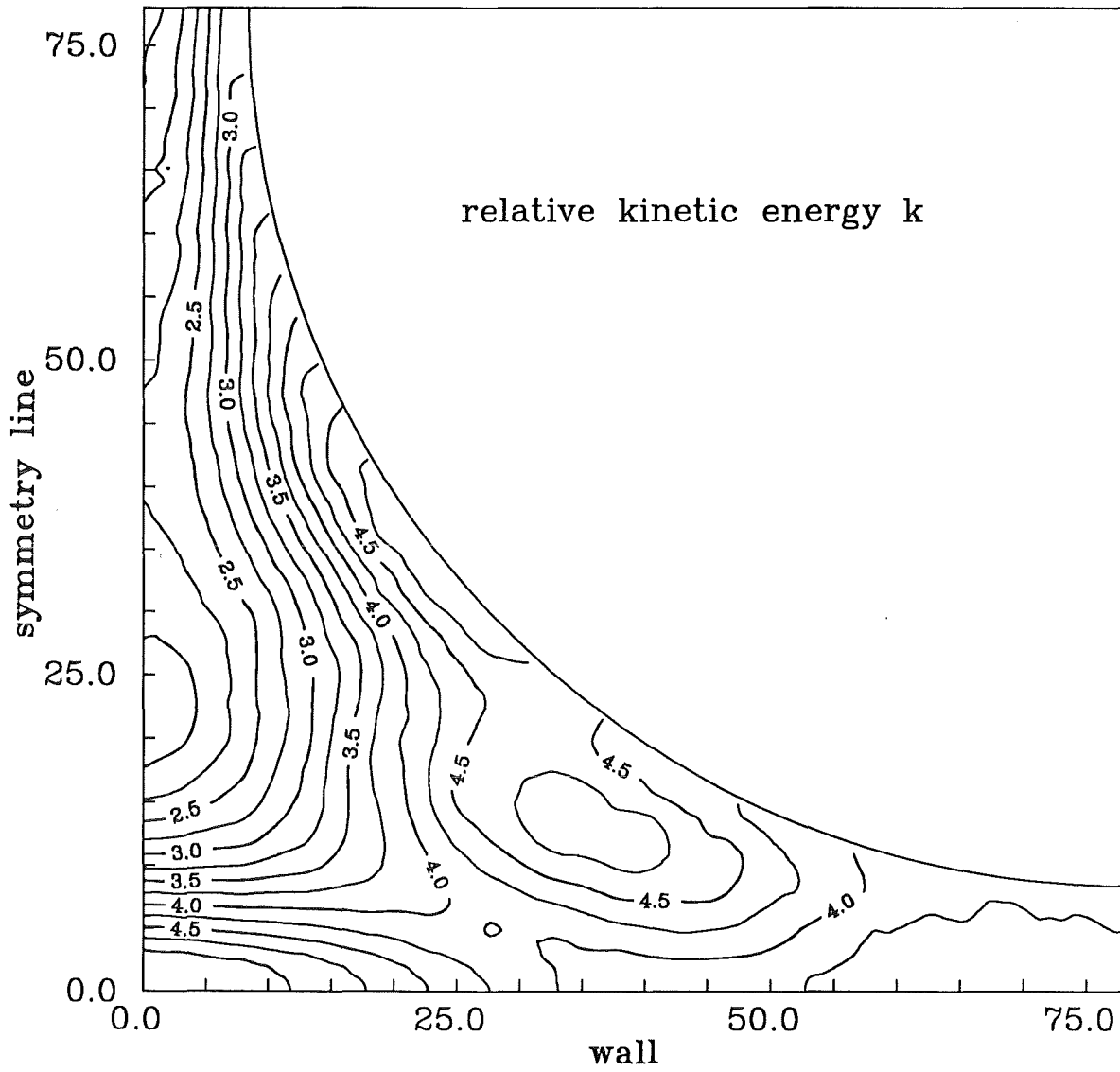


Abb.33 Höhenlinien der kinetischen Energie der Turbulenz im 4-Stabbündel (X-Drahtmethode)

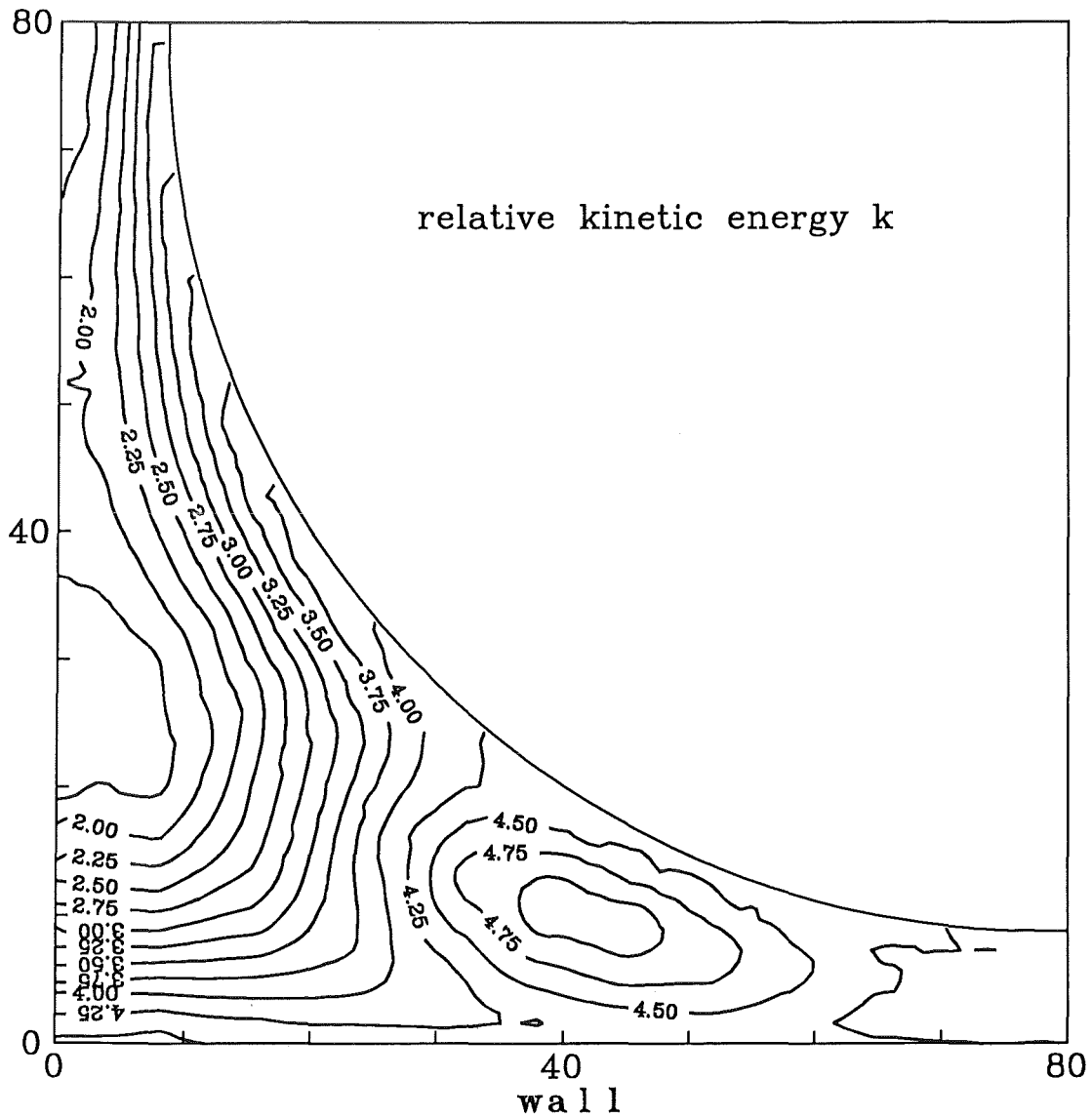


Abb.34 Höhenlinien der kinetischen Energie der Turbulenz im 37-Stabbündel (X-Drahtmethode)

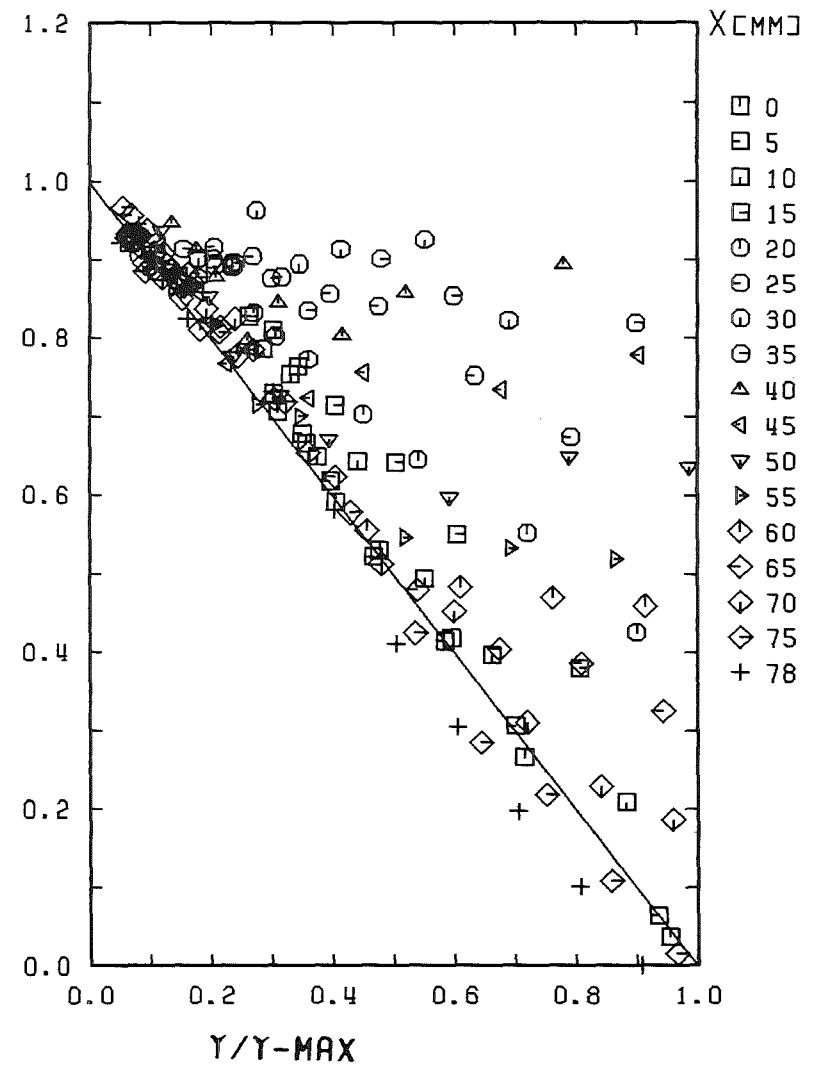
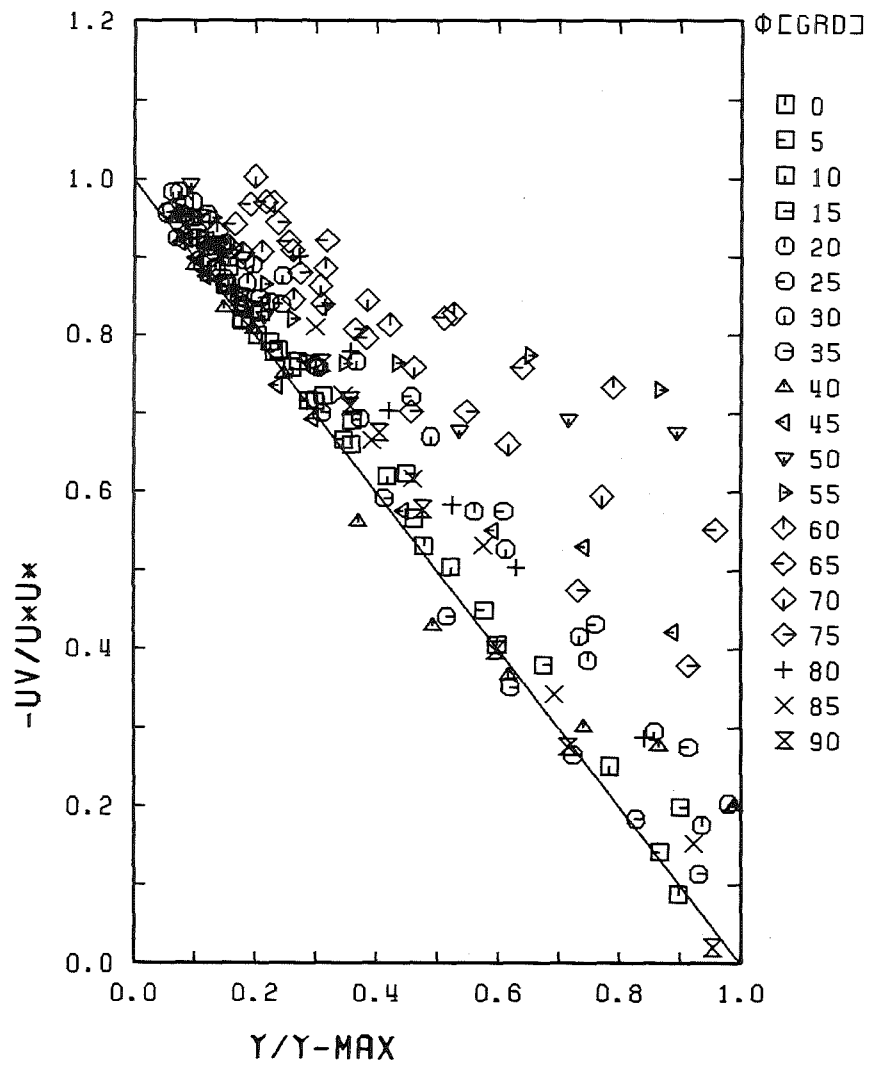


Abb.35 Schubspannung senkrecht zur Wand als Funktion des Wandabstandes im 4-Stabbündel (Einzeldrahtmethode)

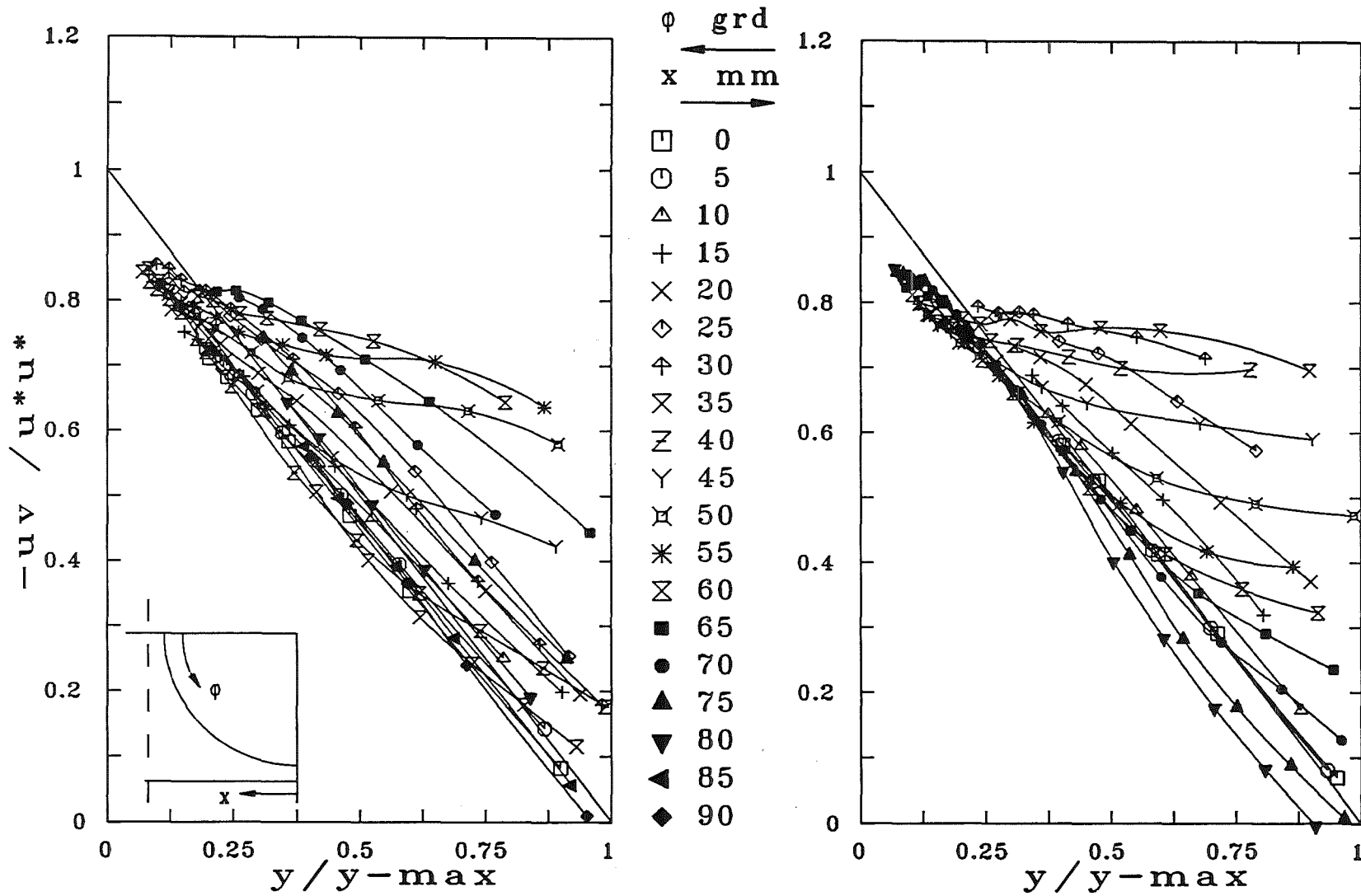


Abb.36 Schubspannung senkrecht zur Wand als Funktion des Wandabstandes im 4-Stabbündel (X-Drahtmethode)

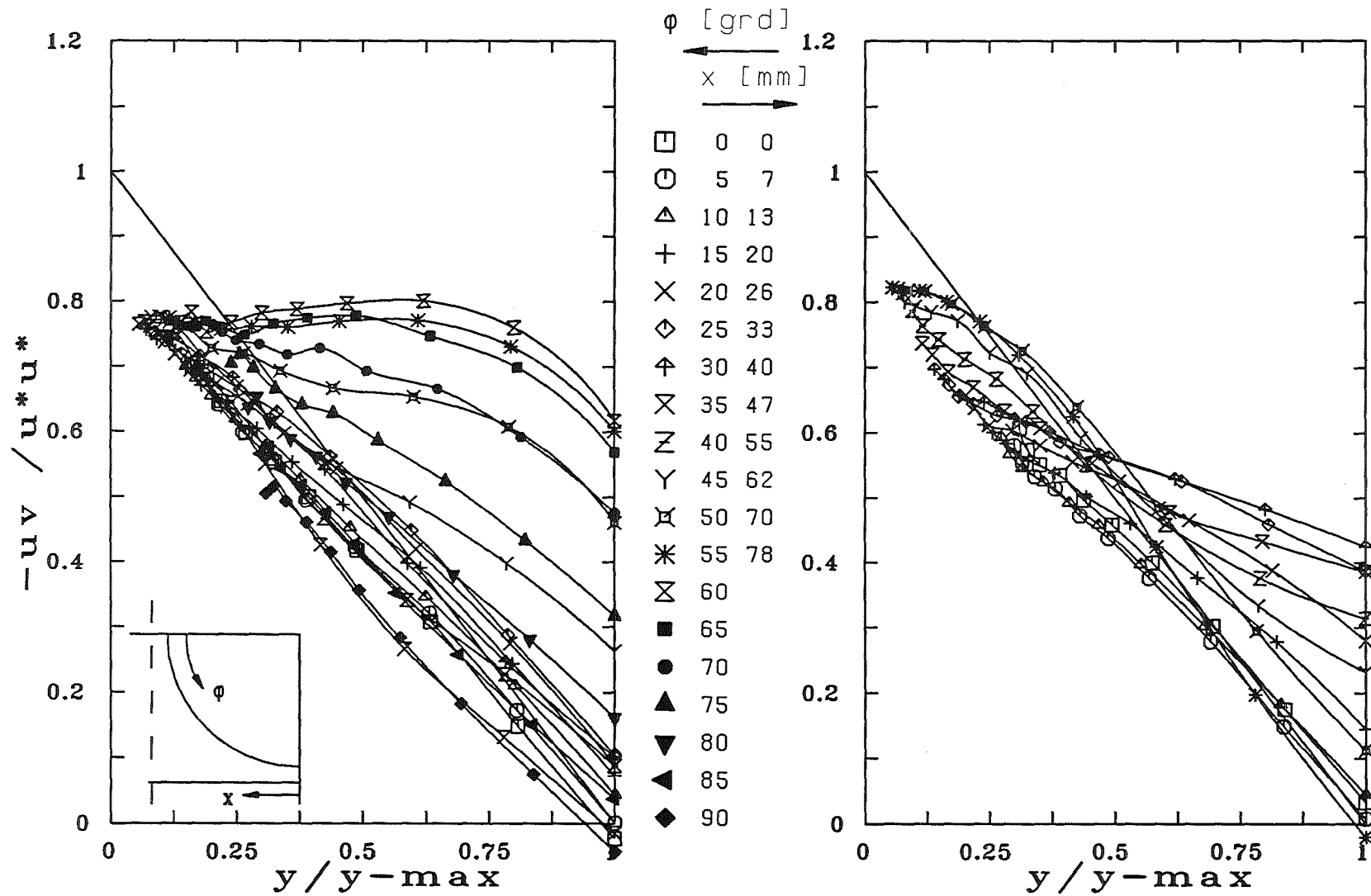


Abb.37 Schubspannung senkrecht zur Wand als Funktion des Wandabstandes
 im 37-Stabbündel (X-Drahtmethode)

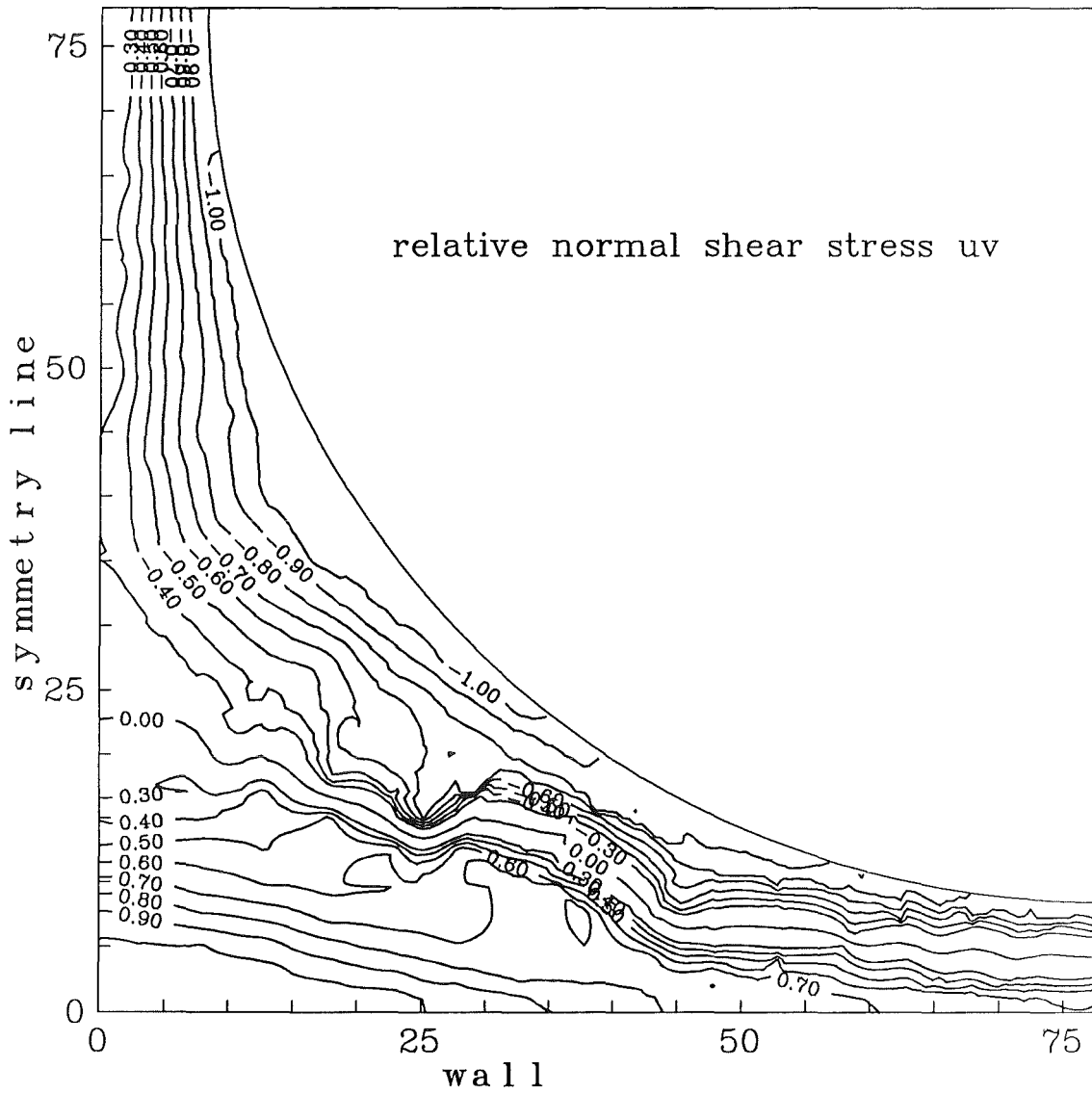


Abb.38 Höhenlinien der Schubspannung senkrecht zur Wand im 4-Stabbündel (Einzeldrahtmethode)

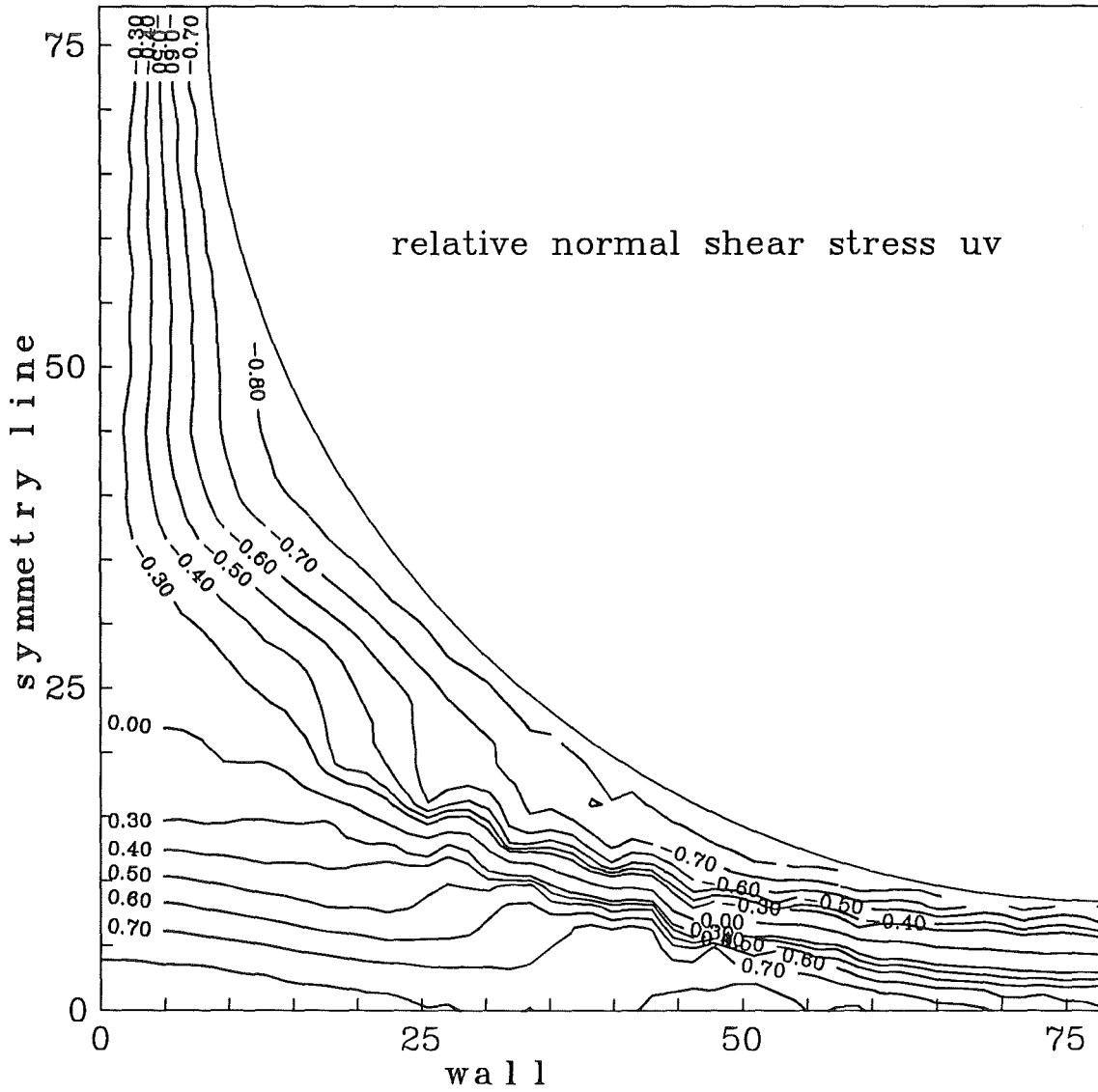


Abb.39 Höhenlinien der Schubspannung senkrecht zur Wand im 4-Stabbündel (X-Drahtmethode)

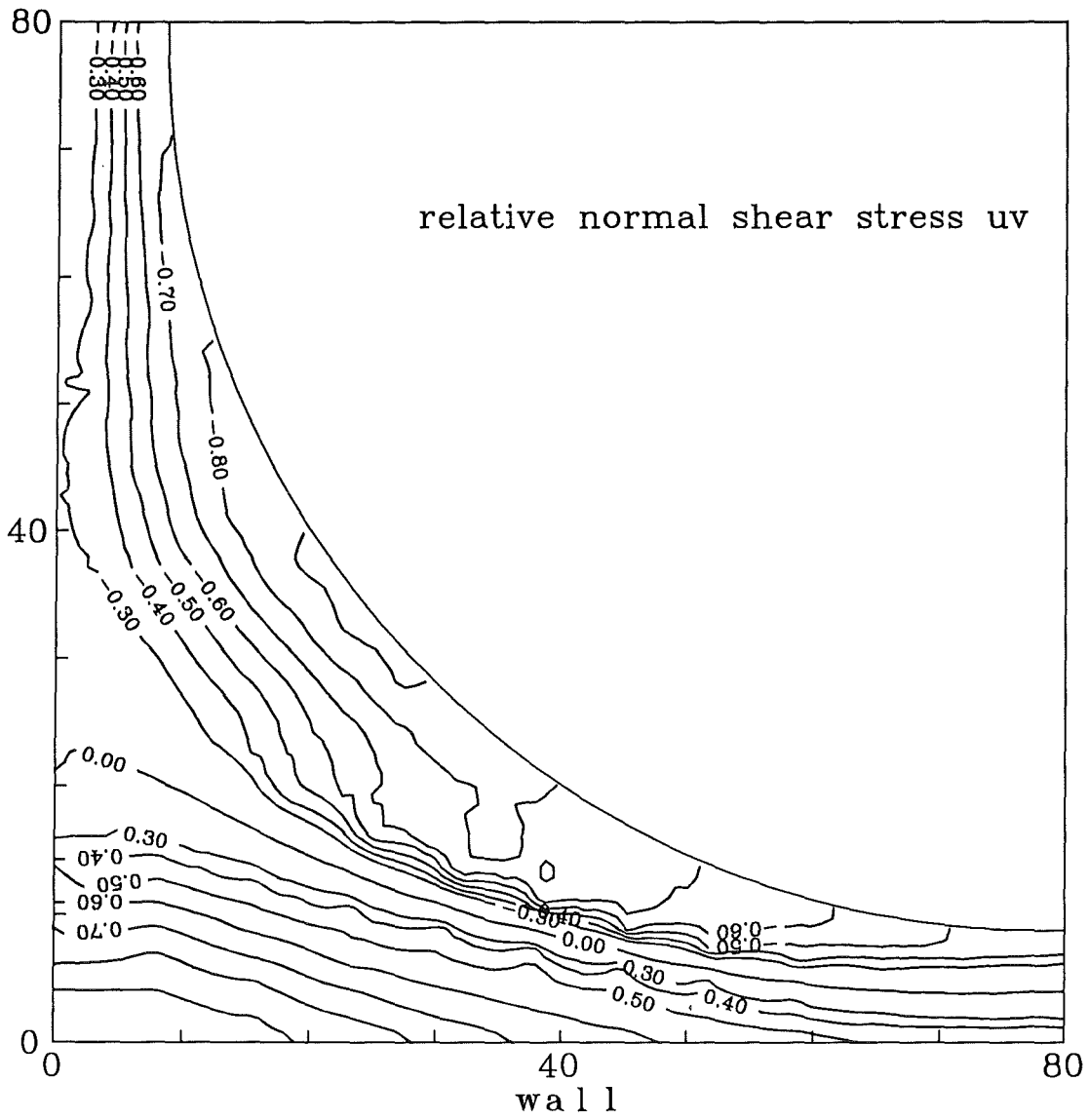


Abb.40 Höhenlinien der Schubspannung senkrecht zur Wand im 37-Stabbündel (X-Drahtmethode)

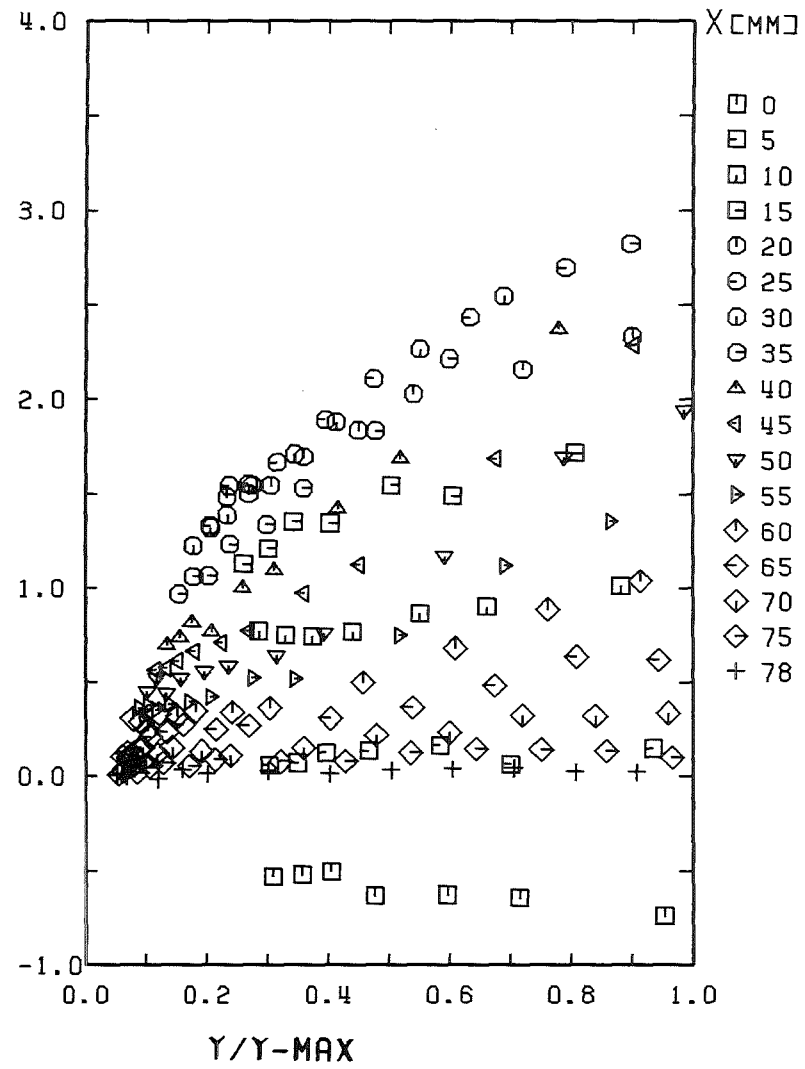
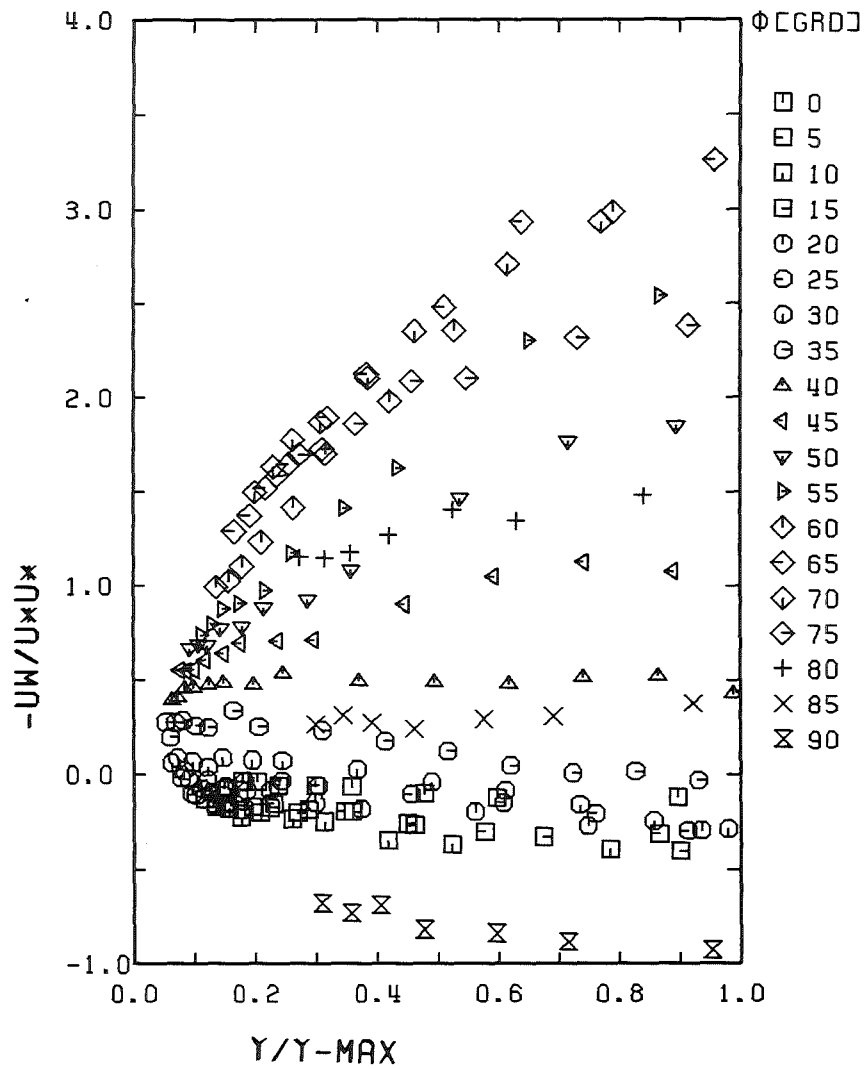


Abb.41 Schubspannung parallel zur Wand als Funktion des Wandabstandes
 im 4-Stabbündel (Einzeldrahtmethode)

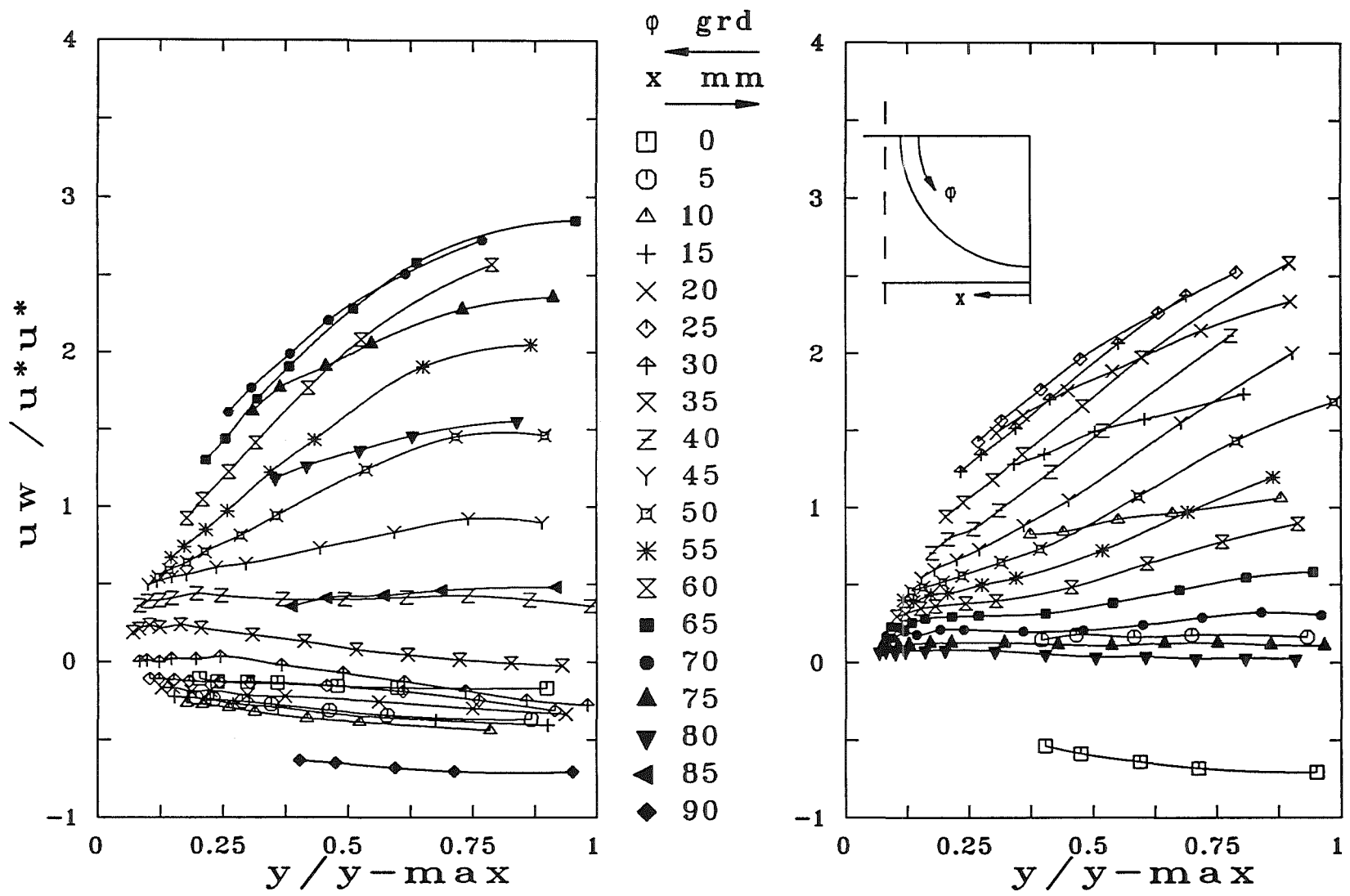


Abb.42 Schubspannung parallel zur Wand als Funktion des Wandabstandes im 4-Stabbündel (X-Drahtmethode)

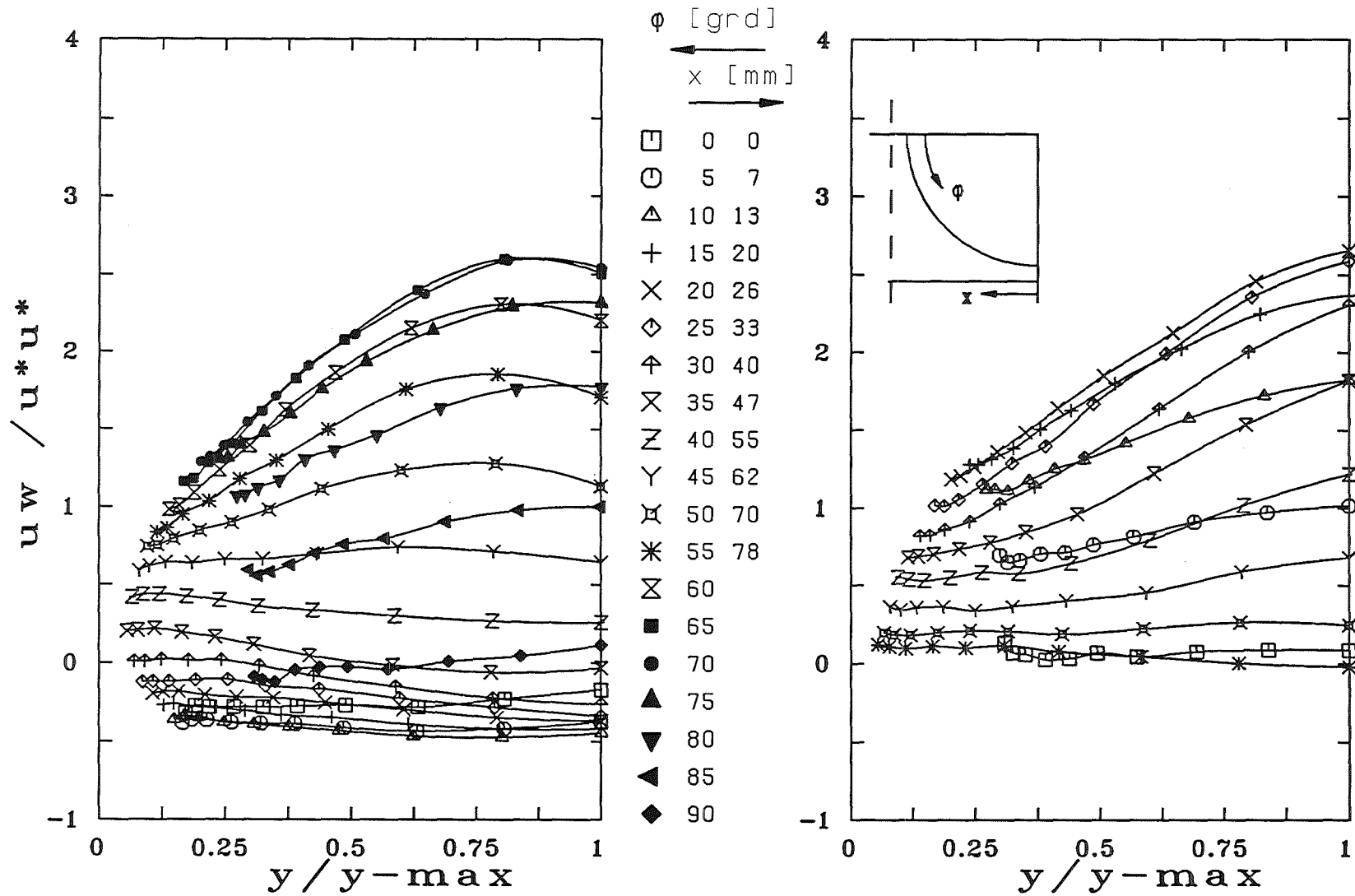


Abb.43 Schubspannung parallel zur Wand als Funktion des Wandabstandes im 37-Stabbündel (X-Drahtmethode)

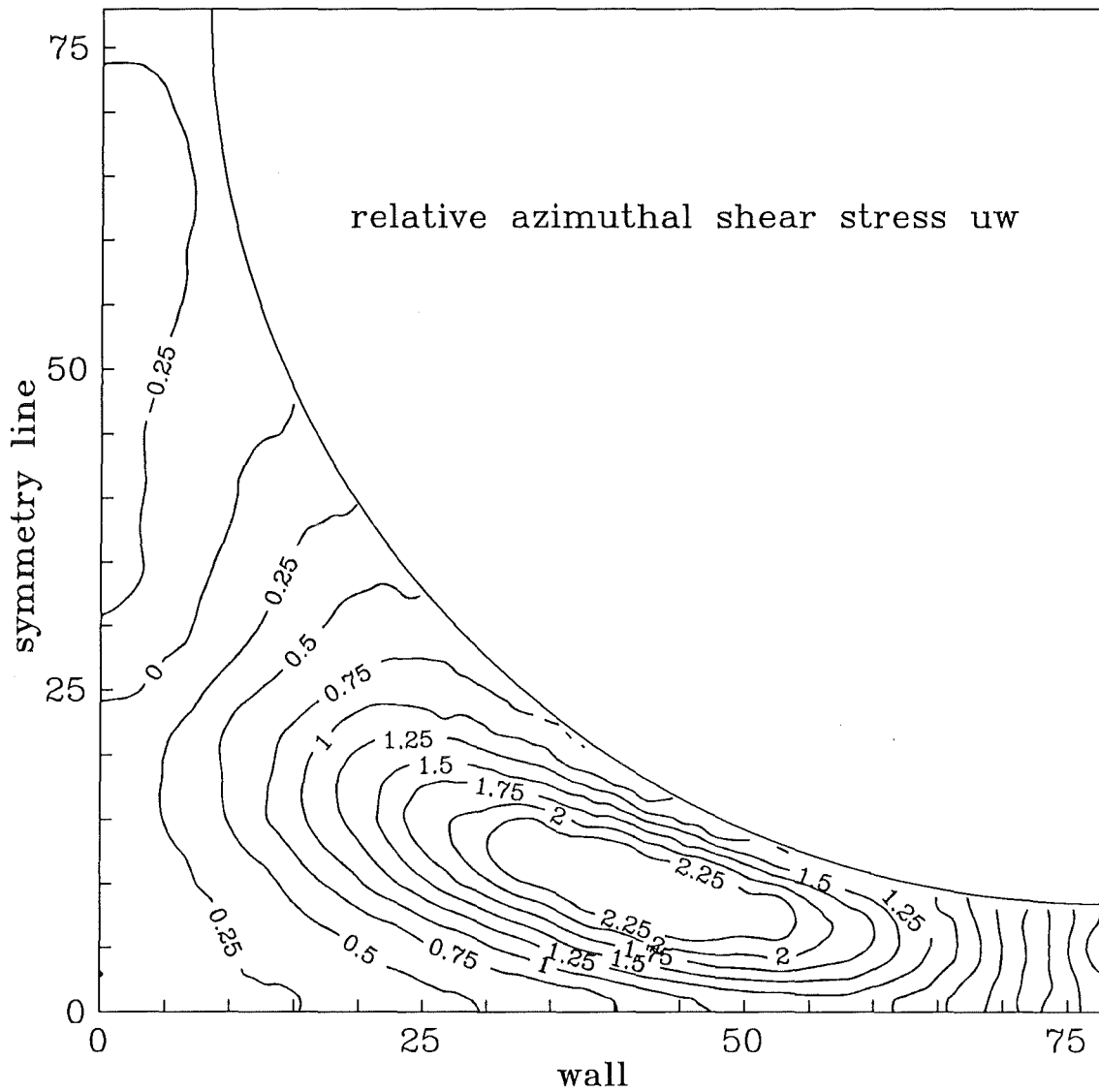


Abb.44 Höhenlinien der Schubspannung parallel zur Wand im 4-Stabbündel (Einzeldrahtmethode)

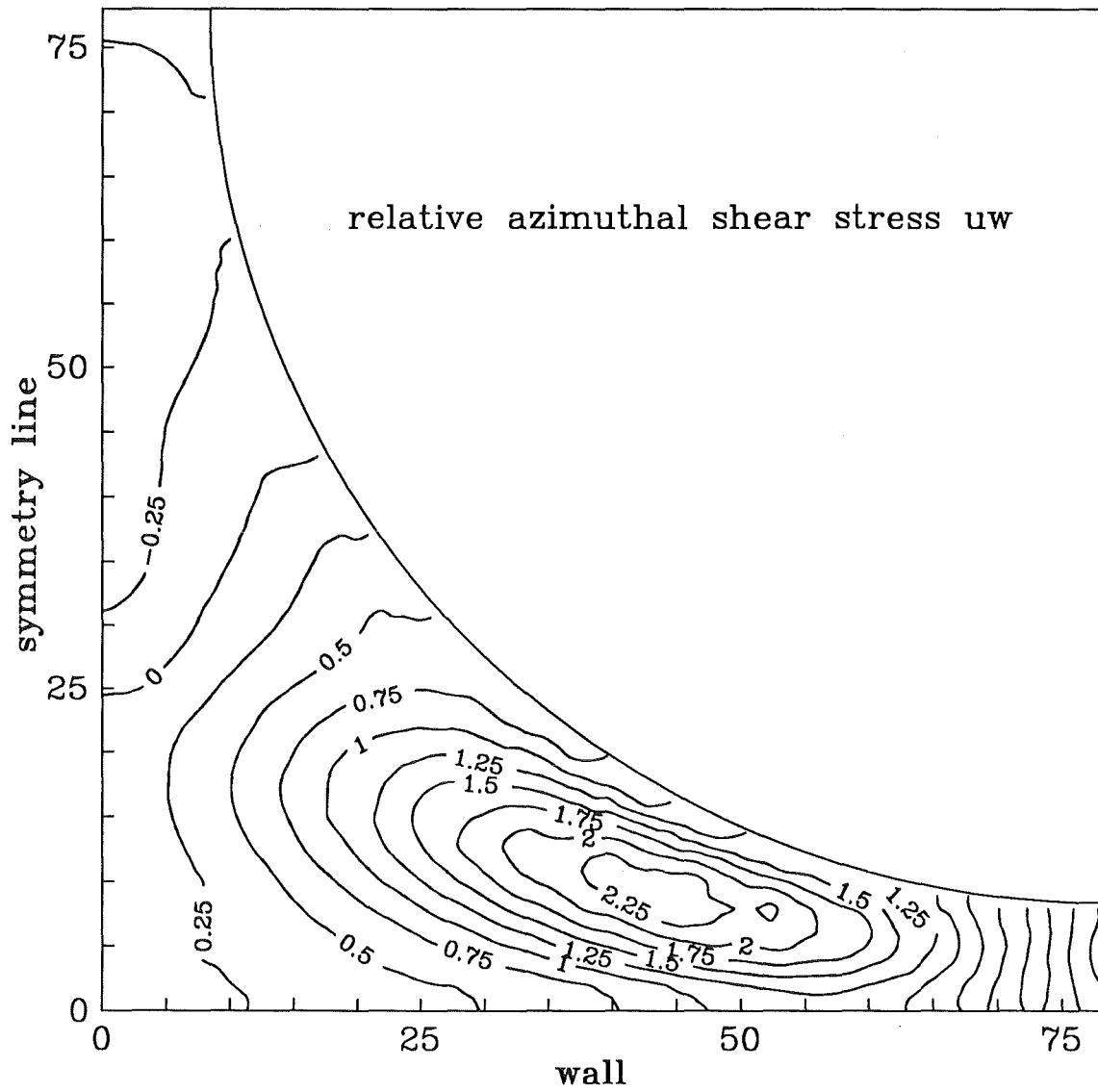


Abb.45 Höhenlinien der Schubspannung parallel zur Wand im 4-Stabbündel (X-Drahtmethode)

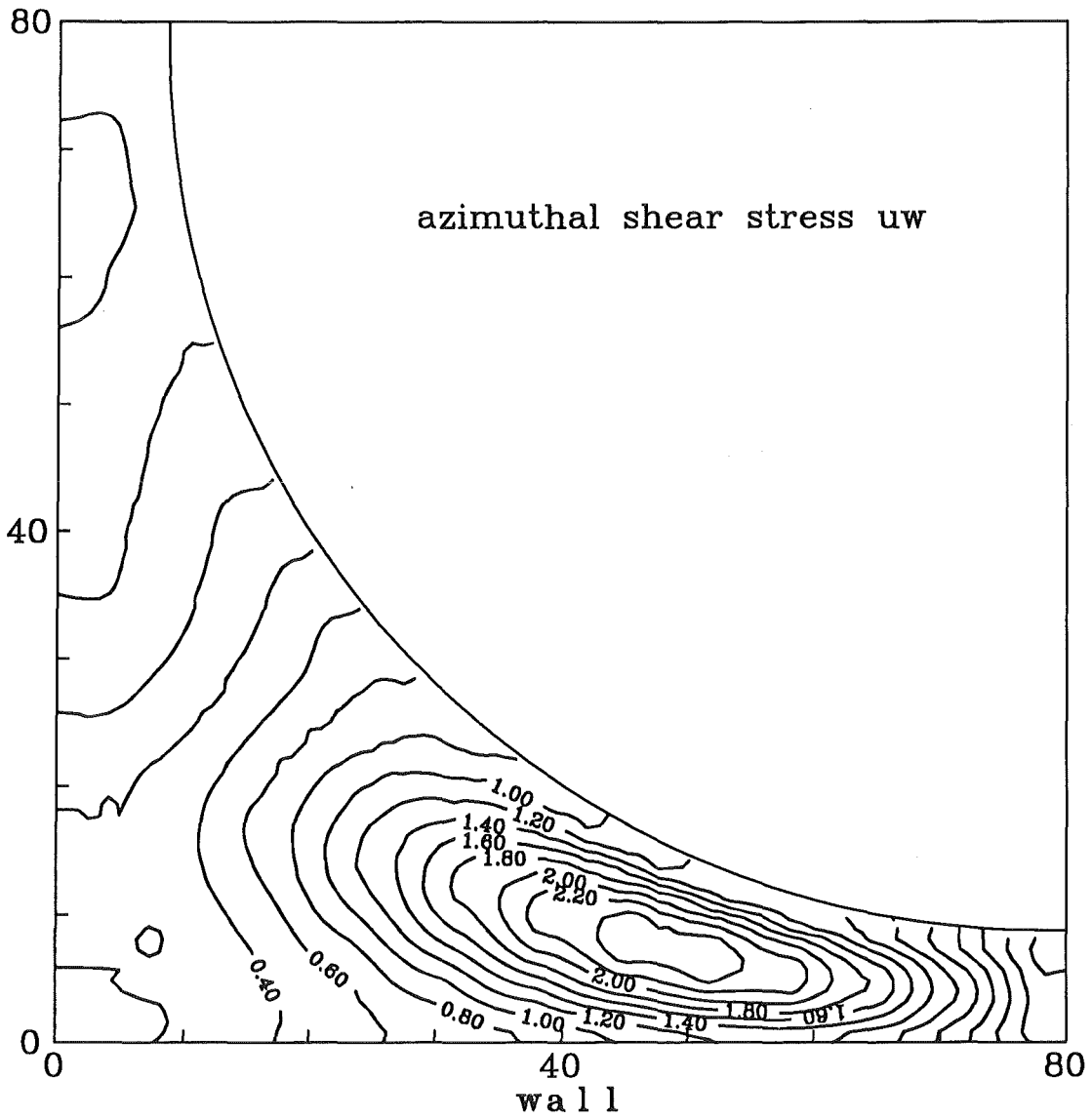


Abb.46 Höhenlinien der Schubspannung parallel zur Wand im 37-Stabbündel (X-Drahtmethode)

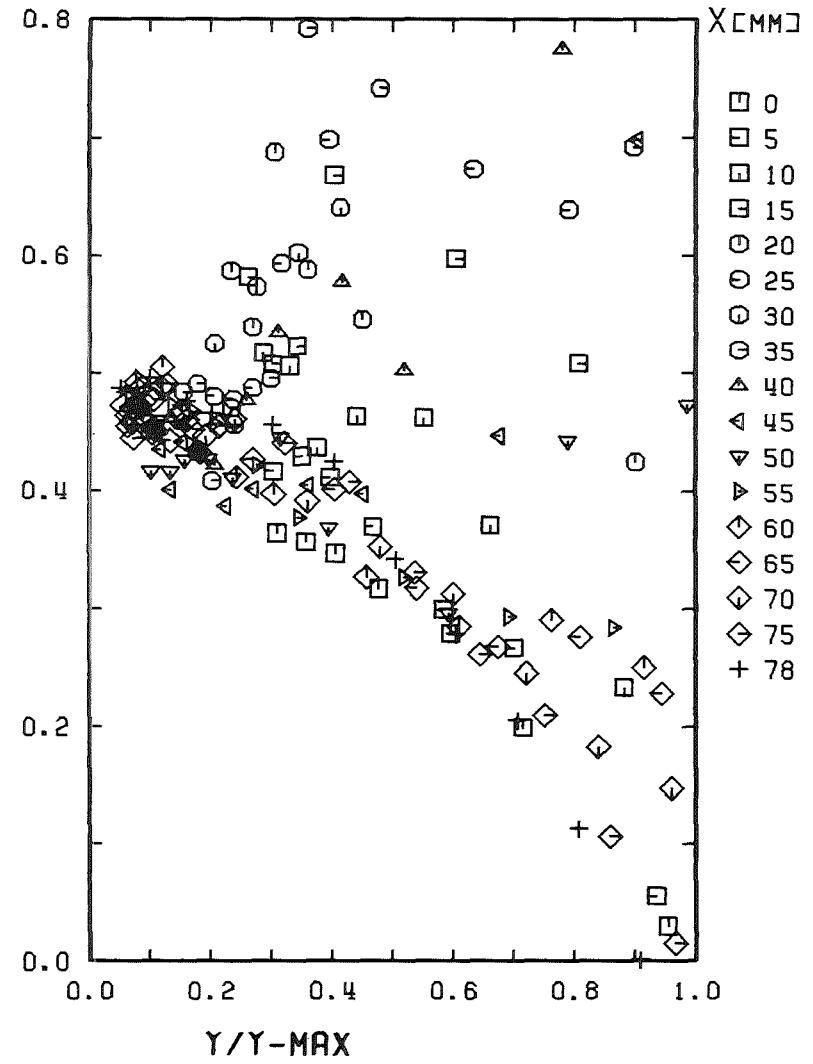
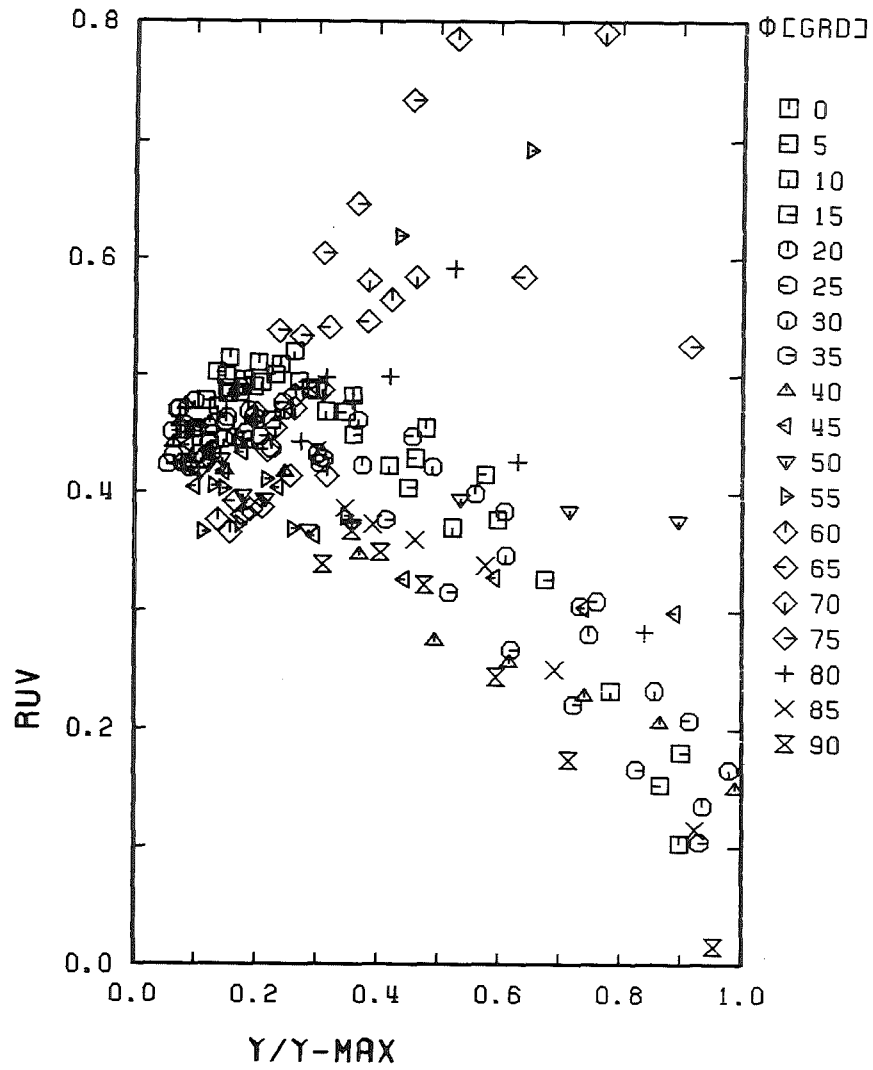


Abb.47 Korrelationskoeffizient der Schubspannung senkrecht zur Wand im 4-Stabbüdel (Einzeldrahtmethode)

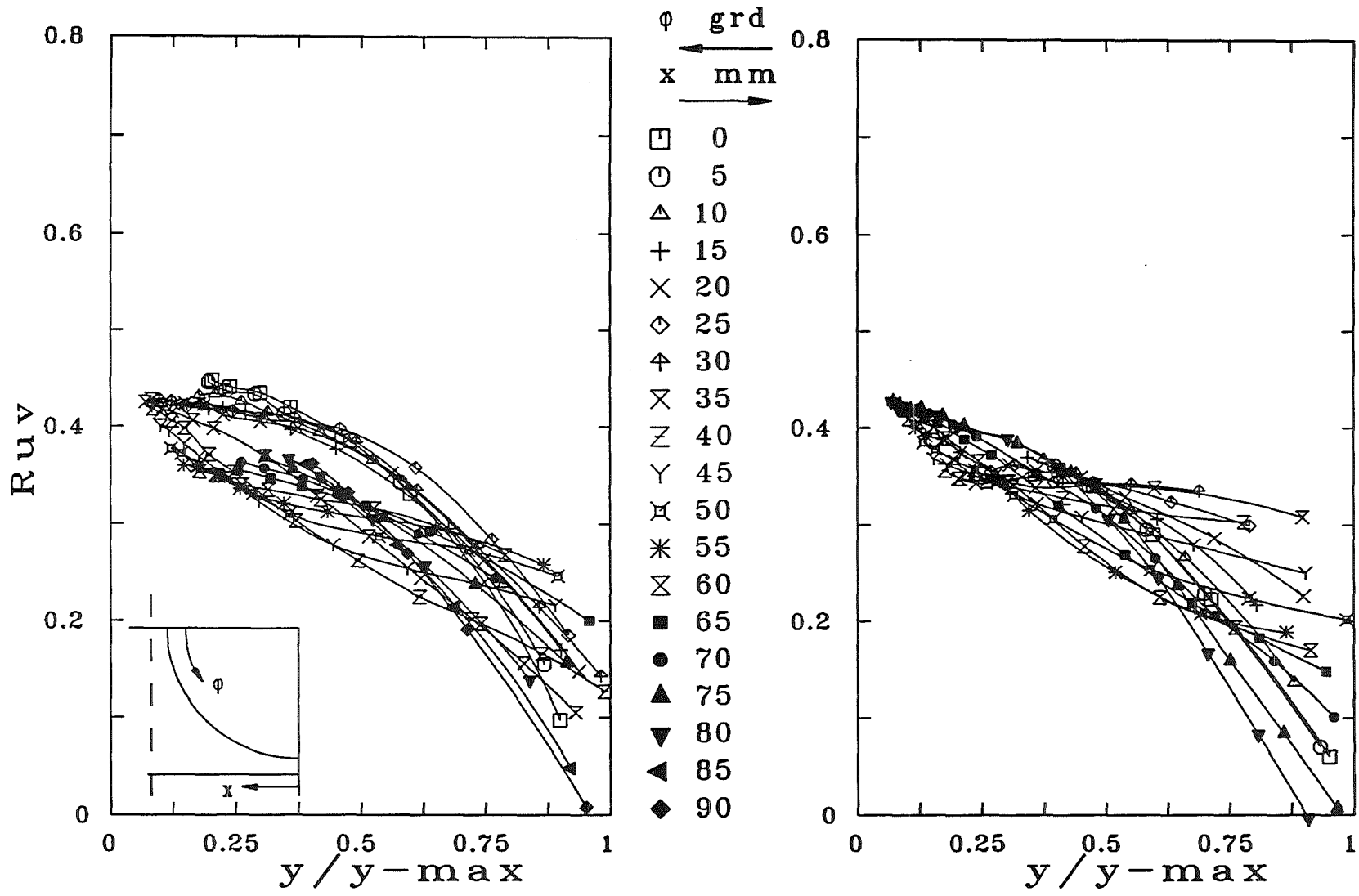


Abb.48 Korrelationskoeffizient der Schubspannung senkrecht zur Wand im 4-Stabbündel (X-Drahtmethode)

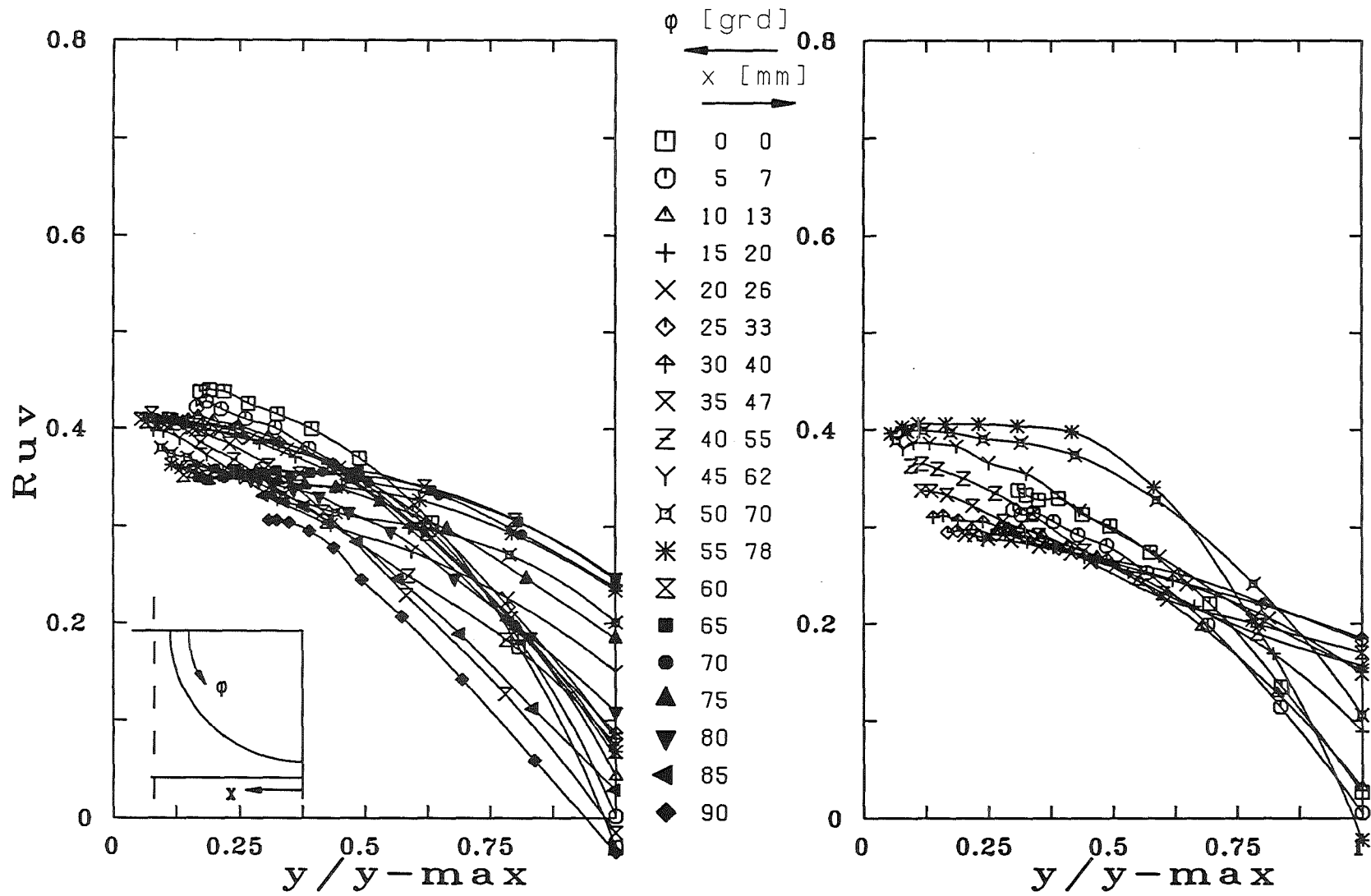


Abb.49 Korrelationskoeffizient der Schubspannung senkrecht zur Wand im 37-Stabbündel (X-Drahtmethode)

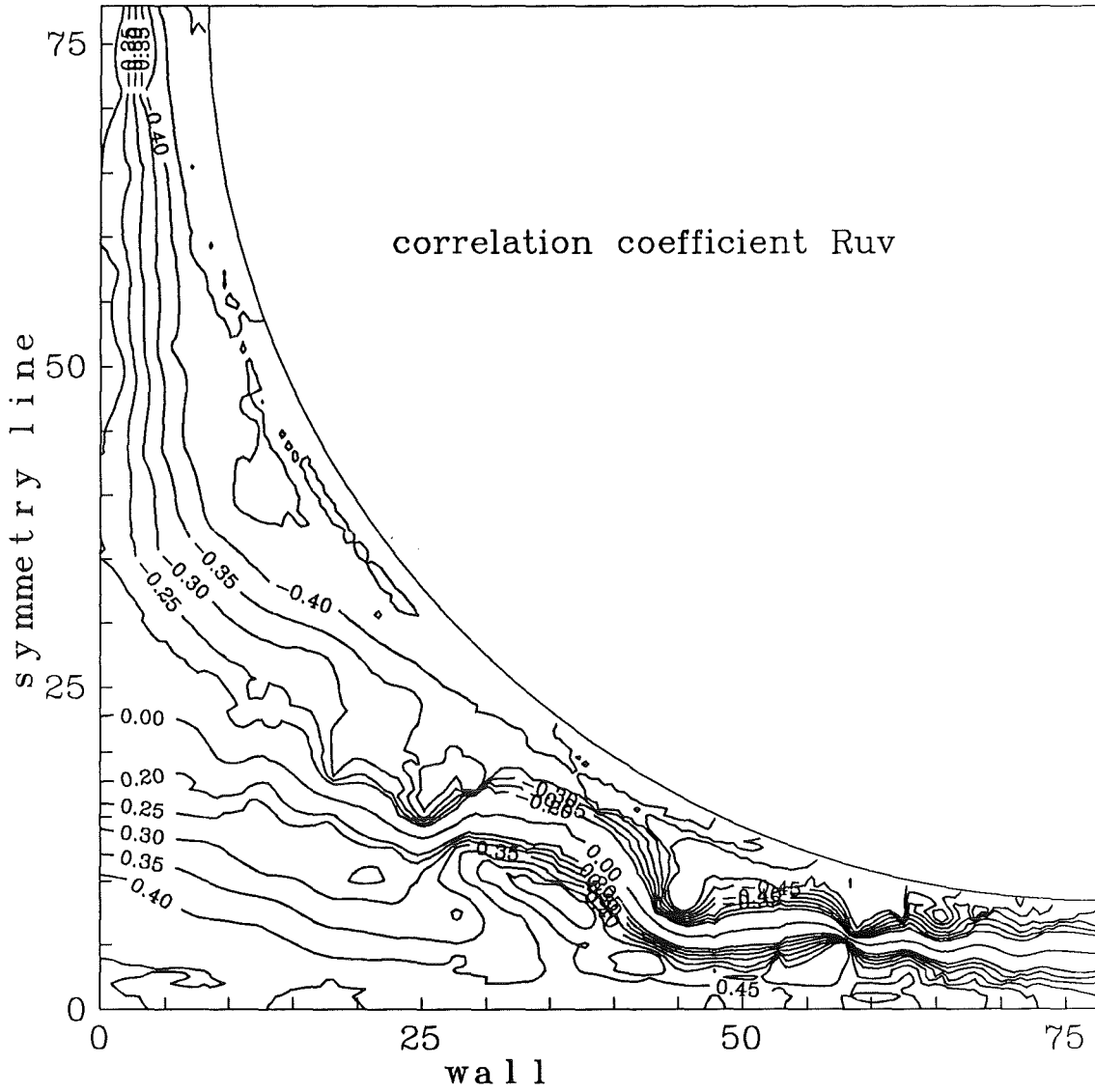


Abb.50 Höhenlinien des Korrelationskoeffizienten der Schubspannung senkrecht zur Wand im 4-Stabbündel (Einzeldrahtmethode)

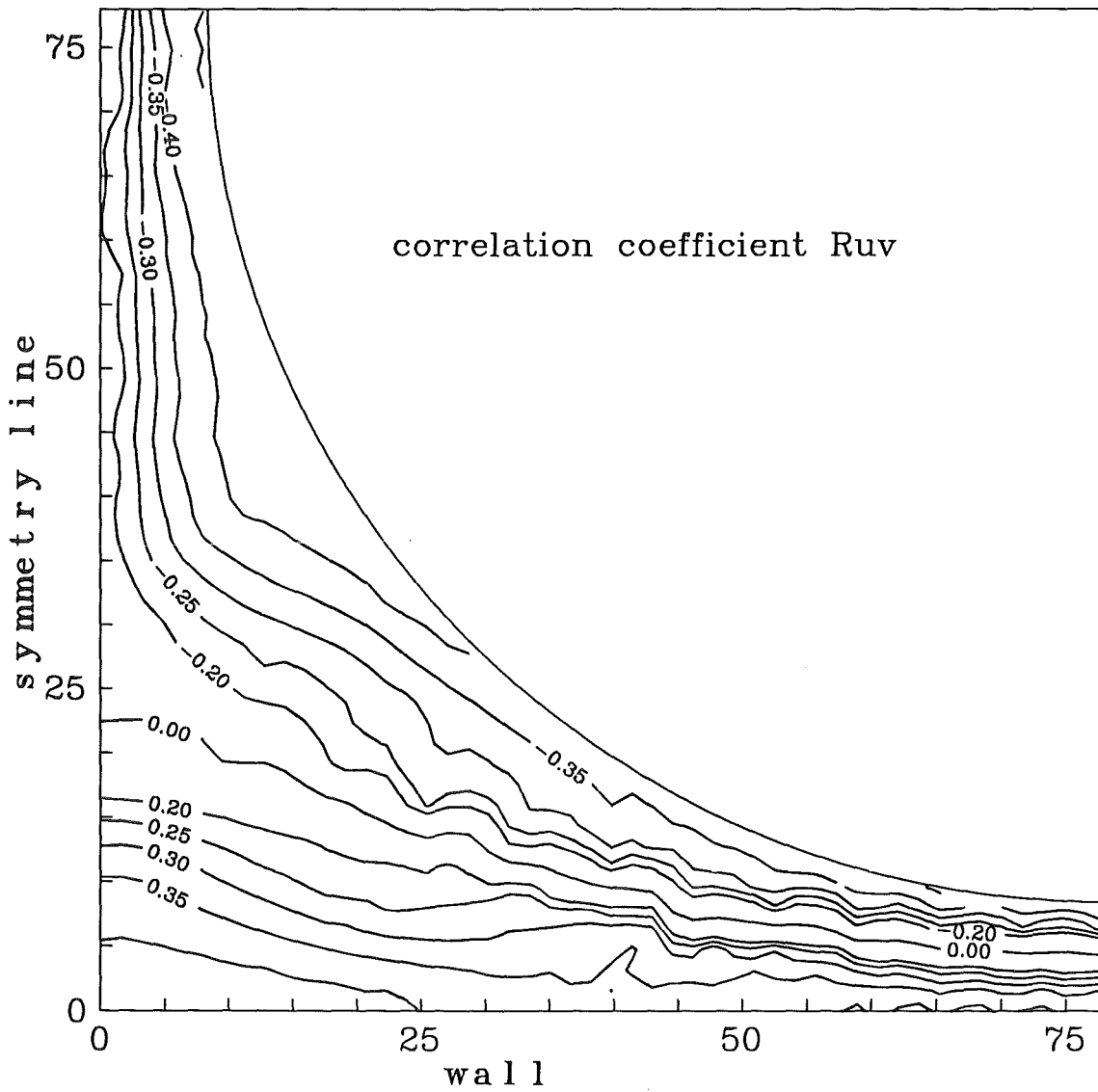


Abb.51 Höhenlinien des Korrelationskoeffizienten der Schubspannung senkrecht zur Wand im 4-Stabbündel (X-Drahtmethode)

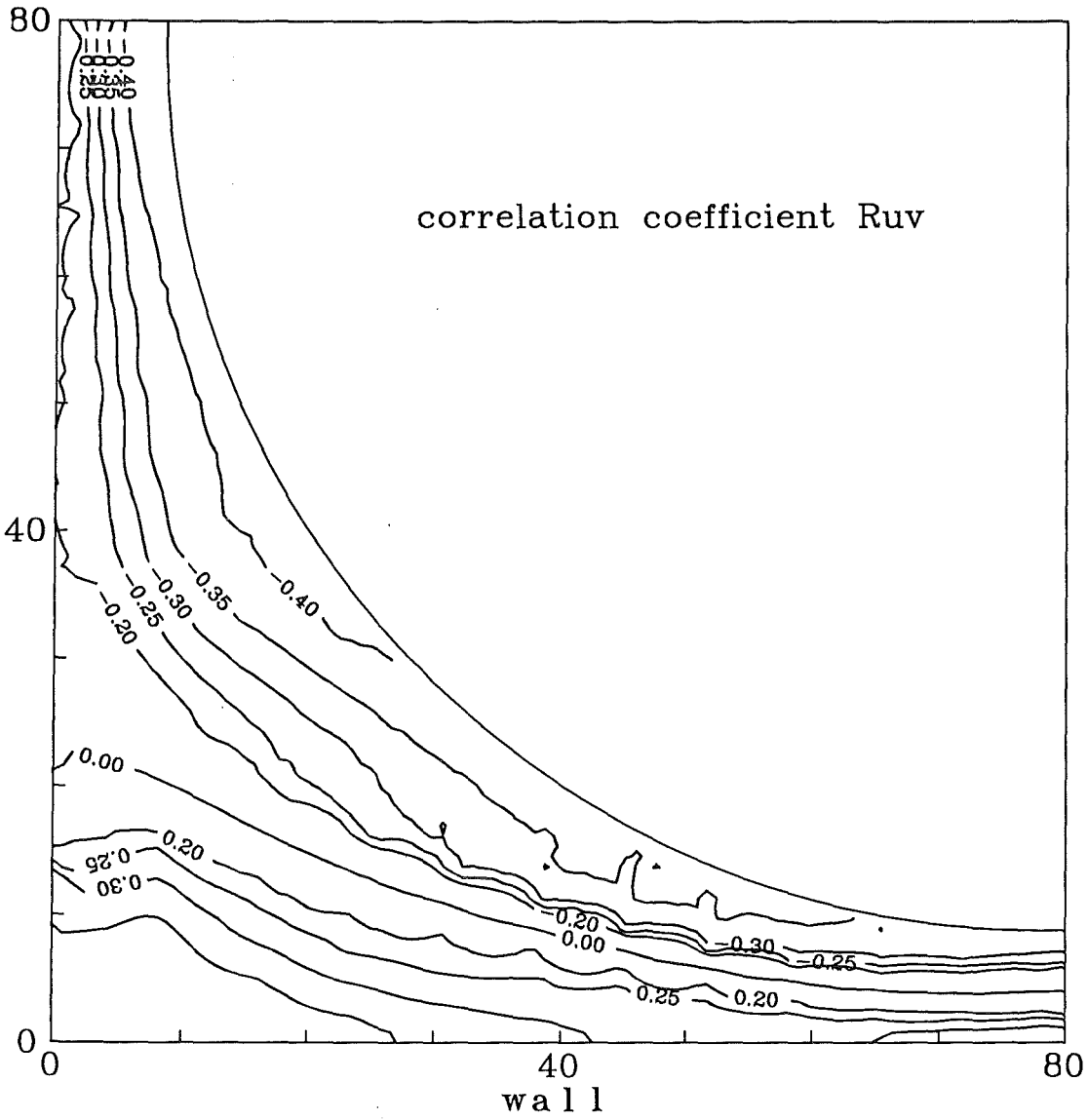


Abb.52 Höhenlinien des Korrelationskoeffizienten der Schubspannung senkrecht zur Wand im 37-Stabbündel (X-Drahtmethode)

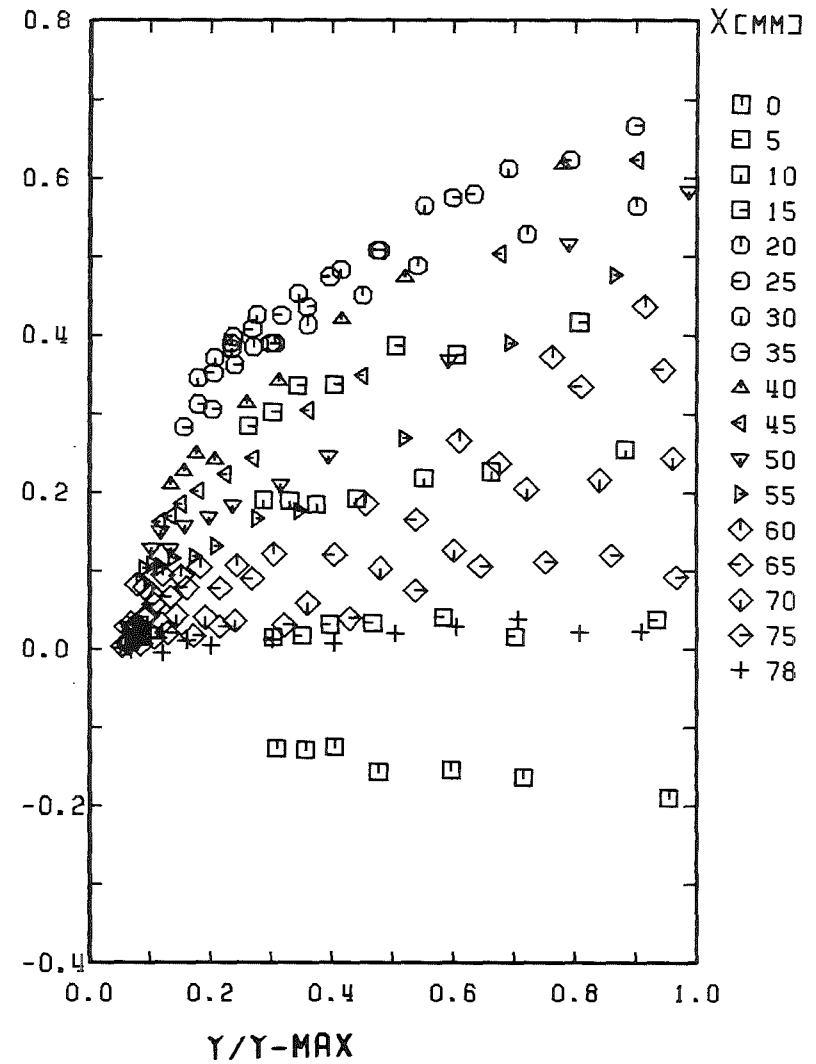
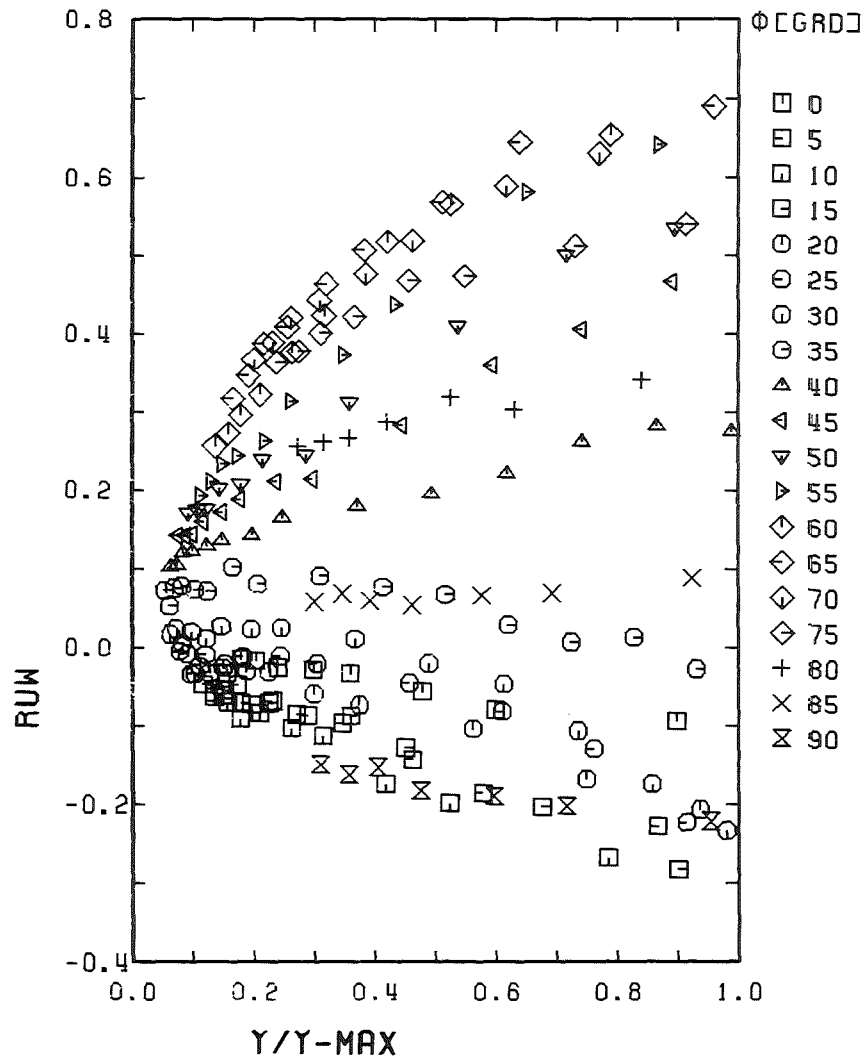


Abb.53 Korrelationskoeffizient der Schubspannung parallel zur Wand im 4-Stabbündel (Einzeldrahtmethode)

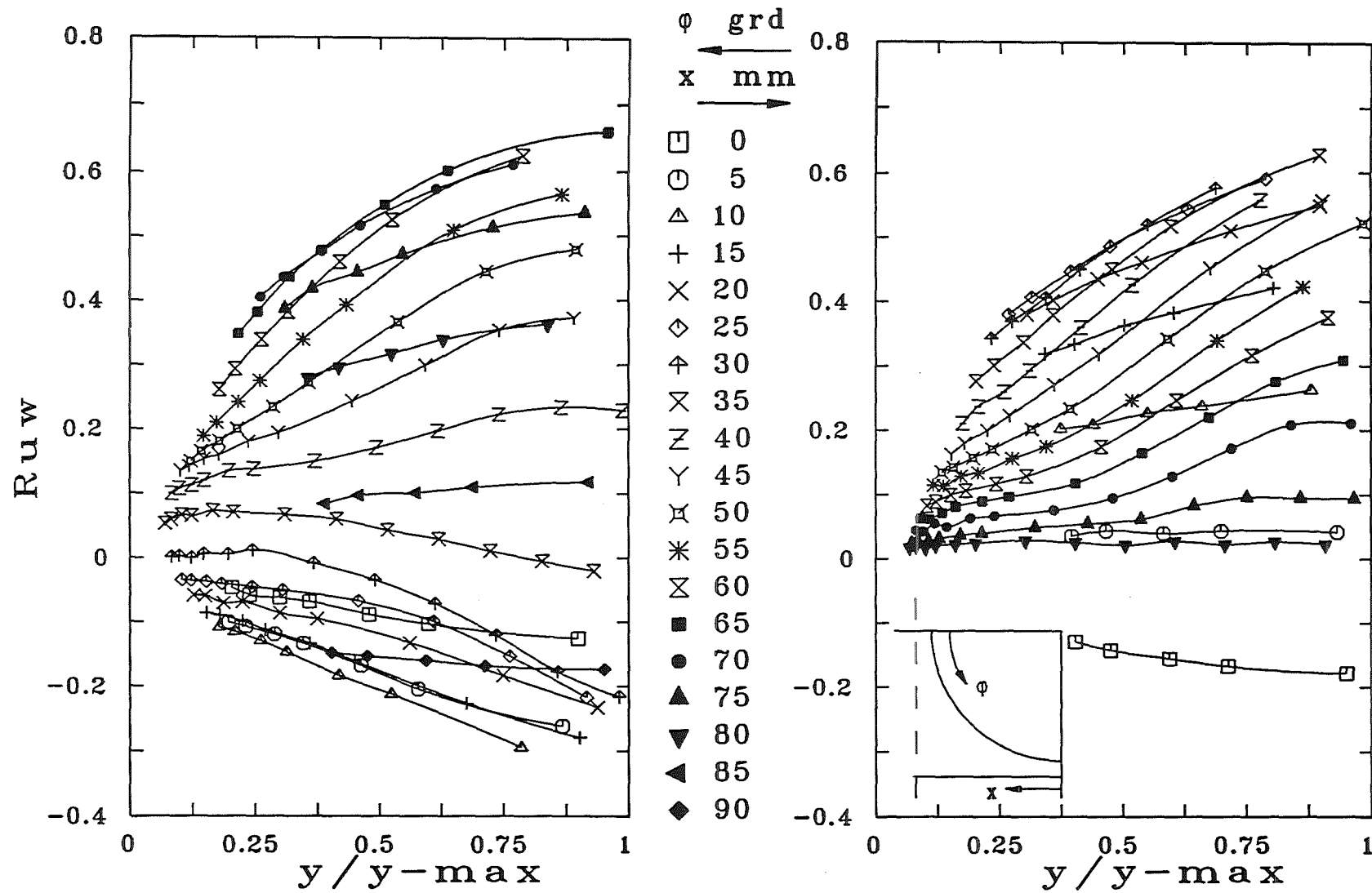


Abb.54 Korrelationskoeffizient der Schubspannung parallel zur Wand im 4-Stabbündel (X-Drahtmethode)

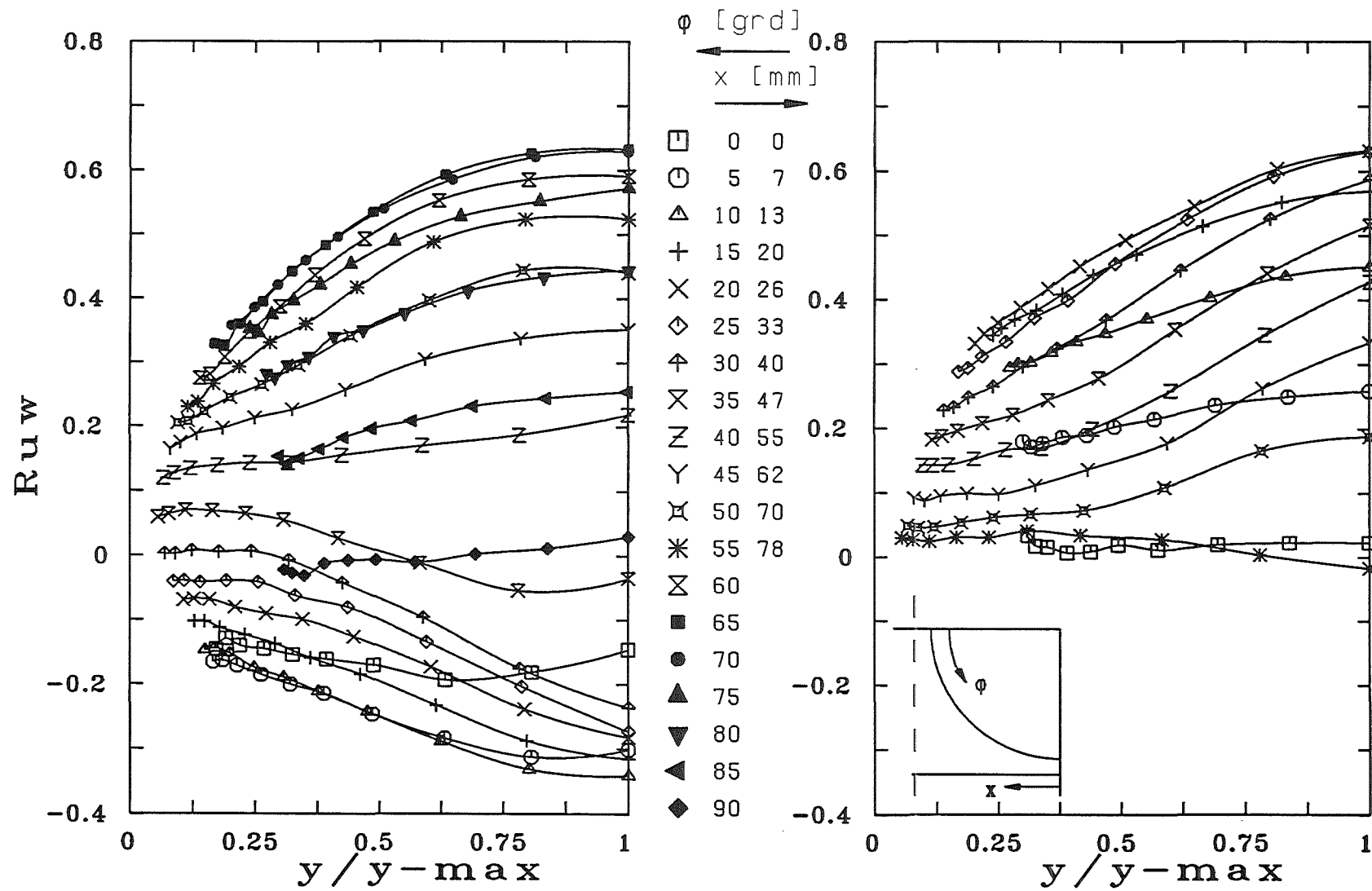


Abb.55 Korrelationskoeffizient der Schubspannung parallel zur Wand im 37-Stabbüdel (X-Drahtmethode)

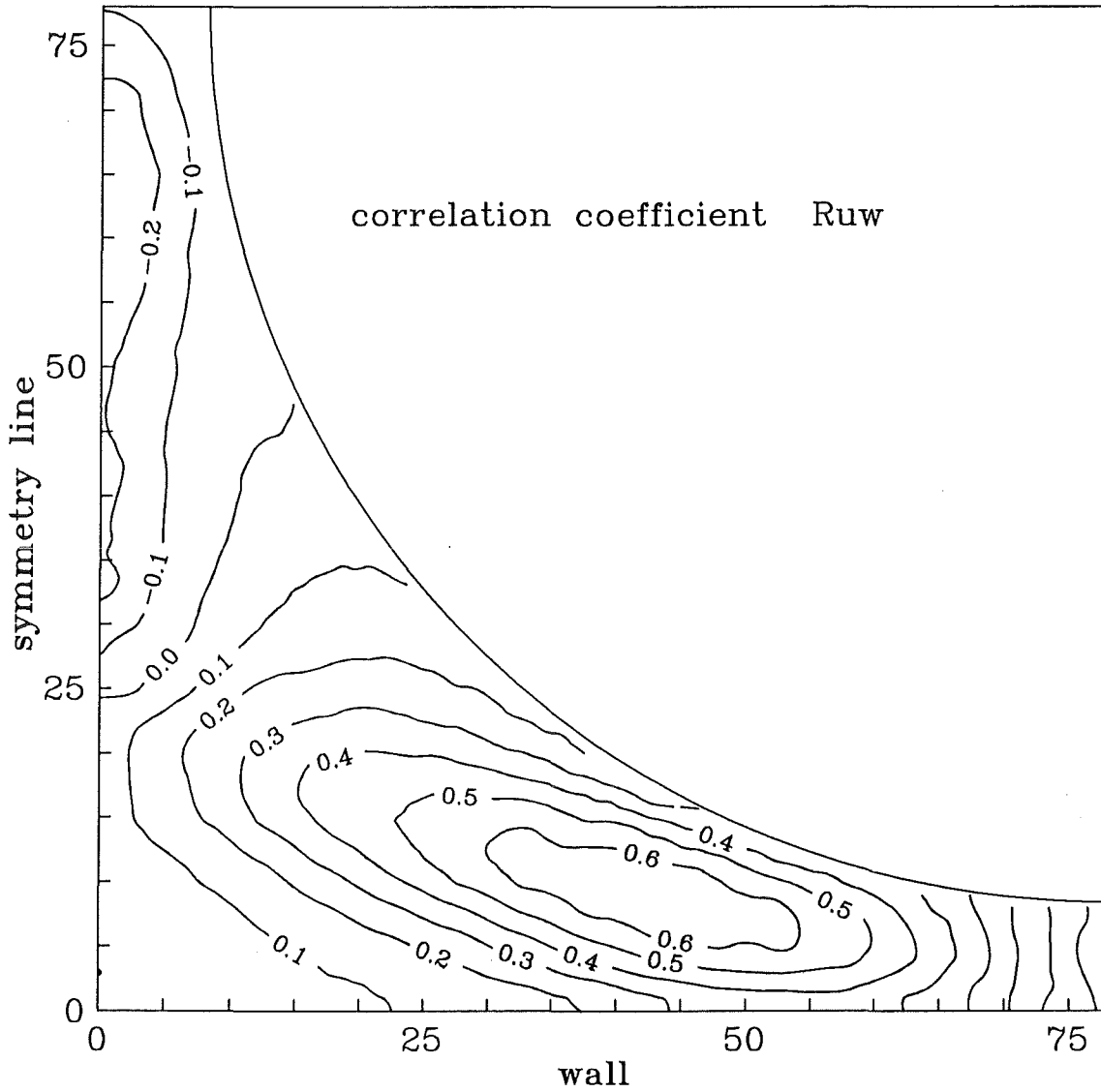


Abb.56 Höhenlinien des Korrelationskoeffizienten der Schubspannung parallel zur Wand im 4-Stabbündel (Einzeldrahtmethode)

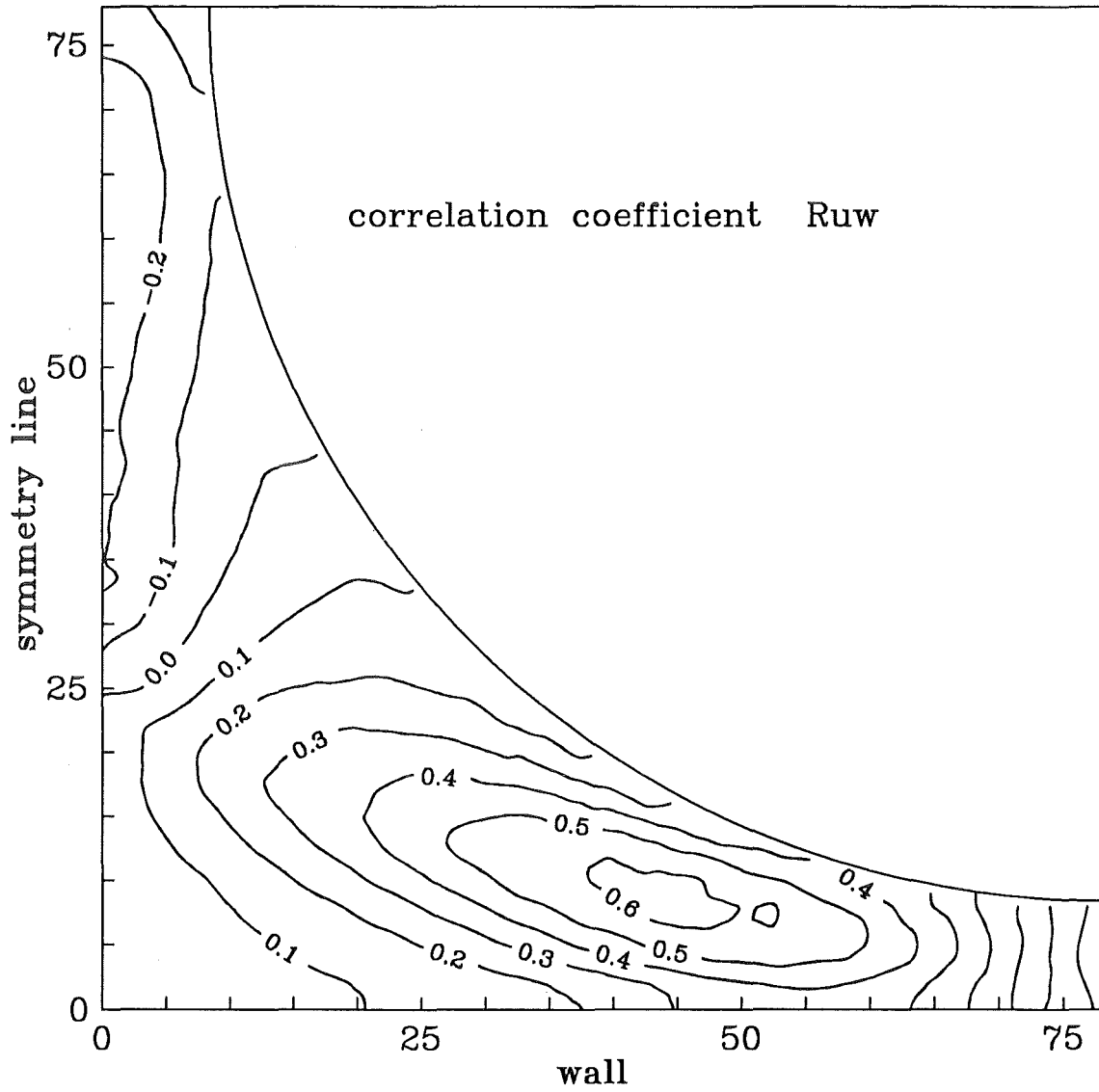


Abb.57 Höhenlinien des Korrelationskoeffizienten der Schubspannung parallel zur Wand im 4-Stabbündel (X-Drahtmethode)

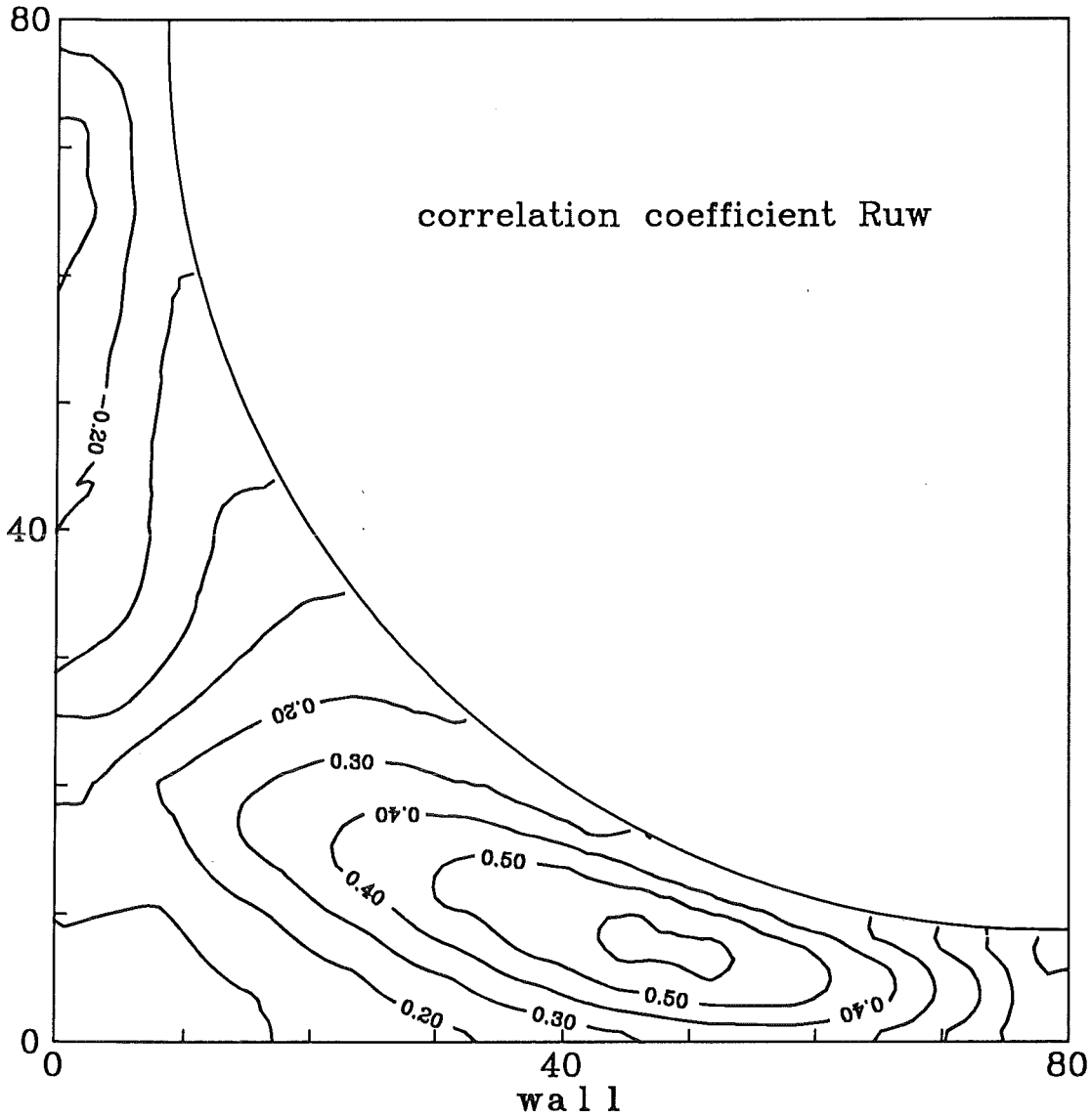


Abb.58 Höhenlinien des Korrelationskoeffizienten der Schubspannung parallel zur Wand im 37-Stabbündel (X-Drahtmethode)

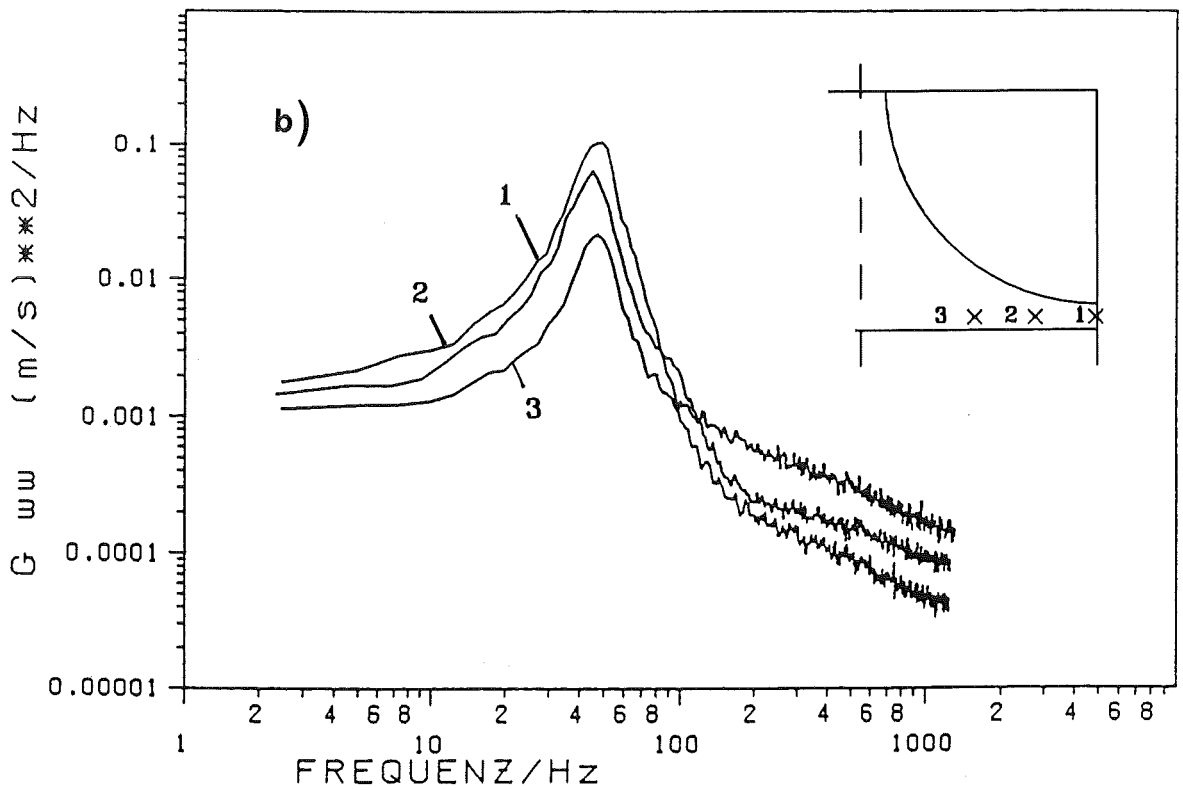
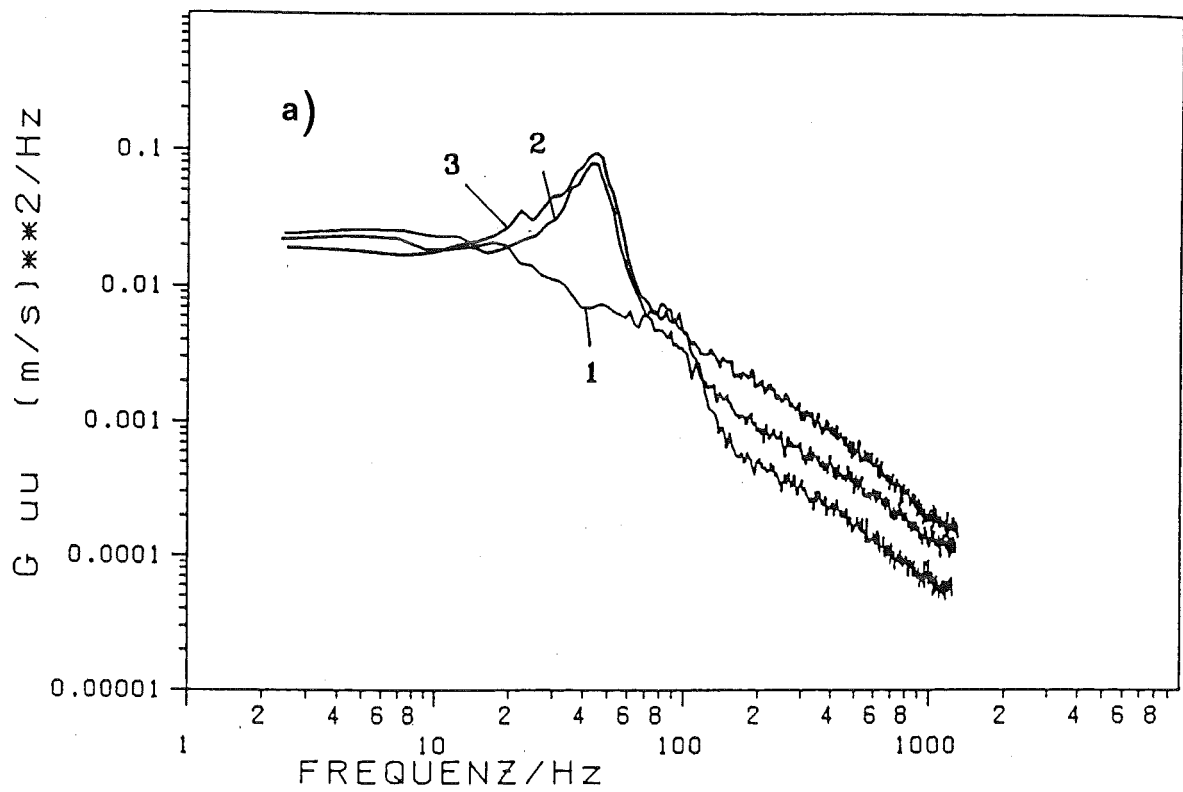


Abb.59 Autospektrale Leistungsdichte des wandparallelen und des axialen Geschwindigkeitsvektors im Spalt zwischen Stab und Wand im 4-Stabbündel

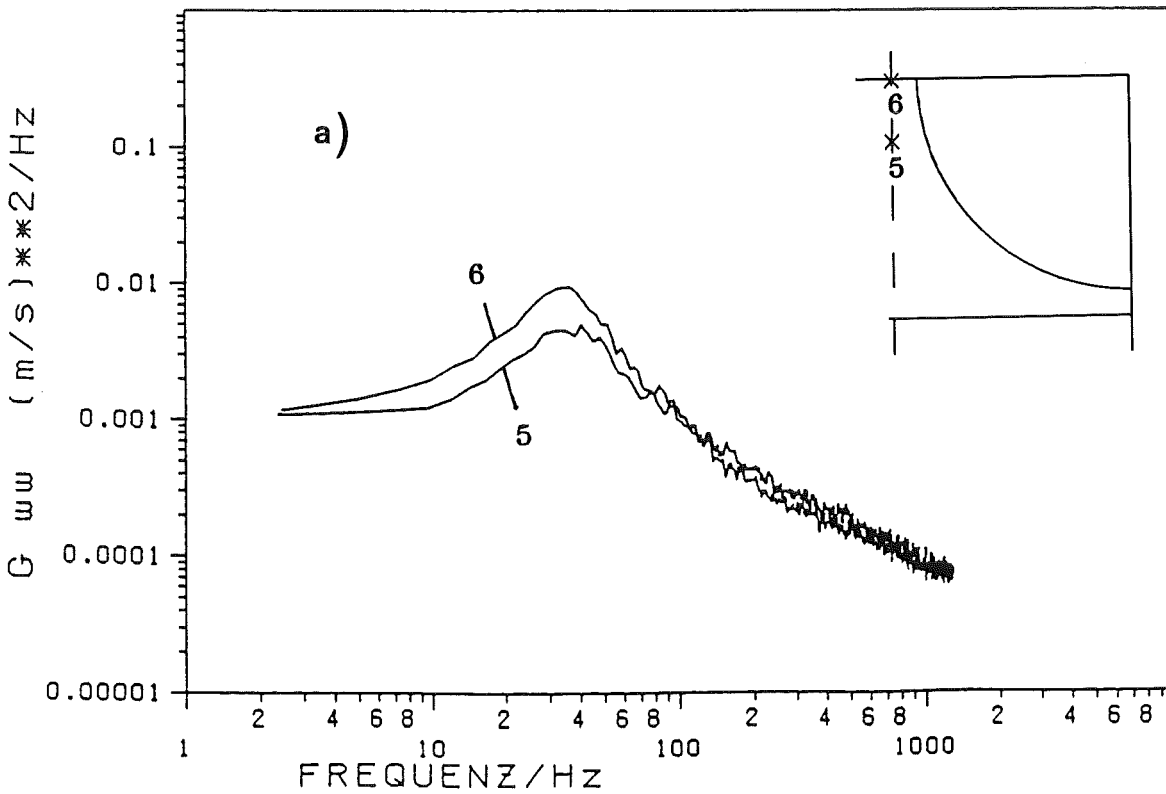
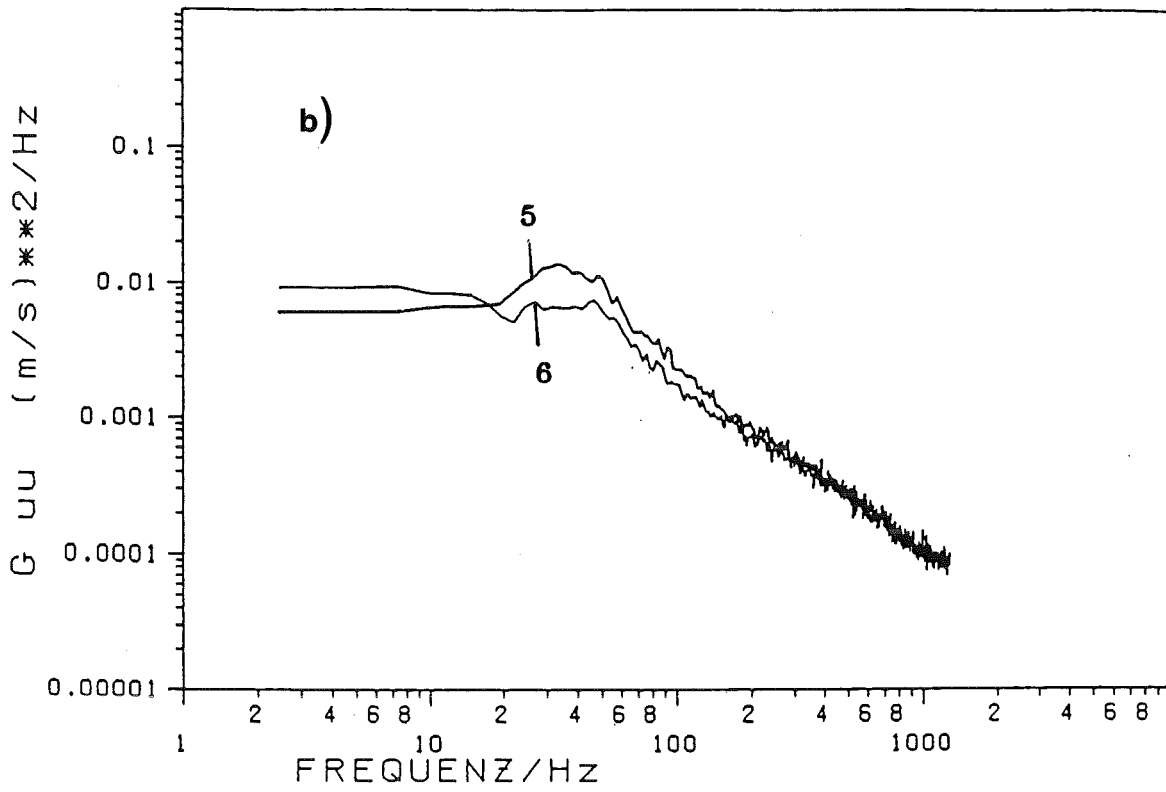


Abb.60 Autospektrale Leistungsdichte des wandparallelen (a) und des axialen (b) Geschwindigkeitsvektors im Spalt zwischen den Stäben im 4-Stabbündel

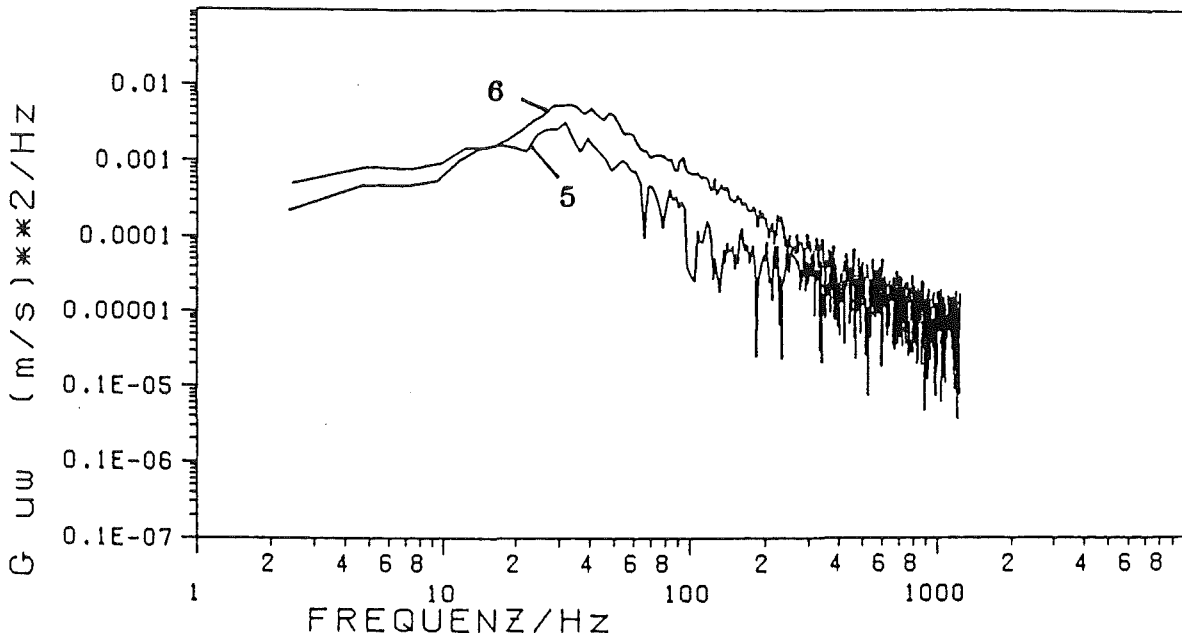
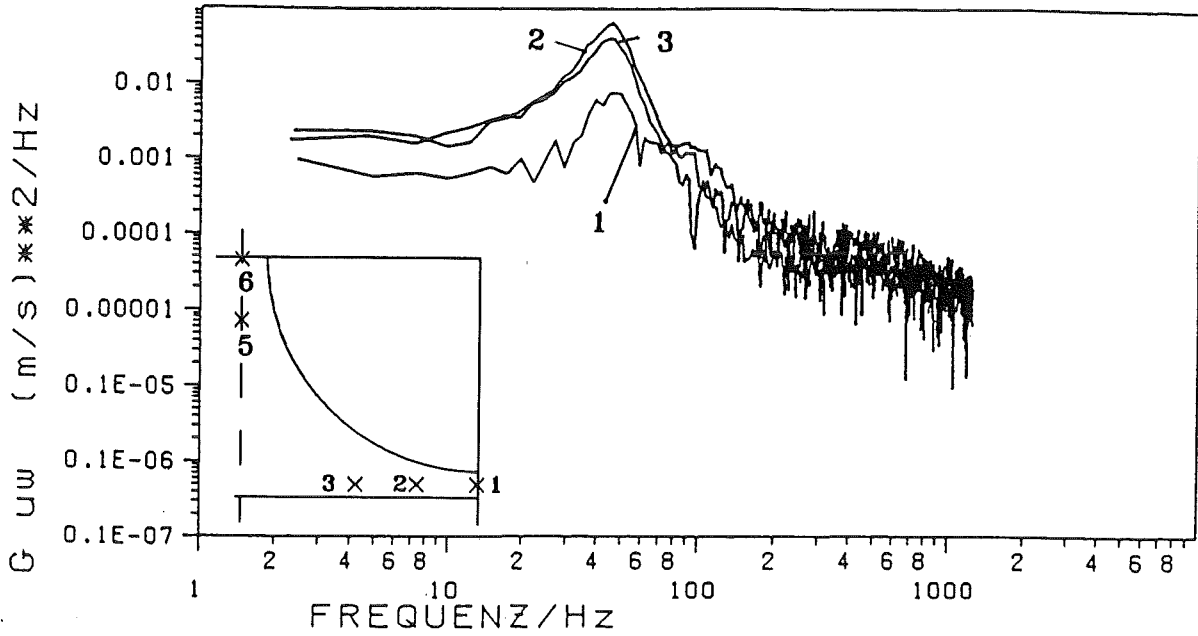


Abb.61 Kreuzspektrale Leistungsdichte des wandparallelen und des axialen Geschwindigkeitsvektors im Spalt zwischen den Stäben und im Spalt zwischen Stab und Kanalwand im 4-Stabebündel

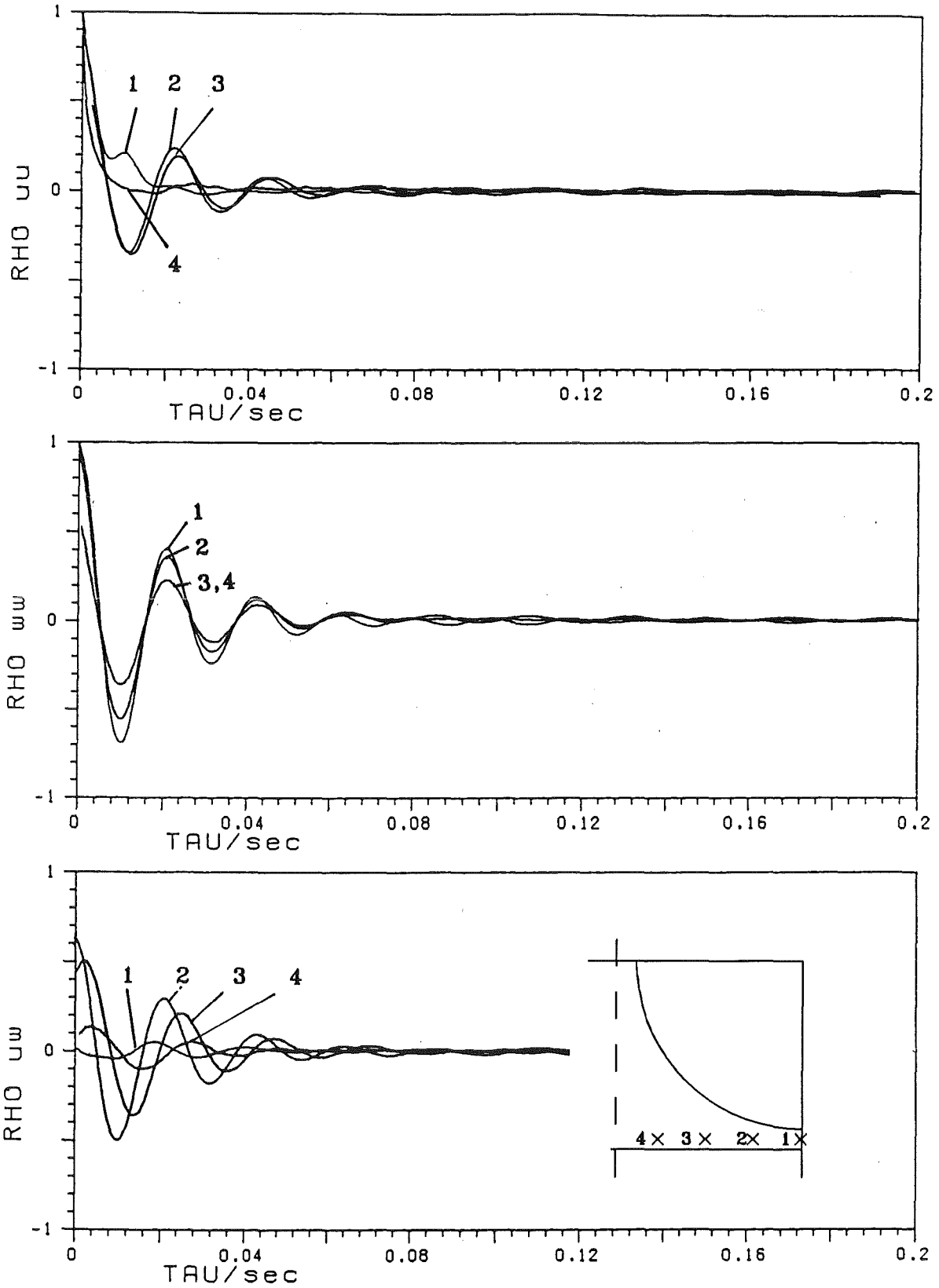


Abb.62 Auto- und Kreuzkorrelationskoeffizienten des wandparallelen und des axialen Geschwindigkeitsvektors im Spalt zwischen Stab und Kanalwand im 4-Stabbündel

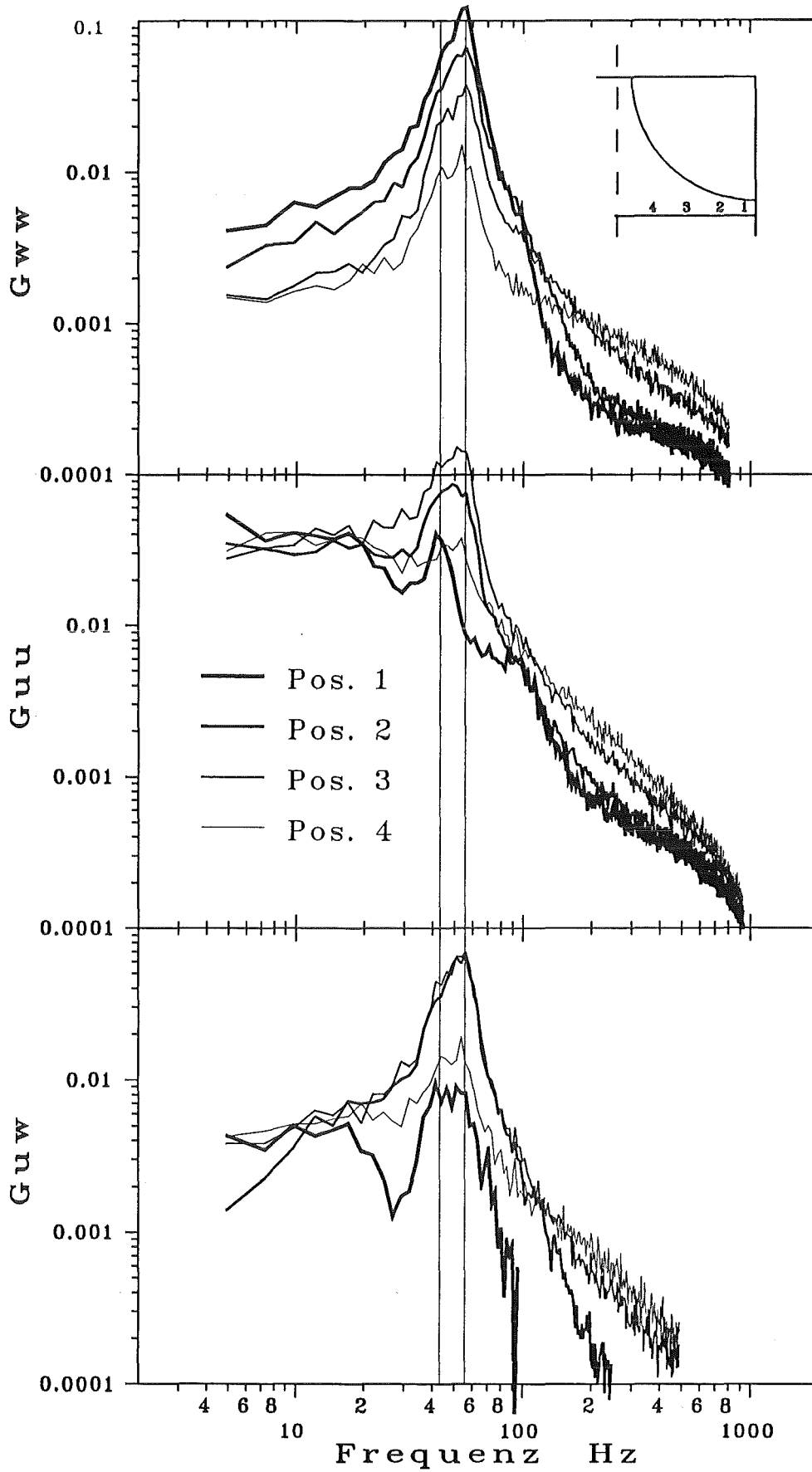


Abb.63 Auto- und Kreuzspektrale Leistungsdichte des wandparallelen und des axialen Geschwindigkeitsvektors im Spalt zwischen Stab und Wand im 37-Stabbündel

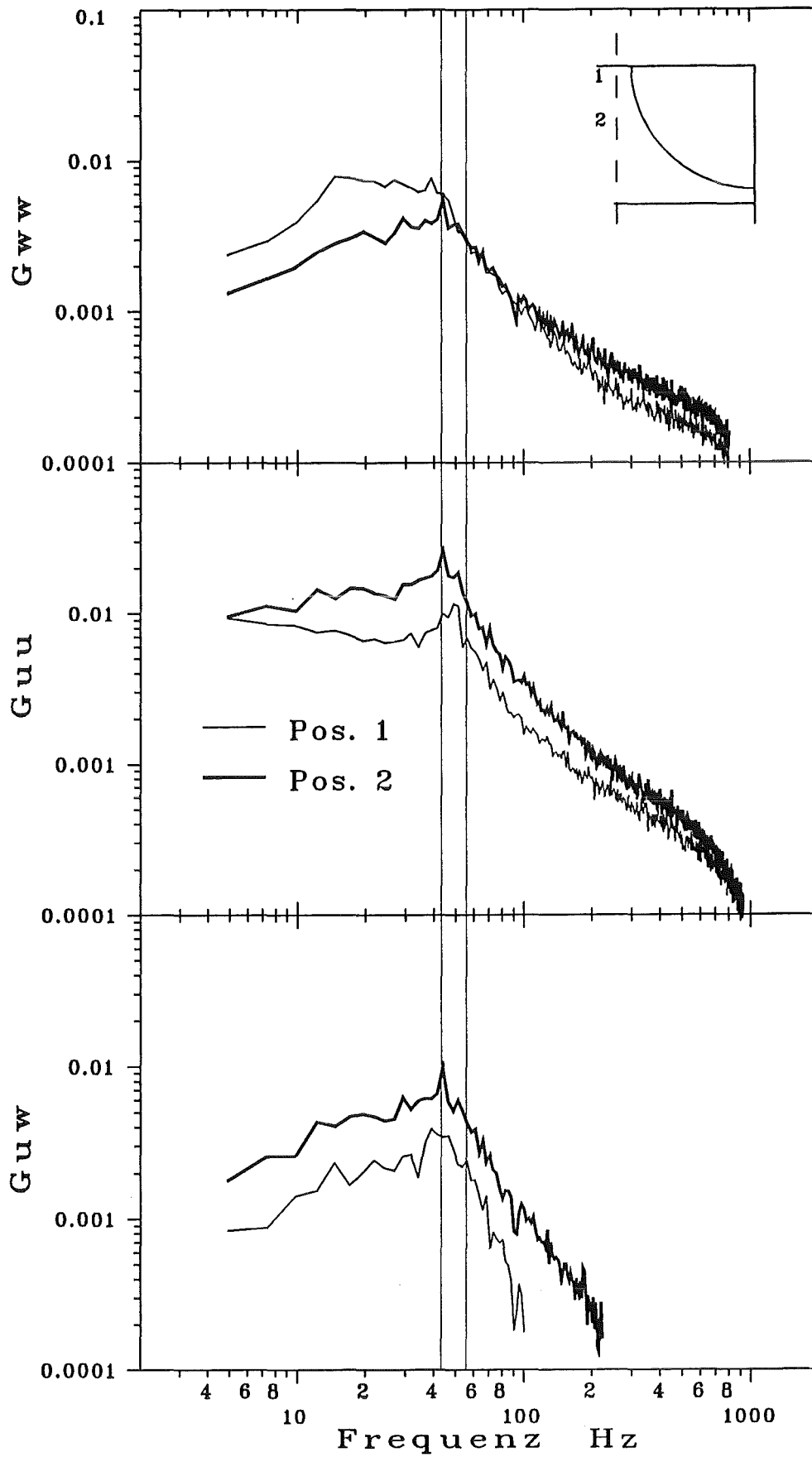


Abb.64 Auto- und Kreuzspektrale Leistungsdichte des wandparallelen und des axialen Geschwindigkeitsvektors im Spalt zwischen den Stäben im 37-Stabbündel

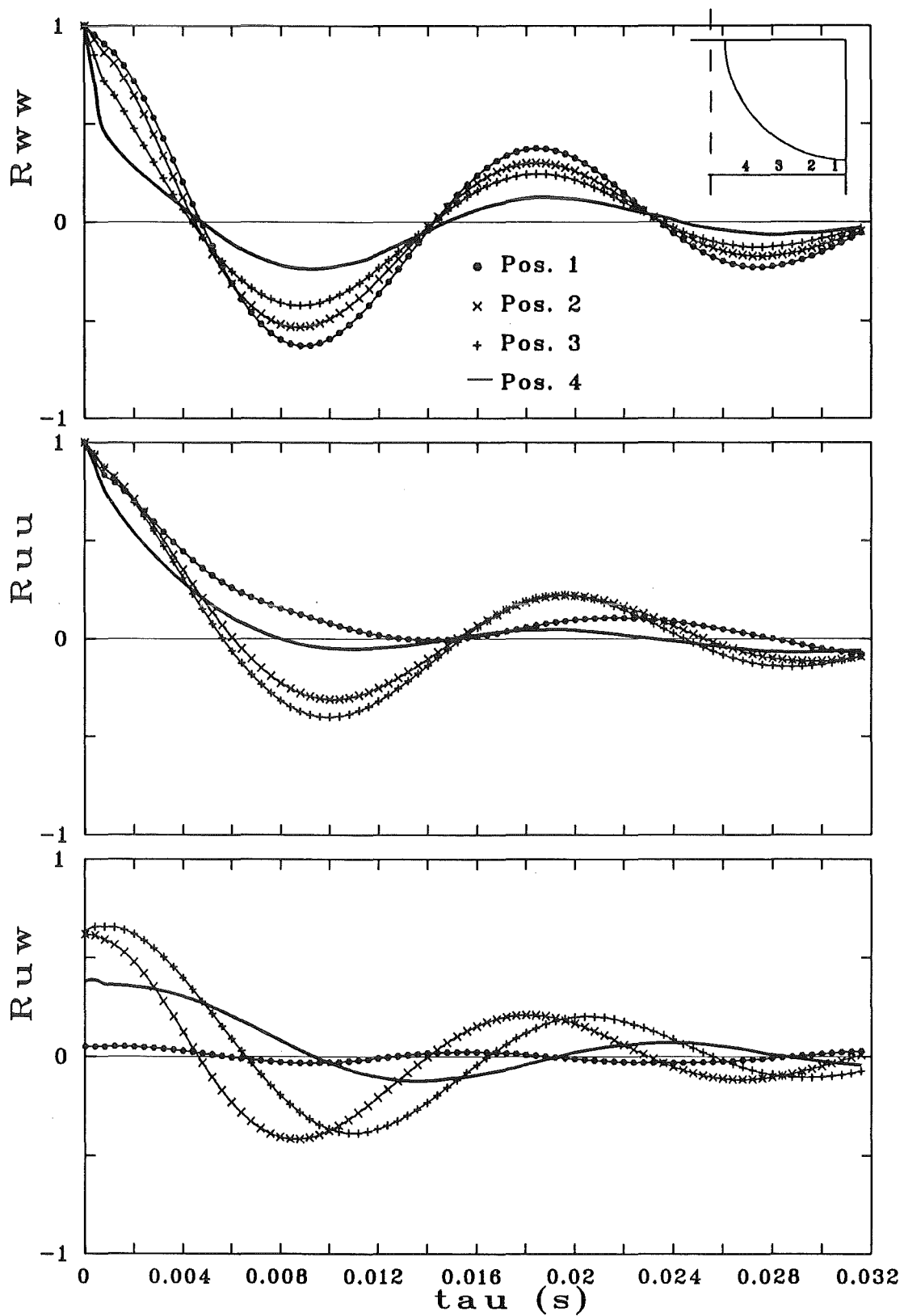


Abb.65 Auto- und Kreuzkorrelationskoeffizienten des wandparallelen und des axialen Geschwindigkeitsvektors im Spalt zwischen Stab und Kanalwand im 37-Stabbündel

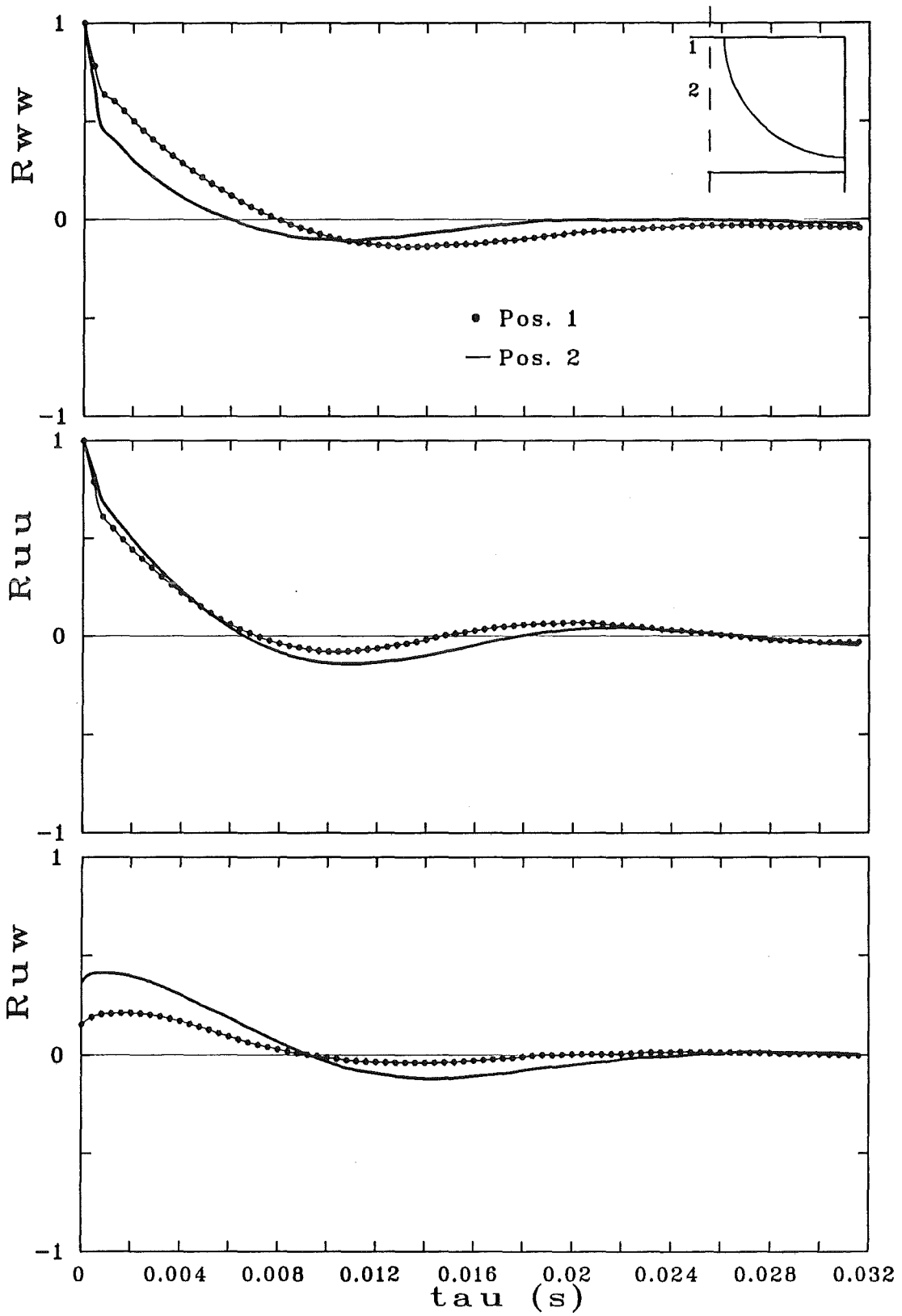


Abb.66 Auto- und Kreuzkorrelationskoeffizienten des wandparallelen und des axialen Geschwindigkeitsvektors im Spalt zwischen den Stäben im 37-Stabbündel

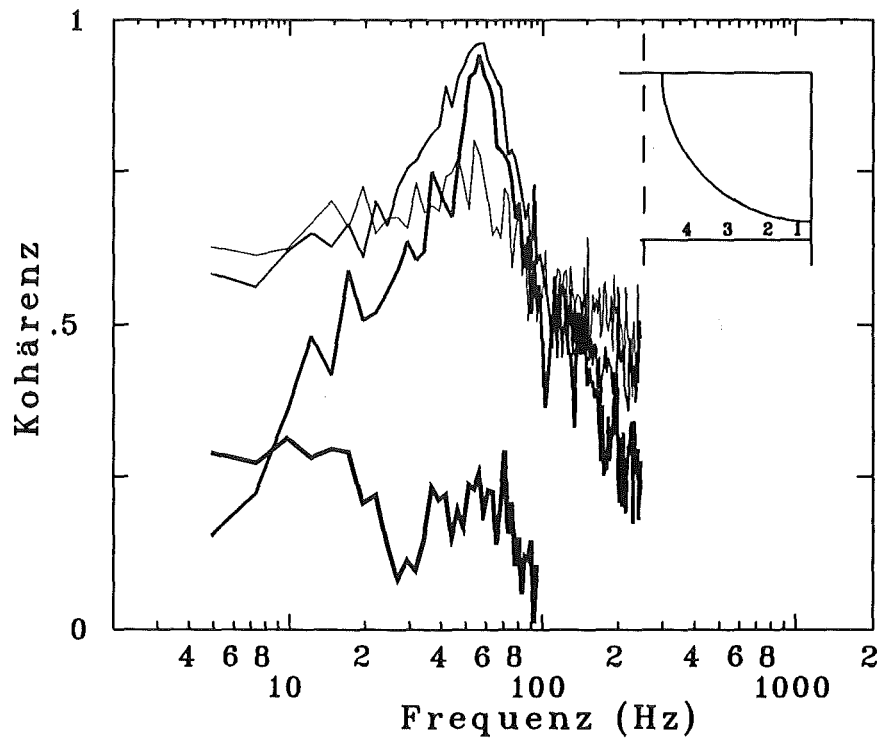
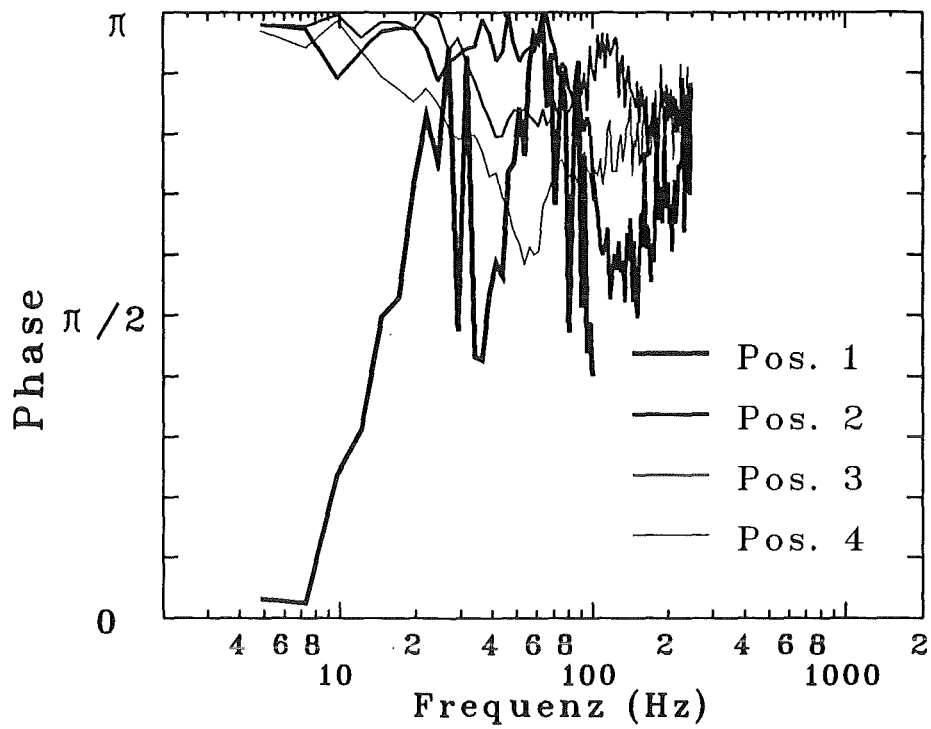


Abb.67 Kohärenzfunktion und Phasenwinkel zwischen den axialen und wandparallelen Geschwindigkeitskomponenten im Spalt zwischen Stab und Kanalwand im 37-Stabbündel

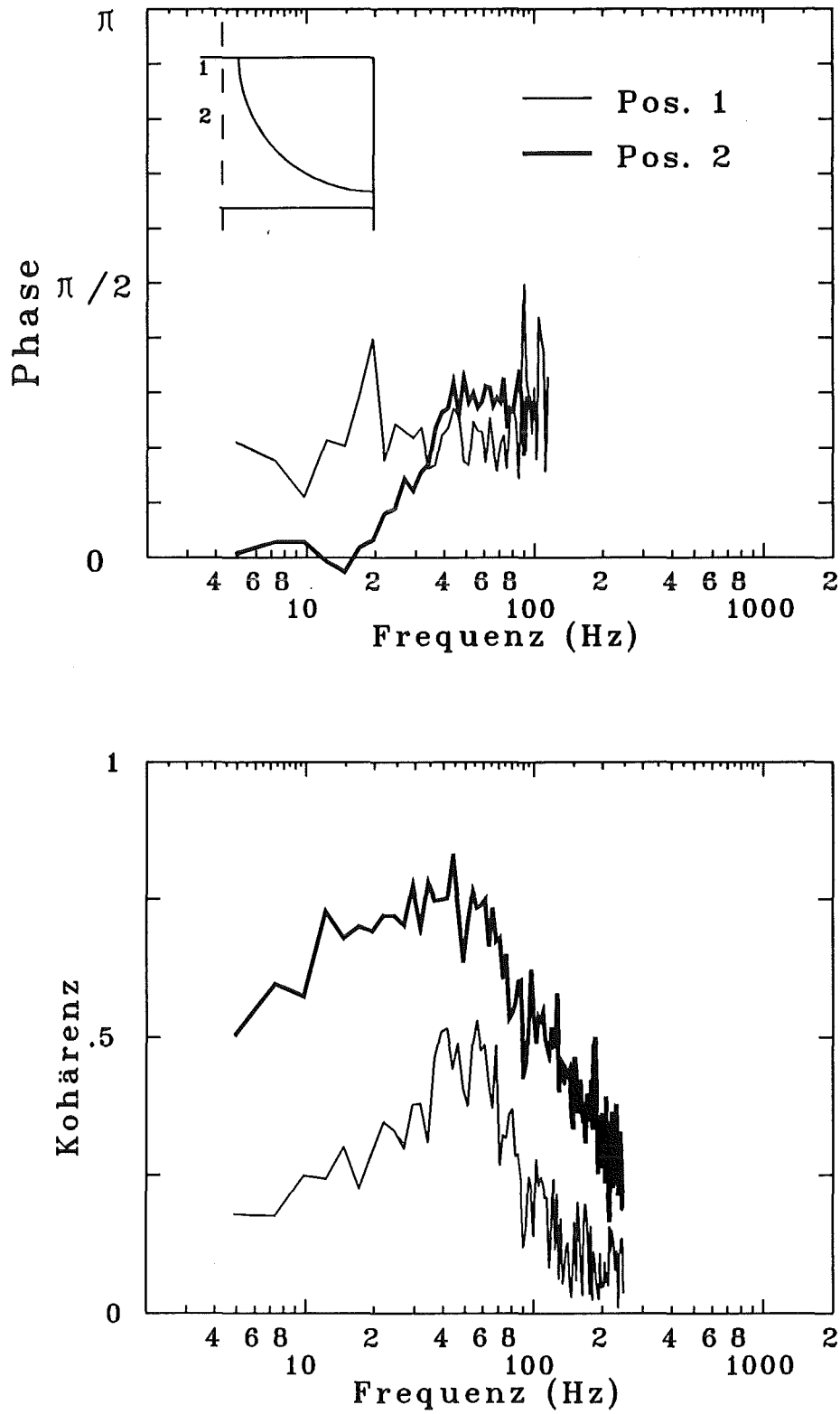


Abb.68 Kohärenzfunktion und Phasenwinkel zwischen den axialen und wandparallelen Geschwindigkeitskomponenten im Spalt zwischen den Stäben im 37-Stabbündel

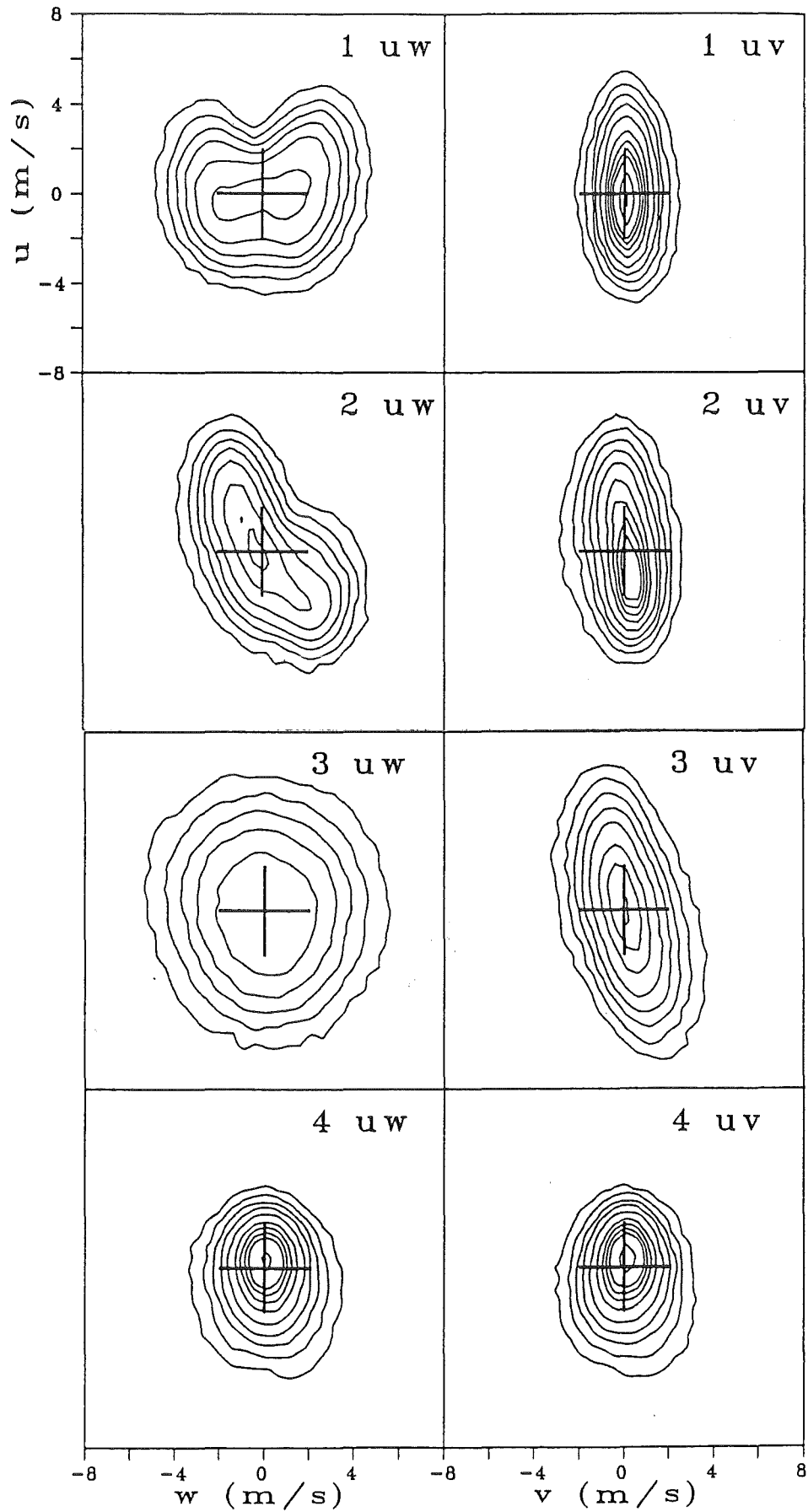


Abb.69 Verbundwahrscheinlichkeitsdichte zwischen der axialen und der wandparallelen bzw. wandsenkrechten Geschwindigkeitskomponente an verschiedenen Positionen im 4-Stabbündel (Positionen s. Abb.70)

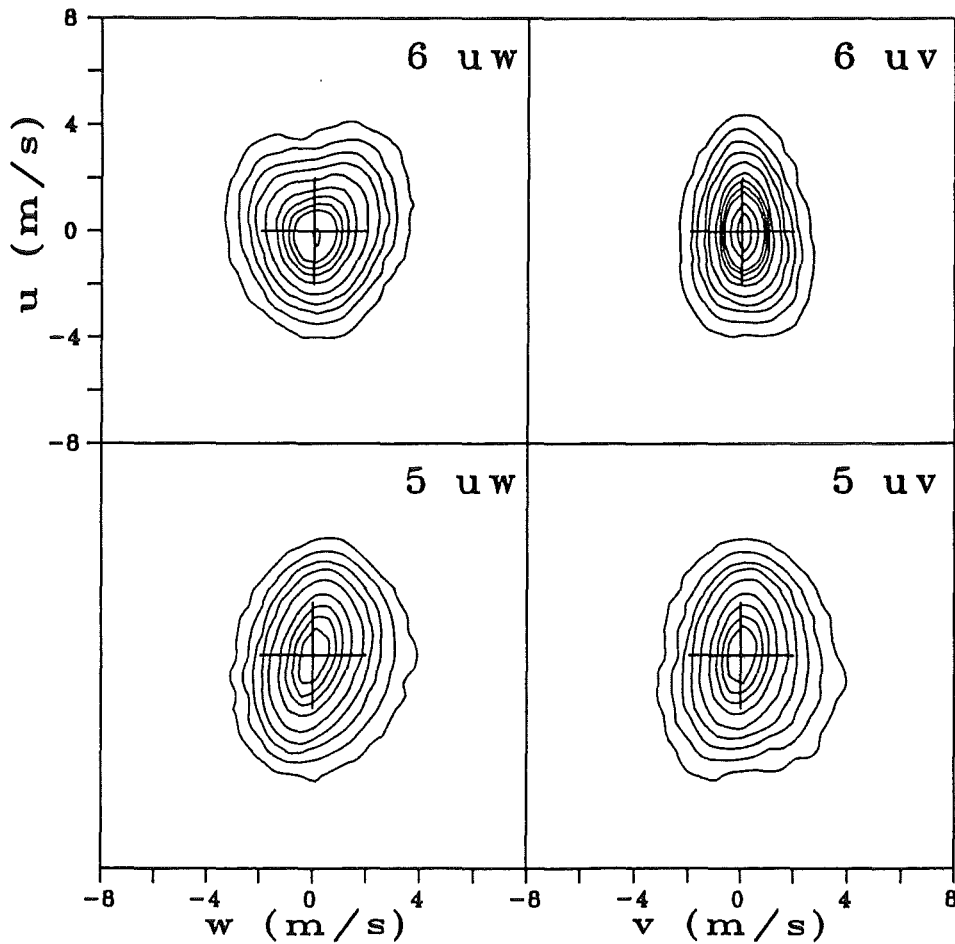
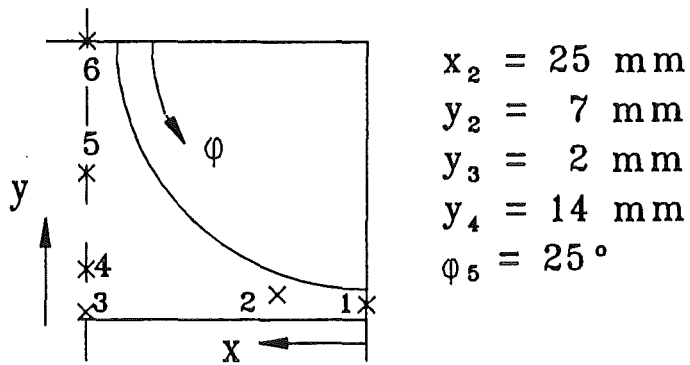


Abb.70 Verbundwahrscheinlichkeitsdichte zwischen der axialen und der wandparallelen bzw. wandsenkrechten Geschwindigkeitskomponente an verschiedenen Positionen im 4-Stabbündel

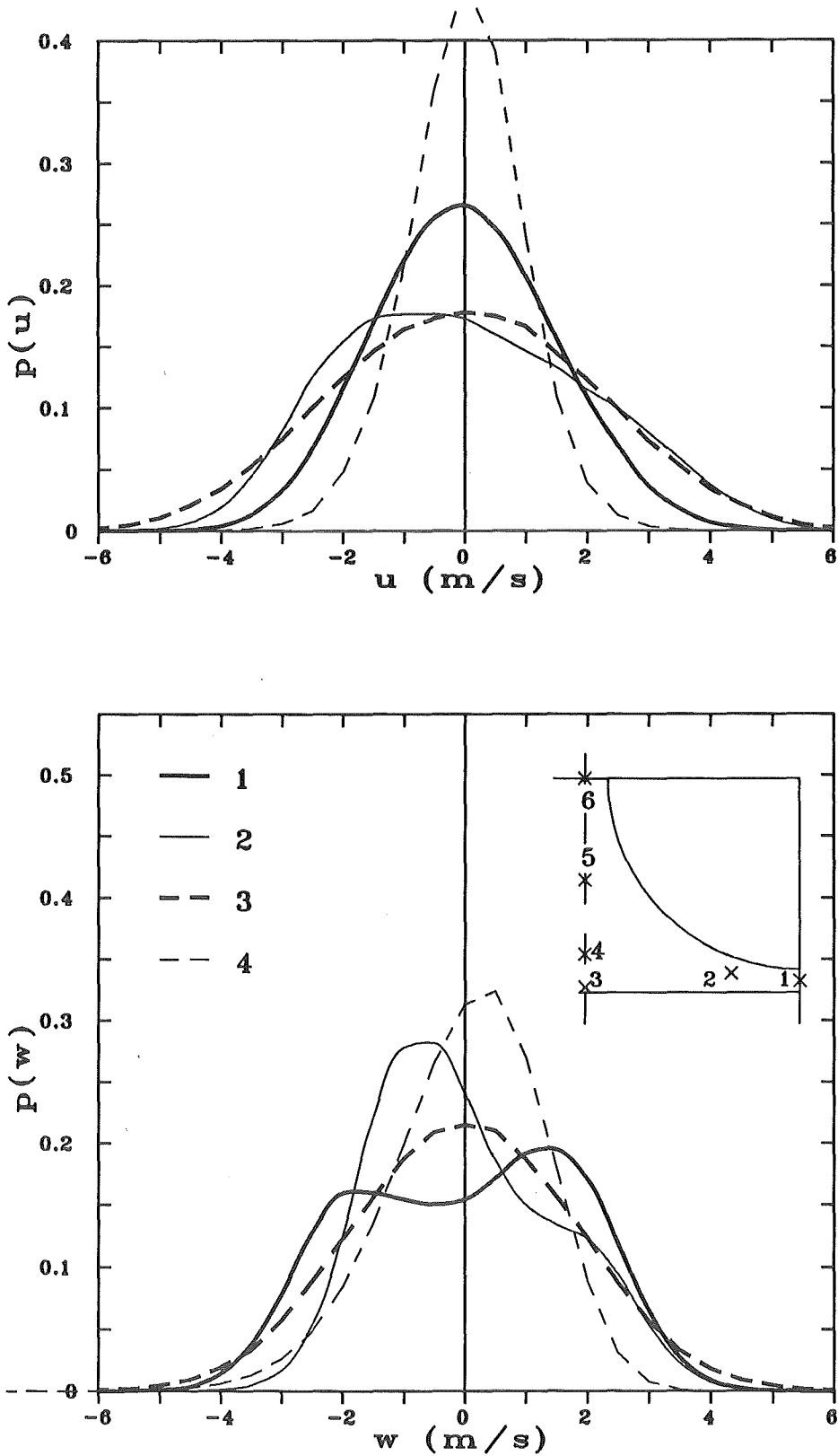


Abb.71 Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der axialen und der wandparallelen Geschwindigkeitskomponente in verschiedenen Positionen im 4-Stabbündel

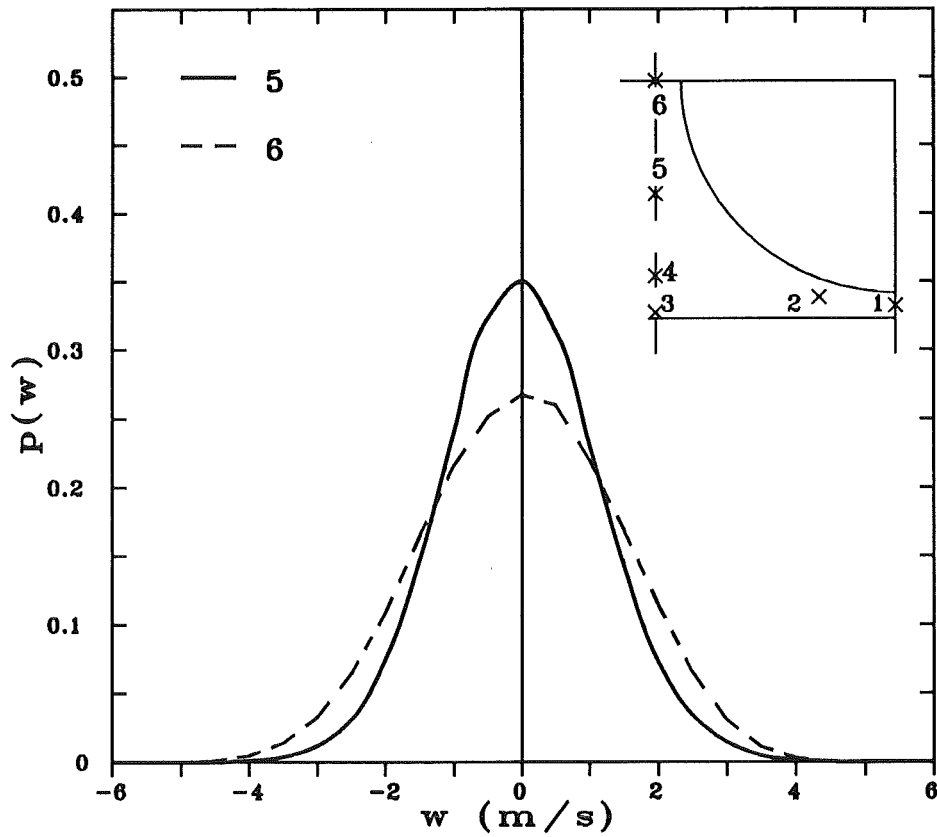
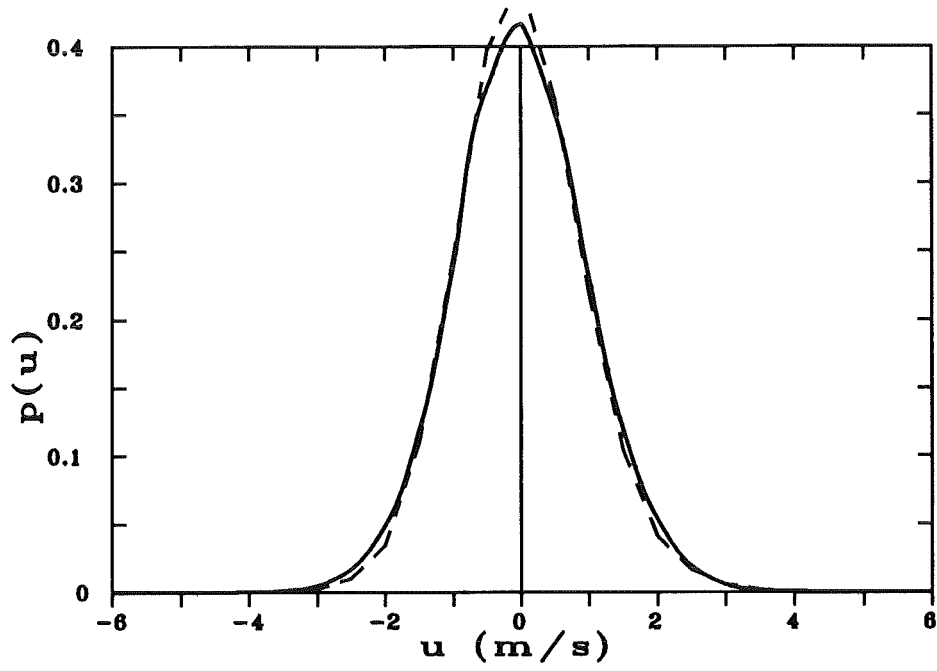


Abb.72 Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der axialen und der wandparallelen Geschwindigkeitskomponente in verschiedenen Positionen im 4-Stabbündel

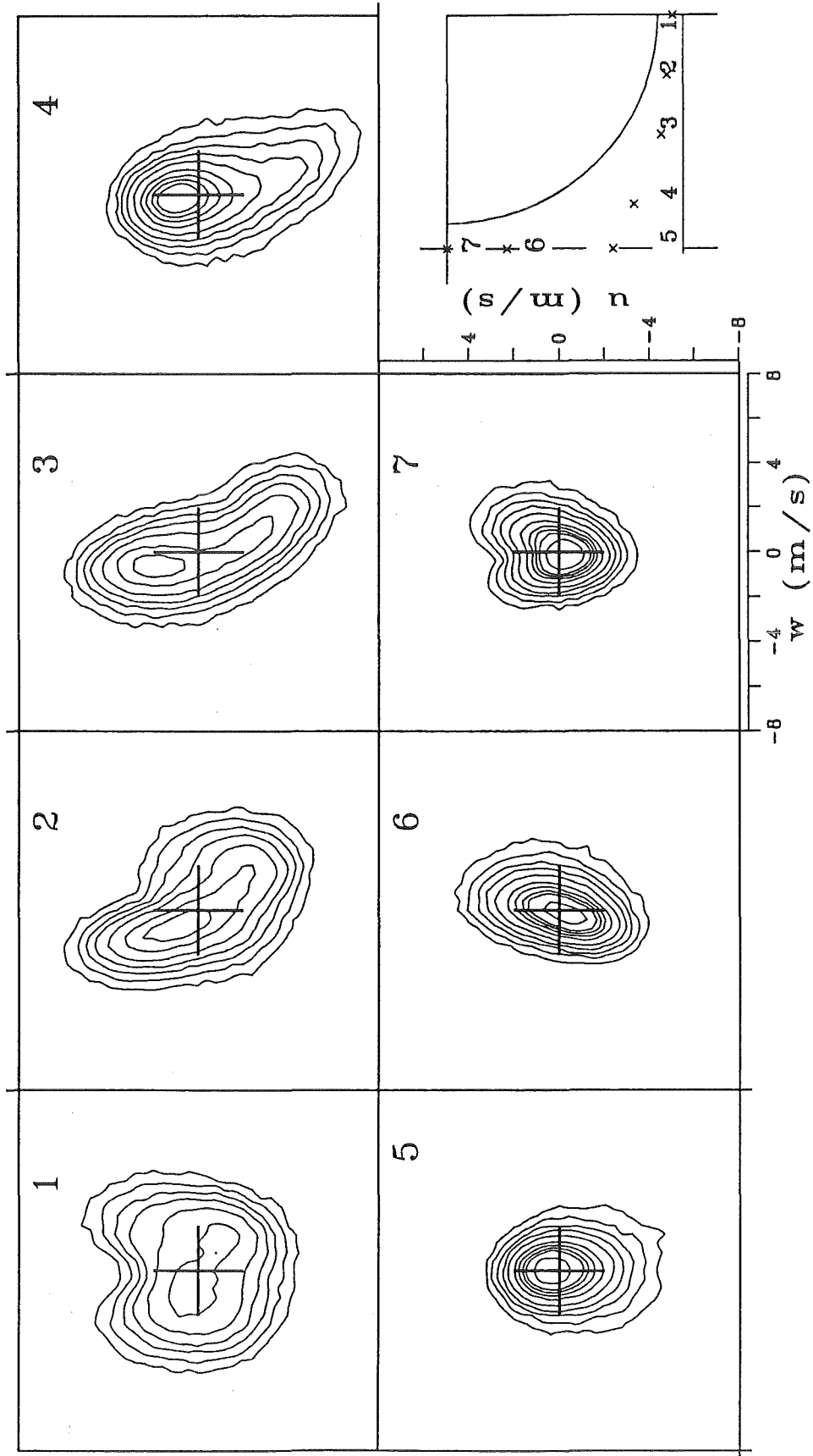


Abb.73 Verbundwahrscheinlichkeitsdichte zwischen der axialen und der wandparallelen Geschwindigkeitskomponente an verschiedenen Positionen im 37-Stabbündel

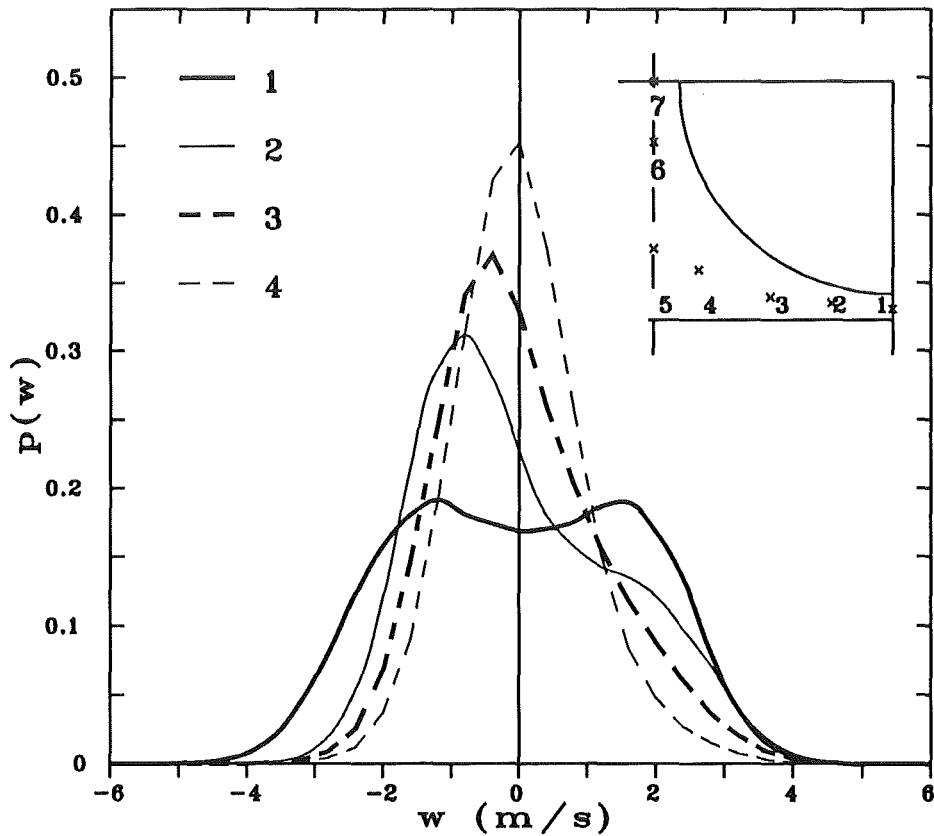
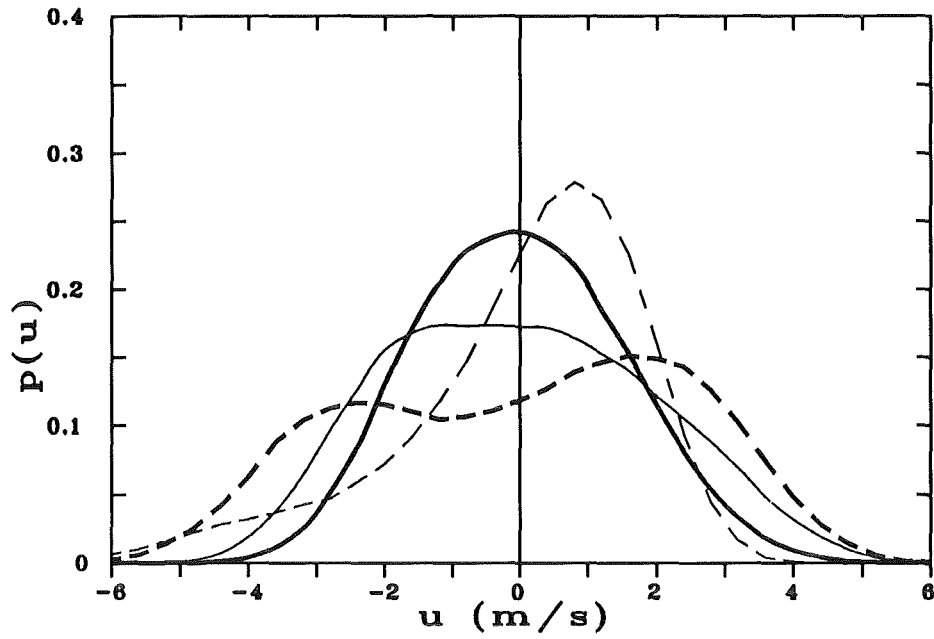


Abb.74 Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der axialen und der wandparallelen Geschwindigkeitskomponente in verschiedenen Positionen im 37-Stabbündel

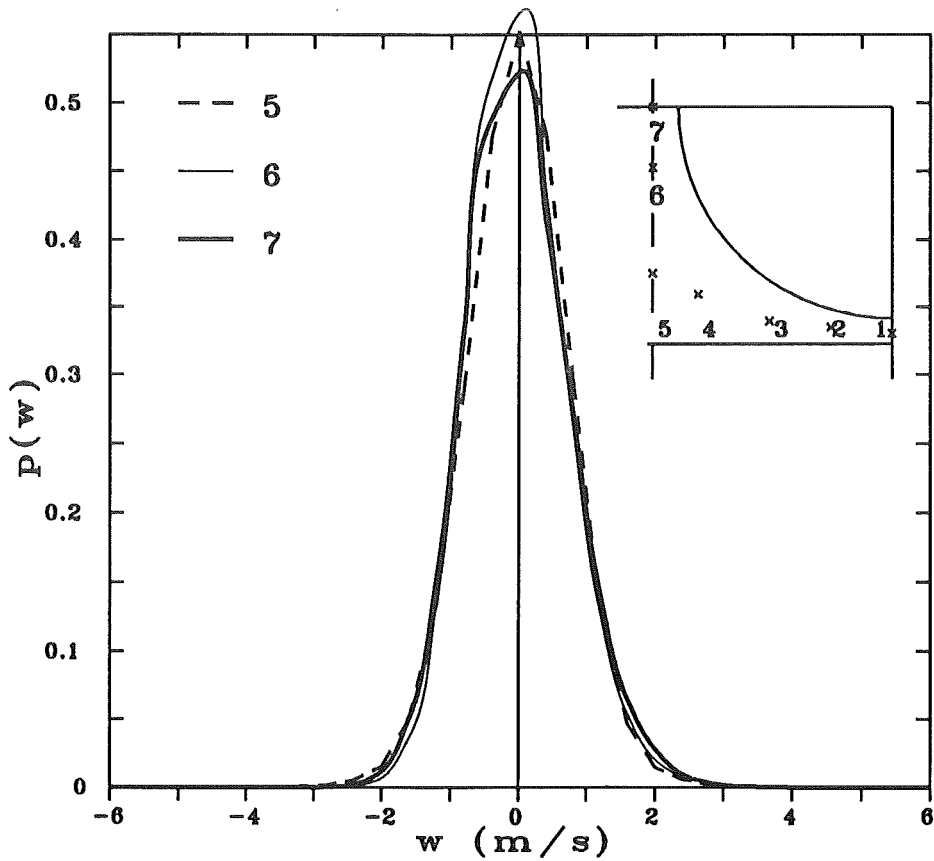
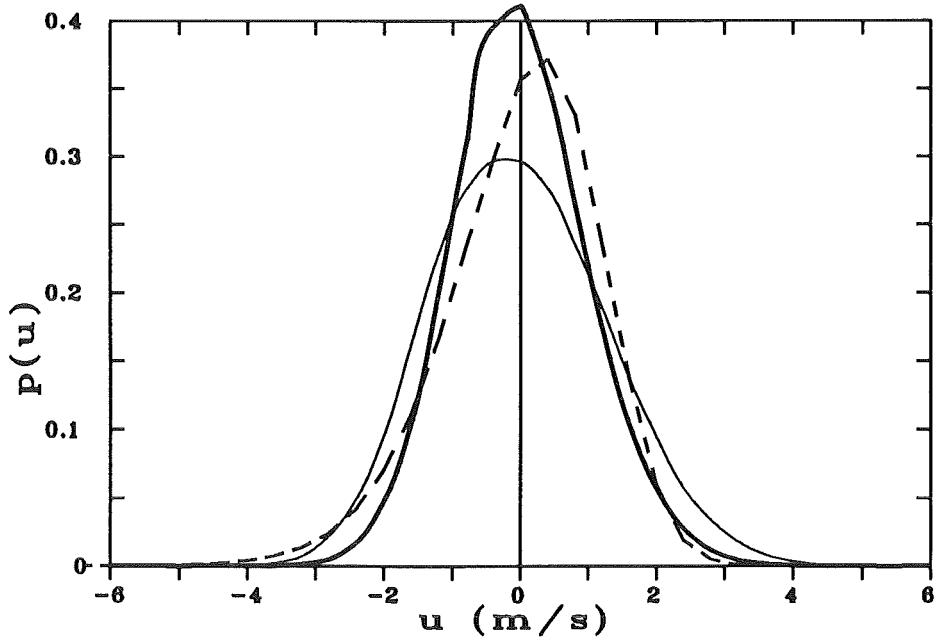


Abb.75 Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der axialen und der wandparallelen Geschwindigkeitskomponente in verschiedenen Positionen im 37-Stabbündel

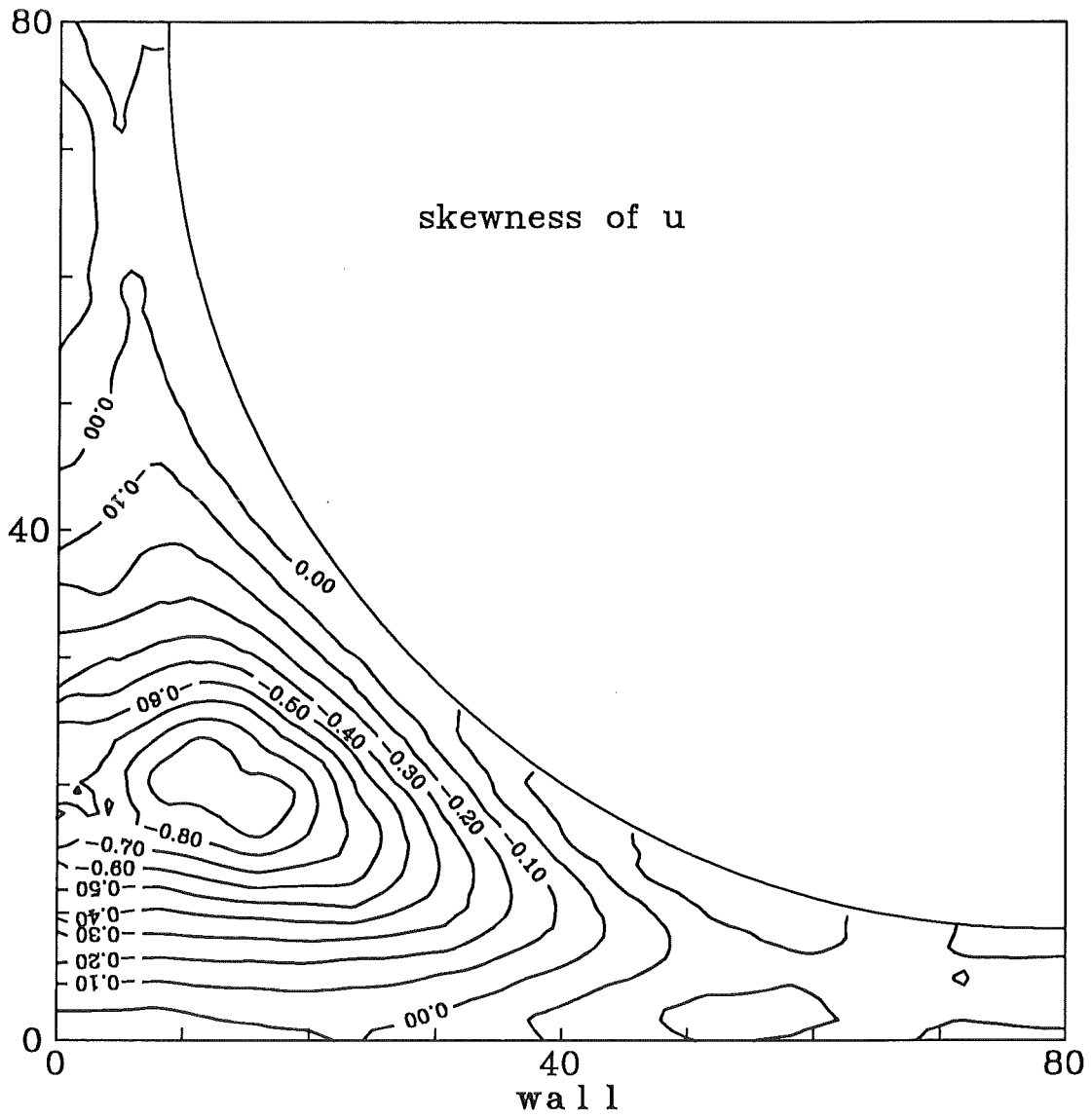


Abb.76 Höhenlinien der Schiefe der axialen Geschwindigkeitskomponente im 37-Stabbündel

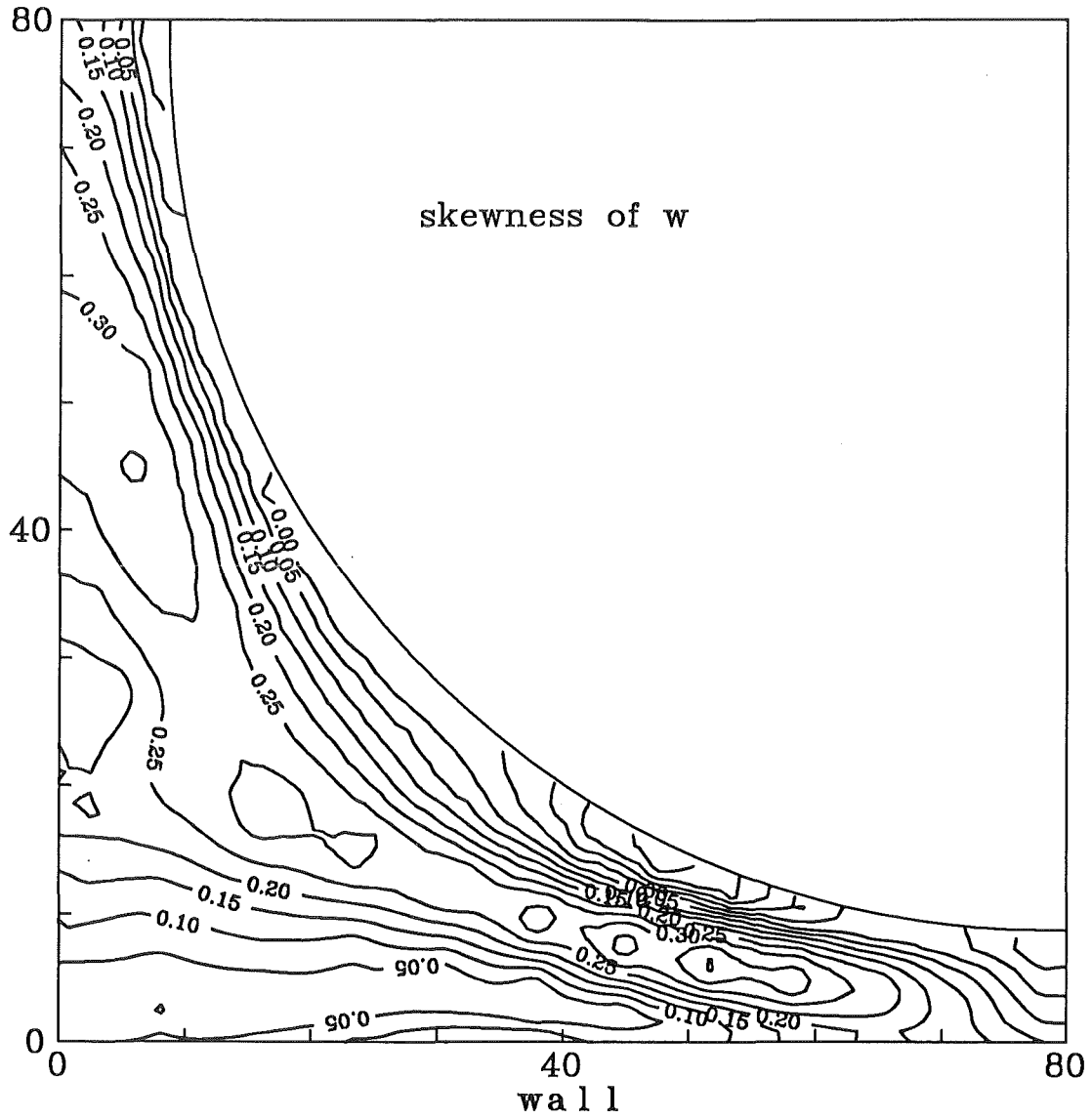


Abb.77 Höhenlinien der Schiefe der wandparallelen Geschwindigkeitskomponente im 37-Stabbündel