

KfK 4596
Juli 1989

**Experimentelle Untersuchung
der Einflüsse eines
Gitterabstandshalters mit starker
Randversperrung auf die
Geschwindigkeits- und
Turbulenzverteilung in
Wandkanälen von Stabbündeln**

K. Rehme
Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Schneller Brüter

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Schneller Brüter

KfK 4596

Experimentelle Untersuchung der Einflüsse eines Gitterabstandshalters mit
starker Randversperrung auf die Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilung in
Wandkanälen von Stabbündeln

K. Rehme

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
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 in zwei Wandkanälen ($P/D = 1.223$; $W/D = 1.183$) in drei axialen Ebenen Geschwindigkeits-, Wandschubspannungs- und Turbulenzverteilungen gemessen. Dabei wurde ein SNR-typisches Abstandshaltergitter, das jedoch im Gegensatz zu früheren Untersuchungen eine einseitige starke Randversperrung aufweist, zur Fixierung der Stäbe verwendet. Die Messungen erfolgten für Verhältnisse von Abstand zwischen Abstandshaltergitter und Meßebene zu hydraulischem Durchmesser von $L/D_h = 84.9, 62.8$ bzw. 40.4 . Die Reynoldszahl der Untersuchungen betrug $Re = 1.4 \times 10^5$.

Im Vergleich zu den früheren Untersuchungen im Nachlauf eines Abstandshaltergitters ohne starke Randversperrung ergeben sich noch für $L/D_h = 84.9$ deutliche Auswirkungen auf die Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen. Für kleinere L/D_h wachsen die Auswirkungen durch die Randversperrung an.

Experimental investigation of the effects of a spacer grid with a strong partial blockage on the distributions of the velocity and turbulence in wall subchannels of a rod bundle

Abstract

Measurements of the mean velocity, of the wall shear stresses, and of the turbulence have been performed in two wall subchannels ($P/D = 1.223$; $W/D = 1.183$) of a rod bundle of four parallel rods arranged in a rectangular channel for three axial planes. A spacer grid of the SNR-type was inserted in the rod bundle to fix the rods. In contrast to previous investigations, however, the spacer grid was partially blocked. The measurements were performed at ratios of distance between the spacer grid and the measuring plane and the hydraulic diameter of $L/D_h = 84.9, 62.8, \text{ and } 40.4$, respectively. The Reynolds number of this investigation was $Re = 1.4 \times 10^5$.

The distributions of the velocity and turbulence are significantly affected even for $L/D_h = 84.9$ in comparison with the previous results downstream of a spacer grid without a partial blockage. The effects of the blockage increase with decreasing L/D_h .

1. Einleitung

Experimentelle Untersuchungen der Strömungsverteilung in Stabbündeln haben gezeigt, daß die Umverteilung der Massenströme zwischen den einzelnen Unterkanälen erst nach sehr langen Einlaufängen (Länge zu hydraulischem Durchmesser $L/D_h > 100$) abgeschlossen ist /1,2/. Das bedeutet, daß in den Brennelementbündeln von Kernreaktoren ein vollständig eingelaufener Zustand nicht auftritt, weil durch Abstandshalter, die zur Fixierung der Brennstäbe erforderlich sind, die sich ausbildende Strömungsverteilung immer wieder gestört wird. Aus experimentellen Untersuchungen ist bekannt, daß Abstandshaltergitter in SNR-typischen Brennelementbündeln eine z.T. massive Massenstromumverteilung zwischen den Unterkanälen hervorrufen /3/.

Für ein sicheres und zuverlässiges Betriebsverhalten der Brennelementbündel ist die Vorhersage der detaillierten Temperaturverteilung nötig. Diese thermo- und fluiddynamische Analyse erfolgt durch die Lösung der Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie. Die verwendeten Methoden kann man in drei Kategorien einteilen:

- Unterkanalanalyse,
- Analyse nach dem Modell eines porösen Körpers (porous body) und
- detaillierte Analyse.

Die grundlegende Vereinfachung von Unterkanalanalyse und der Methode des porösen Körpers ist die Vernachlässigung der Geschwindigkeits- und Temperaturverteilung innerhalb der Kontrollvolumina. Über die Kontrollvolumina werden Massenstrom und Fluidtemperaturen gemittelt. Die meisten nach diesen Methoden berechneten Temperaturverteilungen an der Hüllrohroberfläche sind zu ungenau für die sich anschließende Strukturanalyse /4/, weil

- die Auflösung der berechneten Temperaturverteilung in Umfangsrichtung nicht fein genug ist und
- empirische Korrelationen für die Nusseltzahlen verwendet werden, um Oberflächentemperaturen zu berechnen, die über einen Abschnitt auf der Hüllrohroberfläche bzw. an der Kastenwand gemittelt sind. Die dazu verwendeten Korrelationen sind meistens für die betrachteten Geometrien nicht gültig /4/.

Rechenprogramme für eine detaillierte Analyse, bei der die drei-dimensionalen Geschwindigkeits- und Temperaturverteilungen im Fluid und den Strukturen ermittelt werden, werden gegenwärtig entwickelt /5,6/. Für die Entwicklung dieser Rechenprogramme sind experimentelle Daten über Geschwindigkeits-, Turbulenz- und Temperaturverteilungen in Unterkanälen von Stabbündeln nötig.

Weil bislang über die Turbulenzstruktur im Nachlauf eines Gitterabstandshalters keine experimentellen Ergebnisse bekannt sind, wurde ein experimentelles Programm gestartet, um Testdaten für die Rechenprogramme in bezug auf Geschwindigkeits-, Wandschubspannungs- und Turbulenzverteilungen für verschiedene axiale Ebenen stromabwärts von einem SNR-typischen Abstandshaltergitter bereitzustellen. Voraussetzung für eine Berechnung der detaillierten Temperaturverteilung ist nämlich die hinreichend genaue Berechnung der Geschwindigkeitsverteilung.

Bei der Unterkanalanalyse ergibt sich, daß die Umverteilung der Massenströme zwischen den Unterkanälen im Nachlauf einer Blockade nur sehr unvollkommen beschrieben werden kann. Das liegt im wesentlichen daran, daß die Mischungskoeffizienten nur ungenügend genau bekannt sind. Um für die Validierung der Unterkanalanalyse belastbare experimentelle Daten zur Verfügung zu stellen, werden die bisher durchgeführten Untersuchungen im Nachlauf eines SNR-typischen Abstandshalters /7,8,9,10/ durch entsprechende Messungen hinter einem SNR-typischen Abstandshalter mit starker Randversperrung ergänzt.

2. Teststrecke

Die Untersuchungen wurden an der SIROCCO (= Spacer In Rod Cluster data Compilen)-Anlage, bestehend aus einem Stabbündel von vier parallelen Rohren von $D = 139.0$ mm Durchmesser, durchgeführt, die symmetrisch in einem Rechteckkanal mit den Abmessungen 700 mm x 190 mm angeordnet waren (Abb.1). Das Stababstandsverhältnis betrug $P/D = 1.223$ und das Wandabstandsverhältnis $W/D = 1.183$. Der Kanal ist ebenso wie die Rohre aus vier Schüssen zusammengesetzt. Die gesamte Länge beträgt $H = 7800$ mm.

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.

Der Abstandshalter ist in SNR-typischer Geometrie ausgeführt (Abb.2). Er wurde als Schweißkonstruktion aus den in Aluminium gefertigten Segmenten hergestellt. Die Höhe des Abstandshalters beträgt $h = 300$ mm. Auf der einen langen Kanalseite ist im Gegensatz zu den früheren Messungen /7-10/ der Raum zwischen der Abstandshalterstruktur und den Kanalwänden über die gesamte Abstandshalterhöhe vollständig blockiert (schraffiert in Abb.2). Die Versperrung in Abstandshaltermitte ist bezogen auf den gesamten Strömungsquerschnitt dadurch auf 35.8% gegenüber 18.1% bei den früheren Messungen und damit auf fast das doppelte angestiegen. Am Ein- und Austritt des Abstandshalters beträgt die Versperrung jetzt 30.0% gegenüber 10.8% vorher.

In dem Wandkanal, der aus den Quadranten Q2 und Q3 (Abb.2) gebildet wird, ist die Versperrung mit 18.1% in Abstandshaltermitte gleich geblieben. Dagegen ist die Versperrung im Wandkanal, der aus den Quadranten Q1 und Q4 besteht, von 18.1% auf 52.4% angestiegen.

Die Messungen erfolgen in den beiden erwähnten Wandkanälen, die aus den Quadranten Q1 bis Q4 gebildet werden. Stets wird im offenen Austrittsquerschnitt des Kanals (Abb.1) gemessen. Damit in mehreren Ebenen im Nachlauf des Abstandshalters gemessen werden kann, wird der Abstandshalter

schrittweise vom Eintritt in den Strömungskanal in Richtung Kanalaustritt verschoben.

3. Versuchsdurchführung

In diesem Bericht werden die Meßergebnisse für drei Experimente mit dem in den Ebenen V1, V2 und V3 eingebauten Abstandshalter (Abb.1) dokumentiert.

Der hydraulische Durchmesser der Wandkanäle

$$D_h = 4 F/U \quad (1)$$

ergibt sich mit

$$F = (W-0.5 D)P-D^2\pi/4 \quad (2)$$

und

$$U = P + D\pi/2 \quad (3)$$

zu

$$D_h = 88.197 \text{ mm.}$$

Damit ergibt sich für die drei Meßreihen mit eingebautem Abstandshalter das Verhältnis von Stabbündellänge zwischen der stromabwärts gelegenen Unterkante des Abstandshalters und der Meßebeine zu

$$L/D_h = 84.89 \text{ für Meßebeine V1,}$$

$$L/D_h = 62.77 \text{ für Meßebeine V2,}$$

und

$$L/D_h = 40.37 \text{ für Meßebeine V3}$$

Gemessen wurde jeweils in zwei benachbarten, sich gegenüberliegenden Wandkanälen (Abb.3):

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

Da wegen des großen $L/D_H = 84.9$ für die Ebene V1 keine großen Effekte auf die Turbulenzstruktur erwartet wurden, sind für diese Ebene keine Messungen des Reynoldsen Spannungstensors durchgeführt worden.

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.

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

Der gesamte Versuchsablauf wird von einem Rechner vollautomatisch gesteuert. Für die Messungen wurde ein IBM-PC/XT zur Steuerung eingesetzt. Der IBM-PC/XT wurde dazu mit einem A/D-Wandler, an den die Datenleistungen über eine Verteilerleiste angeschlossen sind, hochgerüstet. 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 /11/ ausführlich dokumentiert; die Version, die z.Z. benutzt wird, enthält einige Verbesserungen gegenüber der Basisversion.

Die Geometrie der zwei Wandkanäle, in denen gemessen wird, besteht aus vier Quadranten (Q1 bis Q4), die jeweils wiederum in zwei Bereiche geteilt werden. Die Aufteilung erfolgt längs der Linie des maximalen senkrechten Wandabstandes von Stab- und Kanalwand (Abb.4). Der Bereich, der dem Stab benachbart ist, wird in zylindrischen Koordinaten (r/ϕ) ausgemessen, der Bereich nahe der Stabwand 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 überlappt, und zwar durch jeweils 2 Meßpunkte (Abb.5). Im Bereich nahe der Stabwand ist der Abstand zwischen den Traversen senkrecht zur Wand 5° , 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 315 und nahe der Kanalwand 300 Meßpunkte verwendet. Für das gesamte ausgemessene Gebiet (4 Quadranten) ergibt das eine Meßpunktzahl von 2460. Die Messungen

mit dem Pitotrohr, dem Prestonrohr und den Hitzdrähten erfolgen ebenfalls zeitlich nacheinander. Der gerade Hitzdraht ist bei den Messungen parallel zur Wand angeordnet, während mit dem schrägen Hitzdraht Messungen in sieben um jeweils 45° versetzte Positionen erfolgen /11/.

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 Mittelwerte 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 5000 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 um 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. Es soll an dieser Stelle erwähnt werden, daß dieses Verfahren neu ist und sich von dem früher verwendeten Verfahren /11/ darin unterscheidet, daß bei früheren Messungen nicht die Standardabweichung der Einzelmessungen berücksichtigt wurde.

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

4. Auswertung der Meßergebnisse

Die Meßergebnisse werden mit dem HDRA-Rechenprogramm /12/ ausgewertet. Für die Hitzdraht-Messungen wird dabei die von Hooper /13/ 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. Die bei den vorliegenden Versuchen ermittelten effektiven Winkel der verwendeten Hitzdrähte weichen nur um maximal $0,27^\circ$ vom Nominalwinkel 45° ab. Dies ist gegenüber den früheren Versuchen eine sehr geringe Abweichung, sei wird dadurch erreicht, daß die Hitzdrähte im eigenen Labor gefertigt werden. Dazu wird ein Punktschweigerät der Fa. DISA verwendet.

Die Korrekturen, die an den Meßwerten angebracht werden, sind in /7/ ebenso wie der Ablauf der Auswertung ausführlich diskutiert. Alle Daten werden auf Referenzbedingungen ($p = 0.1 \text{ MPa}$, $T = 25^\circ\text{C}$) bezogen.

5. Ergebnisse

In diesem Bericht werden die Ergebnisse in Form von Höhenlinien dargestellt und diskutiert. Für die beiden ausgemessenen Wandkanäle wurden mithilfe eines Rechenprogramms /14/ die Höhenlinien aus den Meßergebnissen ermittelt, und zwar für jeden der zwei Bereiche (r/ϕ und x/y) in jedem Quadranten ein Höhenlinienbild. Die Höhenlinienbilder (acht) wurden dann zusammengeklebt. Die Meßergebnisse wurden nicht geglättet, sondern so verwendet, wie sie ermittelt wurden. Durch die Zusammensetzung des Gesamtbildes aus acht Einzelbildern entstehen an den Schnittstellen (Linien größten wandsenkrechten Abstandes und Symmetrielinien) zum Teil Sprünge. Für die senkrecht zur Zeichenebene liegenden Daten (Geschwindigkeit, axiale Turbulenzintensität) spiegeln die Sprünge an den Schnittstellen die Qualität der Ergebnisse wider, da die acht Teile der Bilder zu unterschiedlichen Zeiten nacheinander gemessen wurden.

Bei den in der Zeichenebene liegenden Daten (z.B. Turbulenzintensitäten senkrecht und parallel zu den Wänden) sind die Sprünge an den Schnittstellen vor allem deswegen größer, weil die Richtungen senkrecht bzw. parallel zur Wand für die Meßwerte an der Schnittstelle von verschiedenen Wänden nicht übereinstimmen. Nur in den engen Querschnitten zwischen den Stäben bzw. zwischen Stab- und Kanalwand stimmen die Richtungen von beiden Wänden überein.

5.1 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit

Die gemessenen zeitlichen Mittelwerte der Strömungsgeschwindigkeit sind in den Abb. 6,7 und 8 für die drei Meßebenen V1, V2 bzw. V3 als Linien gleicher Geschwindigkeit dargestellt. Dabei sind die Strömungsgeschwindigkeiten auf die Referenzgeschwindigkeit

$$u_R = 26.16 \text{ ms}^{-1}$$

bezogen.

Die Abbildungen zeigen, daß die Geschwindigkeitsverteilung bereits für $L/D_h = 84.9$ (E3) nicht mehr symmetrisch bezüglich der Symmetrieachsen

senkrecht zu den Kanalwänden zwischen den Stäben bzw. durch die Stabzentren ist. Dadurch wird die bereits früher gemachte Erfahrung /1/ bestätigt, daß die Massenstromumverteilung zwischen den Unterkanälen in Stabbündeln sehr große axiale Längen erfordert.

Die Asymmetrie der Geschwindigkeitsverteilung wird größer bei weiterer Annäherung an den Abstandshalter, also für ein kleineres L/D_h , wie die Höhenliniendarstellung deutlich ausweisen.

Sehr viel deutlicher werden die Verhältnisse, wenn man die Geschwindigkeitsverteilungen in den einzelnen Quadranten und in den beiden Teilen der Quadranten integriert. Tabelle 1 zeigt die ermittelten Ergebnisse. Dabei sind die integrierten mittleren Geschwindigkeiten auf den Mittelwert in allen vier Quadranten für jede Ebene bezogen, der in der letzten Zeile der Tab.1 angegeben ist. In den blockierten Quadranten Q1 und Q4 nimmt die relative mittlere Geschwindigkeit mit sinkendem L/D_h stetig ab. Das gilt sowohl für die Teilkanäle als auch für die beiden Quadranten. Dagegen steigt die relative mittlere Geschwindigkeit in den nicht blockierten Quadranten Q2 und Q3 mit sinkendem L/D_h stetig an, und zwar in allen Teilkanälen.

Bei den Untersuchungen im Nachlauf des Abstandshaltergitters ohne Randblockade konnten die oben beschriebenen Effekte nicht beobachtet werden. Zum einfacheren Vergleich sind die entsprechenden Ergebnisse in Tab. 2 angegeben. Bei den früheren Untersuchungen trat erstmals für $L/D_h = 40.37$ eine signifikante Asymmetrie zur Achse senkrecht zu den Kanalwänden zwischen den Stäben auf, die durch die asymmetrische Abstandshalterstruktur hervorgerufen wurde.

In der Tab. 2 sind zusätzlich die relativen mittleren Geschwindigkeiten in den Quadranten und deren Teilkanälen für $L/D_h = 88.23$ aufgeführt. Bei diesem Verhältnis von L/D_h wurden Messungen am Stabbündel ohne eingebauten Abstandshalter durchgeführt. Trotz des großen Verhältnisses von $L/D_h = 88.23$ ergab sich eine Asymmetrie bezüglich der Achse durch die Stäbe. Diese Asymmetrie ist durch die einseitige Anströmung des Stabbündels im unteren Plenum verursacht, wie Abb.3 schematisch zeigt. Diese Asymmetrie ist auch nach $L/D_h = 88.23$ nicht abgebaut, weil die Umverteilung der Massenströme zwischen den Unterkanälen große Längen erfordert, wie ebenfalls durch gezielte Untersuchungen im Einlauf eines Stabbündels /1/ nachgewiesen wurde.

Die maximalen Abweichungen der relativen mittleren Geschwindigkeit (Tab.2) in den einzelnen Quadranten lagen bei den Messungen ohne Randversperrung bei $L/D_h = 84.89$ innerhalb $\pm 1,9\%$, bei $L/D_h = 62.77$ innerhalb $\pm 1.0\%$ und bei $L/D_h = 40.37$ innerhalb $\pm 1.3\%$. Durch die einseitige Blockade steigen die Abweichungen von $\pm 4.0\%$ für $L/D_h = 84.89$ über $\pm 5,8\%$ für $L/D_h = 62.77$ auf $\pm 10.7\%$ für $L/D_h = 40.37$ an. Dabei liegen bei den neuen Messungen mit blockiertem Abstandshalter die niedrigsten mittleren Geschwindigkeiten jeweils im Quadranten Q4 (blockiert) und die höchsten jeweils im Quadranten Q3 (unblockiert). Die ausgewiesenen Unterschiede zwischen den mittleren Geschwindigkeiten (Massendurchsätzen) der einzelnen Unterkanäle sind eindeutig auf die einseitige Blockade im Abstandshalter zurückzuführen.

Betrachtet man die gemessenen Maximalgeschwindigkeiten bezogen auf die gesamte mittlere Geschwindigkeit im ausgemessenen Bereich (Q1 bis Q4) in den beiden Wandkanälen (Tab. 3), so ergibt sich für den Wandkanal Q1 + Q4, daß die relativen Maximalgeschwindigkeiten mit wachsendem L/D_h ansteigen. Dagegen fallen die relativen Maximalgeschwindigkeiten im Wandkanal, der sich aus Q2 und Q3 zusammensetzt, mit wachsendem L/D_h ab.

Bezieht man die gemessenen Maximalgeschwindigkeiten auf die mittleren Geschwindigkeiten in den jeweiligen Wandkanälen (Tab. 4), dann steigen die relativen Maximalgeschwindigkeiten in beiden Wandkanälen mit wachsendem L/D_h schwach an. Die Werte in beiden Wandkanälen nähern sich einander mit wachsendem L/D_h an. Sie erreichen jedoch für $L/D_h = 84.89$ noch nicht den Wert von 1.21, der sich für beide Wandkanäle bei den Messungen ohne eingebauten Abstandshalter ergeben hatte ($L/D_h = 88.23$) /7/.

Die Geschwindigkeitsprofile senkrecht zur Wand, normiert mit der lokalen Wandschubspannungsgeschwindigkeit, folgen mit geringer Streuung dem universellen Wandgesetz in Kreisrohren, und zwar in allen Quadranten und allen Ebenen. Da sie keine neue Information enthalten, werden diese Darstellungen nicht in diesen Bericht aufgenommen.

5.2 Wandschubspannung

Die gemessenen Wandschubspannungen zeigen die gleichen Trends wie die Geschwindigkeitsverteilungen. Abbildung 9 zeigt die Wandschubspannungsverteilungen an den Stäben in den drei Ebenen. Dabei ist $\phi = 0^\circ$ die Position

zwischen den Stäben und $\phi = \pm 90^\circ$ ist jeweils die Position zwischen Stab- und Kanalwand in den Quadranten Q1 bzw. Q4. Die Wandschubspannungsverteilung an den Kanalwänden ist in Abb. 10 für die drei Ebenen dargestellt. Hier ist $x = 0$ mm die Position auf der Symmetrielinie und $x = \pm 85.0$ mm ist die Position zwischen Stab- und Kanalwand in den Quadranten Q4 bzw. Q3. In allen Darstellungen sind die gemessenen Wandschubspannungen auf den Mittelwert aus allen vier Quadranten bezogen. Dieser Mittelwert ist in Tab. 1 in der letzten Zeile enthalten (τ_{av}/Pa).

Die gemessenen Wandschubspannungsverläufe in den drei Ebenen sind völlig anders als bei den vorangehenden Messungen in den gleichen Ebenen mit dem unblockierten Abstandshalter. Abgesehen von den Eintrittseffekten, die eine leichte Asymmetrie zur Achse durch die Stabzentren verursachen, waren die Wandschubspannungsverteilungen bei den vorangegangenen Messungen mit dem unblockierten Abstandshalter praktisch an beiden Stäben gleich und an beiden Wänden sehr ähnlich. Dabei traten an den Wänden auf der Symmetrielinie Maximalwerte der Wandschubspannung auf und an den Stäben ergab sich für $\phi = 0^\circ$ ein relatives Minimum.

Die neuen Ergebnisse zeigen, auch nicht für $L/D_h = 84.89$, kein relatives Minimum an den Stäben für $\phi = 0^\circ$. Außerdem sind die Verteilungen der Wandschubspannungen an den Kanalwänden nicht ähnlich. Sie weisen auch an der Symmetrielinie ($x = 0$ mm) keine Maximalwerte auf. Diese drastischen Unterschiede im Vergleich zu den früheren Messungen am unblockierten Abstandshaltergitter werden durch die einseitige Blockade hervorgerufen. Die Wandschubspannungsverteilungen hängen viel sensitiver von Störungen im Strömungskanal ab als die Geschwindigkeiten. Wegen

$$\tau_w = 0.125 \lambda \rho u_m^2$$

und

$$\lambda \sim Re^{-0.2} = (u_m D_h / \nu)^{-0.2}$$

ist

$$\tau_w \sim u_m^{1.8}.$$

Daher beträgt z.B. im Quadranten Q3 für $L/D_h = 40.37$ die Abweichung der Wandschubspannung 20.2% von der mittleren Wandschubspannung aus allen

Quadranten, hingegen beträgt die Abweichung der mittleren Geschwindigkeit nur 10.7% von der mittleren Geschwindigkeit in allen Quadranten (Tab.1).

In der Tat ergibt sich eine gute Übereinstimmung der relativen mittleren Wandschubspannungen nach Tab.1 und den Werten, die sich ergeben, wenn man die relativen mittleren Geschwindigkeiten mit 1.8 potenziert. Die Abweichungen liegen innerhalb $\pm 1.0\%$ für $L/D_h = 84.89$ und steigen auf $\pm 1.2\%$ für $L/D_h = 62.77$ und $\pm 1.3\%$ für $L/D_h = 40.37$ an für die einzelnen Quadranten. Für die Teilkanäle sind die Abweichungen mit $\pm 1.8\%$, $\pm 2.4\%$ bzw. $\pm 2.9\%$ nur unwesentlich größer. Die Abweichungen sind vor allem dadurch bedingt, daß die Quadranten an der Linie größten Wandabstandes aufgeteilt werden. Um eine Strömungszone einem bestimmten Wandanteil zuzuordnen, müßte die Aufteilung an der Linie der Maximalgeschwindigkeit erfolgen, die nicht überall mit der Linie größten senkrechten Wandabstandes übereinstimmt.

Die neuen Ergebnisse zeigen an den Stabwänden (Abb.9) asymmetrische Wandschubspannungsverteilungen, wobei die Wandschubspannungen in den unblockierten Quadranten Q2 und Q3 stets höher sind als in den blockierten Quadranten Q1 und Q4. Im Quadranten Q2 ergeben sich für alle L/D_h bei $\phi = 60^\circ - 70^\circ$ relative Minima, die auf die Kontaktstelle Abstandshaltergitter/Stabwand zurückgeführt werden müssen. Bei den Experimenten am unblockierten Abstandshalter traten derartige relative Minima nur für $L/D_h \leq 40.37$ auf. Entsprechende Minima im Quadranten Q1 treten nicht auf, sie sind nur angedeutet durch ein relativ konstantes Plateau für $\phi = -50^\circ$ bis -60° .

An den Kanalwänden (Abb.10) ergibt sich nur für $L/D_h = 84.89$, daß die Wandschubspannung im Quadranten Q1 höher als im Quadranten Q2 ist. Für sinkende L/D_h fallen die Wandschubspannungen an der Kanalwand Q4/Q1 (blockiert) stetig ab, gleichzeitig steigen sie an der Kanalwand Q3/Q2 stetig an (unblockiert). Man beachte den geänderten Maßstab auf der Ordinate für die verschiedenen L/D_h .

5.3 Turbulenzintensitäten und kinetische Energie der Turbulenz

5.3.1 Axiale Turbulenzintensität

Die gemessenen axialen Turbulenzintensitäten sind für die zwei Ebenen, an denen Messungen durchgeführt wurden ($L/D_h = 62.77$ und 40.38) in den Abbildungen 11 und 12 als Höhenlinien dargestellt. Die Meßwerte sind dazu auf

einen Referenzwert der Wandschubspannungsgeschwindigkeit bezogen. Als jeweiliger Referenzwert wurde die Wandschubspannungsgeschwindigkeit im Quadranten bei $\phi = 0^\circ$ gewählt, also im Spalt zwischen den Stäben.

Aus den Höhenlinienbildern ist deutlich die Asymmetrie der Verteilung der axialen Turbulenzintensität sichtbar und zwar sowohl bezüglich der Achse durch die Stabzentren wie auch bezüglich der Achse senkrecht zu den Kanalwänden zwischen den Stäben. Um die Unterschiede in den beiden Ebenen und in den einzelnen Quadranten qualitativ angeben zu können, wurden die Turbulenzintensitäten integriert, um den Mittelwert der Turbulenzintensität zu bestimmen. Tabelle 6 enthält die berechneten Mittelwerte in den Quadranten und den jeweiligen Teilgebieten.

Es zeigt sich, daß der Mittelwert der Turbulenzintensität in den Quadranten Q2 und Q3 (unblockiert) deutlich höher ist als in den Quadranten Q1 und Q4 (blockiert). Die Unterschiede betragen + 12.6% und -14.1% für $L/D_h = 62.77$ bzw. + 13.1% und -17.2 für $L/D_h = 40.37$. Damit ergibt sich eine deutliche Wirkung der einseitigen Blockade auf den Mittelwert der axialen Turbulenzintensität in den einzelnen Quadranten. Bei den vorangegangenen Messungen hinter einem nicht-blockierten Abstandshaltergitter betrugen die Abweichungen nur $\pm 1.8\%$ für $L/D_h = 62.77$ und $\pm 2.7\%$ bei $L/D_h = 40.37$. Auch bei den früheren Messungen war der Mittelwert in den Quadranten Q2 und Q3 etwas höher als in den Quadranten Q1 und Q4, dieser Effekt mußte auf die Eintrittsbedingungen zurückgeführt werden.

Der Gesamtmittelwert, der in der letzten Zeile von Tab. 6 angegeben ist, hat sich gegenüber den früheren Untersuchungen praktisch nicht verändert.

5.3.2 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand

Die gemessenen Turbulenzintensitäten senkrecht zur Wand sind in den Abb. 13 und 14 für die beiden ausgemessenen Ebenen als Höhenlinien dargestellt. Wenn man berücksichtigt, daß die Turbulenzintensitäten senkrecht zur Wand mit einer größeren Meßunsicherheit behaftet sind, ergeben sich relativ gleichmäßige Verteilungen.

Die Einflüsse des randversperrten Abstandshaltergitters sind nur aus den Mittelwerten in den einzelnen Quadranten und deren Teilkanäle (Tab. 6) zu erkennen. Deutlich zeigt sich - wie für die axiale Turbulenzintensität - , daß die

Mittelwerte in den unblockierten Quadranten Q2 und Q3 höher sind als in den blockierten Quadranten Q1 und Q4. Der Gesamtmittelwert in der letzten Zeile von Tab. 6 ist etwa gleich groß wie bei den früheren Untersuchungen.

5.3.3 Turbulenzintensität parallel zur Wand

Die Meßergebnisse der Turbulenzintensität parallel zur Wand, die als Höhenlinien in den Abb. 15 und 16 für die beiden Ebenen $L/D_h = 62.77$ und 40.37 dargestellt sind, lassen eine sehr gleichmäßige Struktur im gesamten ausgemessenen Gebiet erkennen:

Aus den integrierten Mittelwerten der Turbulenzintensität parallel zur Wand ergeben sich ähnliche Auswirkungen wie für die beiden übrigen Intensitäten (Tab. 7). Wiederum ist in den unblockierten Quadranten Q2 und Q3 die Turbulenzintensität parallel zur Wand höher als in den blockierten Quadranten Q1 und Q4.

Der Gesamtmittelwert ist ungefähr gleich den Gesamtmittelwert bei den früheren Untersuchungen am unblockierten Abstandshalter.

5.3.4. Kinetische Energie der Turbulenz

Die kinetische Energie der Turbulenzbewegung ergibt sich aus den gemessenen Turbulenzintensitäten in den drei Koordinatenrichtungen zu

$$\overline{k'} = 1/2(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (9)$$

Die ermittelten Werte sind in den Abb. 17 und 18, bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit, dargestellt.

Die Struktur ist sehr ähnlich der Struktur der axialen Turbulenzintensität. Deutlich erkennbar ist die Asymmetrie der Höhenlinien bezüglich beider Symmetrieachsen, die durch die einseitige Randversperrung des Abstandshaltergitters hervorgerufen wird.

Aus den Mittelwerten der kinetischen Energie der Turbulenz für die Quadranten und deren Teilkanäle (Tab. 7) kann man entnehmen, daß die Abweichungen vom Mittelwert bei den Quadranten Q2 und Q3 bis auf + 10.1% für $L/D_h = 62.77$ und + 18.6% für $L/D_h = 40.37$ anwachsen, während die Abweichungen vom Mittelwert für die blockierten Quadranten Q1 und Q4 bis -12.0% für $L/D_h = 62.77$ und -15.8% für $L/D_h = 40.37$ betragen. Damit sind die Abweichungen vom Mittelwert erheblich höher als bei den früheren Messungen am unblockierten Abstandshaltergitter, wobei die Abweichungen innerhalb $\pm 6.8\%$ für $L/D_h = 62.77$ bzw. $\pm 5.9\%$ für $L/D_h = 40.37$ betragen.

Der Gesamtmittelwert in der letzten Zeile von Tab. 7 ist praktisch unverändert gegenüber den früheren Untersuchungen am unblockierten Gitterabstandshalter.

5.4 Schubspannungen und Korrelationskoeffizienten

Die Höhenlinien der gemessenen Schubspannung senkrecht zur Wand sind in den Abb. 19 und 20 für die beiden Ebenen dargestellt. Die Ergebnisse sind sehr gleichmäßig. In Spaltmitte zwischen den Stäben verschwindet die Schubspannung senkrecht zur Wand aus Symmetriegründen. In den Spalten zwischen den Stäben und den Kanalwänden verschwindet die wandsenkrechte Schubspannung jeweils an einer Position, die näher zum Stab liegt als der Hälfte des Abstandes zwischen Stab und Kanalwand entspricht. Wegen der unterschiedlichen Wandkrümmung von Stab und Kanalwand liegt hier keine Symmetrie vor.

Auswirkungen der durch die einseitige Blockade des Abstandshaltergitters hervorgerufenen Asymmetrie sind zu erkennen in den Gebieten negativer Schubspannung, die gestrichelt dargestellt ist. In beiden Gebieten in den Quadranten Q1 und Q3 ist hier ebenfalls die Linie der Maximalgeschwindigkeit verschoben (s. Abb. 7 und 8).

Die Höhenlinien der gemessenen Schubspannung parallel zu den Wänden, Abb. 21 und 22, zeigen sehr deutlich, daß die einseitige Blockade eine starke Auswirkung hat auf die Verteilung. Bei Symmetrie zur Achse durch die Stabzentren müßte hier die Schubspannung parallel zur Wand verschwinden. Es ist klar zu erkennen, daß die Meßergebnisse das nicht ausweisen. Das bedeutet,

daß ein starker Impulstransport von den Quadranten Q1 und Q4 in die Quadranten Q2 und Q3 über diese Symmetrielinie stattfindet.

Die Höhenliniendarstellungen für die Korrelationskoeffizienten der Schubspannung senkrecht zur Wand (Abb. 23 und 24):

$$R_{uv} = \overline{-u'v'} / (\sqrt{\overline{u'^2}} \cdot \sqrt{\overline{v'^2}}) \quad (10)$$

zeigen in weiten Bereichen nahe den Wänden, daß der Korrelationskoeffizient nahezu konstant ist:

$$R_{uv} \approx 0.4 \div 0.5$$

Die Einflüsse des Abstandshalters, die für die Schubspannung senkrecht zur Wand diskutiert wurden, finden sich natürlich auch für die Korrelationskoeffizienten wieder.

Die entsprechenden Korrelationskoeffizienten der Schubspannung parallel zur Wand:

$$R_{uw} = \overline{-u'w'} / (\sqrt{\overline{u'^2}} \cdot \sqrt{\overline{w'^2}}), \quad (11)$$

die in den Abb. 25 und 26 dargestellt sind, zeigen einen ganz ähnlichen Verlauf wie die Schubspannung selbst.

Die ebenfalls gemessenen transversen Schubspannungen, $-\rho \overline{v'w'}$, sind im gesamten ausgemessenen Bereich für beide L/D_h sehr klein. Die Ergebnisse sind stark durch die Meßunsicherheiten beeinflusst und werden daher in diesem Bericht nicht diskutiert.

5.6. 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 [15]. Die Ergebnisse, bezogen auf das Quadrat der Wandschubspannungsgeschwindigkeit, in Höhenliniendarstellung (Abb. 27 und 28) zeigen relativ gleichmäßige Verläufe für die drei Ebenen. Dabei muß man berücksichtigen, daß die Differenz zweier relativ großer Werte dargestellt ist. Nur in Gebieten größten Wandabstandes fällt die Differenz zwischen den Turbulenzintensitäten

parallel und senkrecht zur Wand auf Null ab. In den übrigen Gebieten fallen die Daten von Werten zwischen 0.8 und 1.0 in Wandnähe wesentlich schwächer mit wachsendem Wandabstand, als bei Kreisrohren beobachtet wird.

6. Schlußfolgerungen

An einem Stabbündel aus vier parallelen Stäben in einem Rechteckkanal für ein Stababstandsverhältnis von $P/D = 1.223$ und ein Wandabstandsverhältnis $W/D = 1.183$ wurden detailliert Geschwindigkeits-, Wandschubspannungs- und Turbulenzverteilungen im Nachlauf eines SNR-typischen Abstandshaltergitters gemessen. Dabei war der Abstandshalter auf der einen langen Seite des Kanals zwischen der Struktur und der Kanalwand vollständig blockiert.

Durch diese Blockade werden die Geschwindigkeits- und die Turbulenzverteilung ganz erheblich beeinflusst. Für $L/D_h = 84.89$ zeigt die Geschwindigkeit eine starke Asymmetrie, die beweist, daß die axialen Längen, die erforderlich sind um Strömungen in den Massendurchsätzen zwischen den Unterkanälen auszugleichen, in Stabbündeln sehr groß sein können.

Für zwei axiale Ebenen ($L/D_h = 62.77$ und 40.37) wurde ebenfalls die Turbulenzverteilung gemessen. Die Ergebnisse zeigen auch hierbei und mit wachsender Annäherung stärker hervortretende Einflüsse der einseitigen Randversperrung.

Besonders deutlich können die Auswirkungen der Randversperrung des Abstandshaltergitters an den Wandschubspannungsverteilungen beobachtet werden.

Die Messungen werden in weiteren Ebenen, die näher am Abstandshaltergitter liegen, d.h. für kleinere L/D_h -Verhältnisse, fortgesetzt.

Der Autor dankt Herrn G. Wörner für die sorgfältige Durchführung und Auswertung der Versuche.

Nomenklatur

D	m	Stabdurchmesser
D_h	m	hydraulischer Durchmesser
d_p	m	Pitotrohraußendurchmesser
F	m ²	Fläche
H	m	Kanalhöhe
h	m	Höhe
K'	m ² s ⁻²	kinetische Energie der Turbulenz
L	m	Länge
P	m	Stabmittelpunktsabstand
p	Pa	Druck
R	-	Korrelationskoeffizient
Re	-	Reynoldszahl
r	m	Koordinate senkrecht zur Stabwand
T	K	Temperatur
U	m	Umfang
u	ms ⁻¹	Geschwindigkeit
u_m	ms ⁻¹	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
u'	ms ⁻¹	Schwankungsgeschwindigkeit in axialer Richtung
u^*	ms ⁻¹	Wandschubspannungsgeschwindigkeit
v'	ms ⁻¹	Schwankungsgeschwindigkeit senkrecht zur Wand
W	m	Wandabstand
w'	ms ⁻¹	Schwankungsgeschwindigkeit parallel zur Wand
x	m	Koordinate parallel zur Kanalwand
y	m	Koordinate senkrecht zur Kanalwand
λ	-	Reibungsbeiwert
ϕ	grad	Umfangskoordinate
ν	m ² s ⁻¹	kinematische Viskosität
ρ	Kgm ⁻³	Dichte
τ	Pa	Schubspannung

Indizes

R	Referenzbedingungen
w	Wand

Literatur

- /1/ K. Rehme, Turbulenzstruktur im Wandkanal eines Stabbündels ($P/D = W/D = 1.148$) für drei Ebenen im Einlauf, KfK-Bericht Nr. 4027 (1986).
- /2/ K. Rehme, Turbulente Strömung durch Wandkanäle eines Stabbündels ($P/D = W/D = 1.30$), KfK-Bericht Nr. 4061 (1986).
- /3/ G. Trippe, Experimentelle Untersuchungen turbulenter Strömungen in axial durchströmten Stabbündeln ohne und mit gitterförmigen Abstandshaltern, KfK-Bericht Nr. 2834 (1979).
- /4/ M.R. Yeung and L. Wolf, Multi-cell slug flow heat transfer analysis for finite LMFBR bundles, Nucl. Eng. Design, Vol.62, Nos. 1-3, pp. 101-121 (1980).
- /5/ W. Slagter, Finite element solution of axial turbulent flow in a bare rod bundle using a one-equation turbulence model, Nucl. Sci. Eng., Vol.82, pp.243-259(1982).
- /6/ H.-G. Kaiser, Näherungslösungen für den Impulstransport bei turbulenter Strömung in engen Stabgitterbündeln nach der Methode der finiten Elemente, Dissertation, Techn. Universität Braunschweig (1985).
- /7/ K. Rehme, Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen in Wandkanälen von Stabbündeln mit einem Gitterabstandshalter, KfK-Bericht Nr. 4094 (1986).
- /8/ K. Rehme, Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen in Wandkanälen von Stabbündeln in drei Ebenen hinter einem Gitterabstandshalter, KfK-Bericht Nr. 4199 (1987)
- /9/ K. Rehme, Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen in Wandkanälen von Stabbündeln in drei Ebenen hinter einem Gitterabstandshalter, KfK-Bericht Nr. 4323 (1987)
- /10/ K. Rehme, Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen in Wandkanälen von Stabbündeln in drei Ebenen unmittelbar hinter einem Gitterabstandshalter, KfK-Bericht Nr. 4408 (1988).

- /11/ K. Rehme, Rechnergesteuerte Versuchsanlage zur Messung von Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen mit Hitzdrähten, KfK-Bericht Nr. 3744 (1984).
- /12/ L. Vosáhlo, Computer programs for evaluation of turbulence characteristics from hot-wire measurements, KfK-Bericht Nr. 3743 (1984).
- /13/ J.D. Hooper, Fully developed turbulent flow through a rod cluster, Ph.D. Thesis, University of New South Wales, Sydney (Australia), (1980).
- /14/ U. Schumann, PLOTHL - Ein FORTRAN IV Unterprogramm zur Darstellung von Funktionen von zwei unabhängigen Variablen durch ihre Höhenlinien auf einem Plotter, KfK-Bericht Nr. 1486 (1971).
- /15/ M.A. Hague et al., An observation on the origin of secondary flow in straight noncircular ducts, Wärme- und Stoffübertragung 17, pp.93-95 (1983).

Quadrant		Relative mittlere Geschwindigkeit			Relative mittlere Wandschubspannung		
L/D_h		84.89	62.77	40.37	84.89	62.77	40.37
Q1	r/ϕ	1.008	0.993	0.956	1.032	1.012	0.922
	x/y	0.983	0.964	0.919	0.972	0.925	0.859
	total	0.998	0.981	0.941	1.006	0.974	0.897
Q2	r/ϕ	1.024	1.036	1.071	1.035	1.065	1.131
	x/y	0.970	0.986	1.021	0.931	0.956	1.038
	total	0.998	1.016	1.051	0.990	1.017	1.094
Q3	r/ϕ	1.059	1.079	1.128	1.117	1.163	1.242
	x/y	1.009	1.027	1.077	1.018	1.046	1.142
	total	1.039	1.058	1.107	1.074	1.112	1.202
Q4	r/ϕ	0.974	0.961	0.920	0.971	0.944	0.861
	x/y	0.940	0.920	0.870	0.879	0.838	0.779
	total	0.960	0.944	0.900	0.931	0.897	0.828
$u_{av}/ms^{-1}, \tau_{av}/Pa$		24.95	25.20	23.78	1.545	1.586	1.427

Tabelle 1. Mittlere Geschwindigkeiten und mittlere Wandschubspannungen in den Quadranten und deren Teilkanäle bezogen auf den Mittelwert aus allen vier Quadranten.

Quadrant		Relative mittlere Geschwindigkeit			
L/D_h		88.23	84.89	62.77	40.37
Q1	r/ϕ	0.998	1.005	1.003	1.002
	x/y	0.960	0.972	0.971	0.981
	total	0.983	0.992	0.990	0.994
Q2	r/ϕ	1.030	1.026	1.021	1.014
	x/y	0.998	0.985	0.978	0.975
	total	1.017	1.010	1.004	0.998
Q3	r/ϕ	1.033	1.029	1.023	1.029
	x/y	1.009	1.000	0.987	0.989
	total	1.023	1.017	1.009	1.013
Q4	r/ϕ	0.993	0.995	1.008	1.006
	x/y	0.953	0.959	0.979	0.979
	total	0.977	0.981	0.997	0.995
u_{av} / ms^{-1}		25.53	25.87	25.84	25.57

Tabelle 2. Mittlere Geschwindigkeiten in den Quadranten und deren Teilkanäle bezogen auf den Mittelwert aus allen vier Quadranten: Messungen ohne starke Randversperrung [7,8]

Wandkanal	Relative maximale gemessene Geschwindigkeit		
	L/D_h		
Q1 + Q4	1.136	1.110	1.049
Q2 + Q3	1.213	1.226	1.264

Tabelle 3. Maximale gemessene Geschwindigkeit bezogen auf die gesamte mittlere Geschwindigkeit im blockierten (Q1 und Q4) und unblockierten (Q2 und Q3) Wandkanal

Wandkanal	Relative mittlere Geschwindigkeit		
	L/D_h		
Q1 + Q4	0.979	0.963	0.921
Q2 + Q3	1.021	1.037	1.079

Tabelle 4. Mittlere Geschwindigkeit in beiden Wandkanälen bezogen auf die gesamte mittlere Geschwindigkeit

Wandkanal	Relative maximale gemessene Geschwindigkeit		
	L/D_h		
Q1 + Q4	1.160	1.153	1.139
Q2 + Q3	1.188	1.182	1.171

Tabelle 5. Maximale gemessene Geschwindigkeit bezogen auf die mittlere Geschwindigkeit in den beiden Wandkanälen

Quadrant		Relative mittlere axiale Turbulenzintensität			Relative mittlere Turbulenzintensität normal zur Wand		
L/D_h		84.89	62.77	40.37	84.89	62.77	40.37
Q1	r/ϕ	-	0.919	0.899	-	0.908	0.920
	x/y	-	1.010	0.958	-	0.905	0.867
	total	-	0.956	0.923	-	0.907	0.899
Q2	r/ϕ	-	1.010	1.060	-	1.121	1.033
	x/y	-	1.002	1.028	-	1.135	1.110
	total	-	1.006	1.047	-	1.126	1.064
Q3	r/ϕ	-	1.018	1.047	-	1.040	1.109
	x/y	-	1.109	1.142	-	1.085	1.164
	total	-	1.054	1.085	-	1.058	1.131
Q4	r/ϕ	-	0.954	0.925	-	0.920	0.912
	x/y	-	1.032	0.977	-	0.891	0.897
	total	-	0.985	0.946	-	0.909	0.906
$(u'/u^x)_{av}, (v'/u^x)_{av}$		-	1.533	1.556	-	0.859	0.828

Tabelle 6. Mittelwerte der axialen und der zur Wand senkrechten Turbulenzintensitäten in den Quadranten und deren Teilkanäle bezogen auf den Mittelwert aus allen vier Quadranten.

Quadrant		Relative mittlere Turbulenzintensität parallel zur Wand			Relative mittlere kinetische Energie der Turbulenz		
L/D_h		84.89	62.77	40.37	84.89	62.77	40.37
Q1	r/ϕ	-	0.899	0.924	-	0.836	0.826
	x/y	-	0.925	0.912	-	0.945	0.867
	total	-	0.909	0.919	-	0.880	0.842
Q2	r/ϕ	-	1.100	1.035	-	1.102	1.093
	x/y	-	1.066	1.039	-	1.088	1.086
	total	-	1.087	1.036	-	1.101	1.090
Q3	r/ϕ	-	1.033	1.074	-	1.051	1.127
	x/y	-	1.033	1.096	-	1.088	1.086
	total	-	1.033	1.082	-	1.099	1.186
Q4	r/ϕ	-	0.974	0.952	-	0.901	0.854
	x/y	-	0.966	0.979	-	0.976	0.922
	total	-	0.971	0.963	-	0.931	0.881
$(w'/u^x)_{av}, k'/u^{x2}$		-	1.078	1.075	-	2.212	2.220

Tabelle 7. Mittelwerte der Turbulenzintensität parallel zur Wand und der kinetischen Energie der Turbulenz in den Quadranten und deren Teilkanäle bezogen auf den Mittelwert aus allen vier Quadranten.

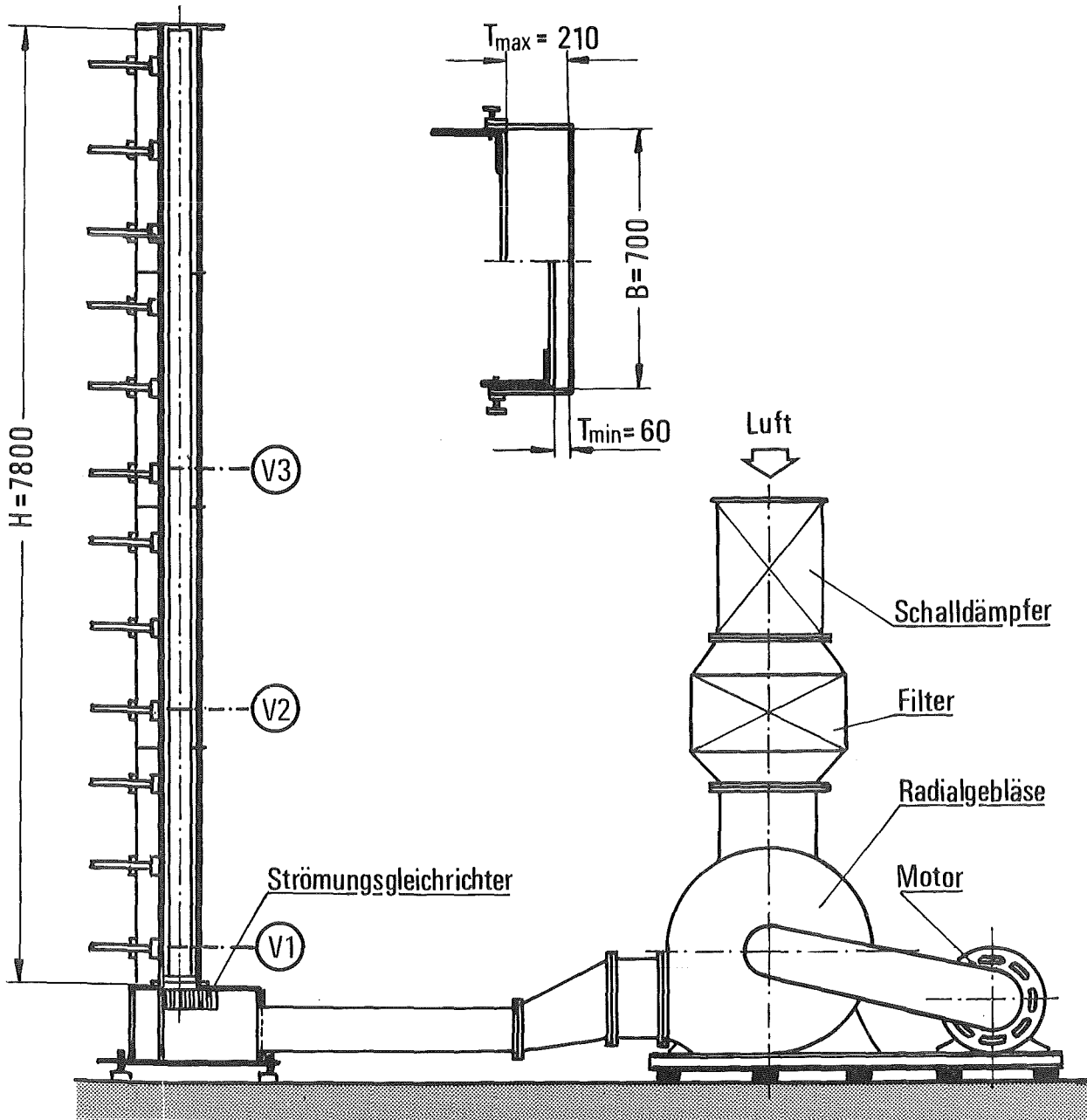


Abb. 1 Versuchsanlage (schematisch)

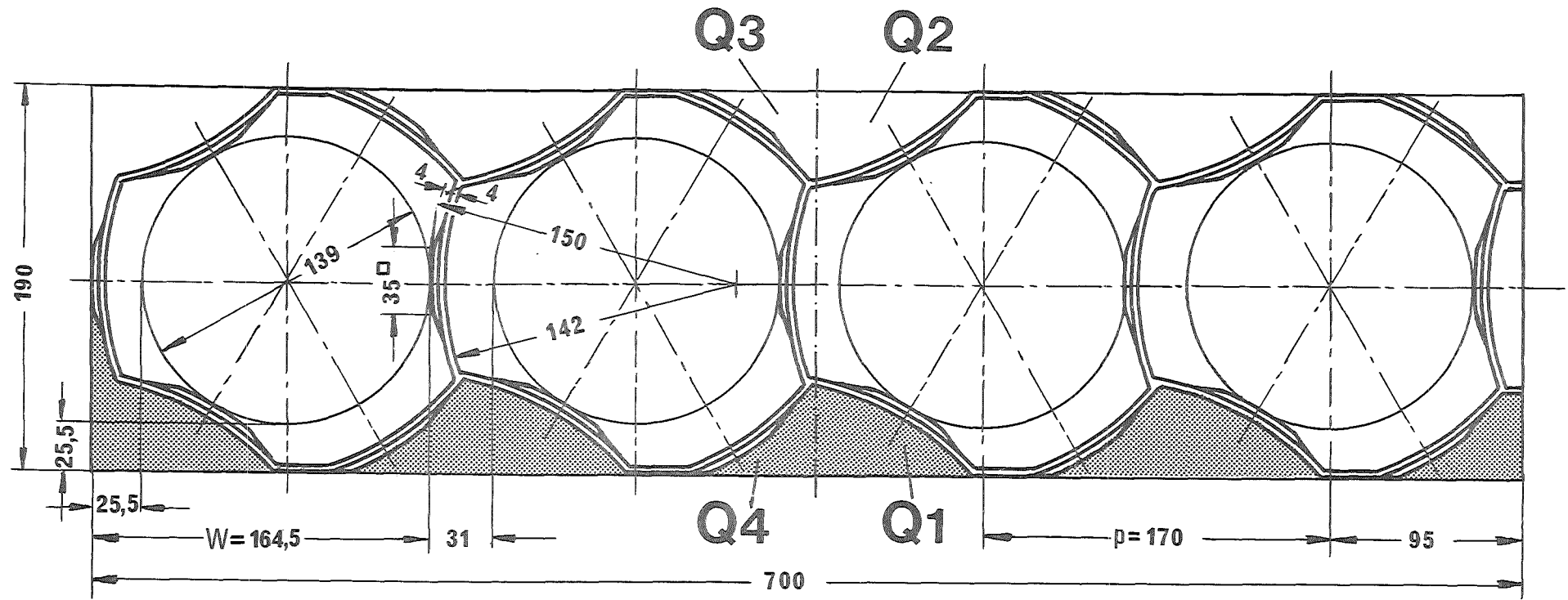


Abb. 2 Querschnitt der Abstandshaltergeometrie mit Randblockade

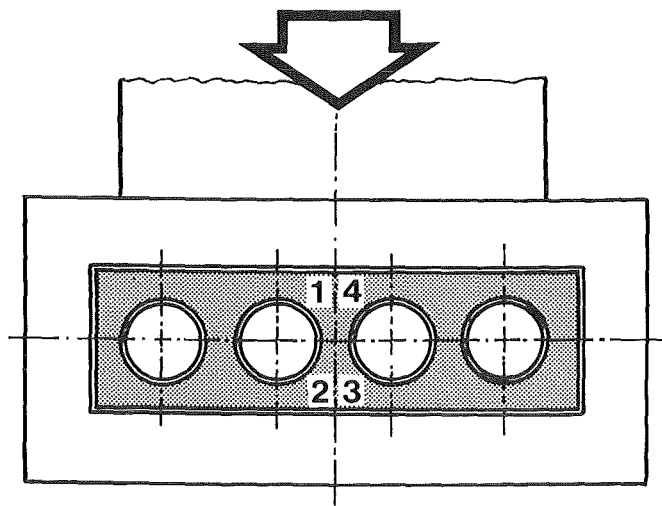


Abb. 3 Aufsicht auf den Strömungskanal mit den Eintrittsbedingungen

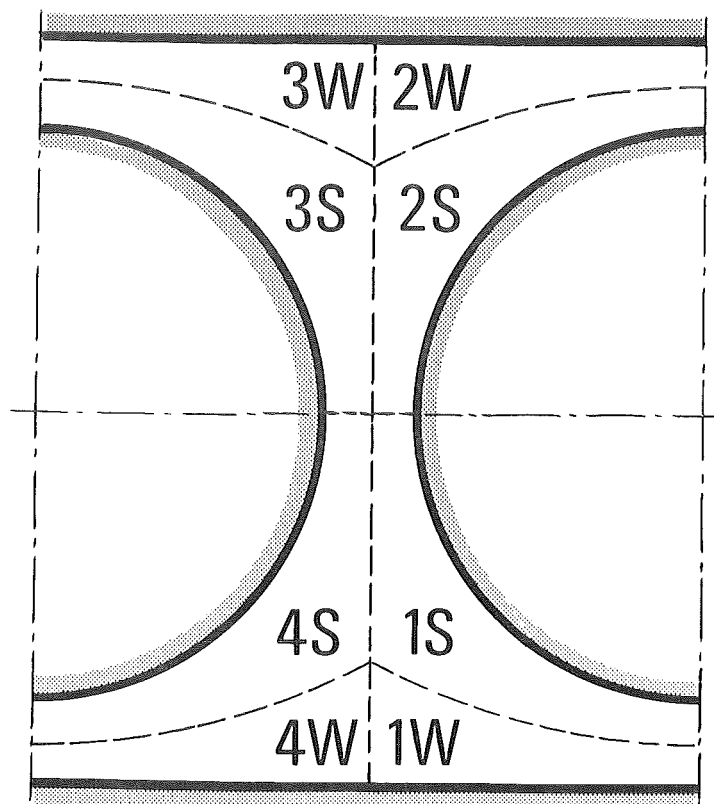
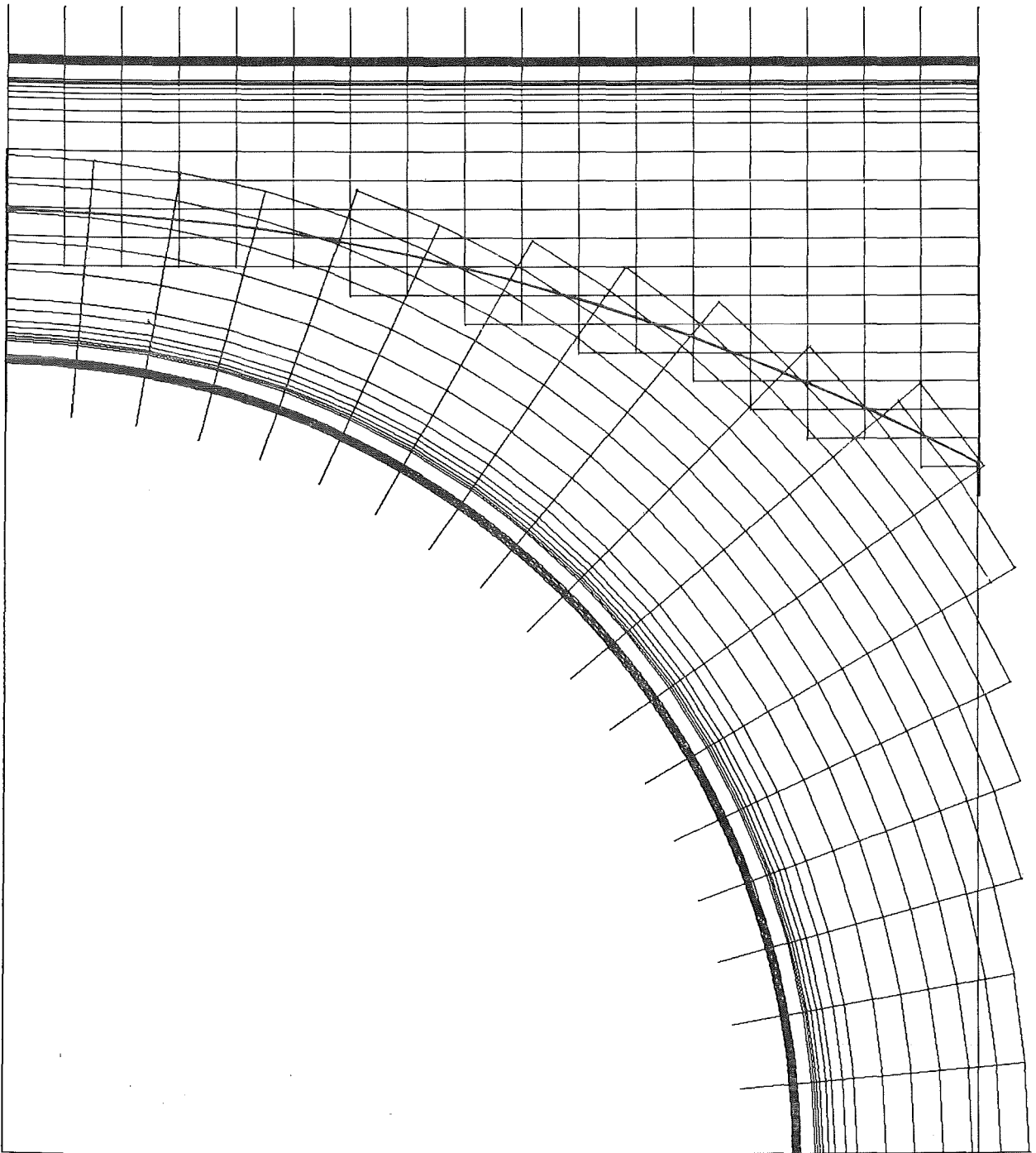


Abb. 4 Teilkanäle des untersuchten Strömungsquerschnitts



KfK

Abb. 5 Verteilung der Meßpositionen in einem Quadranten

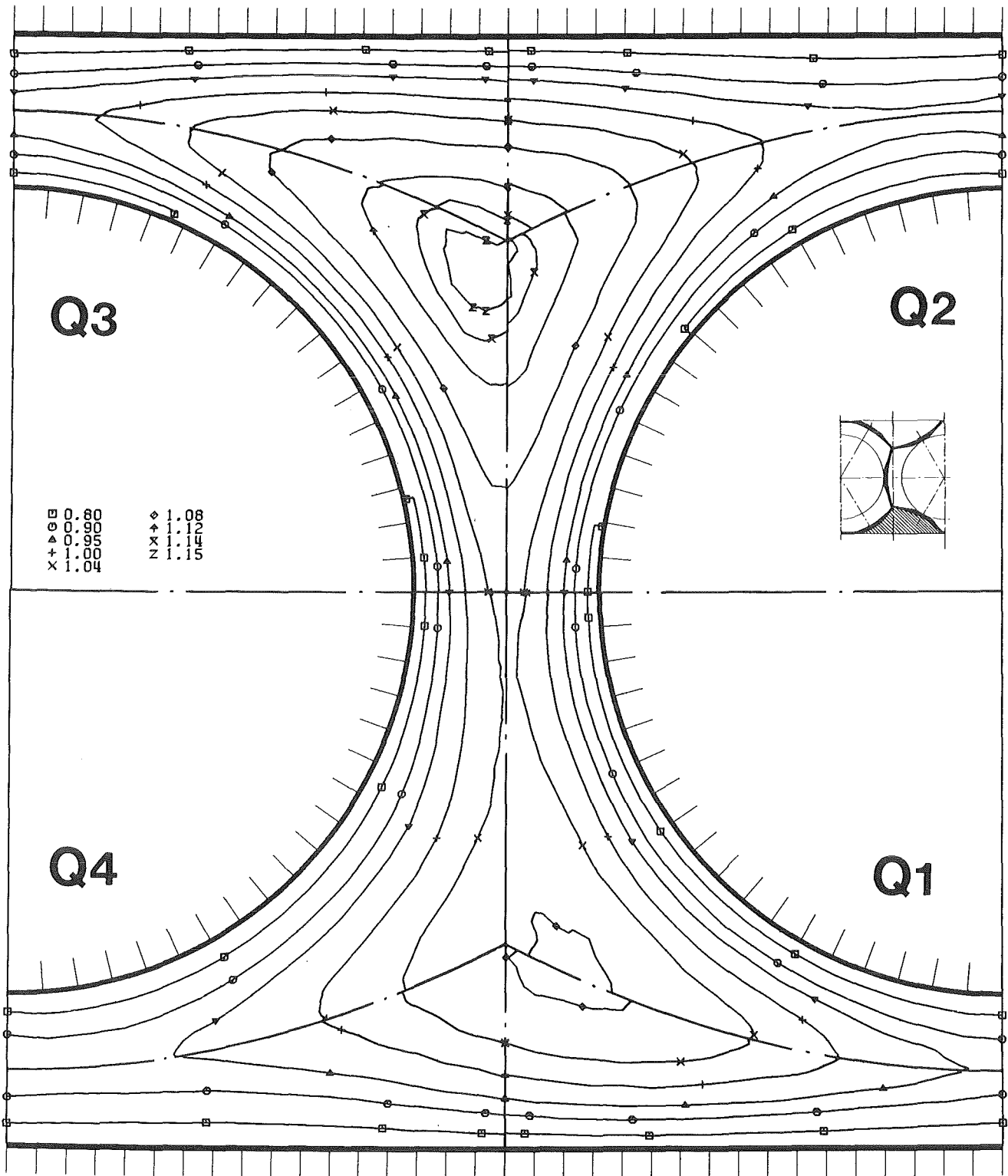


Abb. 6 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 84.89$

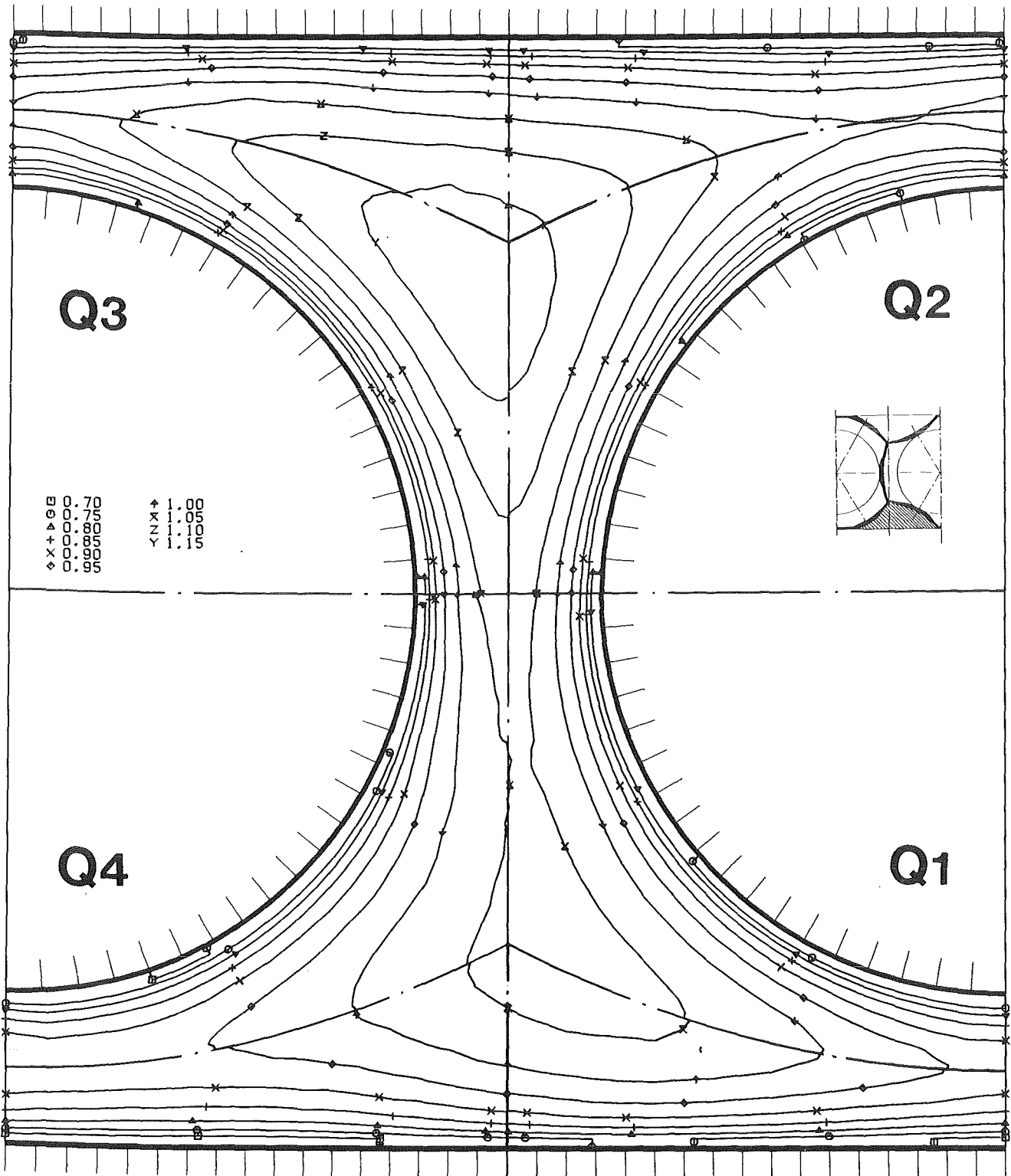
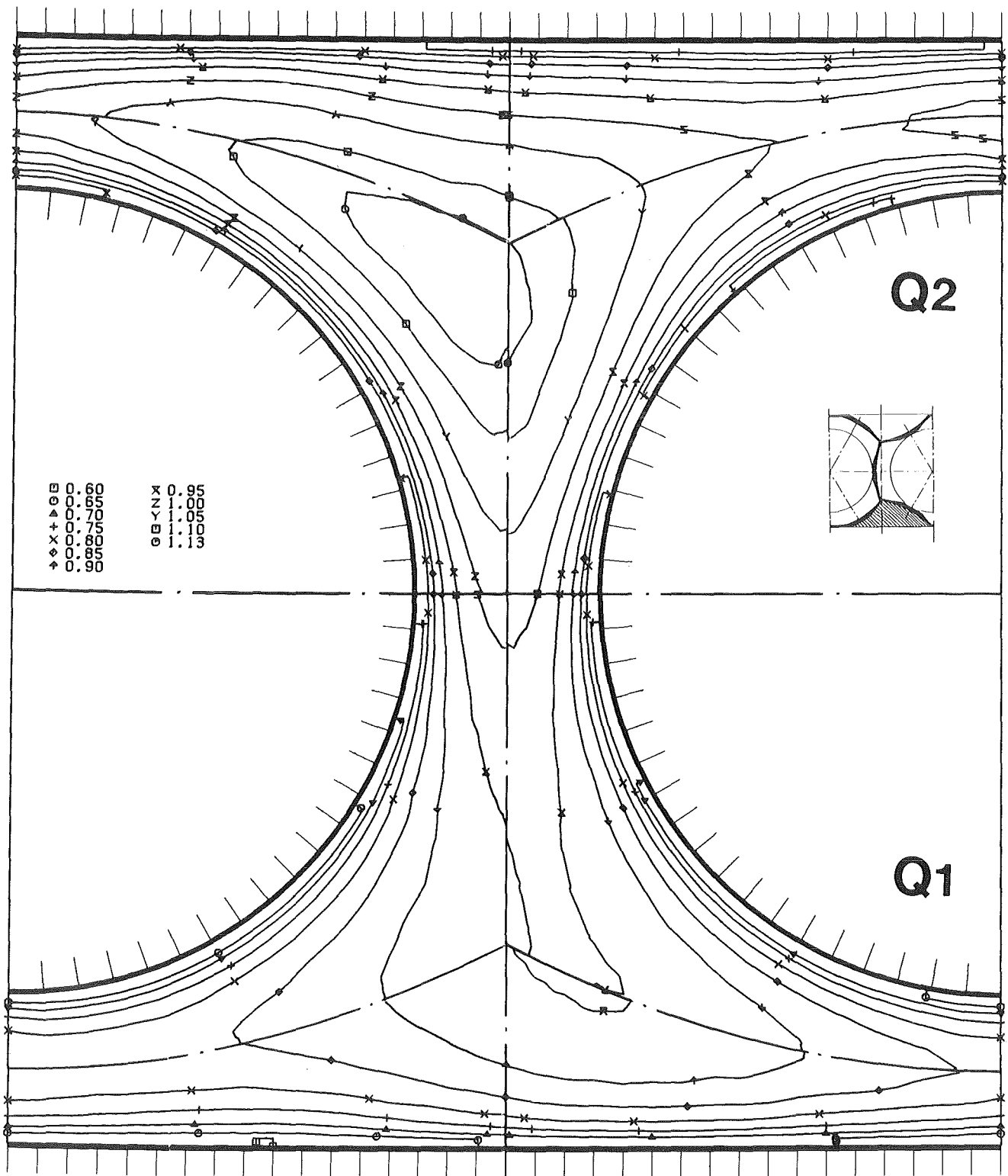


Abb. 7 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 62.77$



kfk

Abb. 8 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 40.37$

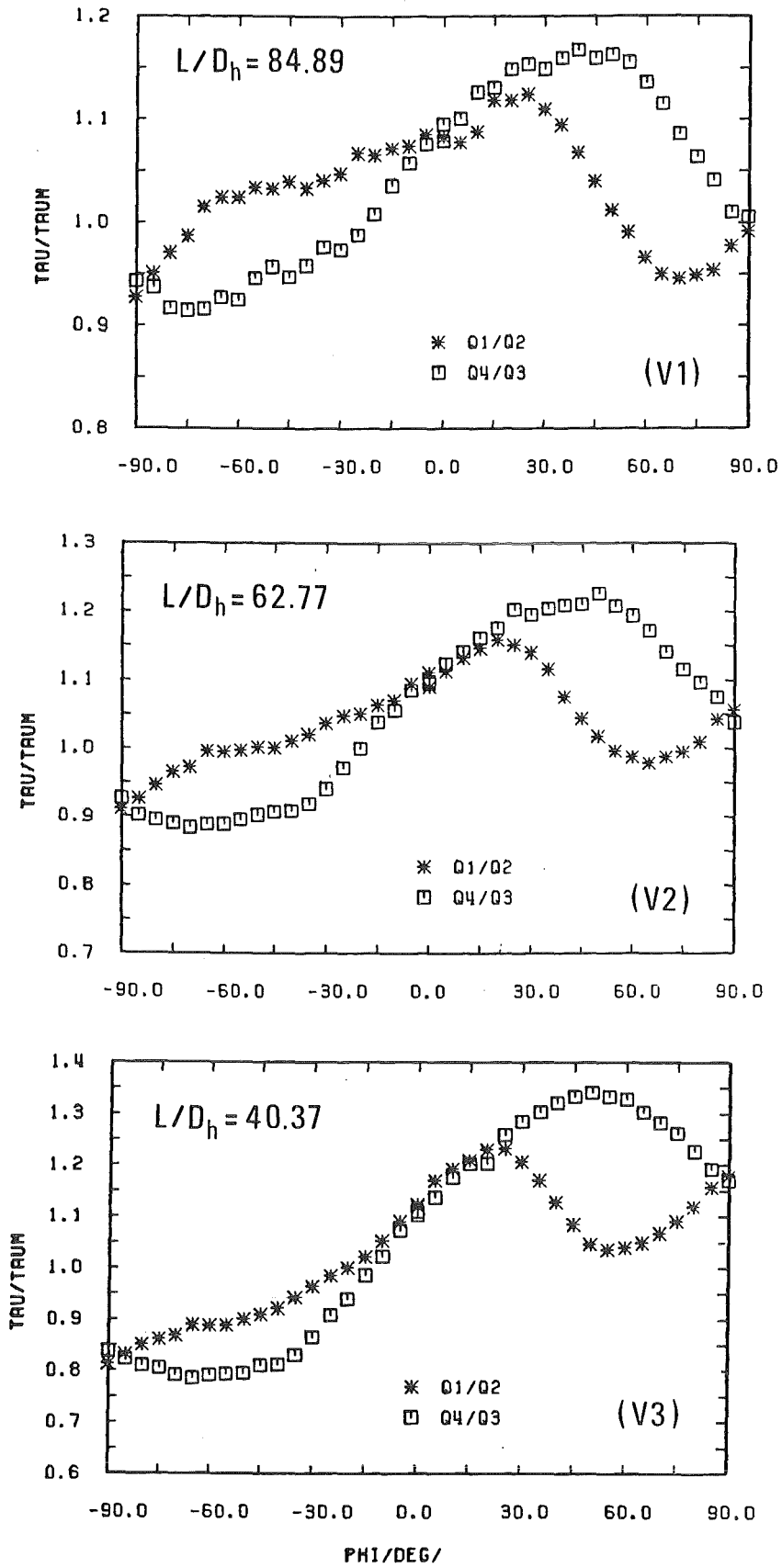


Abb. 9 Wandschubspannungsverteilungen bezogen auf den Mittelwert aus allen vier Quadranten (r/ϕ)

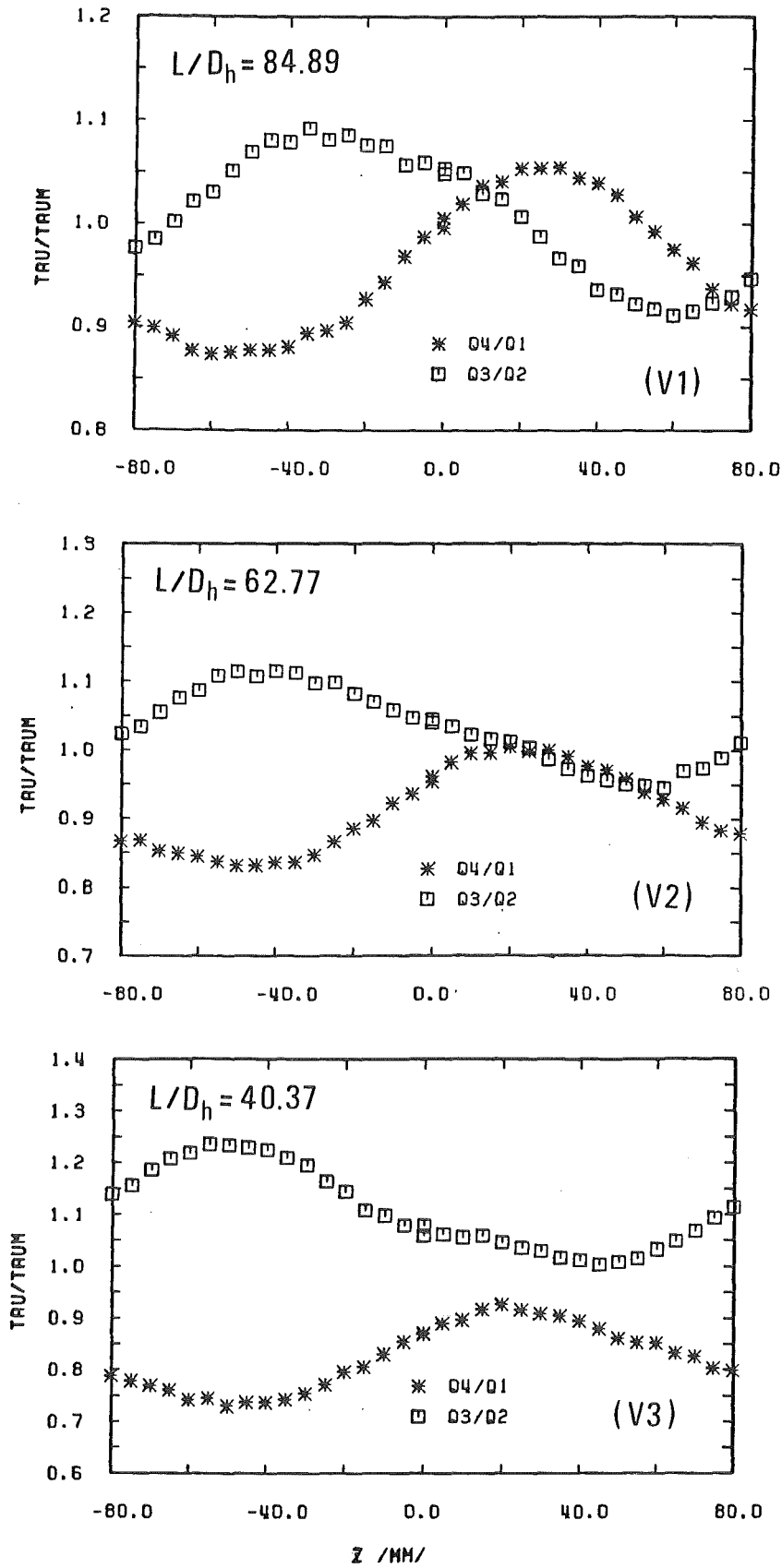


Abb.10 Wandschubspannungsverteilungen bezogen auf den Mittelwert aus allen vier Quadranten (x/y)

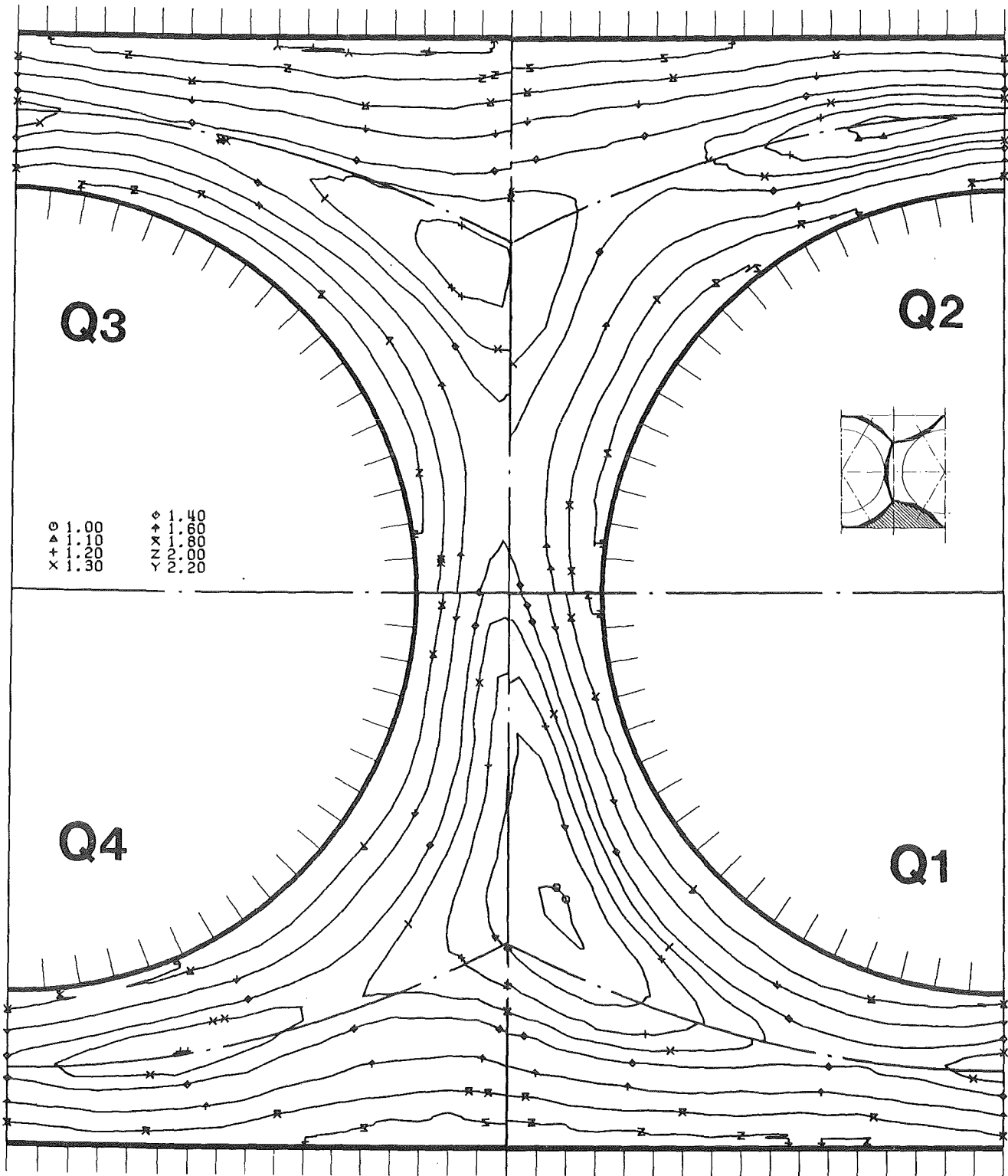
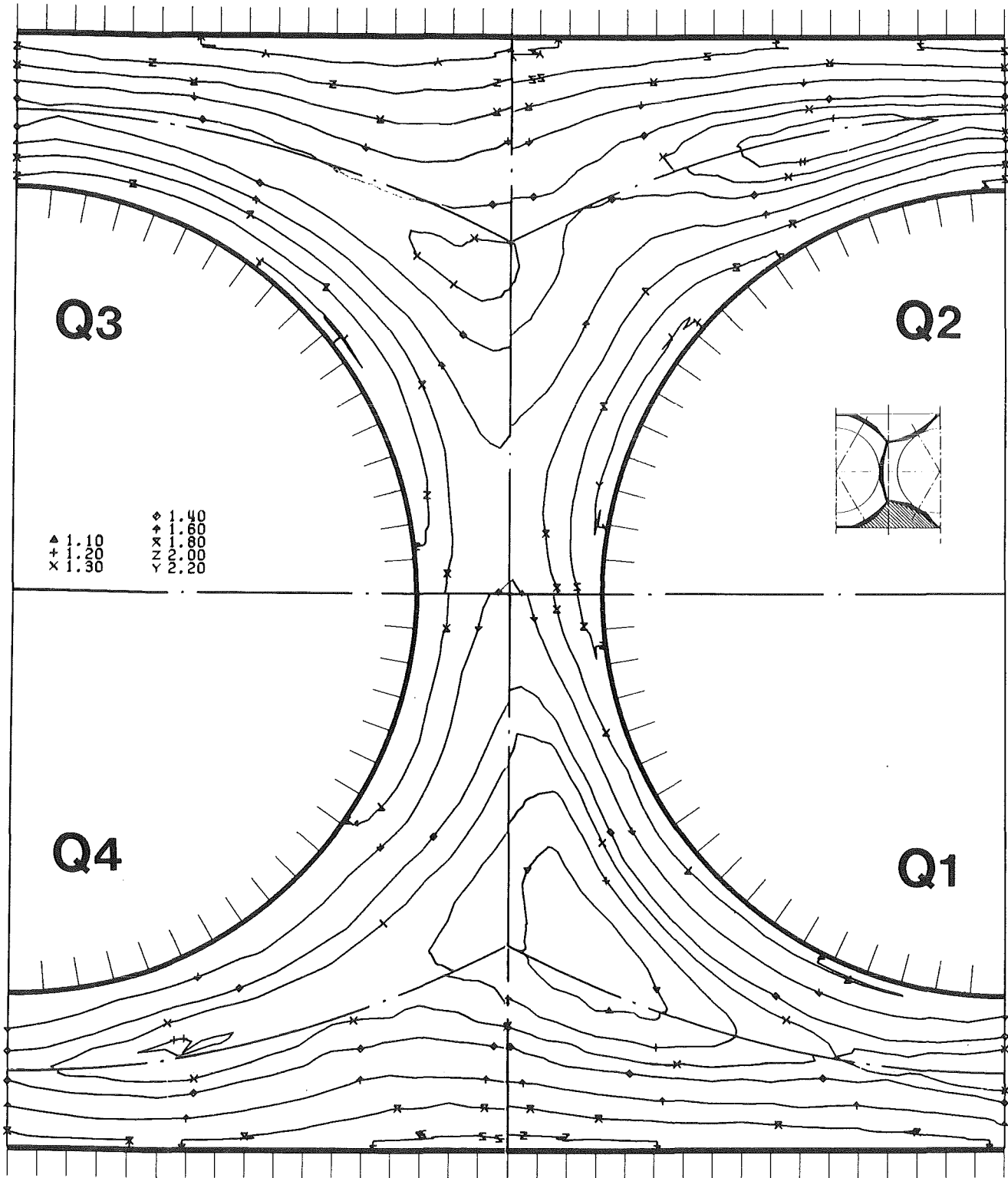
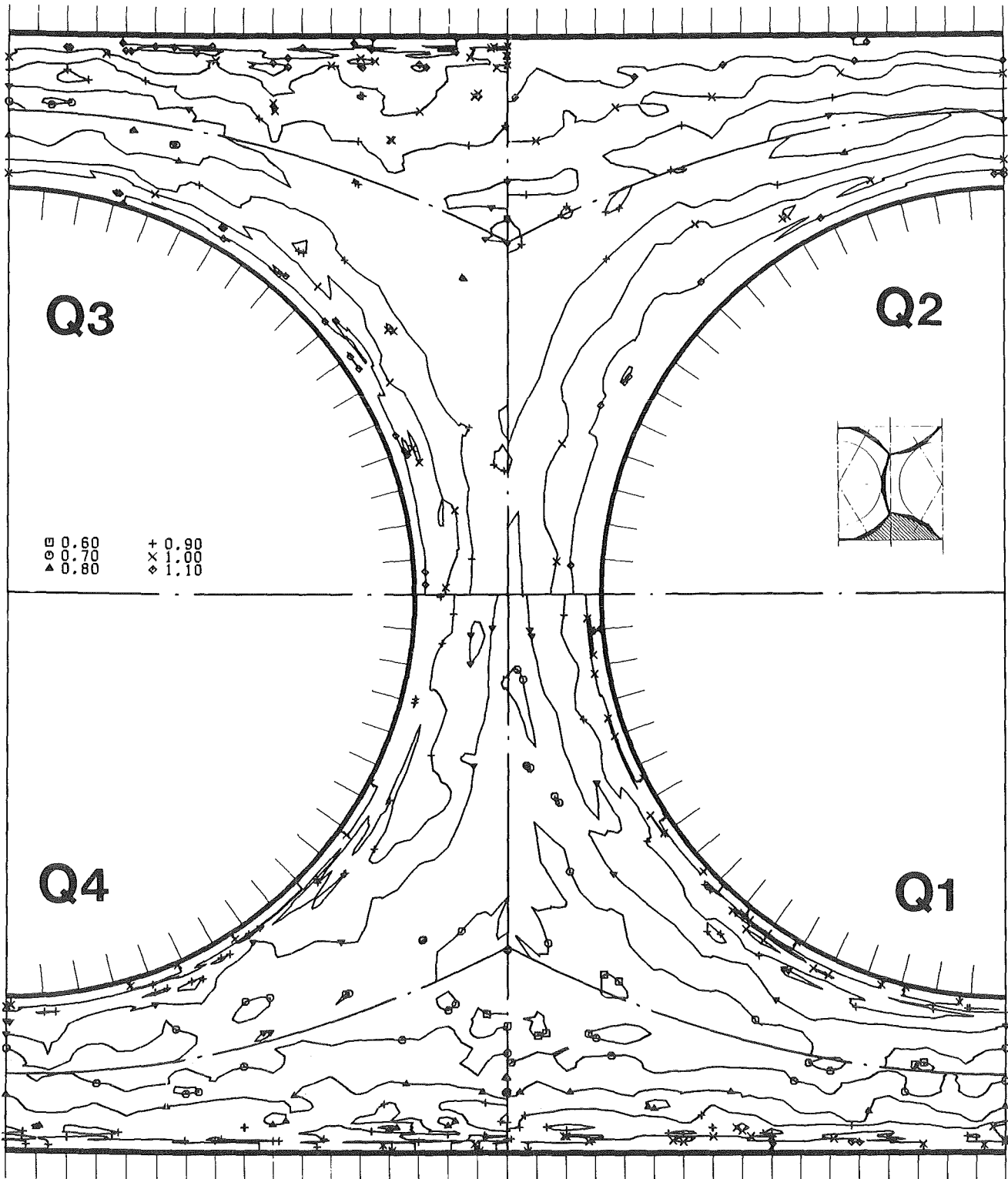


Abb.11 Axiale Turbulenzintensität bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 62.77$



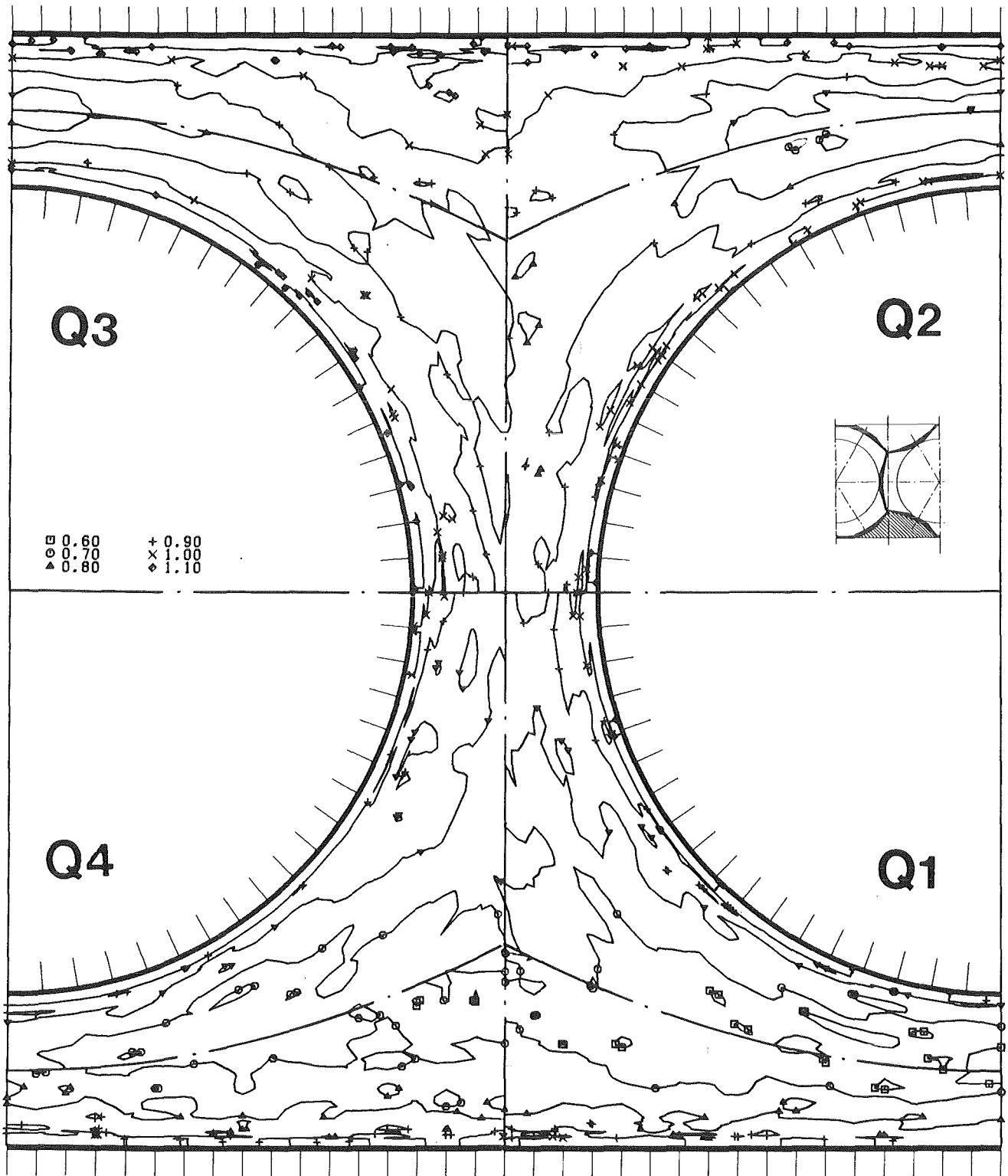
KfK

Abb.12 Axiale Turbulenzintensität bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 40.37$



KfK

Abb.13 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 62.77$



KfK

Abb.14 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 40.37$

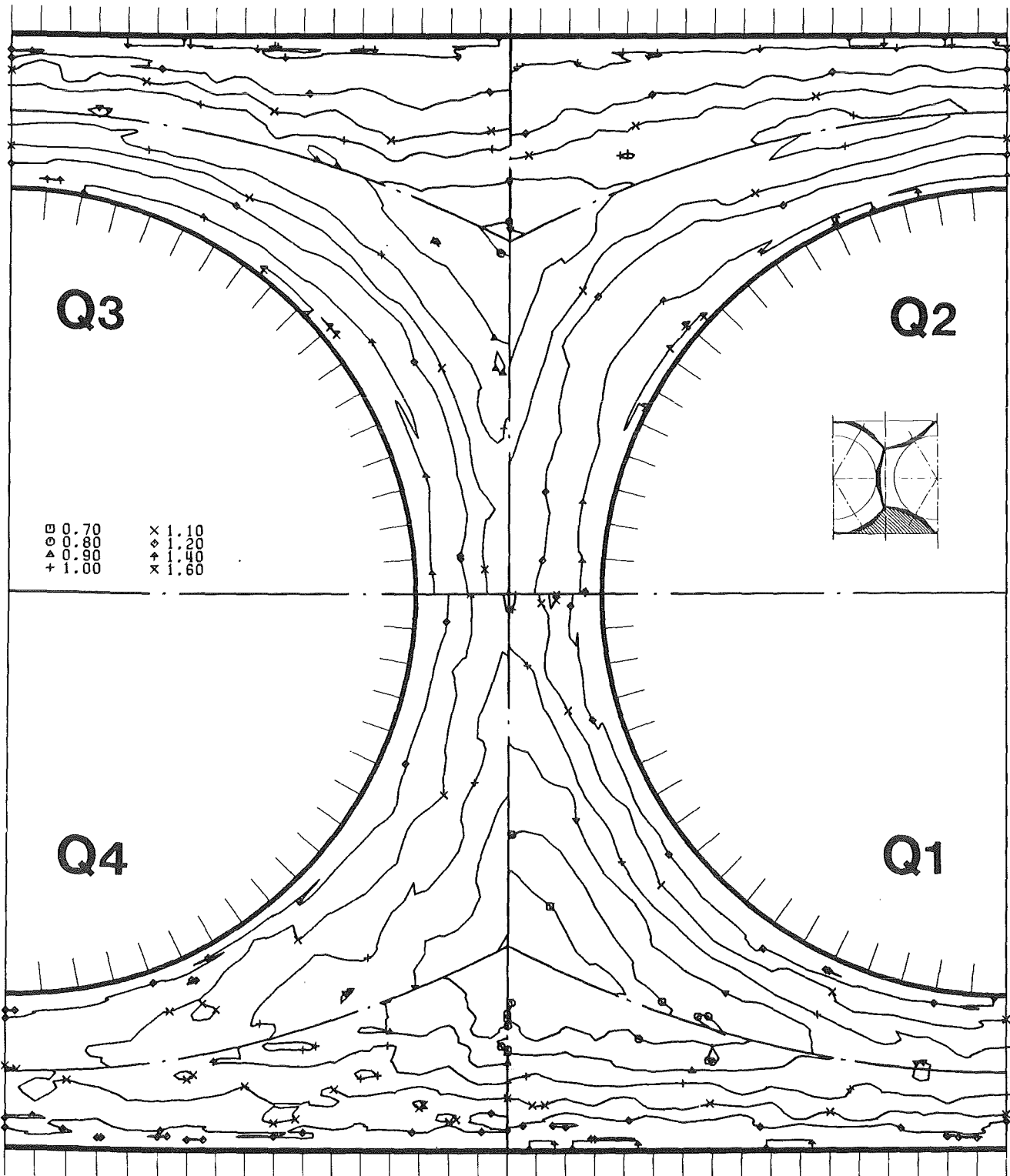


Abb.15 Turbulenzintensität parallel zur Wand bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 62.77$

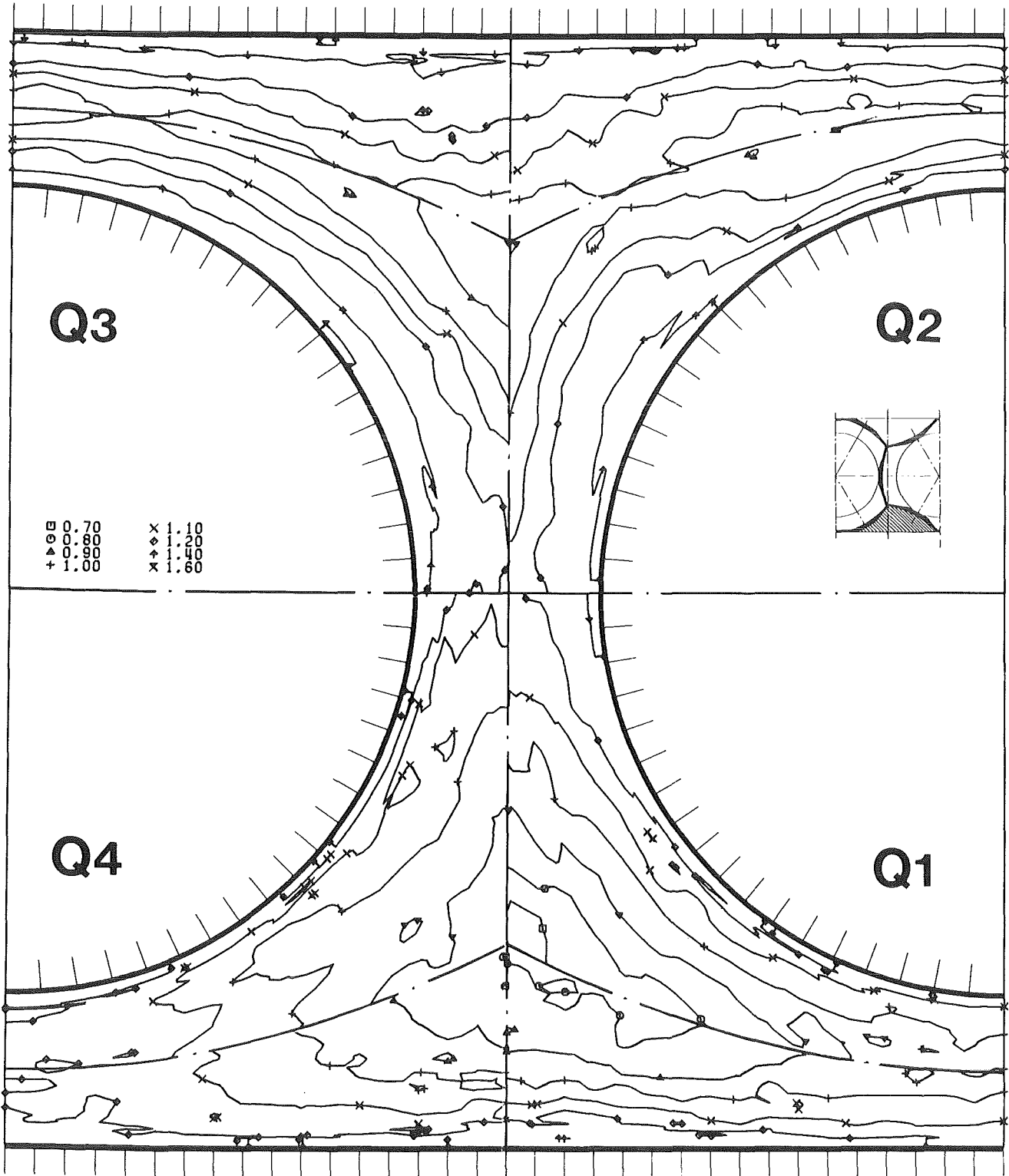


Abb.16 Turbulenzintensität parallel zur Wand bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 40.37$

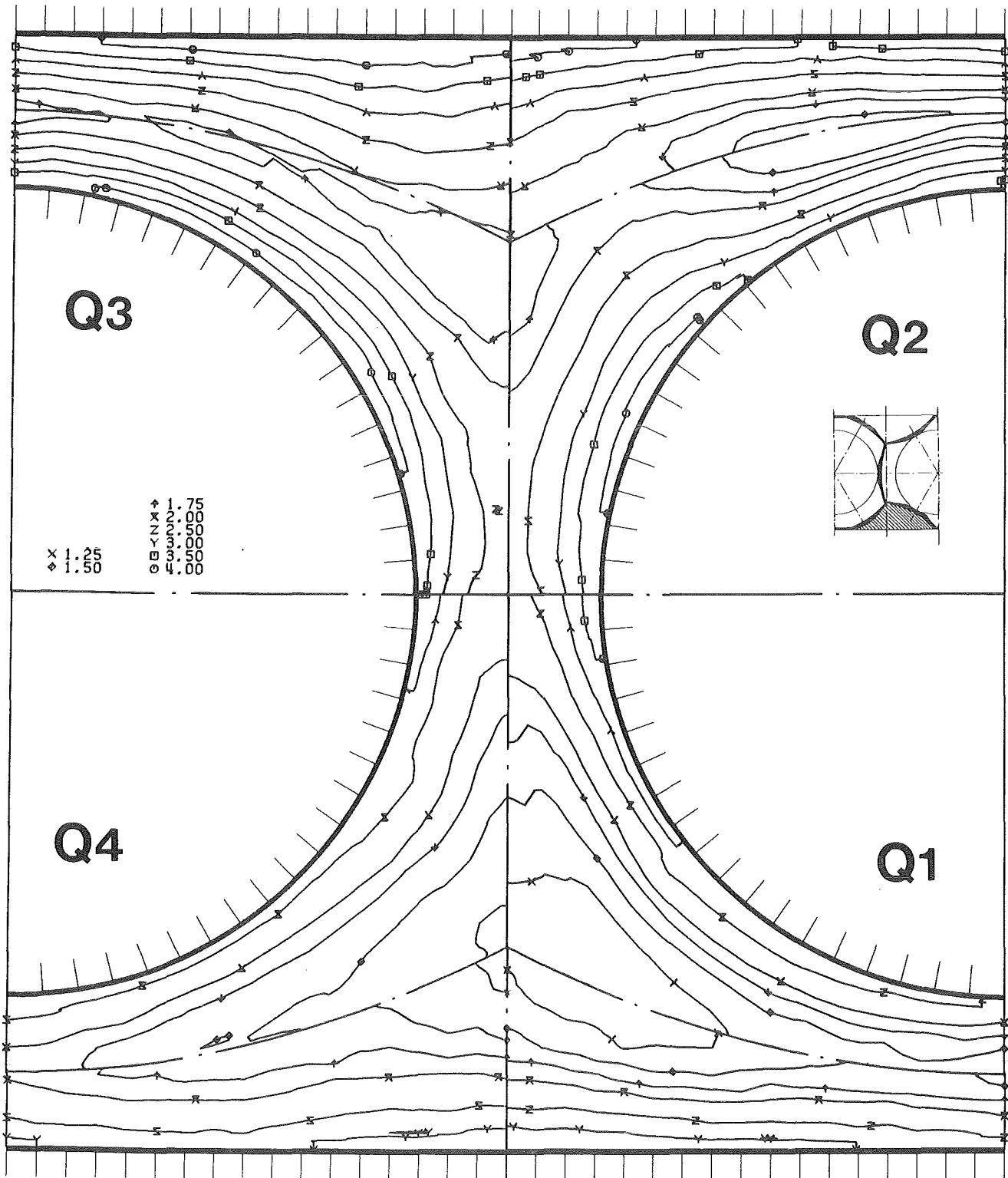
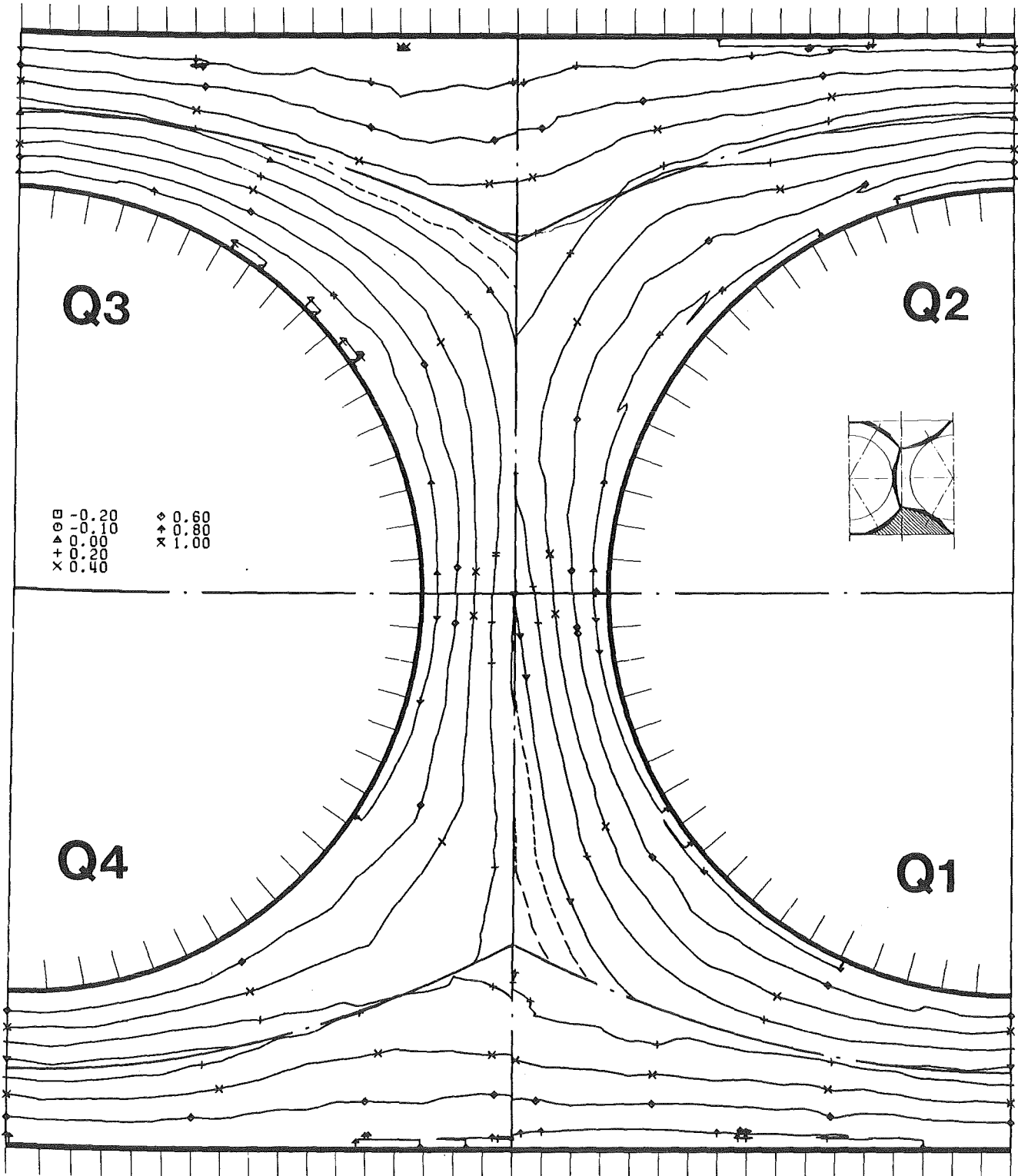
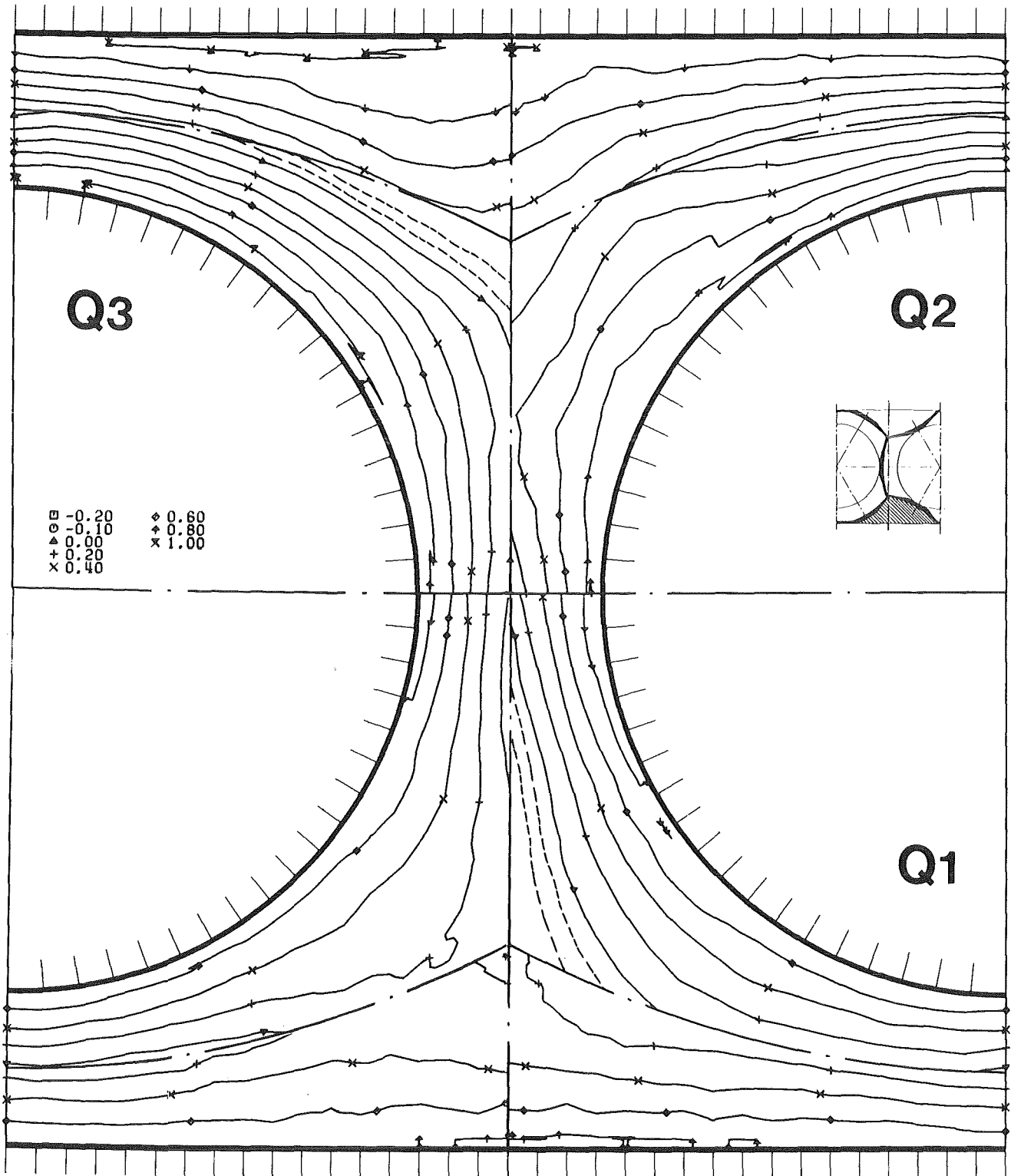


Abb.18 Kinetische Energie der Turbulenz bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 40.37$



KfK

Abb.19 Schubspannung senkrecht zur Wand bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für $L/D_n = 62.77$



kfk

Abb.20 Schubspannung senkrecht zur Wand bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 40.37$

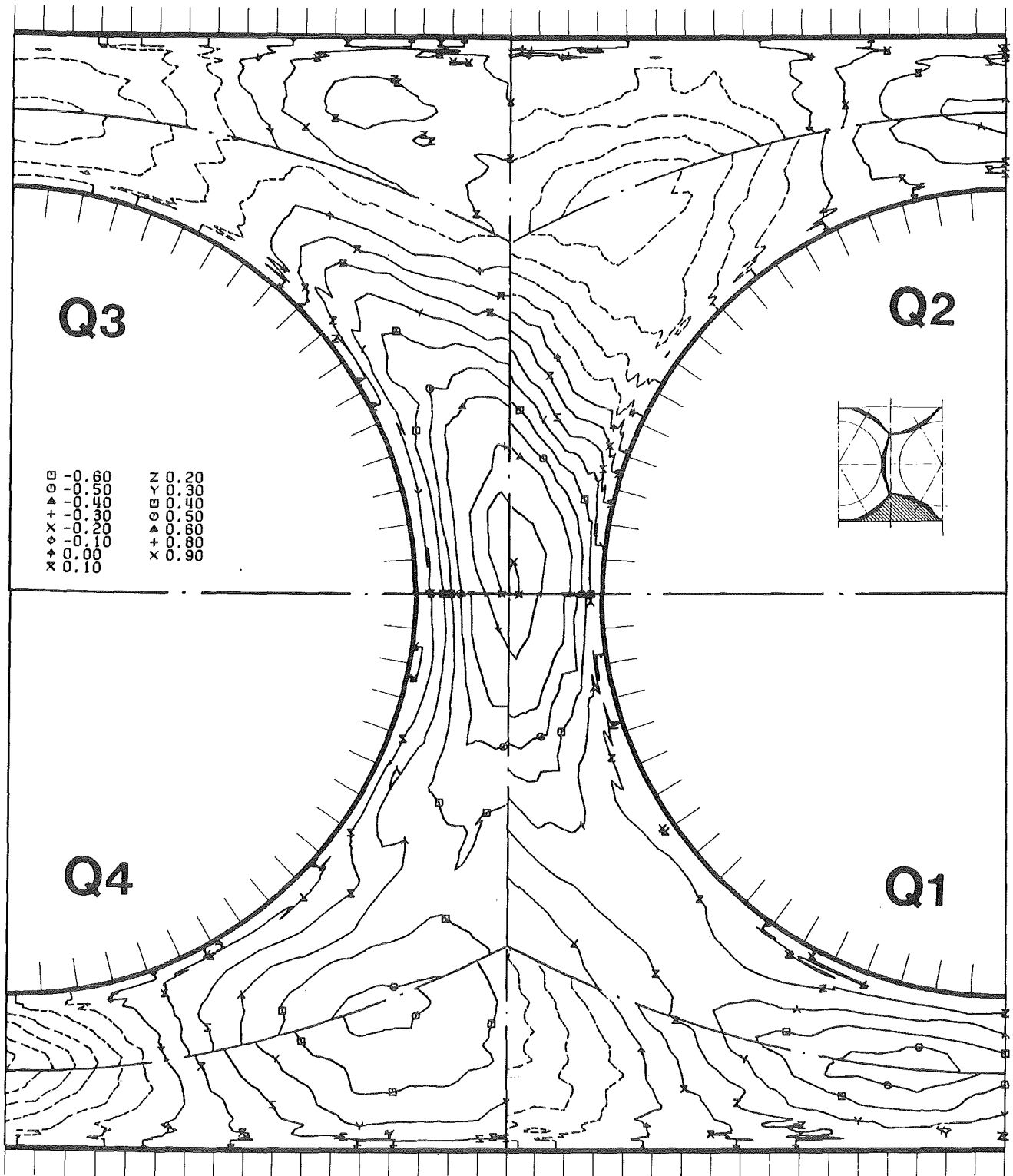
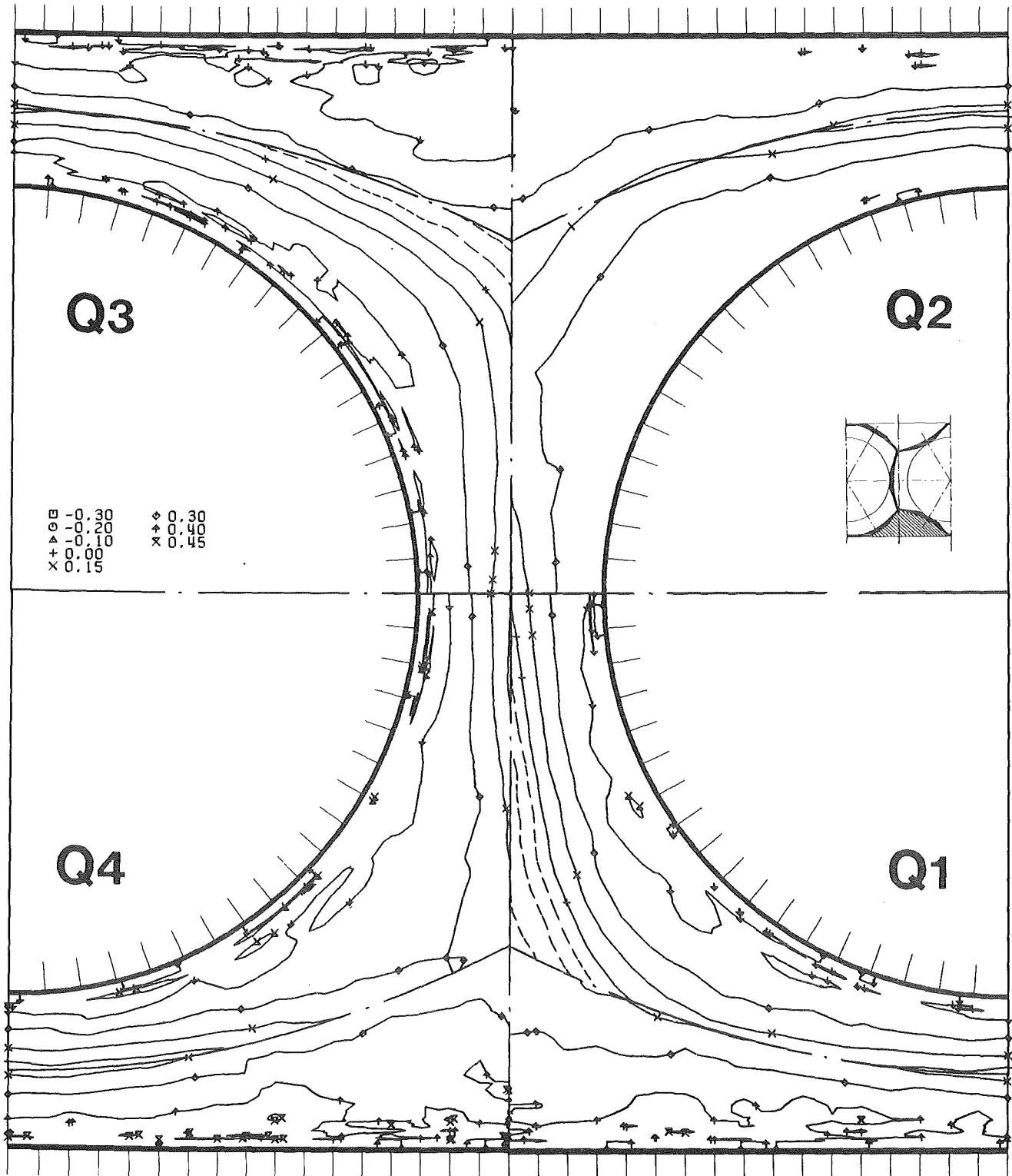
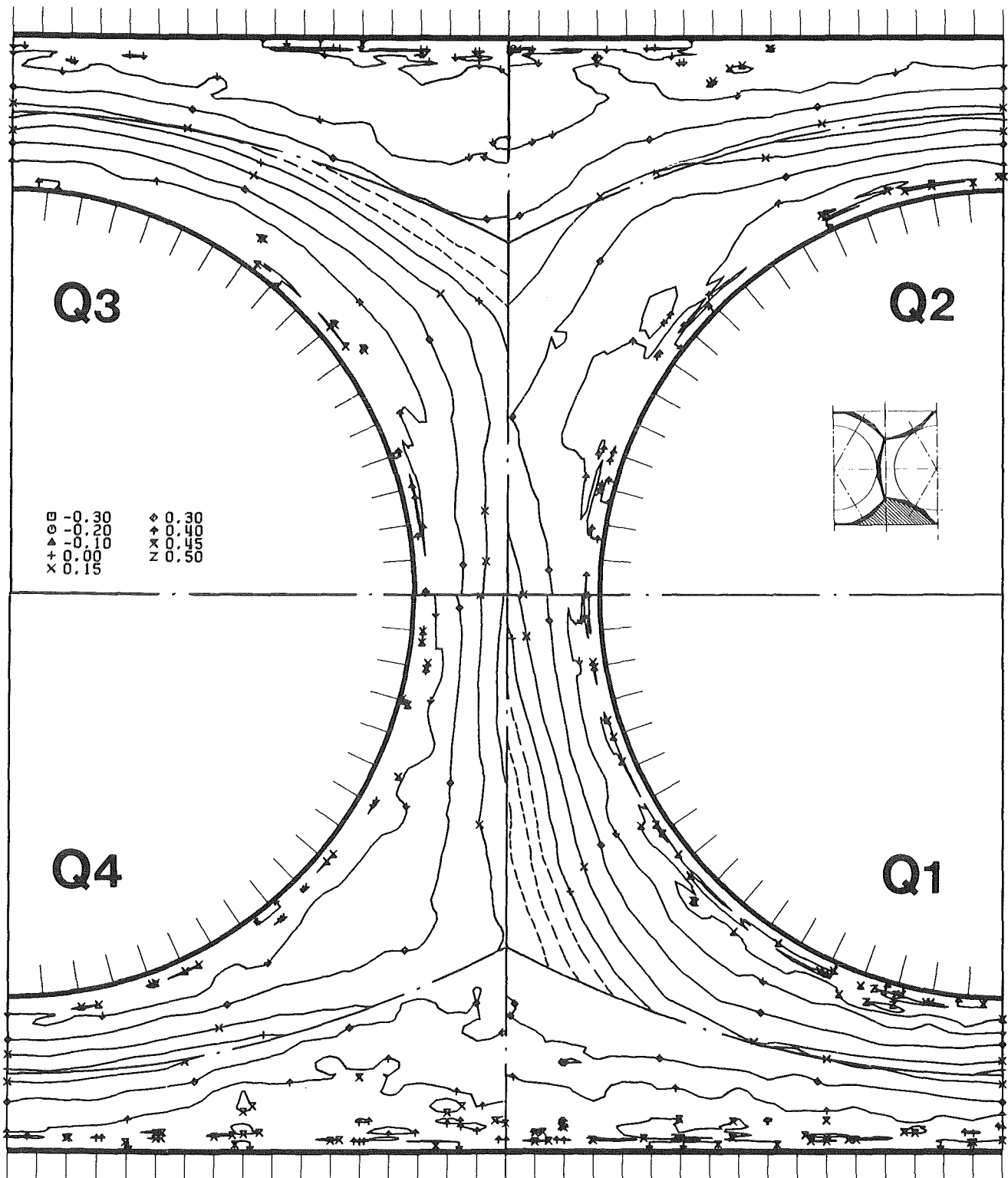


Abb.22 Schubspannung parallel zur Wand bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 40.37$



KfK

Abb.23 Korrelationskoeffizient der Schubspannung senkrecht zur Wand für $L/D_h = 62.77$



KfK

Abb.24 Korrelationskoeffizient der Schubspannung senkrecht zur Wand für $L/D_h = 40.37$

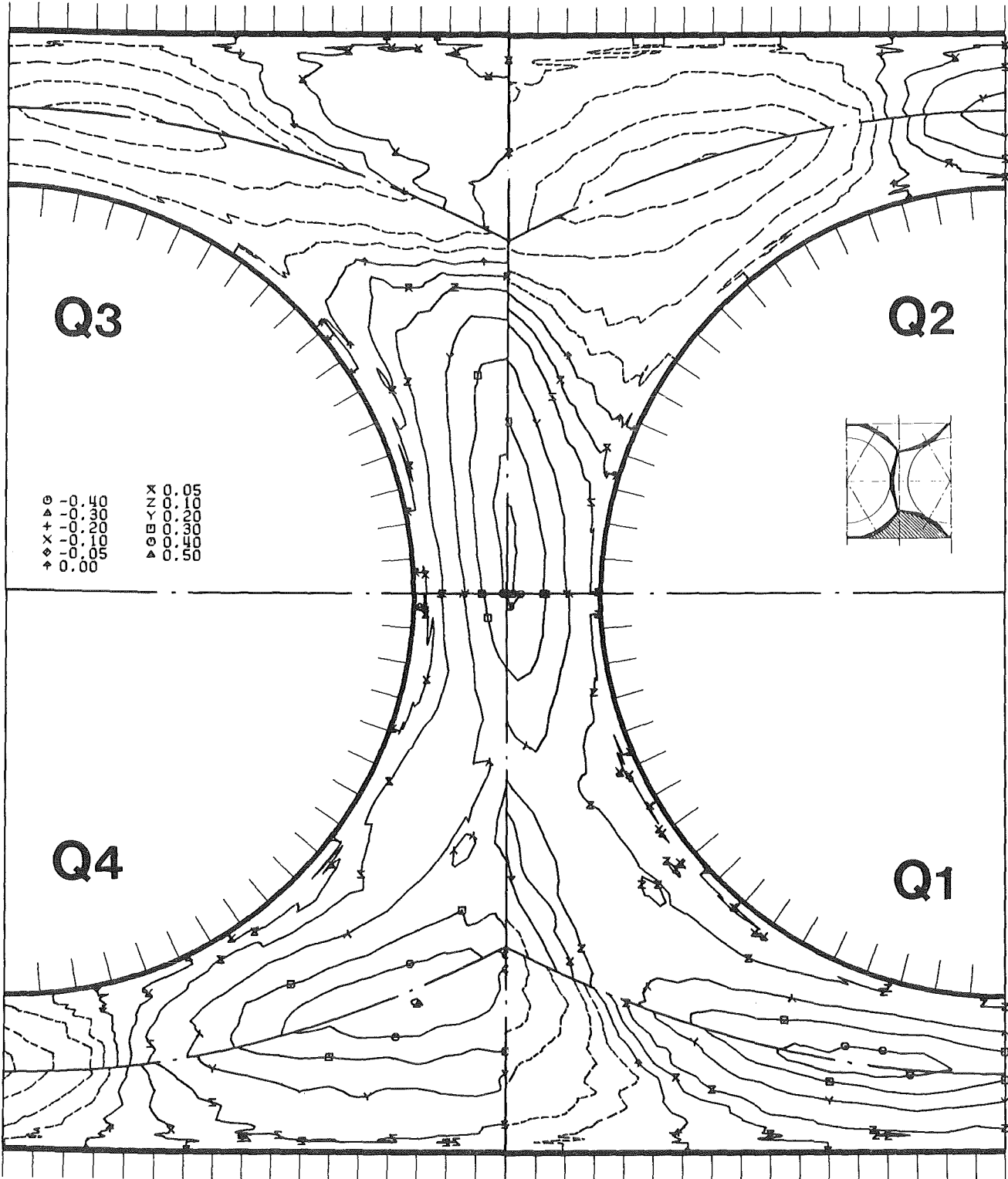
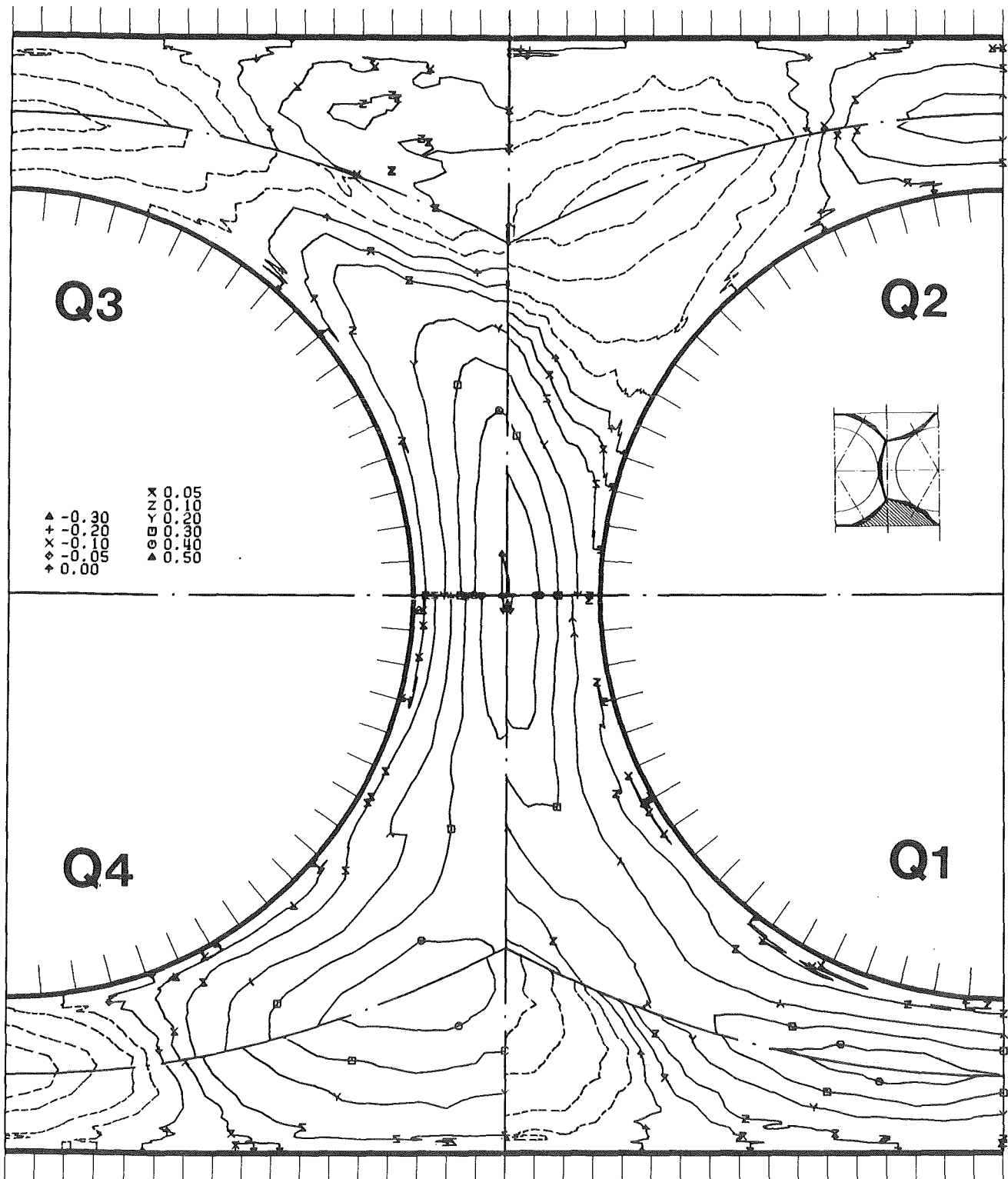
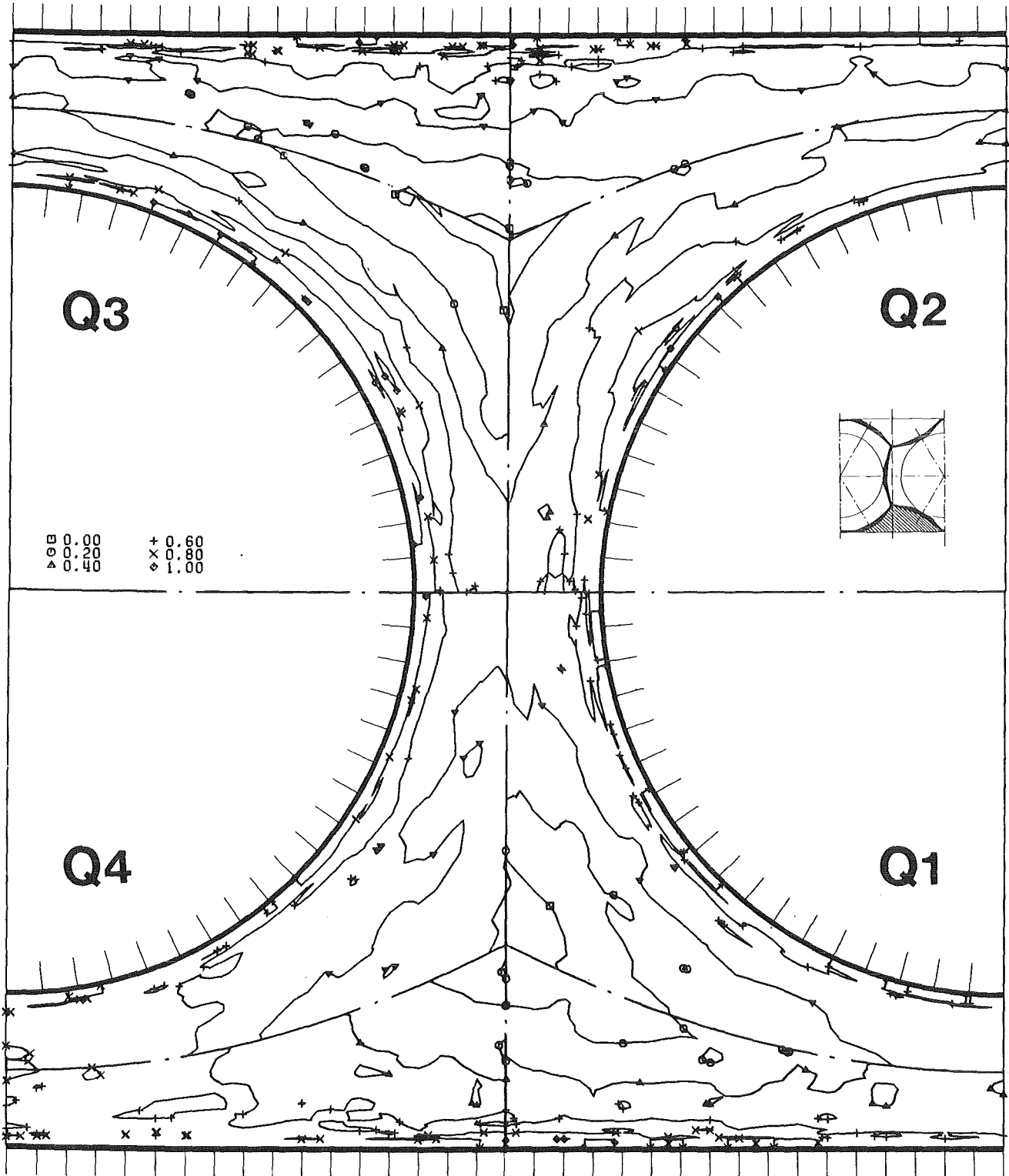


Abb.25 Korrelationskoeffizient der Schubspannung parallel zur Wand für $L/D_h = 62.77$



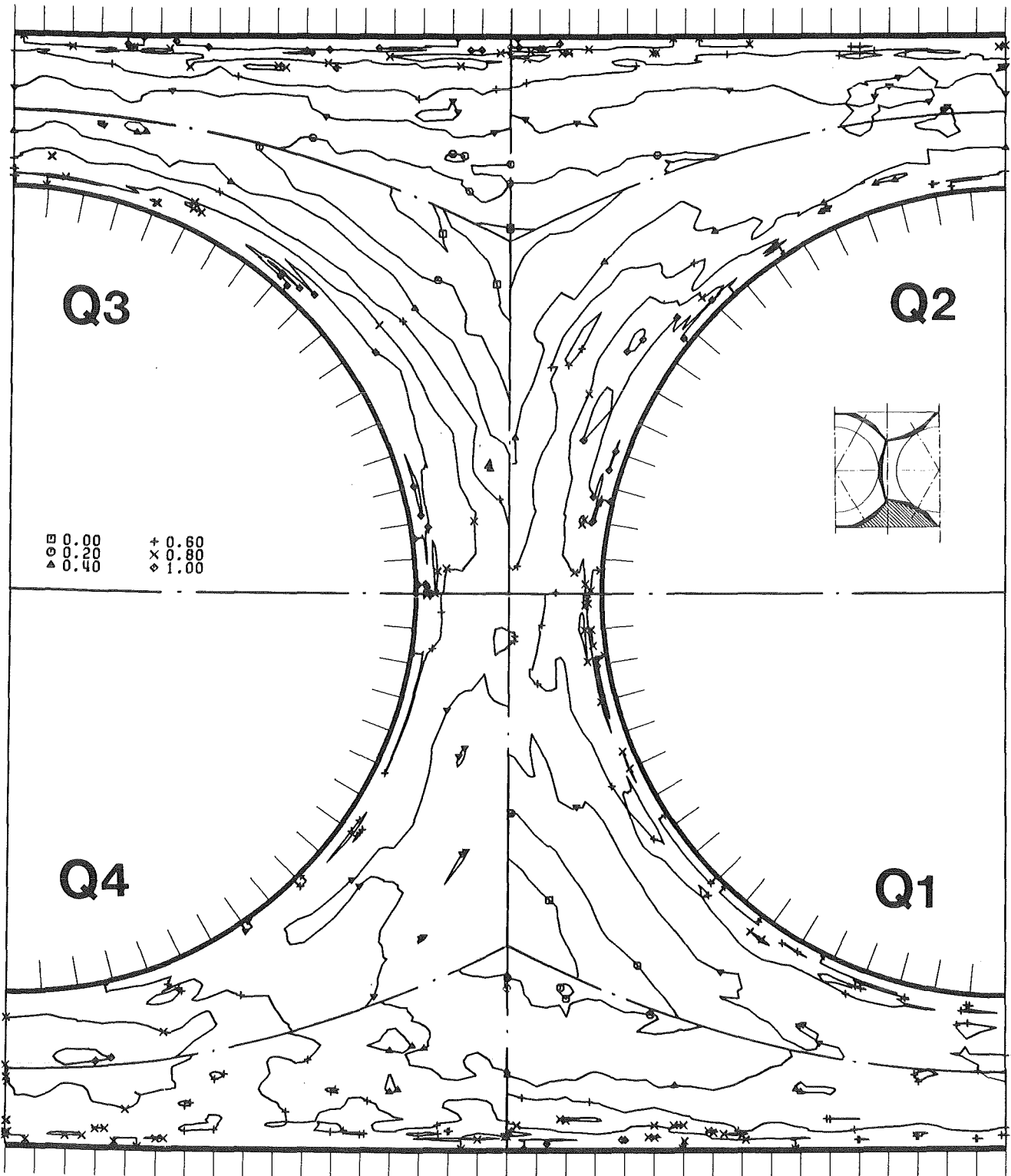
KfK

Abb.26 Korrelationskoeffizient der Schubspannung parallel zur Wand
für $L/D_h = 40.37$



KfK

Abb.27 Quellterm für die axiale Wirbelstärke für $L/D_h = 62.77$



KfK

Abb.28 Quellterm für die axiale Wirbelstärke für $L/D_h = 40.37$