



KfK 4828  
März 1991

# **Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilung in Wandkanälen von Stabbündeln unmittelbar hinter einem Abstandshalter mit starker Randversperrung**

**K. Rehme**  
**Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik**  
**Projekt Nukleare Sicherheitsforschung**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



# **KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE**

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik  
Projekt Nukleare Sicherheitsforschung

KfK 4828

Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilung in Wandkanälen von Stabbündeln  
unmittelbar hinter einem Abstandshalter mit starker Randversperrung

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 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  $L/D_h = 4.61, 1.93$  bzw.  $0.96$ . Die Reynoldszahl der Untersuchungen betrug  $Re = 1.35 \times 10^5$ .

Im Vergleich zu den früheren Untersuchungen im Nachlauf eines Abstandshaltergitters ohne starke Randversperrung ergeben sich starke Änderungen der Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen. Für sinkende  $L/D_h$  wachsen die Massenstromumverteilungen. Die Turbulenzintensitäten und die kinetische Energie der Turbulenz wachsen stark an.

Ein Vergleich zwischen den Ergebnissen im Nachlauf eines Abstandshalters mit und ohne Randversperrung zeigt, daß im Falle der Randversperrung das Turbulenzniveau bis  $L/D_h = 40.37$  angehoben ist, während für den Fall ohne Randversperrung bei  $L/D_h = 8.44$  die Verhältnisse für die ausgebildete Strömung erreicht werden.

# Distributions of velocity and turbulence in wall subchannels of rod bundles immediately downstream of a spacer grid with a strong partial blockage

## 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  $L/D_h = 4.61$ ,  $1.93$  and  $0.96$ , respectively. The Reynolds number of this investigation was  $Re = 1.35 \times 10^5$ .

Strong changes of the distributions of velocity and turbulence are found compared with the previous results downstream of a spacer grid without a partial blockage. The redistributions of the mass flow and of the turbulence intensities increase with decreasing  $L/D_h$ . The kinetic energy of turbulence strongly increases with decreasing  $L/D_h$ .

The comparison between the results downstream of a spacer grid with and without a partial blockage shows that, in the case of the blocked spacer, the level of turbulence is increased up to  $L/D_h = 40.37$  whereas the level of the fully developed flow is reached after  $L/D_h = 8.44$ , in the case of an unblocked spacer.

## 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 /11,12/. Der vorliegende Bericht enthält die Ergebnisse der Messungen von Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen unmittelbar hinter dem blockierten Abstandshaltergitter.



## 2. Teststrecke

Die Untersuchungen wurden an der SIROCCO (= Spacer In Rod Cluster data Compilation)-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 V7, V8 und V9 eingebauten Abstandshalter (Abb.1) dokumentiert. Die Meßergebnisse für die Ebenen V1 bis V3 ( $L/D_h = 89.9$  bis  $40.4$ ) sind in /11/ und die Ergebnisse für die Ebenen V4 bis V6 ( $L/D_h = 32.76$  bis  $8.44$ ) in /12/ enthalten.

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

$$L/D_h = 4.61 \text{ für Meßebeine V7,}$$

$$L/D_h = 1.93 \text{ für Meßebeine V8,}$$

und

$$L/D_h = 0.96 \text{ für Meßebeine V9.}$$

Die Messungen erfolgten bei Reynoldszahlen von  $Re = 1.35 \times 10^5$ .

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.

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 ( $45^\circ$ ) 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 /13/ 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 ( $r/\Phi$ ) 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  $5^\circ$ , 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  $45^\circ$  versetzte Positionen erfolgen /13/.

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 wandnächsten 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 /13/ 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 /14/ ausgewertet. Für die Hitzdraht-Messungen wird dabei die von Hooper /15/ 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  $0,20^\circ$  vom Nominalwinkel  $45^\circ$  ab. Die Hitzdrähte werden im eigenen Labor gefertigt. Dazu wird ein Punktschweißgerät der Fa. DISA verwendet.

Die Korrektur, 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 /16/ die Höhenlinien aus den Meßergebnissen ermittelt, und zwar für jeden der zwei Bereiche ( $r/\Phi$  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 V7, V8 bzw. V9 als Linien gleicher Geschwindigkeit dargestellt. Dabei sind die Strömungsgeschwindigkeiten auf die Referenzgeschwindigkeit

$$u_R = 27.25 \text{ ms}^{-1}$$

bezogen.

Die Geschwindigkeitsverteilungen sind deutlich durch die Abstandshalterstruktur und besonders durch die starke Randblockade geprägt, die in den Abbildungen skizziert ist. Im Wandkanal mit der starken Randversperrung (Q1 und Q4) tritt die



Maximalgeschwindigkeit stets im Spalt zwischen den Stäben auf. Für alle drei Ebenen ist deutlich zu erkennen, daß sich geschlossene Höhenlinien ausgebildet haben zwischen der Abstandshalterstruktur und den Stab- bzw. Kanalwänden. Während für  $L/D_h = 4.61$  und  $1.93$  unter der starken Randversperrung (Q1 und Q4) die Geschwindigkeiten stark absinken bei Annäherung an den Abstandshalter, tritt für  $L/D_h = 0.96$  Rückströmung unter der Randversperrung auf. Das Rückströmgebiet kann näherungsweise als das Gebiet angenommen werden, in dem keine Höhenlinien vorhanden sind (Abb.8).

Sehr viel deutlicher werden die Verhältnisse, wenn die Geschwindigkeitsverteilungen in den einzelnen Quadranten und in den beiden Teilen der Quadranten integriert werden. 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 von Tab.1 angegeben ist. In den unblockierten Quadranten Q2 und Q3 steigt die relative mittlere Geschwindigkeit mit sinkendem  $L/D_h$  stetig an. Das gilt mit der Ausnahme des Gebietes an der Kanalwand (x/y) im Quadranten Q3 auch für alle Teilkanäle.

In den blockierten Quadranten Q1 und Q4 ergibt sich ein unterschiedliches Verhalten. Während im Quadranten Q1 (mit der stärksten Blockade) die mittlere relative Geschwindigkeit mit sinkendem  $L/D_h$  stark abnimmt, auch in den Teilkanälen, steigt die relative mittlere Geschwindigkeit im Quadranten Q4 mit sinkendem  $L/D_h$  an. Das liegt insbesondere daran, daß das Teilgebiet nahe der Stabwand ( $r/\Phi$ ) im Quadranten Q4 praktisch kaum blockiert ist und daher dort auch die relative mittlere Geschwindigkeit stark ansteigt. Dagegen ist der Teilbereich an der Kanalwand (x/y) stärker blockiert und deshalb steigt zwar die relative mittlere Geschwindigkeit von  $L/D_h = 4.61$  nach  $L/D_h = 1.93$  leicht an, um dann nach  $L/D_h = 0.96$  stark abzufallen.

Bei den Untersuchungen im Nachlauf eines Abstandshaltergitters ohne Randblockade konnten derartige Effekte nicht festgestellt werden /7-10/. Zum einfacheren Vergleich sind die entsprechenden Ergebnisse (für gleiche  $L/D_h$ ) in Tab.2 angegeben. Die Tendenzen sind teils umgekehrt zu den hier gemessenen für den Fall mit Randversperrung. Das zeigt deutlich, welchen starken Einfluß die Randversperrung auf die Geschwindigkeitsverteilung ausübt. Für  $L/D_h = 0.96$  betrug die größte Abweichung des Durchsatzes vom mittleren Durchsatz 1,7% im Quadranten Q2 für den Fall ohne Randversperrung. Der entsprechende Wert

liegt für den hier untersuchten Fall mit Randversperrung bei 52.5% im Quadranten Q1.

Vergleicht man die mittleren Geschwindigkeiten in den beiden Wandkanälen, nämlich im blockierten Wandkanal (Q1 + Q4) und im unblockierten Wandkanal (Q2 + Q3), dann sieht man, wie die Durchsatzunterschiede zwischen den beiden Wandkanälen anwachsen, je näher man am Abstandshalter ist (Tab.3) . Für  $L/D_h = 4.61$  beträgt der Unterschied 46.3%, er wächst auf 56,1% für  $L/D_h = 1.93$  und 96.4% für  $L/D_h = 0.96$  an. Dabei ist das Verhältnis jeweils auf den Durchsatz im blockierten Wandkanal (Q1 + Q4) bezogen.

## 5.2 Wandschubspannung

Die gemessenen Wandschubspannungen zeigen ähnliche 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  $\Phi = -90^\circ$  die Position zwischen Stab- und Kanalwand in den Quadranten Q1 bzw. Q4. Die Wandschubspannungsverteilungen an den Kanalwänden sind in Abb.10 für die drei Ebenen dargestellt. Hier ist  $z = 0$  die Position auf der Symmetrielinie der Wandkanäle und  $z = -85.0$  mm die Position zwischen Stab- und Kanalwand in den Quadranten Q3 bzw. Q4. 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 ( $\tau_{av}/Pa$ ).

Die gemessenen Wandschubspannungsverläufe in den drei Ebenen sind völlig anders als bei den vorangehenden Messungen in den gleichen Ebenen mit dem unblockierten Abstandshalter /9,10/. An den Stabwänden sind die Wandschubspannungen in den Quadranten Q2 und Q3 ( $\Phi \geq 0^\circ$ ) deutlich höher als in den blockierten Quadranten Q1 und Q4. Die Kontaktstelle zwischen Abstandshalter und Stabwand in den Quadranten Q4 und Q3 liegt bei  $\Phi = 0^\circ$ . Für  $L/D_h = 4.61$  ist diese Kontaktstelle in Wandschubspannungsverlauf nicht sichtbar durch ein relatives Minimum. Dagegen zeigt sich sowohl für  $L/D_h = 1.93$  als auch für  $L/D_h = 0.96$  ein ausgeprägtes Minimum der Wandschubspannung. An der Stabwand in den Quadranten Q1 und Q2 ergeben sich deutliche relative Minima im Quadranten Q2 bei  $\Phi = 60^\circ$ , der einen Kontaktstelle zwischen Abstandshalter und Stabwand. An der anderen Kontaktstelle im Quadranten Q1 ( $\Phi = -60^\circ$ ) ist für  $L/D_h = 4.61$  (V7) kein Minimum zu erkennen, jedoch ist ein relatives Minimum sichtbar für  $L/D_h = 1.93$  bzw. 0.96. Für  $L/D_h = 0.96$  (V9) verschwindet die

Wandschubspannung. Das bedeutet, daß in diesem Gebiet unterhalb der Kontaktstelle Rückströmung auftritt. Das bedeutet aber gleichfalls, daß an den übrigen Positionen des Kontakts zwischen Abstandshalter und Stabwand ( $\Phi = 60^\circ$  im Quadranten Q2 und  $\Phi = 0^\circ$  in den Quadranten Q4 und Q3) kein Kontakt zwischen Abstandshalter und Stabwand auftritt, sondern ein Toleranzspalt besteht, der verhindert, daß die Wandschubspannung verschwindet.

Es muß darauf hingewiesen werden, daß im Rückströmgebiet die Messung der Wandschubspannung nach der Preston-Methode versagt. Damit wird auch der durch Integration bestimmte Mittelwert der Wandschubspannung in der Ebene V9 ( $L/D_h = 0.96$ ) verfälscht. Für die übrigen Ergebnisse der Wandschubspannung kann festgestellt werden, daß die Messungen hinreichend genau sind, auch wenn sie bei sich ausbildendem Geschwindigkeitsprofil erfolgten. Das wird deutlich aus den dimensionslosen Geschwindigkeitsprofilen, die mit der gemessenen Wandschubspannungsgeschwindigkeit normiert werden. Es zeigt sich, daß für alle Messungen die wandnächsten Meßpunkte auf dem universellen Wandgesetz liegen und damit die Voraussetzung der Preston-Methode bestätigt wird.

An den Kanalwänden unterscheiden sich die Wandschubspannungsverteilungen im Vergleich zu den Messungen ohne Randversperrung noch drastischer. Während bei den früheren Messungen die Verläufe an den beiden Kanalwänden ähnlich waren, sind sie für die Messungen mit Randversperrung völlig verschieden. In den Quadranten Q2 und Q3 mit dem deutlich höheren Massendurchsatz ist die Wandschubspannung deutlich höher als in den Quadranten Q4 und Q1, die blockiert sind. Relative Minima der Wandschubspannungen sind nur an der Kanalwand in den Quadranten Q2 und Q3 zu erkennen, die dort auftreten, wo die Abstandshalterstruktur mit der Kanalwand zusammentrifft. An der Kanalwand im blockierten Wandkanal (Q4/Q1) ist die Wandschubspannungsverteilung für die Ebene V7 ( $L/D_h = 4.61$ ) noch relativ symmetrisch. Für kleinere  $L/D_h$  wird die Wandschubspannung stark unsymmetrisch und für  $L/D_h = 0.96$  verschwindet die Wandschubspannung für einen großen Bereich, nämlich dort, wo Rückströmung auftritt, wie bereits bei der Geschwindigkeitsverteilung diskutiert wurde.

## 5.3 Turbulenzintensitäten und kinetische Energie der Turbulenz

### 5.3.1 Axiale Turbulenzintensität

Die gemessenen axialen Turbulenzintensitäten sind für die drei ausgemessenen Ebenen in den Abbildungen 11, 12 und 13 als Höhenlinien dargestellt. Die Meßwerte sind dazu auf einen Referenzwert der Wandschubspannungsgeschwindigkeit im Quadranten Q1 bei  $\Phi = 0^\circ$  gewählt, also im Spalt zwischen den Stäben.

Aus den Höhenlinendarstellungen ergibt sich deutlich der starke Einfluß der Blockade in dem Wandkanal Q1+Q4. Es fällt auf, daß die axiale Turbulenzintensität im blockierten Wandkanal mit sinkendem  $L/D_h$  sehr hohe Werte aufweist, die deutlich höher sind als im unblockierten Wandkanal Q2 + Q3. Die hohen axialen Turbulenzintensitäten sind der Grund dafür, daß in den zwei Wandkanälen in den Ebenen V8 und V9 nicht die gleichen Höhenlinien dargestellt wurden. Das ist bei der Beurteilung der Verteilungen zu berücksichtigen. Auffällig ist auch, daß geschlossene Höhenlinien nur im unblockierten Wandkanal (Q2 + Q3) auftreten zwischen der Struktur des Abstandshalters und den Stab- bzw. Kanalwänden.

Um die Unterschiede der axialen Turbulenzintensität in den drei Ebenen und in den einzelnen Quadranten qualitativ angeben zu können, wurden die Turbulenzintensitäten integriert und damit der Mittelwert der Turbulenzintensität in axialer Richtung bestimmt. Tabelle 4 enthält die berechneten Mittelwerte in den einzelnen Quadranten und den jeweiligen Teilgebieten bezogen auf den Mittelwert im gesamten ausgemessenen Bereich. Dieser Wert ist in der letzten Zeile der Tabelle angegeben. Dabei sind die Werte auf die mittlere Wandschubspannungsgeschwindigkeit bezogen, die sich aus  $\tau_{av}$  aus Tab.1 zu

$$u_{av} = \sqrt{\frac{\tau_{av}}{\rho}} \quad (4)$$

ergibt, wobei die Luftdichte  $\rho = 1.169 \text{ kgm}^{-3}$  ist.

Es zeigt sich, daß der Mittelwert der axialen Turbulenzintensität in den unblockierten Quadranten für alle untersuchten  $L/D_h$  deutlich kleiner ist als in den blockierten Quadranten. Die Unterschiede nehmen mit abnehmendem  $L/D_h$  zu bis auf die Ebene V9 ( $L/D_h = 0.96$ ), die am nächsten am Abstandshalter liegt. Hier ergibt sich eine Abnahme des Unterschiedes zwischen blockiertem und unblockiertem Wandkanal, die hervorgerufen wird durch das große Rückströmgebiet unmittelbar hinter der Blockade.

Betrachtet man die Absolutwerte der Mittelwerte der axialen Turbulenzintensität (Tab.7), dann ergibt sich, daß absolut die Mittelwerte auch in den unblockierten Wandkanal stetig ansteigen mit sinkendem  $L/D_h$ . Im blockierten Wandkanal ist der Anstieg von  $L/D_h = 4.61$  nach  $L/D_h = 1.93$  jedoch wesentlich stärker. Für  $L/D_h = 0.96$  fällt der Absolutwert ab, ist jedoch immer noch höher als im unblockierten Wandkanal. Für  $L/D_h = 1.93$  ist der Mittelwert der axialen Turbulenzintensität im blockierten Wandkanal mehr als doppelt so hoch wie im unblockierten Wandkanal.

### 5.3.2 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand

Die gemessenen Turbulenzintensitäten senkrecht zur Wand sind in den Abb.14 bis 16 für die ausgemessenen Ebenen als Höhenlinien dargestellt. Während für  $L/D_h = 4.61$  noch geschlossene Höhenlinien im blockierten Wandkanal auftreten, findet man geschlossene Höhenlinien für  $L/D_h = 1.93$  und  $0.96$  nur noch im unblockierten Wandkanal zwischen der Abstandshalterstruktur und den Stab- und Kanalwänden. Abgesehen von  $L/D_h = 0.96$  sind die Turbulenzintensitäten senkrecht zur Wand im blockierten Wandkanal höher als im unblockierten.

Das ergibt sich auch aus den integrierten Mittelwerten (Tab.4). Betrachtet man die Absolutwerte der Mittelwerte (Tab.7), dann wird deutlich, daß im unblockierten Wandkanal die mittlere Turbulenzintensität senkrecht zur Wand stetig mit sinkendem  $L/D_h$  ansteigt. Dagegen ist im blockierte Wandkanal von  $L/D_h = 1.93$  nach  $L/D_h = 0.96$  ein Abfall zu beobachten. Für  $L/D_h = 0.96$  ist der absolute Mittelwert im blockierten Wandkanal kleiner als im unblockierten.

### 5.3.3 Turbulenzintensität parallel zur Wand

Die Meßergebnisse für die Turbulenzintensität parallel zur Wand, die in den Abb.17 bis 19 als Höhenlinien für die drei ausgemessenen Ebenen dargestellt

sind, zeigen deutliche Strukturen im wesentlichen nur im unblockierten Wandkanal (Q2 + Q3). Abgesehen von  $L/D_h = 0.96$  sind die Turbulenzintensitäten im blockierten Wandkanal deutlich höher als im unblockierten. Auch ist zu erkennen, daß die Turbulenzintensitäten parallel zur Wand direkt im Nachlauf der Abstandshalterstruktur höher sind als weiter entfernt davon.

Aus den integrierten Mittelwerten der relativen Turbulenzintensität parallel zur Wand (Tab.5) erkennt man, daß die Werte für die unblockierten Quadranten Q2 und Q3 mit sinkendem  $L/D_h$  ansteigen. Dagegen fallen die Mittelwerte im Quadranten Q1 mit sinkendem  $L/D_h$  stark ab. Im Quadranten Q2 ergibt sich ein leichter Abfall zu  $L/D_h = 0.96$ .

Betrachtet man die Absolutwerte in den beiden Wandkanälen (Tab.7) dann zeigt sich, daß der Mittelwert der Turbulenzintensität parallel zur Wand im blockierten Wandkanal (Q1 + Q4) stetig mit sinkendem  $L/D_h$  abfällt. Dagegen steigt der Absolutwert im unblockierten Wandkanal (Q2 + Q3) mit sinkendem  $L/D_h$  stetig an. Für  $L/D_h = 0.96$  ist der Absolutwert im unblockierten Wandkanal erstmals höher als im blockierten.

#### 5.3.4 Kinetische Energie der Turbulenz

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

$$k' = 0.5 (u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (5)$$

Die ermittelten Werte sind in den Abb.20 bis 22 für die drei ausgemessenen Ebenen als Höhenlinien dargestellt. Dabei ist die kinetische Energie der Turbulenz auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit bezogen.

Im unblockierten Wandkanal (Q2 + Q3) ist die Struktur der Höhenlinien ähnlich zur Struktur der Höhenlinien der axialen Turbulenzintensität. Im blockierten Wandkanal (Q1 + Q4) wirken sich die mit sinkendem  $L/D_h$  abfallenden Turbulenzintensitäten senkrecht und besonders parallel zur Wand derartig aus, daß Unterschiede in der Struktur der Höhenlinien zwischen der kinetischen Energie der Turbulenz und der axialen Turbulenzintensität deutlich werden. Den integrierten Mittelwerten der kinetischen Energie der Turbulenz (Tab.5) kann man entnehmen, daß die relative kinetische Energie mit sinkendem  $L/D_h$  im Quadranten Q1 (blockiert) stetig abnimmt, dagegen im Quadranten Q3

(unblockiert) stetig zunimmt. Im Quadranten Q2 hat der Mittelwert der kinetischen Energie für  $L/D_h = 1.93$  ein Minimum, im Quadranten Q4 ein Maximum.

Teilt man die mittlere relative kinetische Energie nach unblockiertem und blockiertem Wandkanal auf, erhält man die in Tab.6 angegebenen Werte. Es ergibt sich, daß die relative kinetische Energie der Turbulenzbewegung im unblockierten Wandkanal (Q2 + Q3) stetig ansteigt mit sinkendem  $L/D_h$ . Im blockierten Wandkanal durchläuft die mittlere kinetische Energie für  $L/D_h = 1.93$  ein Maximum. Jedoch ist auch für  $L/D_h = 0.96$  der Energieinhalt im blockierten Wandkanal höher als im unblockierten.

Die Absolutwerte der kinetischen Energie (in  $m^2s^{-2}$ ) sind in Tab.7 enthalten. Es zeigt sich, daß die mittlere kinetische Energie im blockierten Wandkanal um den Faktor 2.64 höher ist als im unblockierten Wandkanal für  $L/D_h = 4.61$ . Bei  $L/D_h = 1.93$  vergrößert sich der Faktor auf 3.1; er fällt für  $L/D_h = 0.96$  auf 1.64 ab. Betrachtet man den unblockierten Wandkanal (Q2 + Q3), so steigt die mittlere kinetische Energie von  $L/D_h = 4.61$  nach  $L/D_h = 0.96$  um 80% an. Im blockierten Wandkanal steigt der Energieinhalt von  $L/D_h = 4.61$  nach  $L/D_h = 1.93$  um 77% an und sinkt dann auf 63% für  $L/D_h = 0.96$  ab.

#### 5.4 Schubspannungen und Korrelationskoeffizienten

Die Höhenlinien der gemessenen Schubspannungen senkrecht zur Wand bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit sind in den Abb.23 bis 25 für die drei Ebenen dargestellt. Die Höhenlinien spiegeln deutlich die Struktur des Abstandshalters und der Blockade wider. Für  $L/D_h = 4.61$  und 1.93 ergeben sich sehr hohe Schubspannungen senkrecht zur Wand unterhalb der Blockade in den Quadranten Q1 und Q4, sowie unterhalb den Kontaktstellen zwischen Abstandshalter und Stab- und Kanalwand in den Quadranten Q2 und Q3. Für  $L/D_h = 0.96$  ergeben sich hohe Schubspannungen am Rande der Blockade, dort wo die Strömung sich ablöst.

Die Höhenlinien der gemessenen Schubspannungen parallel zu den Wänden bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit sind in den Abb.26 bis 28 für die drei Ebenen dargestellt. Die Schubspannungen parallel zu den Wänden werden bestimmt durch die Abstandshalterstruktur und die Blockade. Es ergeben sich hohe Schubspannungen in der Nähe der Kontaktstellen zwischen Abstandshalter und Stab- bzw. Kanalwänden. Ebenfalls

ergeben sich hohe Schubspannungen parallel zu den Wänden in der Nähe der Blockade. Besonders ausgeprägt sind diese Gebiete für  $L/D_h=0.96$  in den Quadranten Q1 und Q4 in Spaltnähe zwischen Stab- und Kanalwand.

Die Höhenliniendarstellung der Korrelationskoeffizienten der Schubspannung senkrecht zur Wand (Abb.29 bis 31) zeigen ähnliche Verläufe wie Schubspannung selbst. Es fällt auf, daß die Korrelationskoeffizienten relativ hohe Werte haben für den blockierten Wandkanal in der Nähe der Blockade. Die Einflüsse von Abstandshalterstruktur und Blockade sind ebenfalls gut zu erkennen in den Höhenliniendarstellungen des Korrelationskoeffizienten der Schubspannung parallel zur Wand (Abb.32 bis 34). Besonders im blockierten Wandkanal (Q1 und Q4) erreichen die Korrelationskoeffizienten hohe Werte am Rande der Blockade.



## 6. Vergleich der Ergebnisse mit und ohne Randversperrung

Um die Auswirkungen der Randversperrung im Abstandshalter auf die Turbulenz und den Energieinhalt der turbulenten Schwankungsbewegungen deutlich zu machen, werden die integralen Mittelwerte der Turbulenzintensitäten und der kinetischen Energie der Turbulenz mit und ohne Randblockade untereinander verglichen.

Die Abb. 32 bis 35 zeigen den Vergleich. Dazu wurde der Mittelwert über alle Quadranten, also über beide Wandkanäle, ermittelt und nicht normiert dargestellt. Sowohl für die Turbulenzintensitäten wie auch für die kinetische Energie der Turbulenz ergibt sich, daß der Mittelwert für den unblockierten Abstandshalter nach  $L/D_h = 8.44$  auf den Wert der ausgebildeten Strömung abgefallen ist. Für kleinere  $L/D_h$  sind die Mittelwerte durch die Ablösung der Strömung am Abstandshalter und die damit verbundene Turbulenzerzeugung erhöht. Dagegen sind alle Mittelwerte beim blockierten Abstandshalter erst bei  $L/D_h = 40.37$  auf den Mittelwert der ausgebildeten Strömung abgefallen. Bei der hier untersuchten Blockade ist die Länge hinter dem Abstandshalter, die erforderlich ist, um den Mittelwert auf die Verhältnisse bei ausgebildeter Strömung abfallen zu lassen, etwa um den Faktor 5 größer.

Eine genauere Analyse des Mittelwerts der kinetischen Energie der Turbulenz aufgeteilt nach den beiden Wandkanälen ergibt, daß sich die kinetische Energie unmittelbar nach dem Abstandshalter in dem Wandkanal mit der Blockade (Q1 + Q4) um den Faktor 7.5 gegenüber dem Wert für die ausgebildete Strömung erhöht (bei  $L/D_h = 1.93$ ). Danach fällt der Mittelwert der kinetischen Energie rasch ab und erreicht bei  $L/D_h = 32.76$  den Wert für die ausgebildete Strömung. Im Wandkanal ohne Blockade (Q2 + Q3) ist der Mittelwert bis  $L/D_h = 4.61$  auf dem gleichen Niveau wie beim Abstandshalter ohne Blockade. Das bedeutet, daß die kinetische Energie im unblockierten Wandkanal bis  $L/D_h = 4.61$  nicht durch die Blockade beeinflusst wird. Ab  $L/D_h = 4.61$  fällt der Mittelwert der kinetischen Energie im unblockierten Wandkanal nur langsam ab und erreicht erst für  $L/D_h > 40.37$  den Wert der ausgebildeten Strömung. Beim unblockierten Abstandshalter erreicht das Maximum des Mittelwerts der kinetischen Energie nur den 3-fachen Wert für die ausgebildete, und zwar bei  $L/D_h = 0.49$ .

Das Abfallen des Mittelwerts der Turbulenzintensitäten und der kinetischen Energie der Turbulenz auf den Wert der ausgebildeten Strömung bedeutet nicht,

daß das Turbulenzfeld gleich ist. Örtlich ergeben sich im Turbulenzfeld sowohl für den unblockierten Abstandshalter, besonders aber für den blockierten Abstandshalter noch deutliche Unterschiede zur ausgebildeten Strömung.

## 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 Turbulenzenverteilung ganz erheblich beeinflusst. Die Messungen erfolgten bei Reynoldszahlen von  $Re = 1.35 \times 10^5$  für drei Ebenen mit Verhältnissen von Länge zwischen der Austrittskante des Abstandshalters und der Meßebene zum hydraulischen Durchmesser von  $L/D_h = 4.61, 1.93$  und  $0.96$ .

Die gemessenen Geschwindigkeitsverteilungen zeigen, daß der Massendurchsatz im blockierten Wandkanal mit kleinerem  $L/D_h$  stark reduziert ist aufgrund der Blockade. Die Turbulenzintensität und die kinetische Energie der Turbulenz steigen mit kleinerem  $L/D_h$  stark an und erreichen das Maximum im blockierten Wandkanal für  $L/D_h = 1.93$ . Bei  $L/D_h = 0.96$  liegt Rückströmung hinter der Blockade vor. Im unblockierten Wandkanal erreichen die Turbulenzintensitäten und die kinetische Energie der Turbulenz Maximalwerte für  $L/D_h = 0.96$ .

Ein Vergleich der Mittelwerte der Turbulenzintensitäten und der kinetischen Energie der Turbulenz mit und ohne Blockade im Abstandshalter zeigt, daß eine Länge von  $L/D_h = 40.37$  erforderlich ist, damit die durch die Blockade verursachte Turbulenzerhöhung wieder auf den ausgebildeten Fall abklingt. Für den Abstandshalter ohne Blockade beträgt die erforderliche Länge nur  $L/D_h = 8.44$ .

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
$k'$	$m^2s^{-2}$	kinetische Energie der Turbulenz
L	m	Länge
P	m	Stabmittelpunktsabstand
p	Pa	Druck
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
$\Phi$	grad	Umfangskoordinate
$\rho$	$kgm^{-3}$	Dichte
$\tau$	Pa	Schubspannung

## Indizes

av	mittlerer
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 und 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/ **N. Neelen**, Modellierung des Impulstransportes achsparalleler Strömungen in Stabgittern, Dissertation Techn. Universität Braunschweig (1987).
- /6/ **C. Monir**, Darstellung turbulenter Geschwindigkeits- und Temperaturfelder einphasiger Strömungen in engen Stabgittern, Dissertation Techn. Universität Braunschweig (1990), KfK-Bericht Nr. 4820 (1991).
- /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**, Experimentelle Untersuchung der Einflüsse eines Gitterabstandshalters mit starker Randversperrung auf die Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilung in Wandkanälen von Stabbündeln. KfK-Bericht Nr. 4596 (1989).
- /12/ **K. Rehme**, Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilung in Wandkanälen von Stabbündeln hinter einem Abstandshalter mit starker Randversperrung, KfK-Bericht Nr. 4705 (1990).
- /13/ **K. Rehme**, Rechnergesteuerte Versuchsanlage zur Messung von Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen mit Hitzdrähten, KfK-Bericht Nr. 3744 (1984).
- /14/ **L. Vosahlo**, Computer programs for evaluation of turbulence characteristics from hot-wire measurements, KfK-Bericht Nr. 3743 (1984).
- /15/ **J.D. Hooper**, Fully Developed turbulent flow through a rod cluster, Ph.D. Thesis, University of New South Wales, Sydnday (Australia), (1980).
- /16/ **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).

Quadrant		Relative mittlere Geschwindigkeit			Relative mittlere Wandschubspannung		
$L/D_h$		4.61	1.93	0.96	4.61	1.93	0.96
Q1	$r/\phi$	0.904	0.829	0.689	0.843	0.760	0.692
	$x/y$	0.743	0.485	0.150	0.614	0.408	0.100
	total	0.840	0.692	0.475	0.743	0.606	0.443
Q2	$r/\phi$	1.145	1.185	1.319	1.261	1.334	1.349
	$x/y$	1.218	1.295	1.401	1.250	1.397	1.387
	total	1.174	1.229	1.352	1.269	1.361	1.387
Q3	$r/\phi$	1.206	1.221	1.304	1.435	1.434	1.364
	$x/y$	1.199	1.191	1.291	1.263	1.231	1.215
	total	1.203	1.209	1.299	1.360	1.345	1.299
Q4	$r/\phi$	0.835	0.950	1.176	0.707	0.706	1.310
	$x/y$	0.705	0.751	0.420	0.557	0.665	0.310
	total	0.783	0.870	0.875	0.641	0.699	0.872
$u_{av}/\text{ms}^{-1}, \tau_{av}/\text{Pa}$		22.49	24.57	24.32	1.373	1.660	1.942

**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		
$L/D_h$		4.61	1.93	0.96
Q1	$r/\phi$	0.965	0.962	0.965
	$x/y$	1.004	1.023	1.037
	total	0.980	0.986	0.993
Q2	$r/\phi$	0.985	0.984	0.987
	$x/y$	1.022	1.043	1.063
	total	1.000	1.008	1.017
Q3	$r/\phi$	1.025	1.023	1.020
	$x/y$	1.032	1.011	0.980
	total	1.028	1.018	1.004
Q4	$r/\phi$	1.000	1.004	1.016
	$x/y$	0.980	0.964	0.939
	total	0.992	0.988	0.985
$u_{av} / \text{ms}^{-1}$		28.46	27.56	27.04

**Tabelle 2. Mittlere Geschwindigkeiten** in den Quadranten und deren Teilkanäle bezogen auf den Mittelwert aus allen vier Quadranten: Messungen ohne starke Randversperrung [8,9]

Wandkanal	Relative mittlere Geschwindigkeit		
$L/D_h$	4.61	1.93	0.96
Q1 + Q4	0.812	0.781	0.675
Q2 + Q3	1.188	1.219	1.326

**Tabelle 3.** Mittlere Geschwindigkeit in beiden Wandkanälen bezogen auf die gesamte mittlere Geschwindigkeit

Quadrant		Relative mittlere axiale Turbulenzintensität			Relative mittlere Turbulenzintensität senkrecht zur Wand		
$L/D_h$		4.61	1.93	0.96	4.61	1.93	0.96
Q1	$r/\phi$	1.243	1.185	1.279	1.249	1.171	1.079
	$x/y$	1.252	1.485	0.505	1.419	0.953	0.368
	total	1.247	1.305	0.971	1.316	1.084	0.796
Q2	$r/\phi$	0.808	0.657	0.894	0.862	0.851	1.122
	$x/y$	0.814	0.585	0.759	0.809	0.679	0.810
	total	0.811	0.628	0.840	0.841	0.782	0.998
Q3	$r/\phi$	0.681	0.618	0.807	0.799	0.781	1.150
	$x/y$	0.863	0.802	1.116	0.815	1.026	1.259
	total	0.754	0.691	0.930	0.805	0.879	1.193
Q4	$r/\phi$	1.150	1.188	1.361	0.950	1.231	1.284
	$x/y$	1.250	1.658	1.105	1.168	1.290	0.607
	total	1.189	1.376	1.259	1.037	1.255	1.013
$(u'/u^*)_{av}, (v'/u^*)_{av}$		2.087	2.736	1.929	1.277	1.385	1.065

**Tabelle 4.** 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		
$L/D_h$		4.61	1.93	0.96	4.61	1.93	0.96
Q1	$r/\phi$	1.395	1.121	1.001	1.598	1.311	1.463
	$x/y$	1.405	0.873	0.276	1.654	1.555	0.609
	total	1.399	1.022	0.712	1.620	1.408	1.123
Q2	$r/\phi$	0.746	0.881	1.098	0.599	0.468	0.733
	$x/y$	0.680	0.728	0.846	0.557	0.368	0.512
	total	0.719	0.820	0.998	0.583	0.428	0.645
Q3	$r/\phi$	0.653	0.802	1.065	0.451	0.409	0.683
	$x/y$	0.727	1.174	1.354	0.617	0.760	1.156
	total	0.683	0.950	1.180	0.517	0.548	0.872
Q4	$r/\phi$	1.093	1.177	1.383	1.130	1.343	1.444
	$x/y$	1.360	1.252	0.695	1.508	2.028	1.234
	total	1.199	1.207	1.110	1.280	1.616	1.360
$(w'/u^*)_{av}, (k'/u^{*2})_{av}$		1.729	1.463	1.152	4.984	7.027	4.499

**Tabelle 5. 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.

Wandkanal	Relative mittlere kinetische Energie der Turbulenz		
$L/D_h$	4.61	1.93	0.96
Q2 + Q3	3.376	4.211	4.235
Q1 + Q4	8.900	13.048	6.932

**Tabelle 6. Mittlere kinetische Energie der Turbulenz in beiden Wandkanälen** bezogen auf die mittlere Wandschubspannungsgeschwindigkeit

Wand- kanal	Q2+Q3 Wandkanal ohne Randversperrung				Q1+Q4 Wandkanal mit Randversperrung			
	$u'$ $ms^{-1}$	$v'$ $ms^{-1}$	$w'$ $ms^{-1}$	$k'$ $m^2s^{-2}$	$u'$ $ms^{-1}$	$v'$ $ms^{-1}$	$w'$ $ms^{-1}$	$k'$ $m^2s^{-2}$
4.61	2.181	1.403	1.618	4.885	3.393	2.006	3.184	12.88
1.93	2.643	1.684	1.895	7.346	5.370	2.371	2.387	22.76
0.96	2.731	1.867	2.007	8.734	3.441	1.541	1.679	14.30

**Tabelle 7. Absolute Mittelwerte der Turbulenzintensitäten und der kinetischen Energie in den beiden Wandkanälen.**

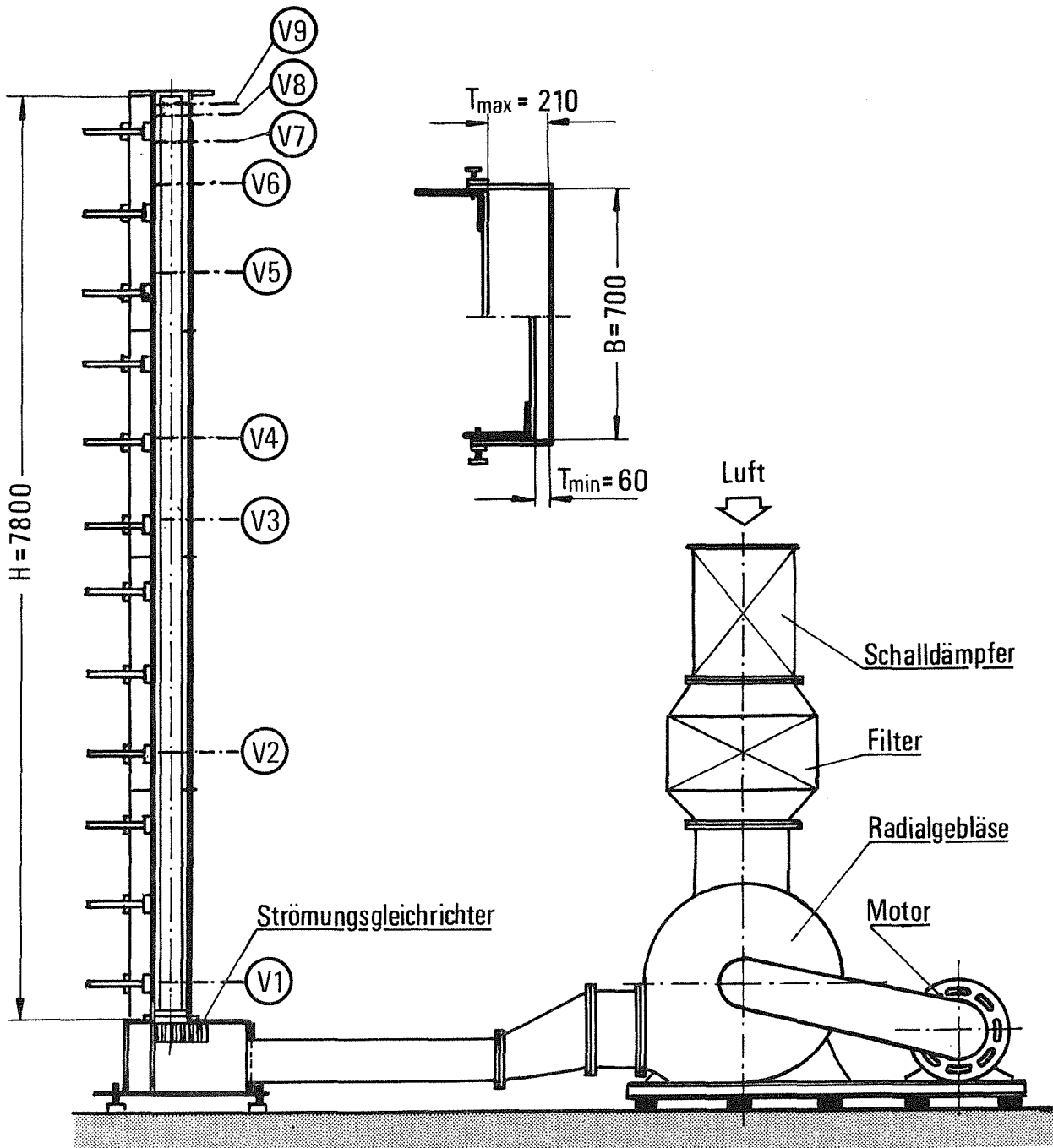


Abb. 1 Versuchsanlage (schematisch)

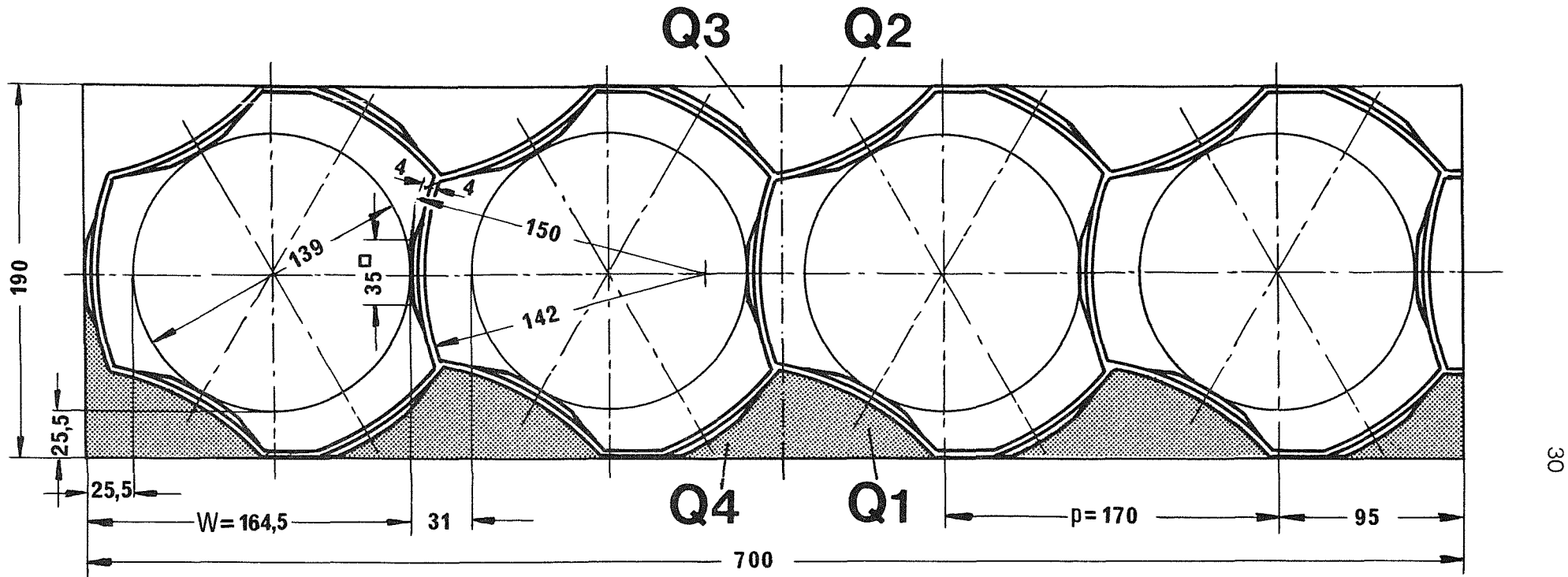
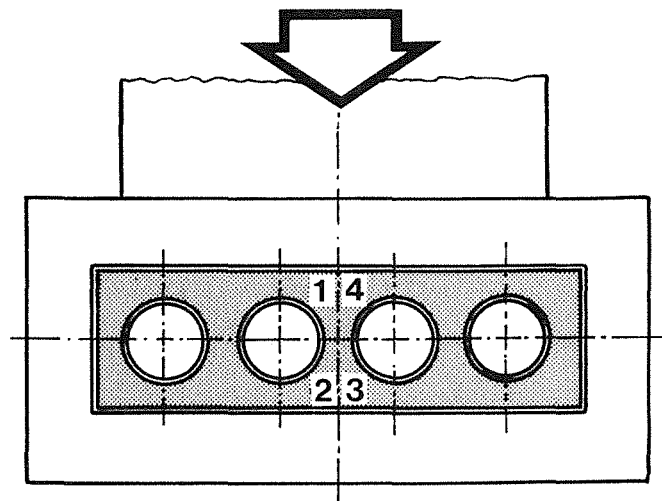


Abb. 2 Querschnitt der Abstandshaltergeometrie mit Randblockade



**Abb. 3** Aufsicht auf den Strömungskanal mit den Eintrittsbedingungen

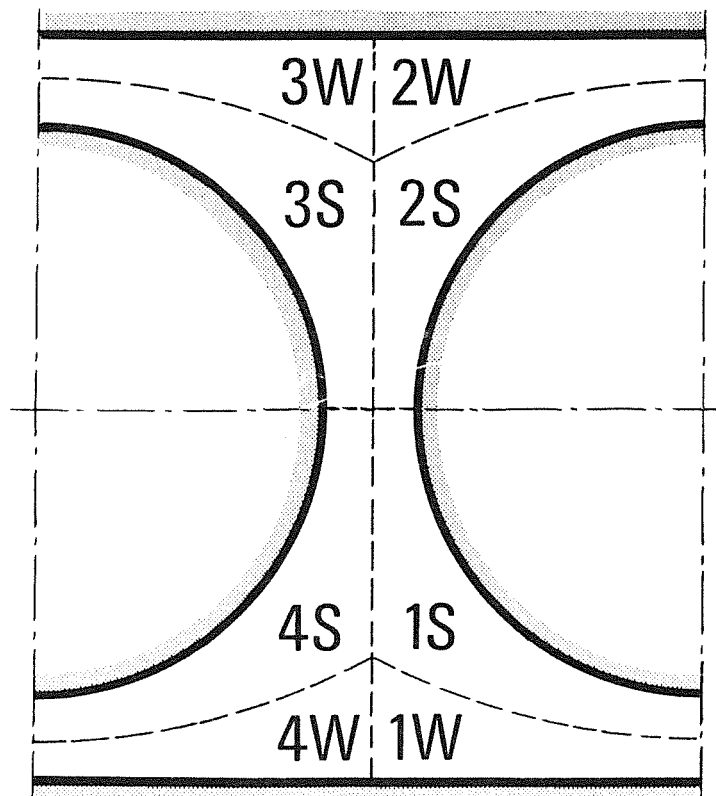


Abb. 4 Teilkanäle des untersuchten Strömungsquerschnitts

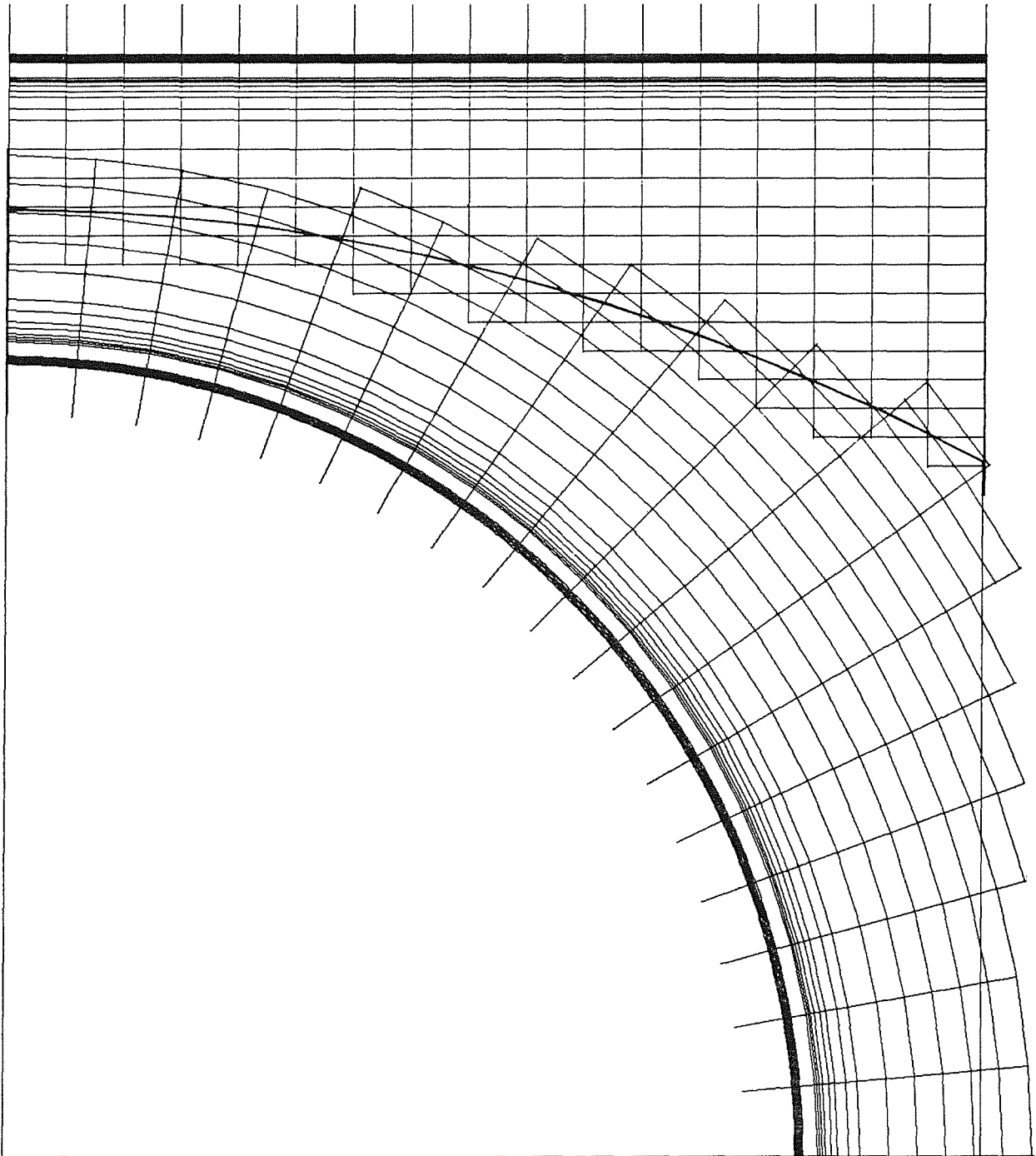


Abb. 5 Verteilung der Meßpositionen in einem Quadranten

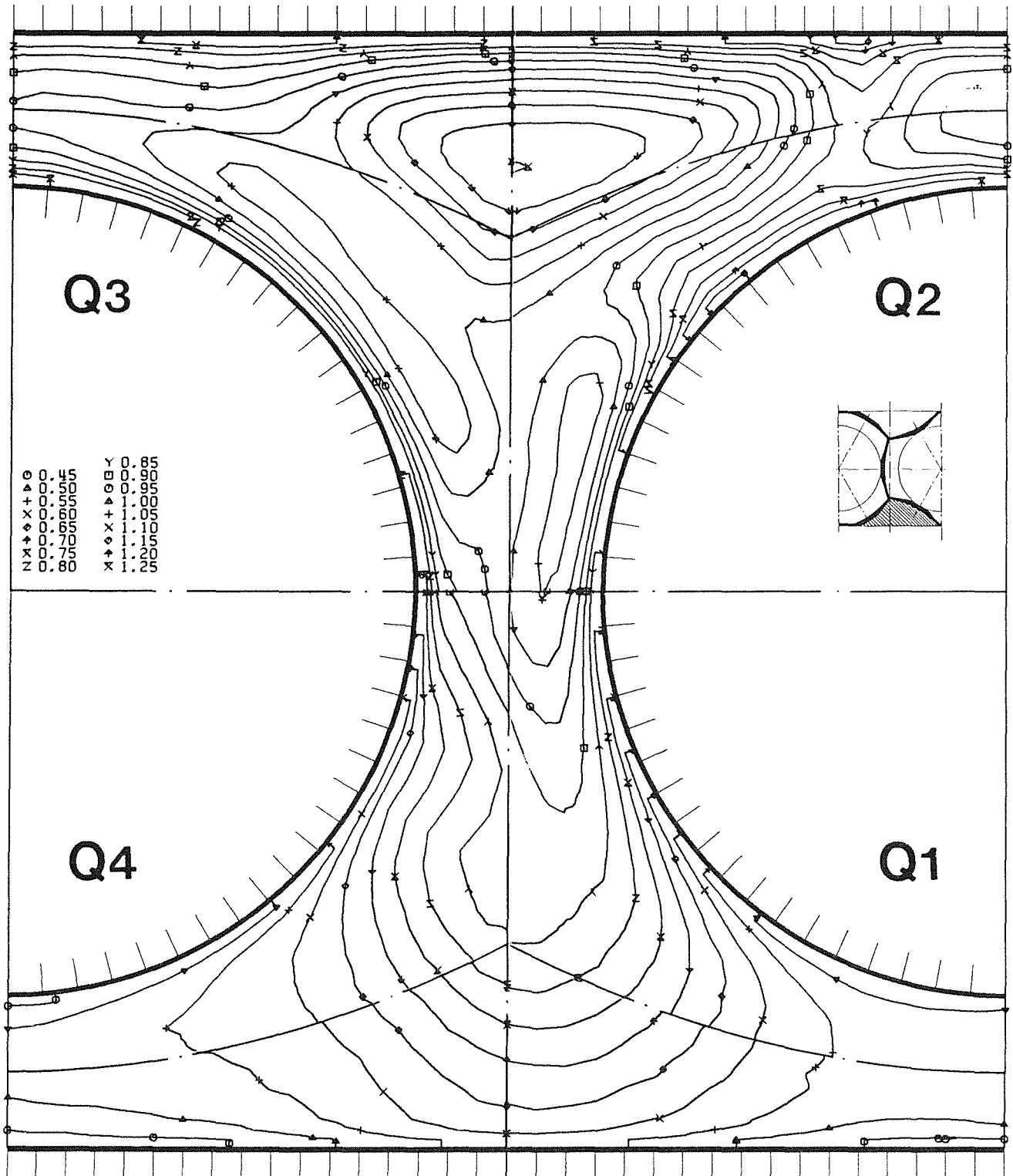


Abb. 6 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit für  $L/D_h = 4.61$



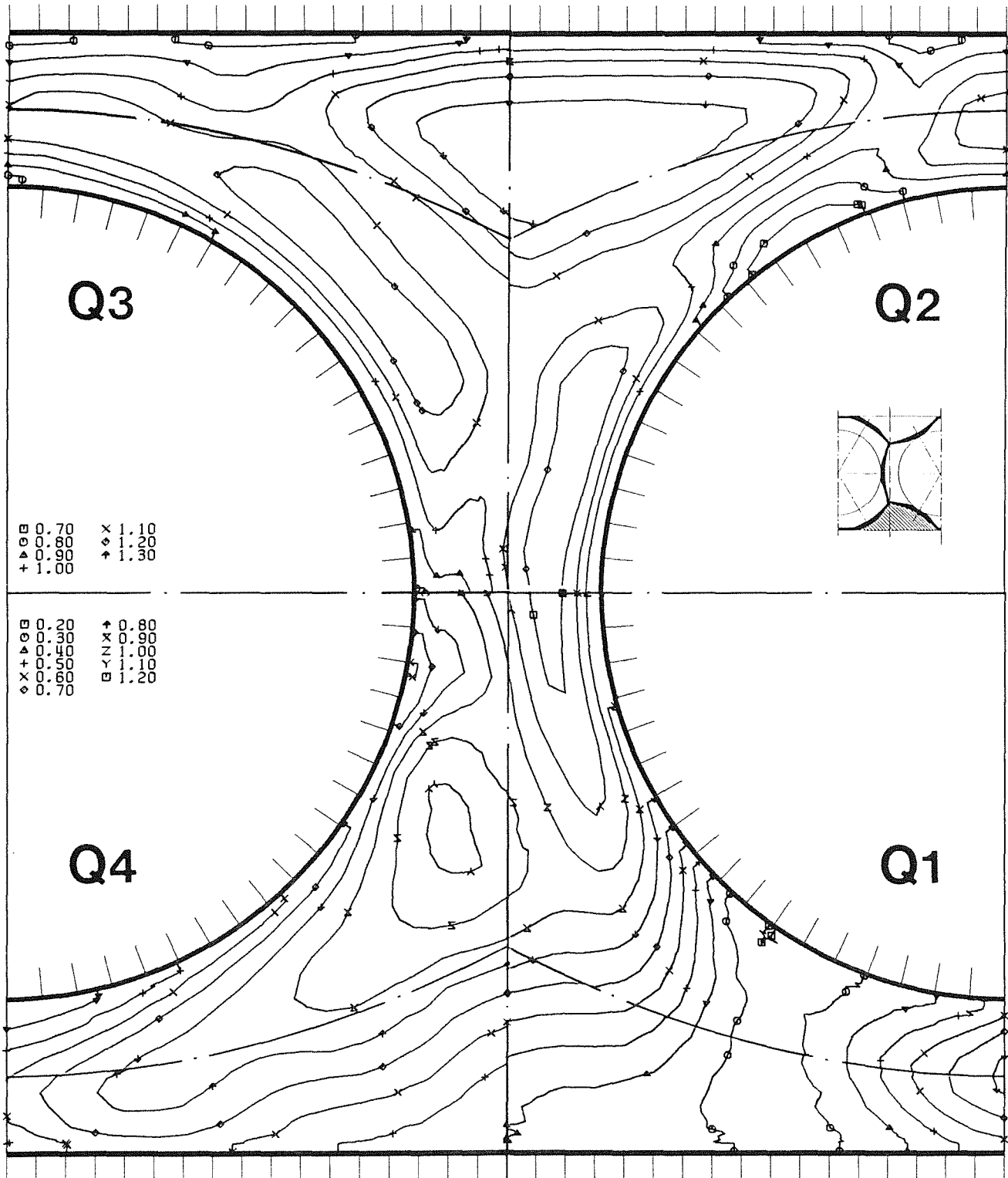


Abb. 7 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit für  $L/D_h = 1.93$

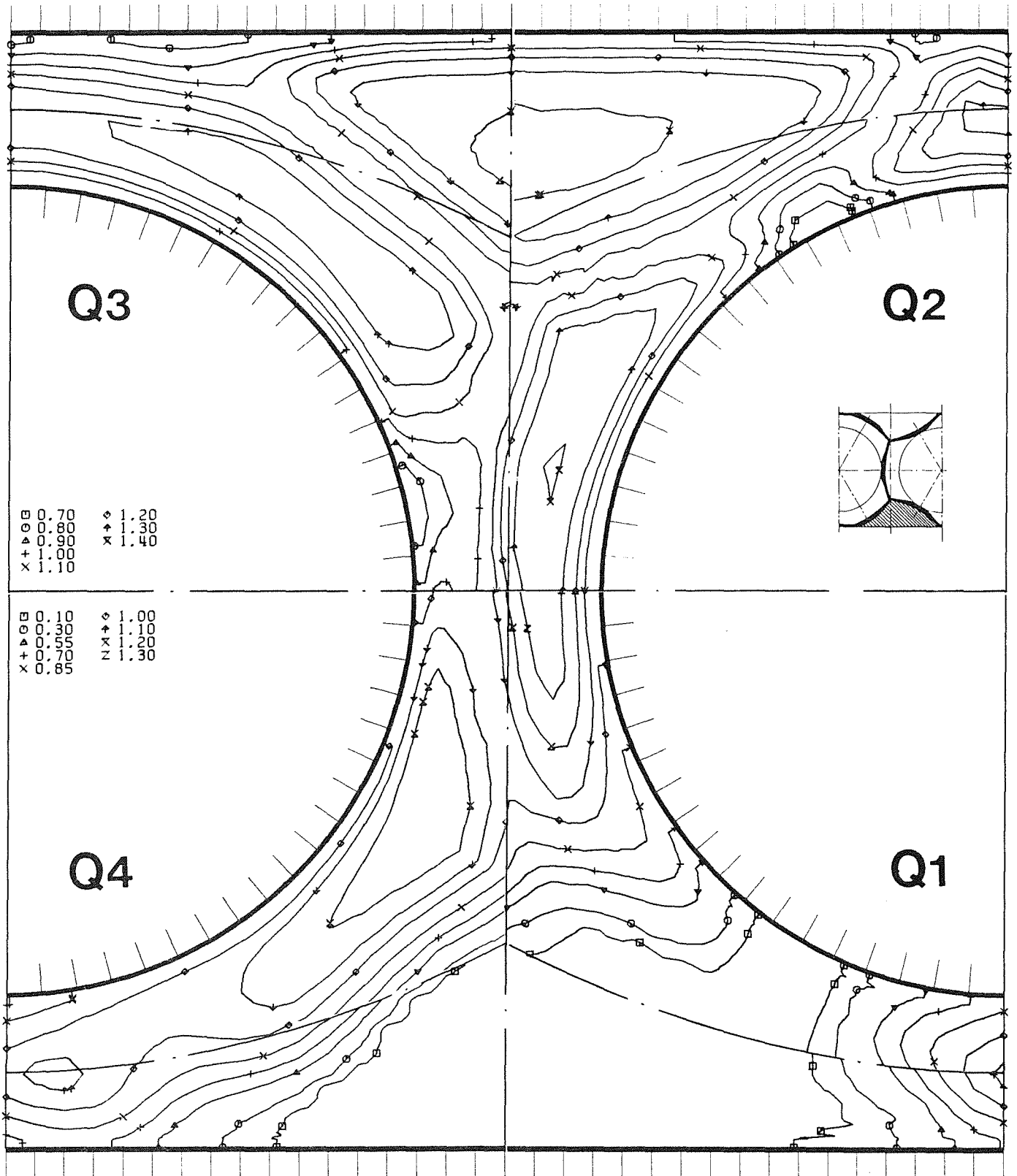


Abb. 8 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit für  $L/D_h = 0.96$

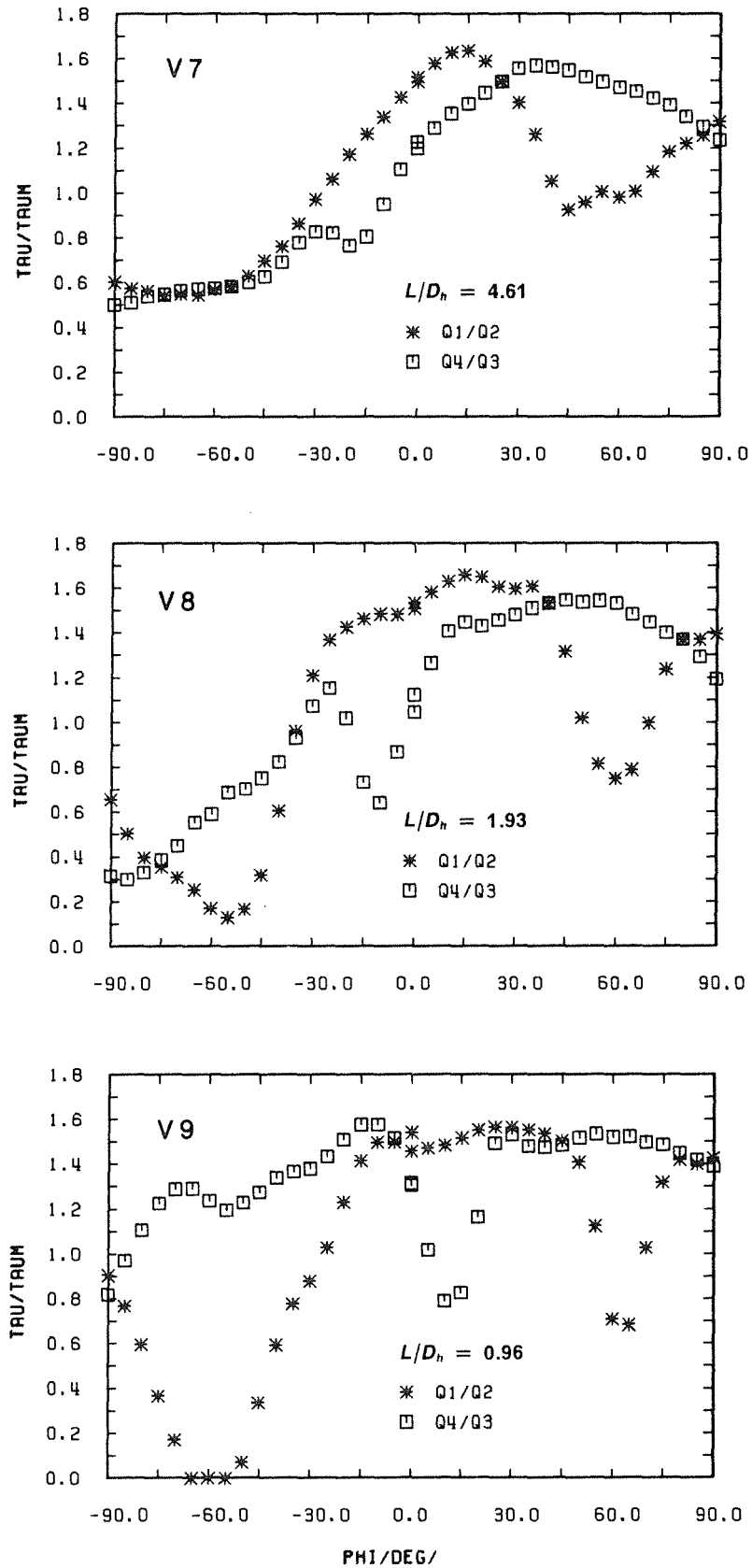


Abb. 9 Wandschubspannungsverteilungen bezogen auf den Mittelwert aus allen vier Quadranten ( $r/\phi$ )

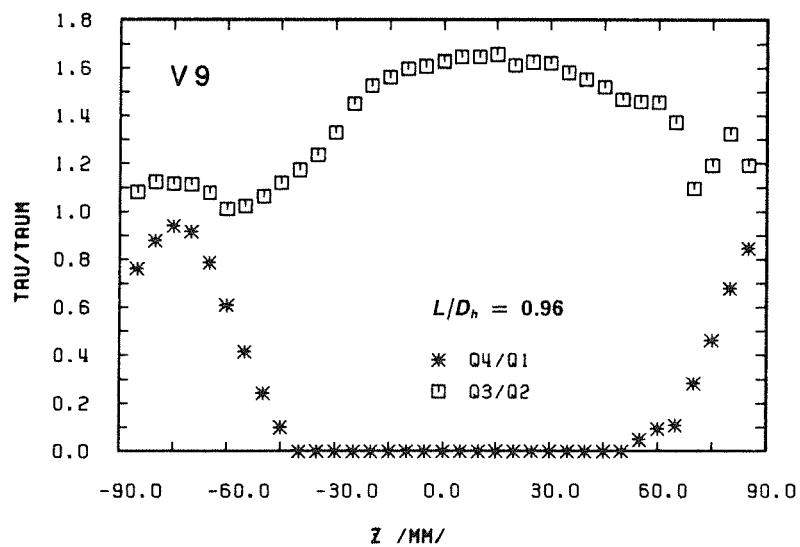
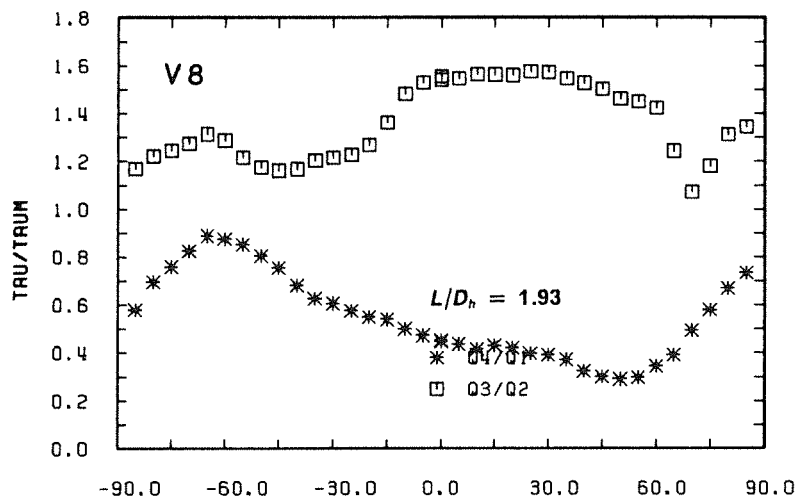
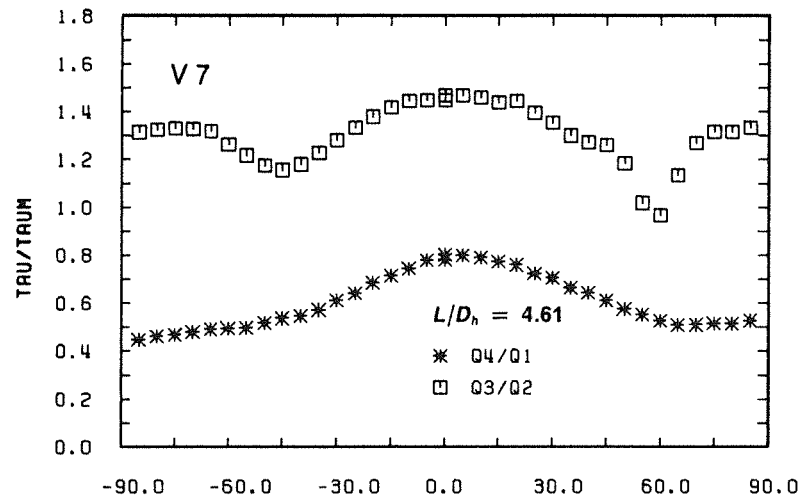


Abb.10 Wandschubspannungsverteilungen bezogen auf den Mittelwert aus allen vier Quadranten ( x/y )

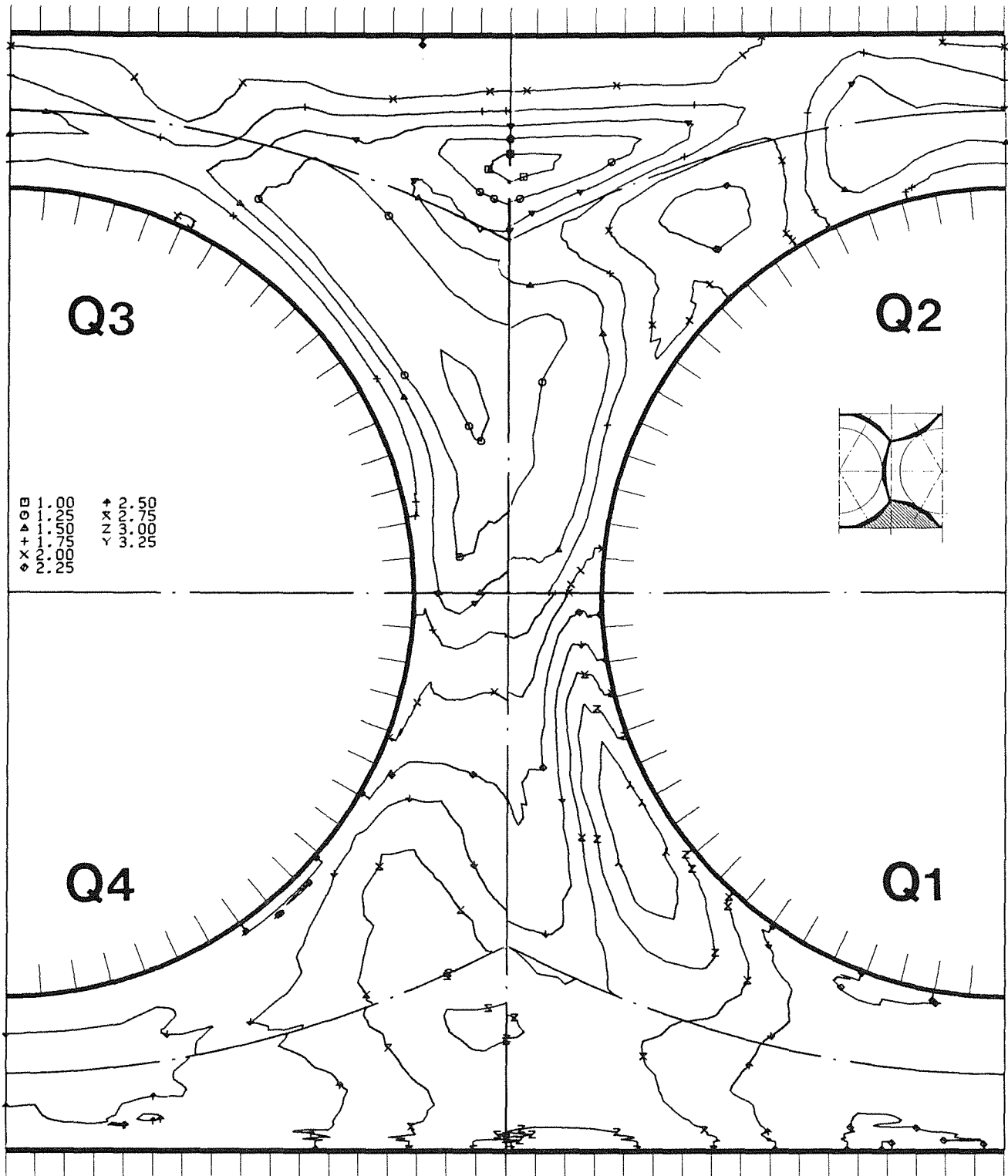


Abb.11 Axiale Turbulenzintensität bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für  $L/D_h = 4.61$

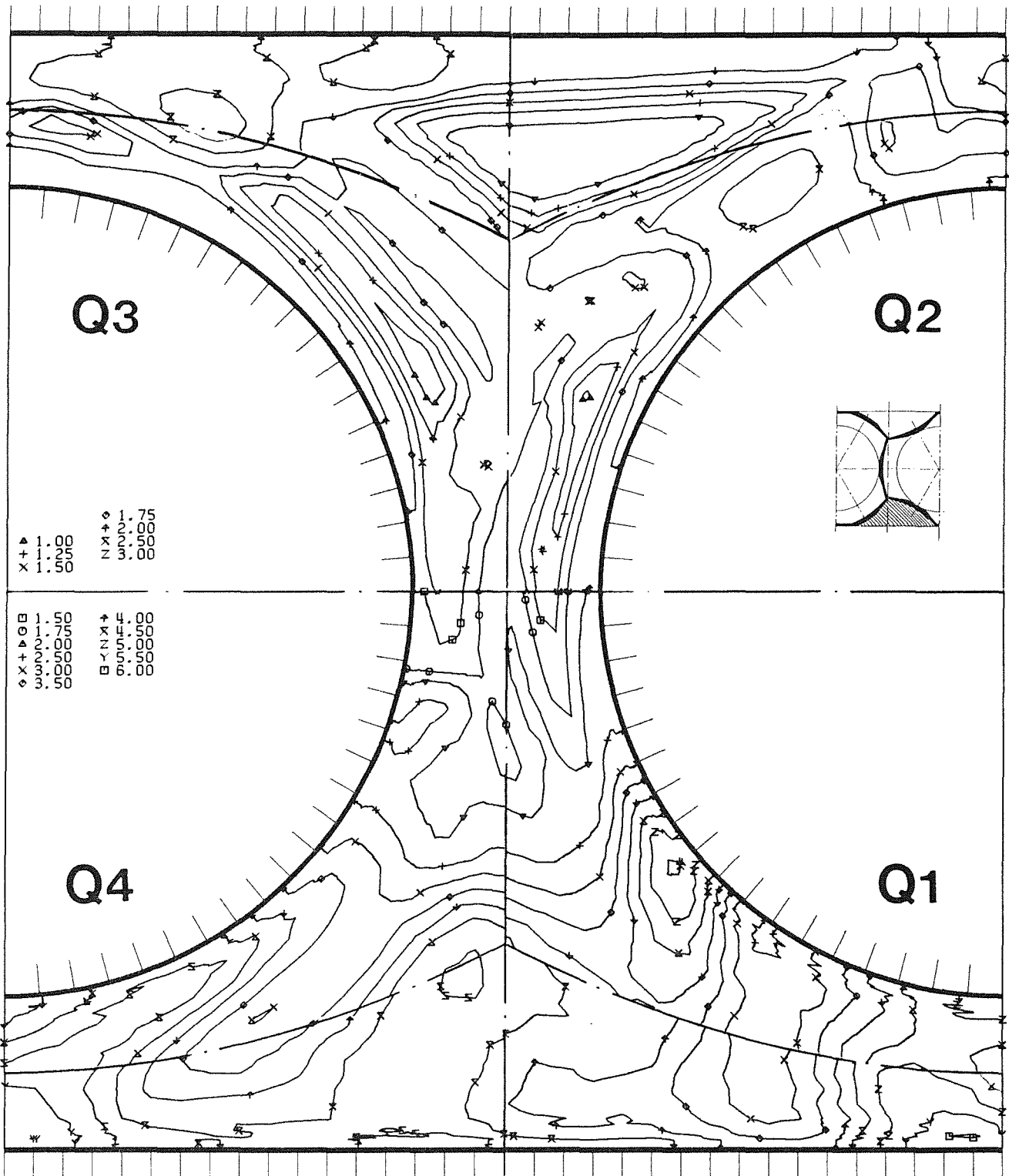


Abb.12 Axiale Turbulenzintensität bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für  $L/D_h = 1.93$

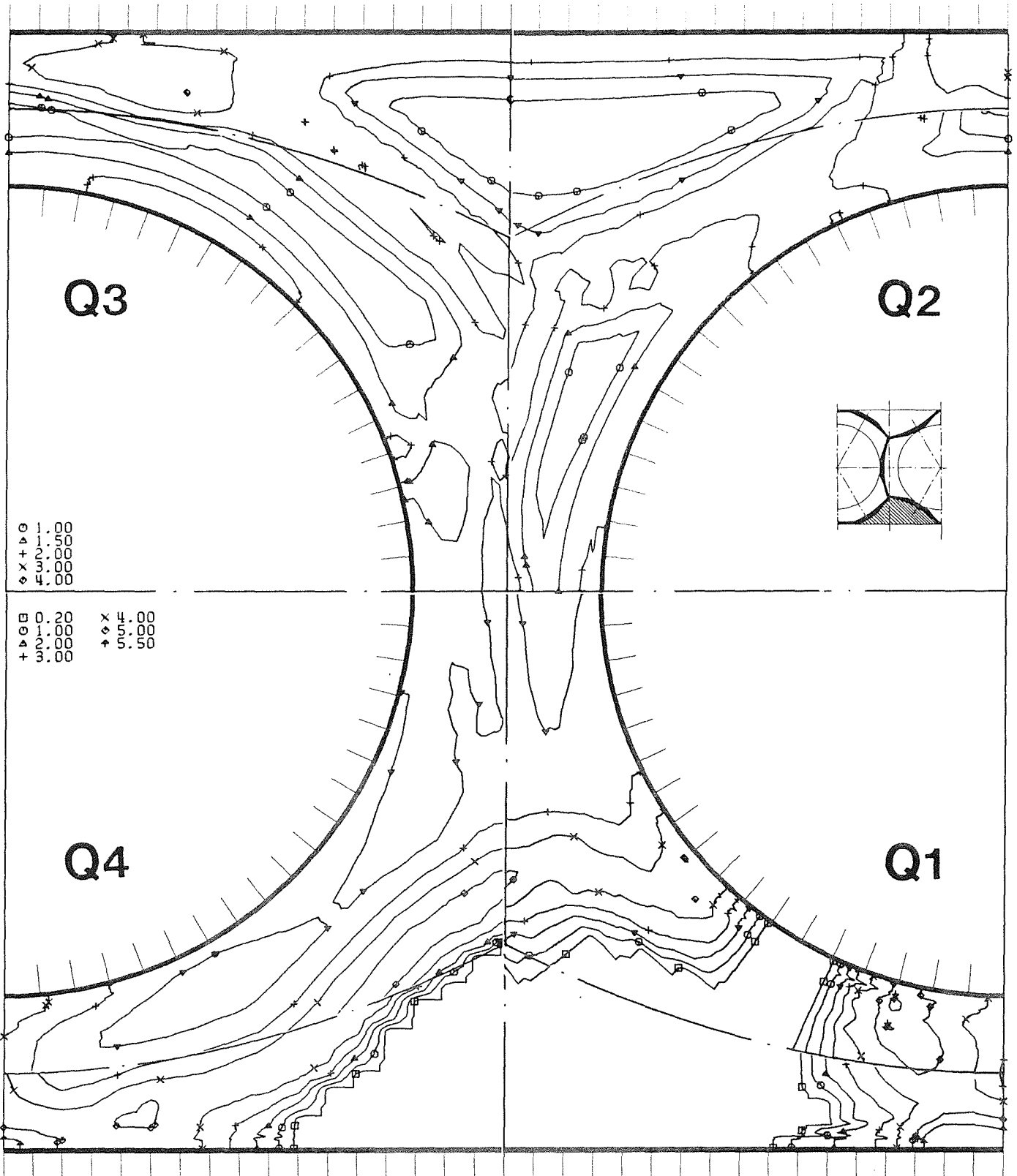


Abb.13 Axiale Turbulenzintensität bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für  $L/D_h = 0.96$

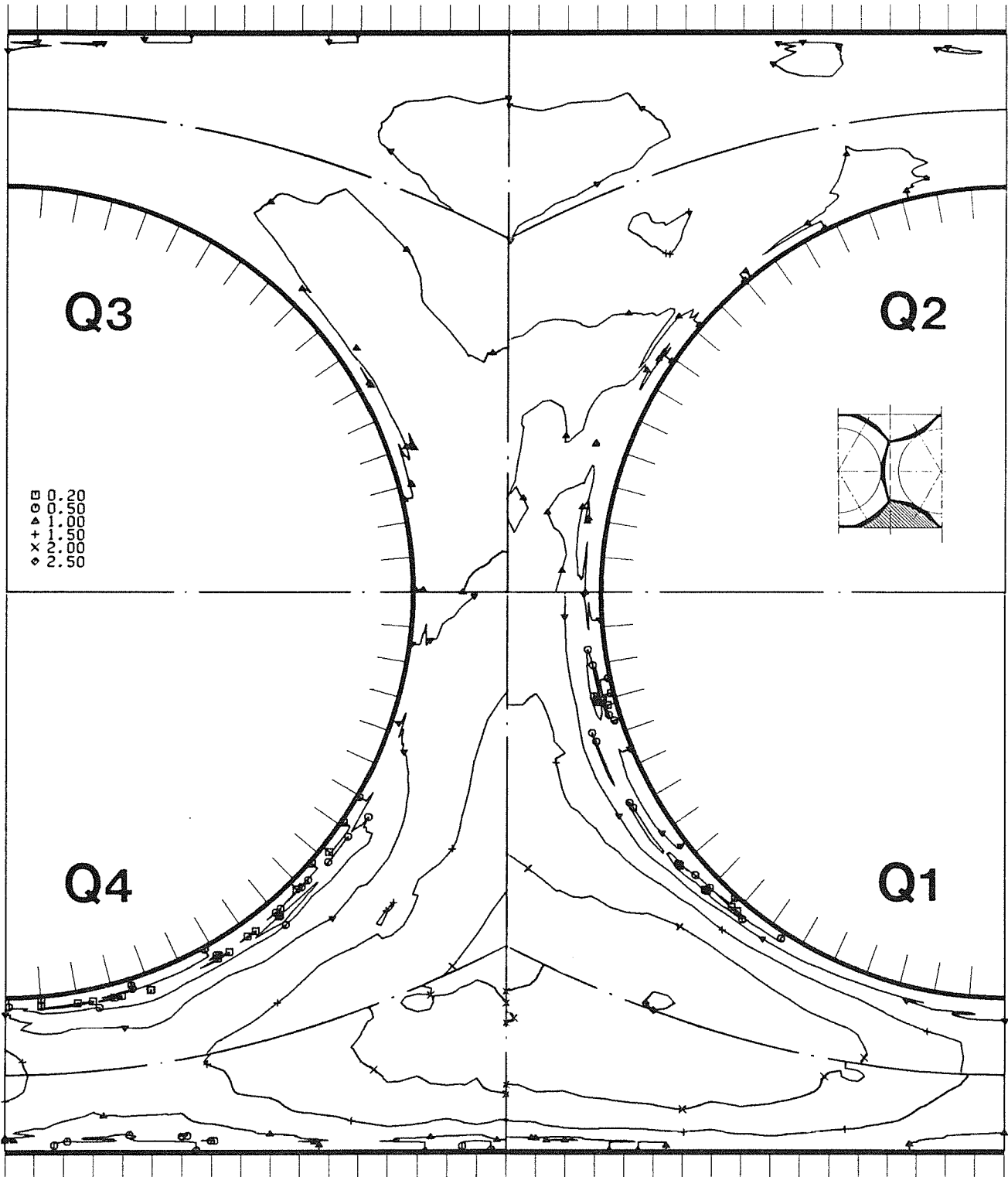


Abb.14 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für  $L/D_h = 4.61$



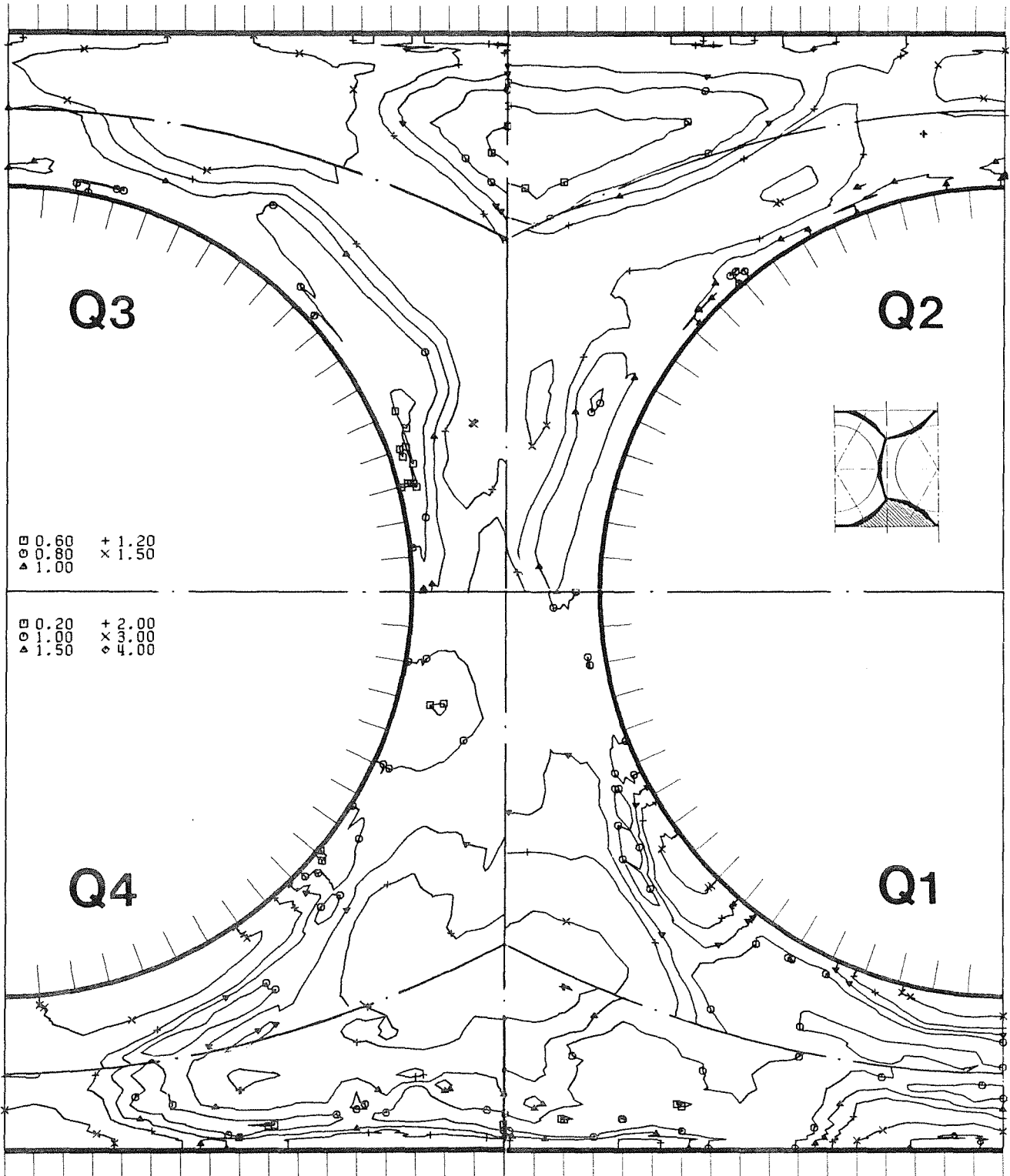


Abb.15 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für  $L/D_h = 1.93$

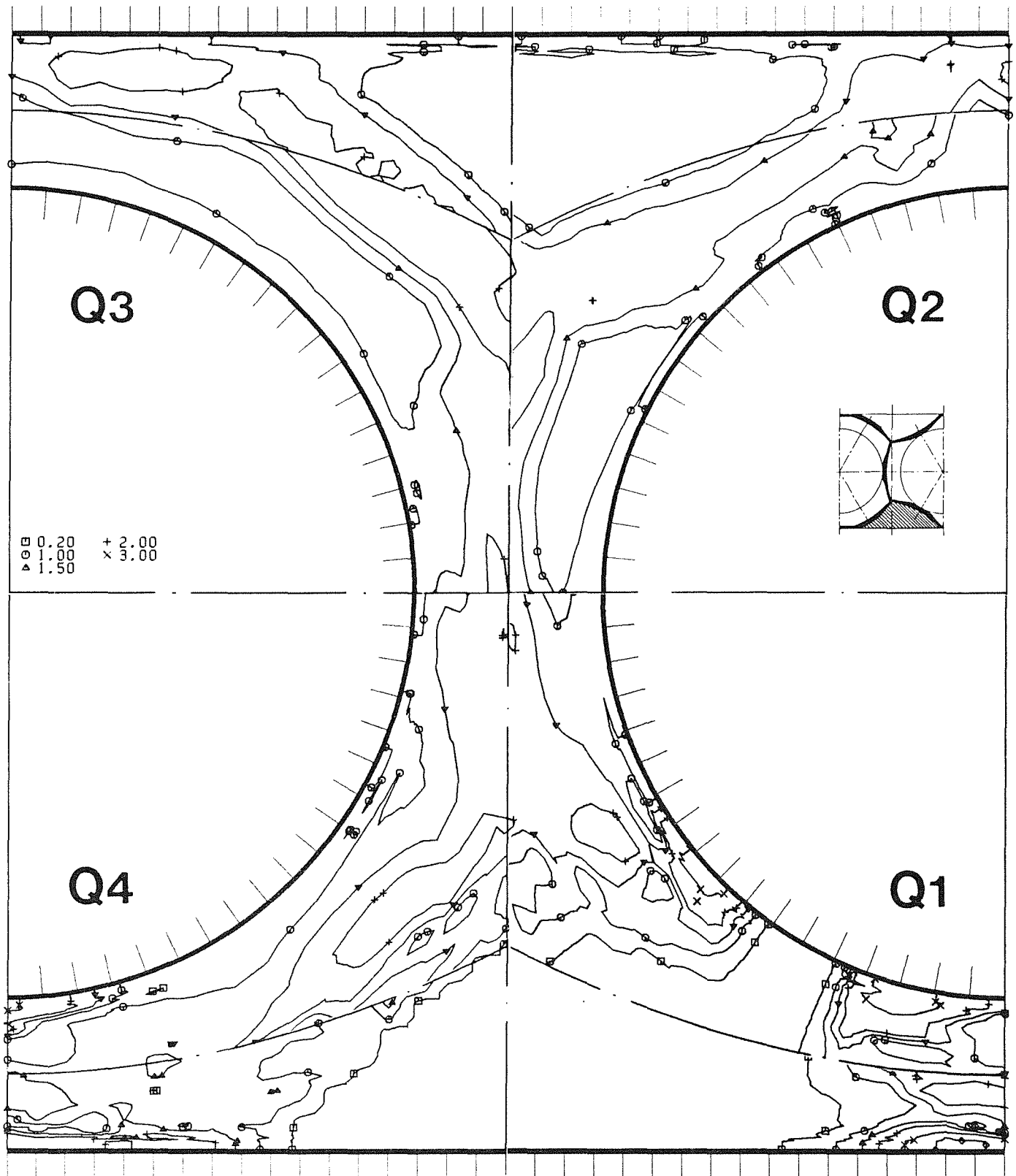


Abb.16 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für  $L/D_h = 0.96$

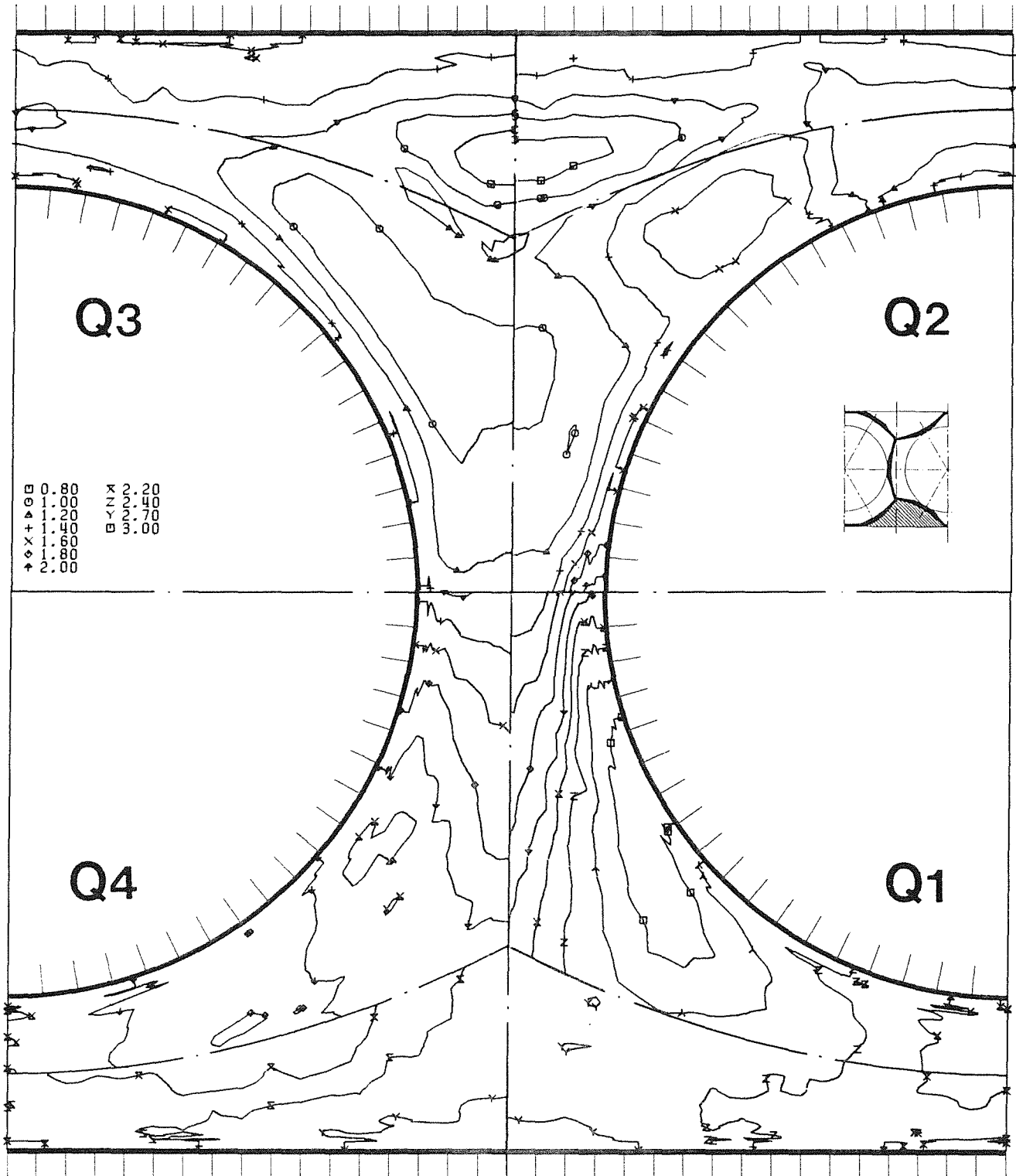


Abb.17 Turbulenzintensität parallel zur Wand bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für  $L/D_h = 4.61$

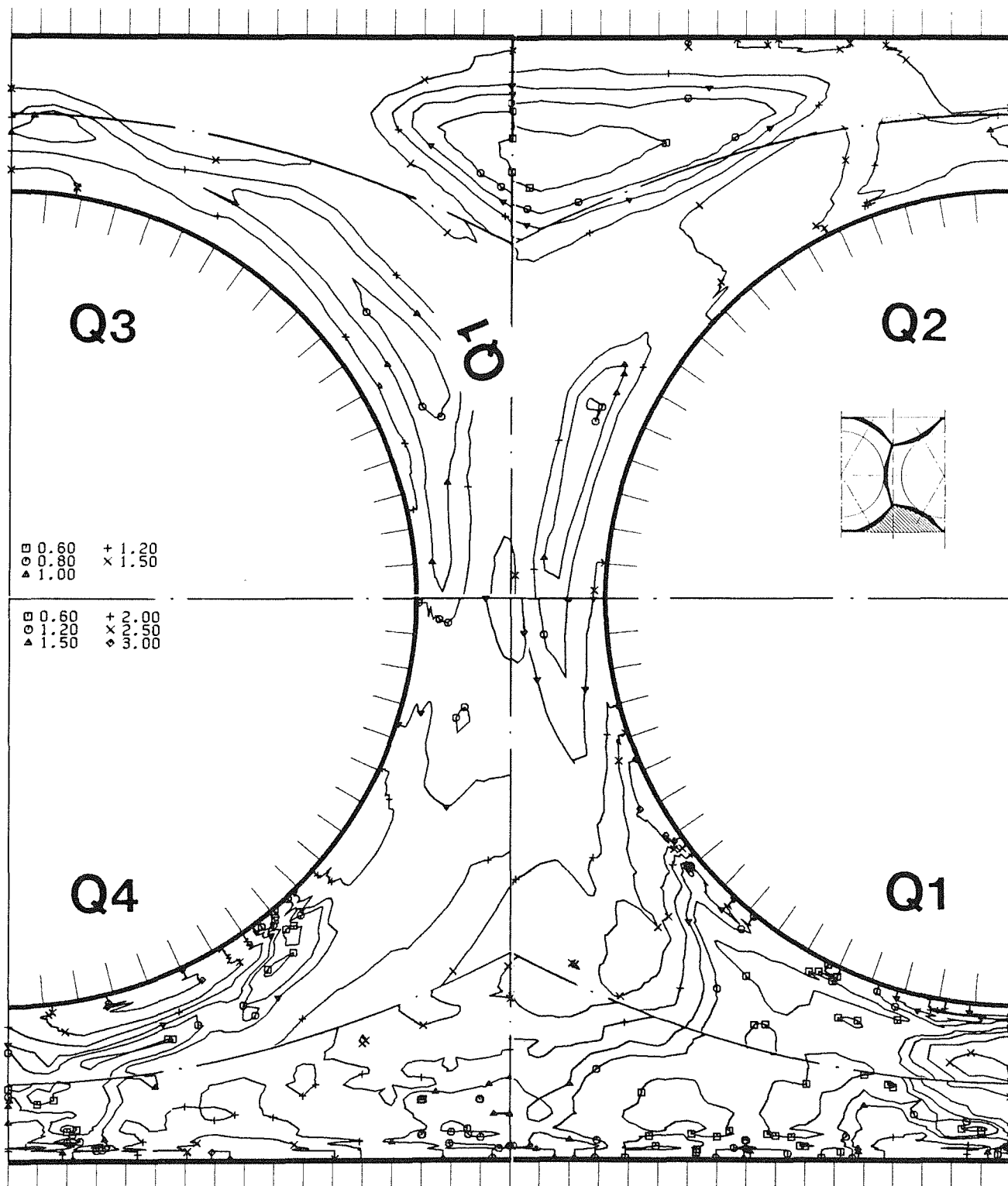


Abb.18 Turbulenzintensität parallel zur Wand bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für  $L/D_h = 1.93$

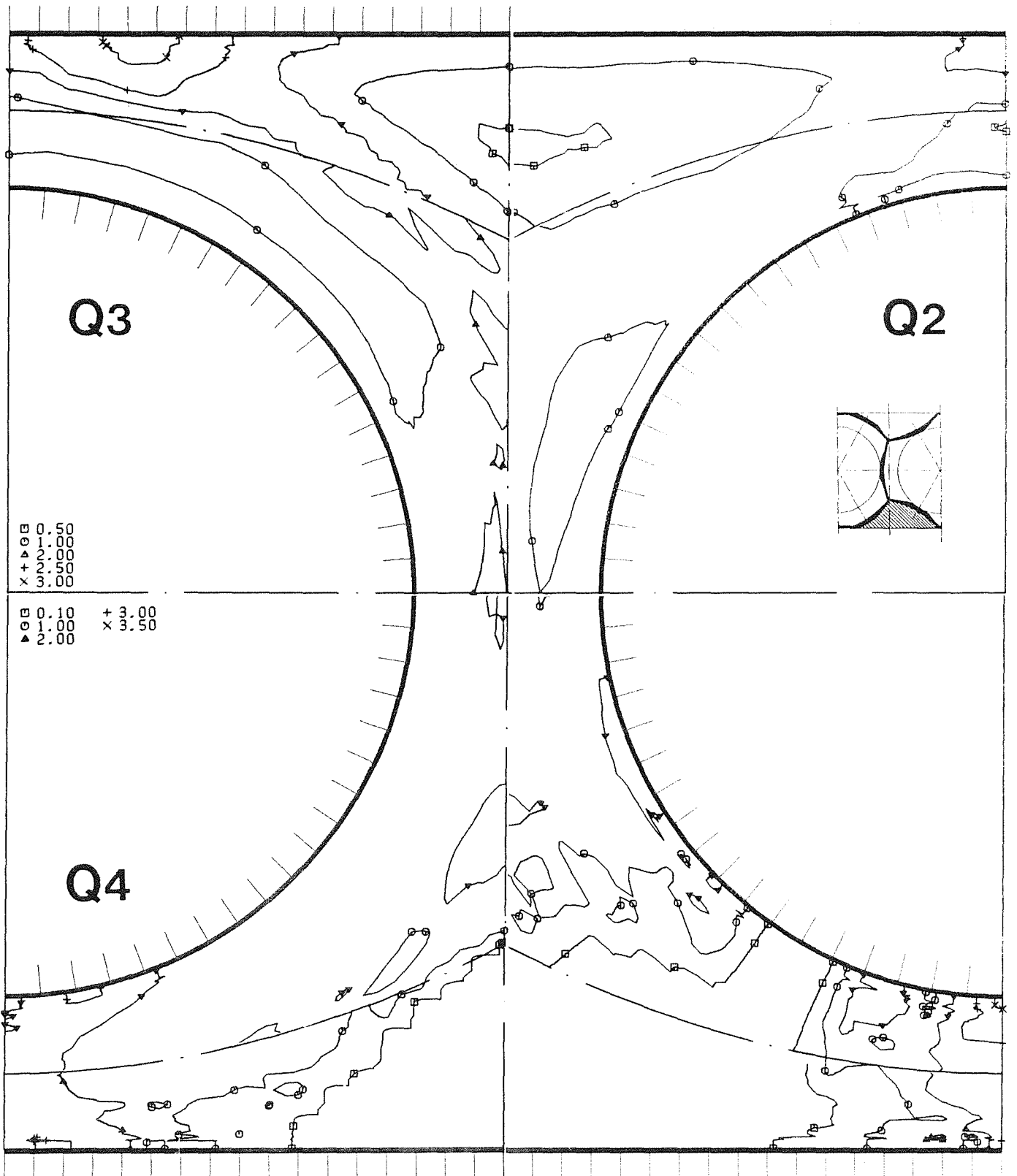


Abb.19 Turbulenzintensität parallel zur Wand bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für  $L/D_h = 0.96$

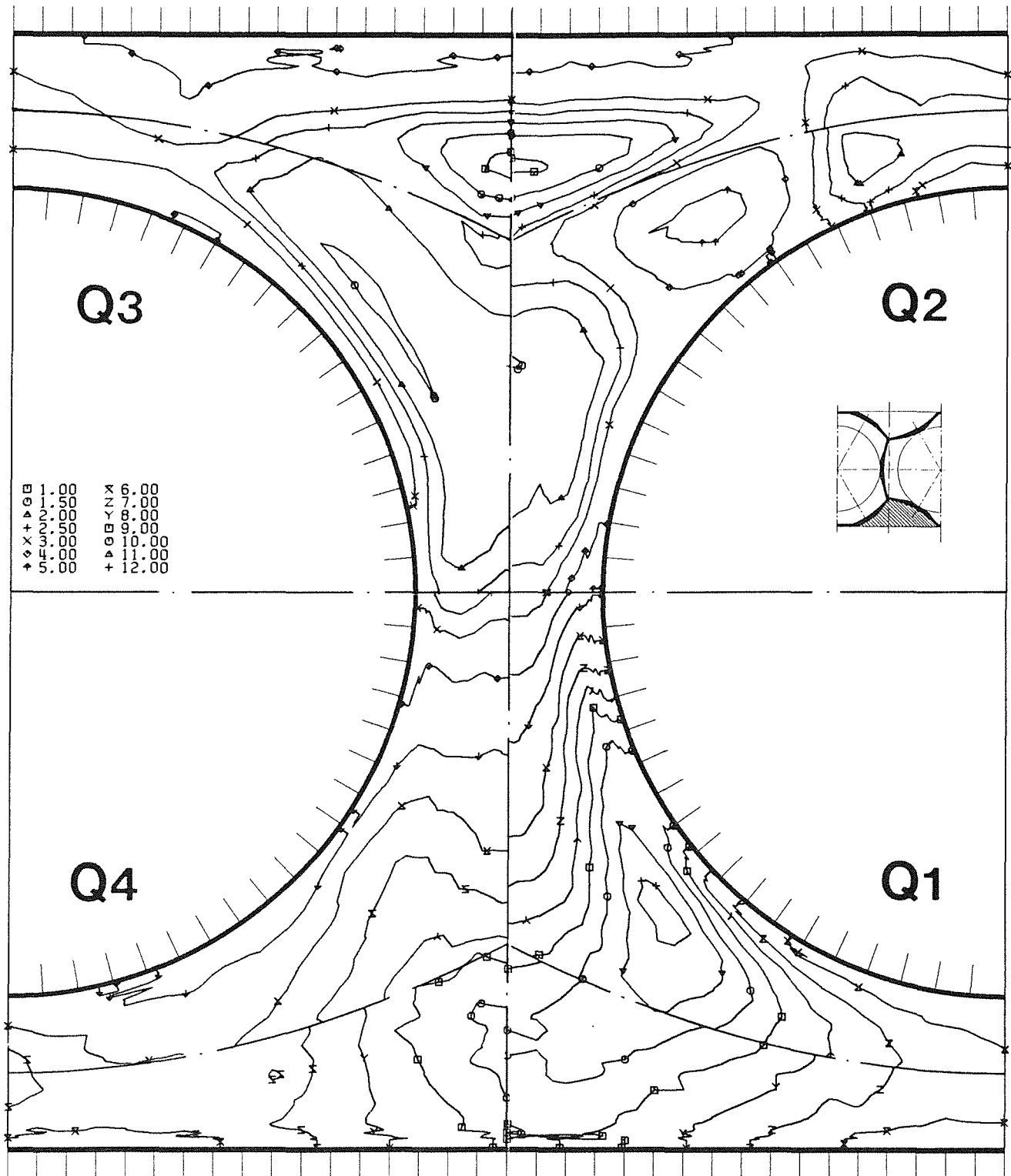


Abb.20 Kinetische Energie der Turbulenz bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für  $L/D_h = 4.61$

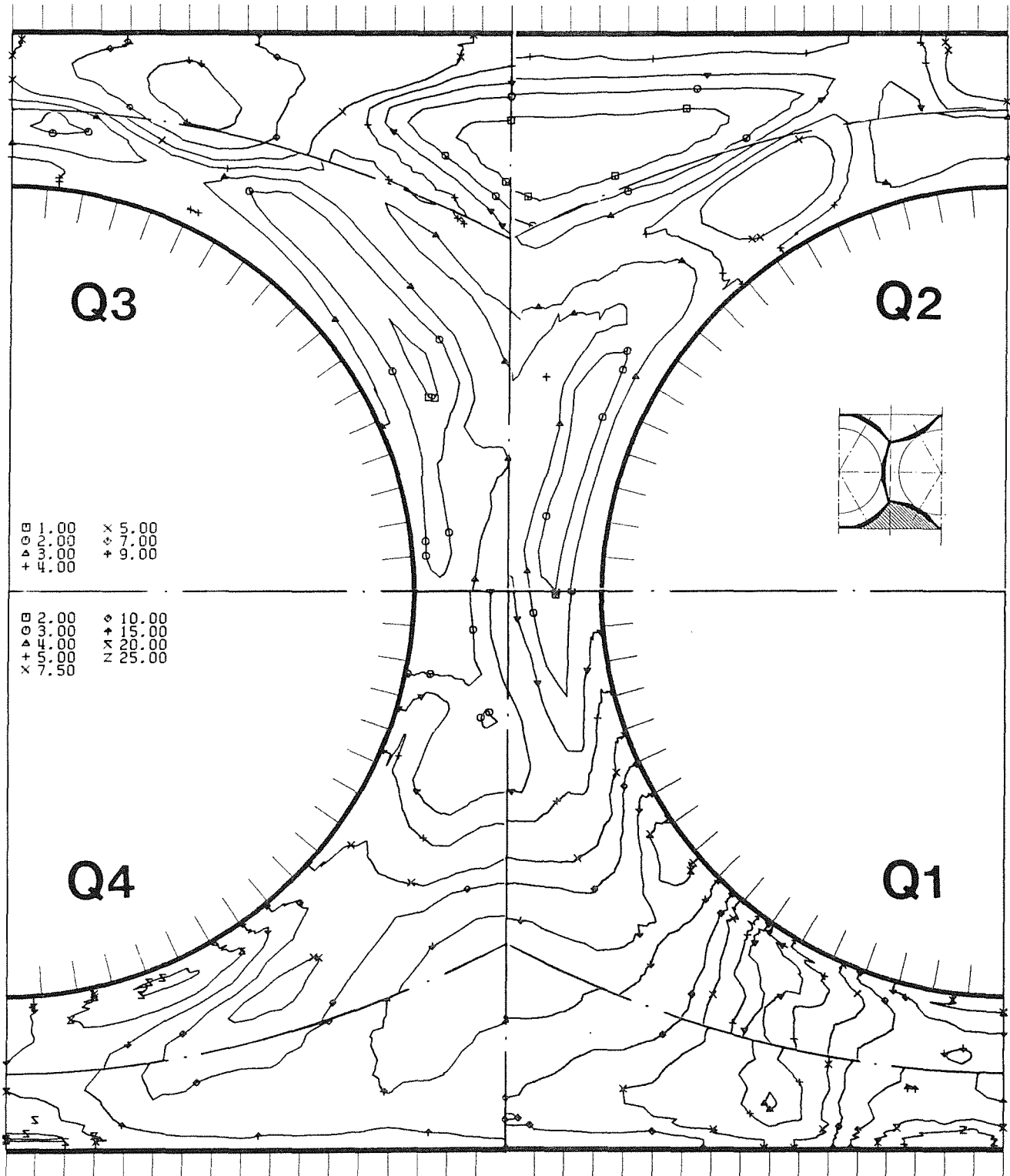


Abb.21 Kinetische Energie der Turbulenz bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für  $L/D_h = 1.93$

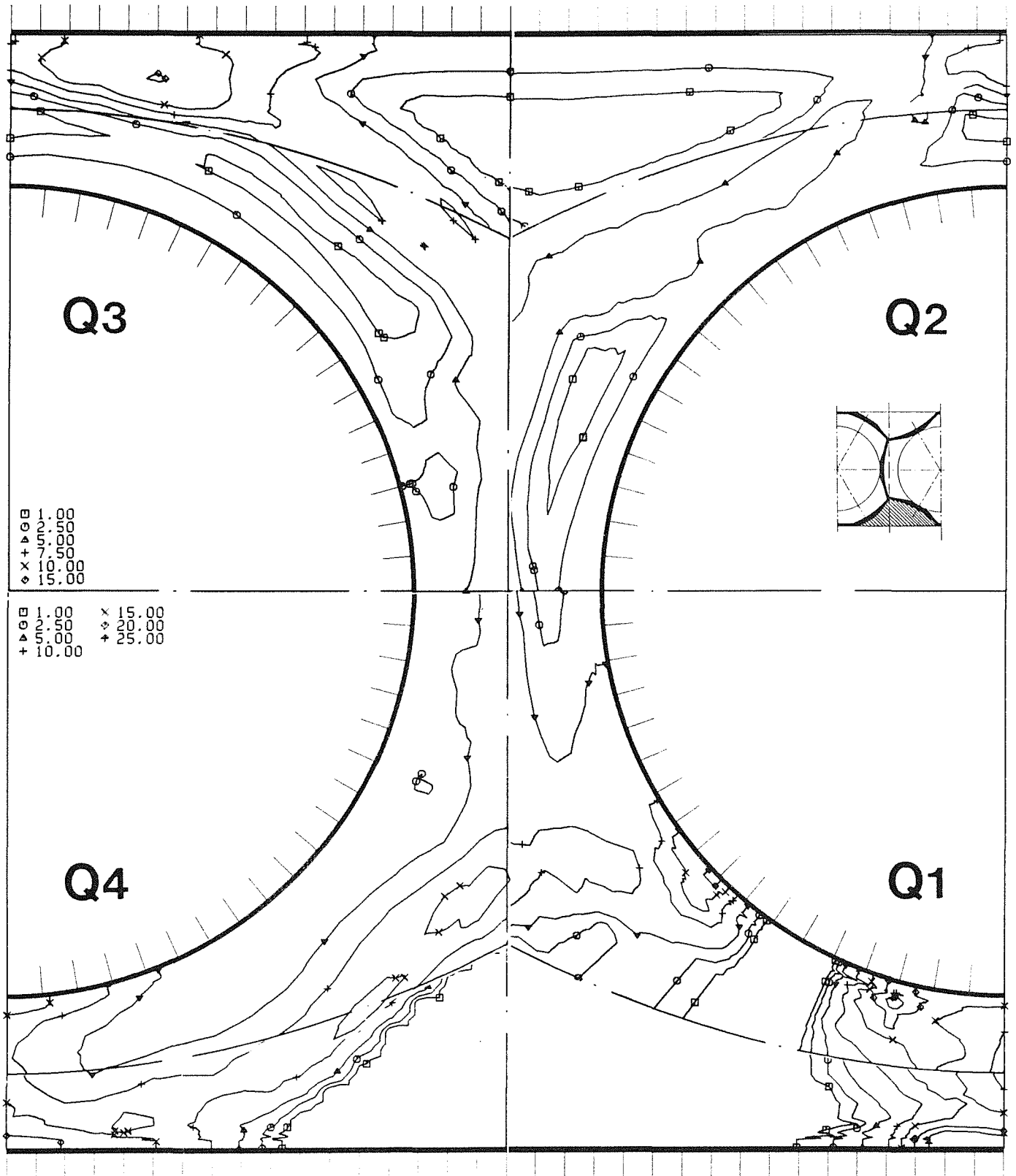


Abb.22 Kinetische Energie der Turbulenz bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für  $L/D_h = 0.96$



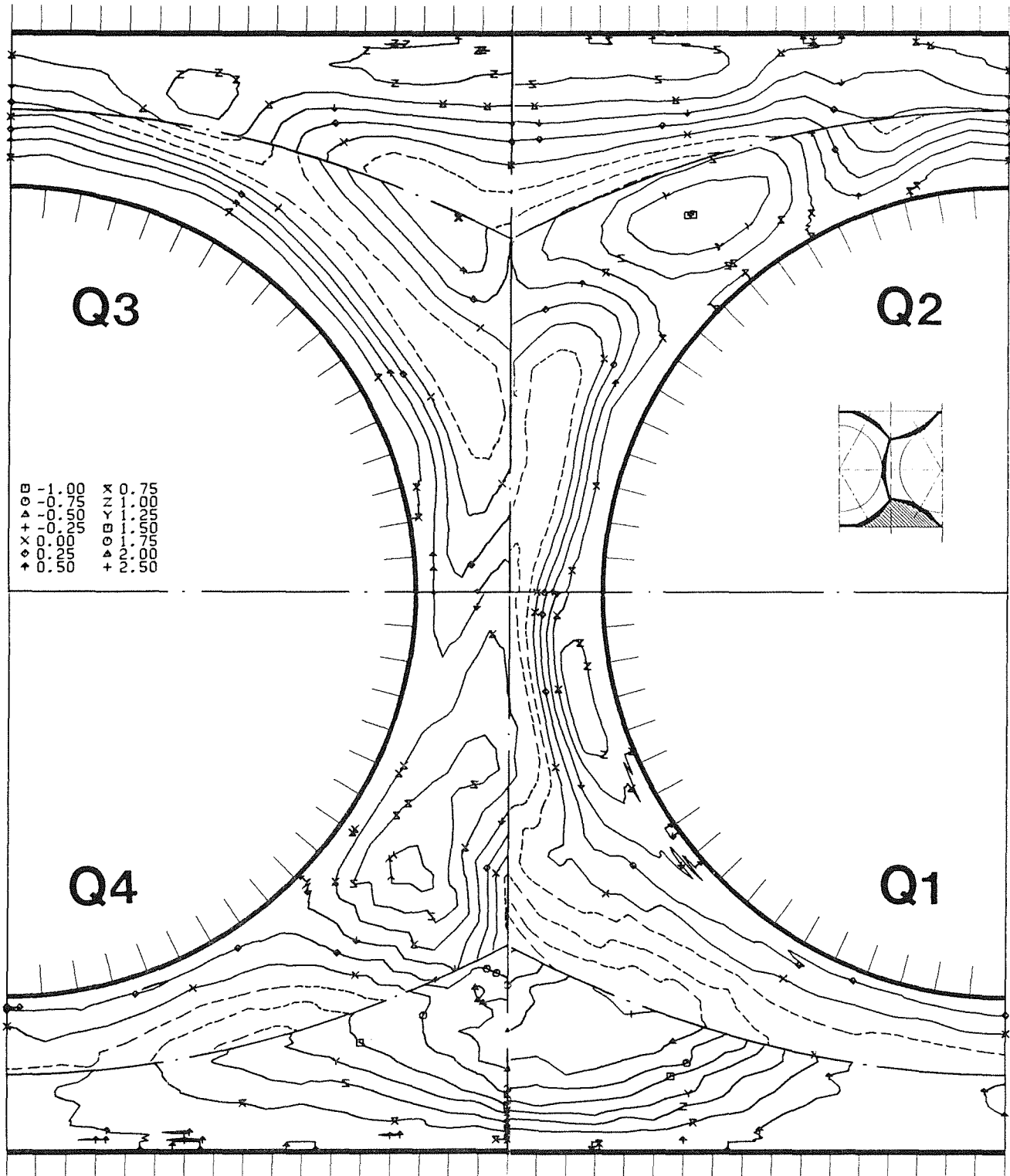


Abb.23 Schubspannung senkrecht zur Wand bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für  $L/D_h = 4.61$

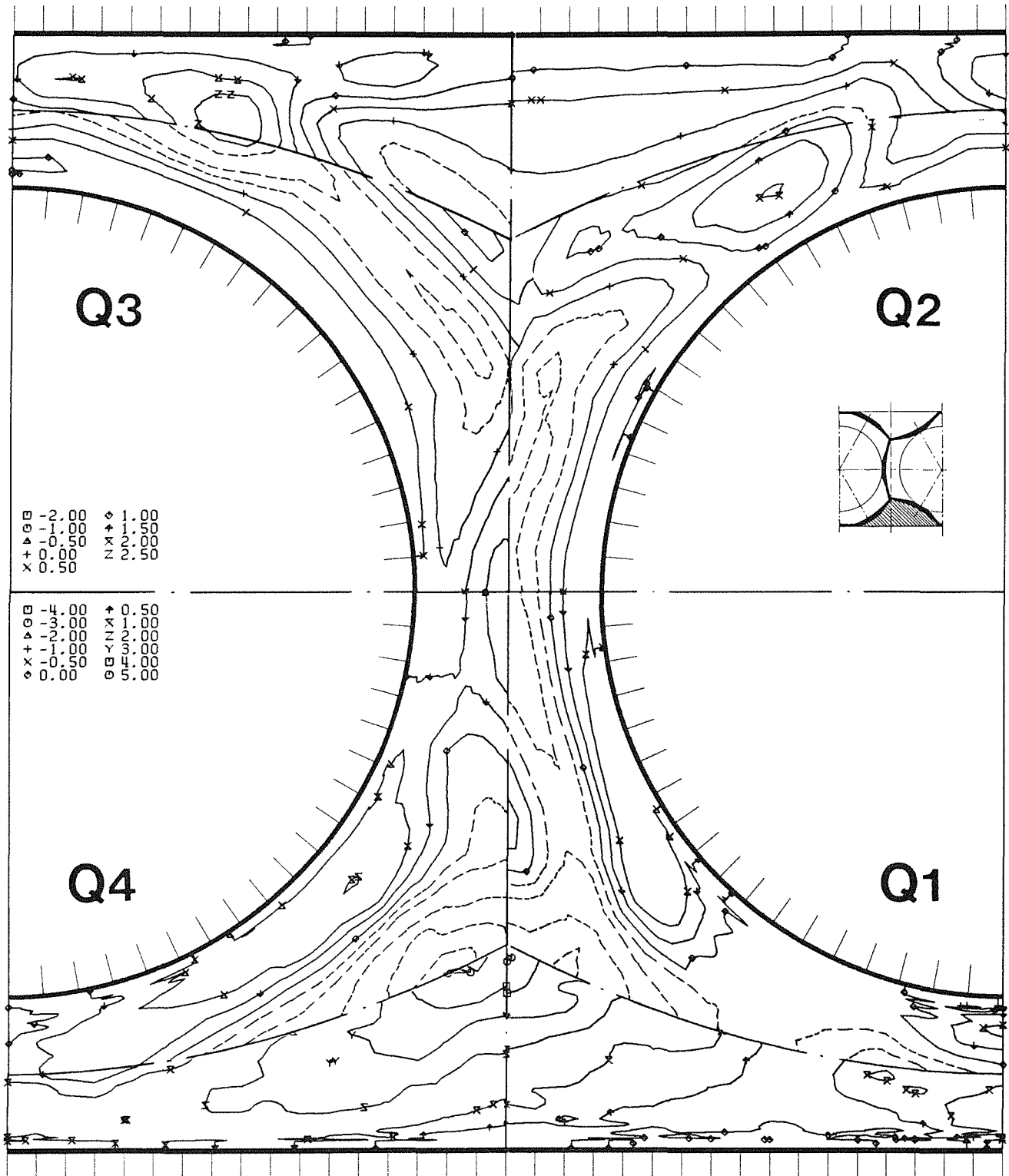


Abb.24 Schubspannung senkrecht zur Wand bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für  $L/D_h = 1.93$

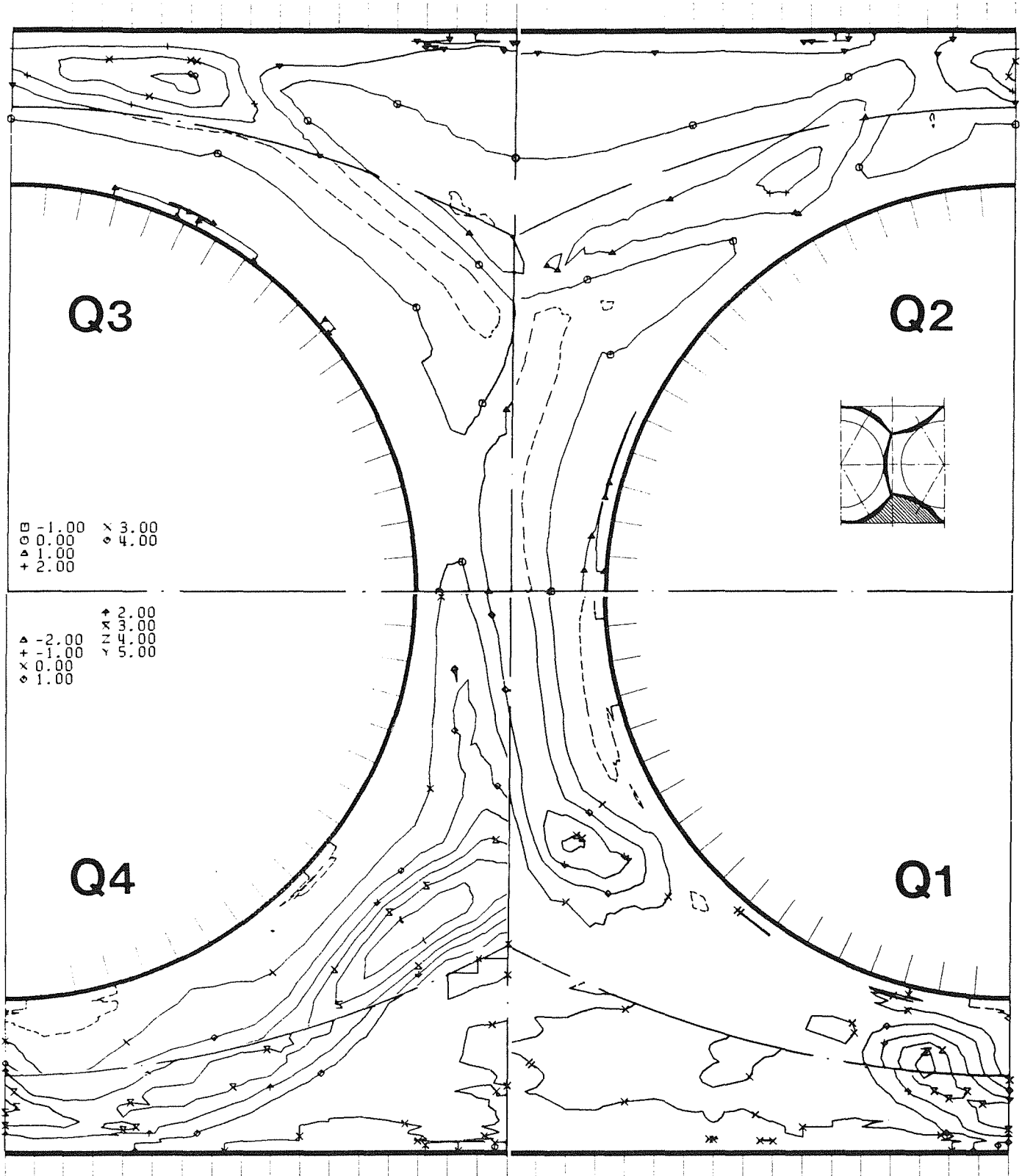


Abb.25 Schubspannung senkrecht zur Wand bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für  $L/D_h = 0.96$

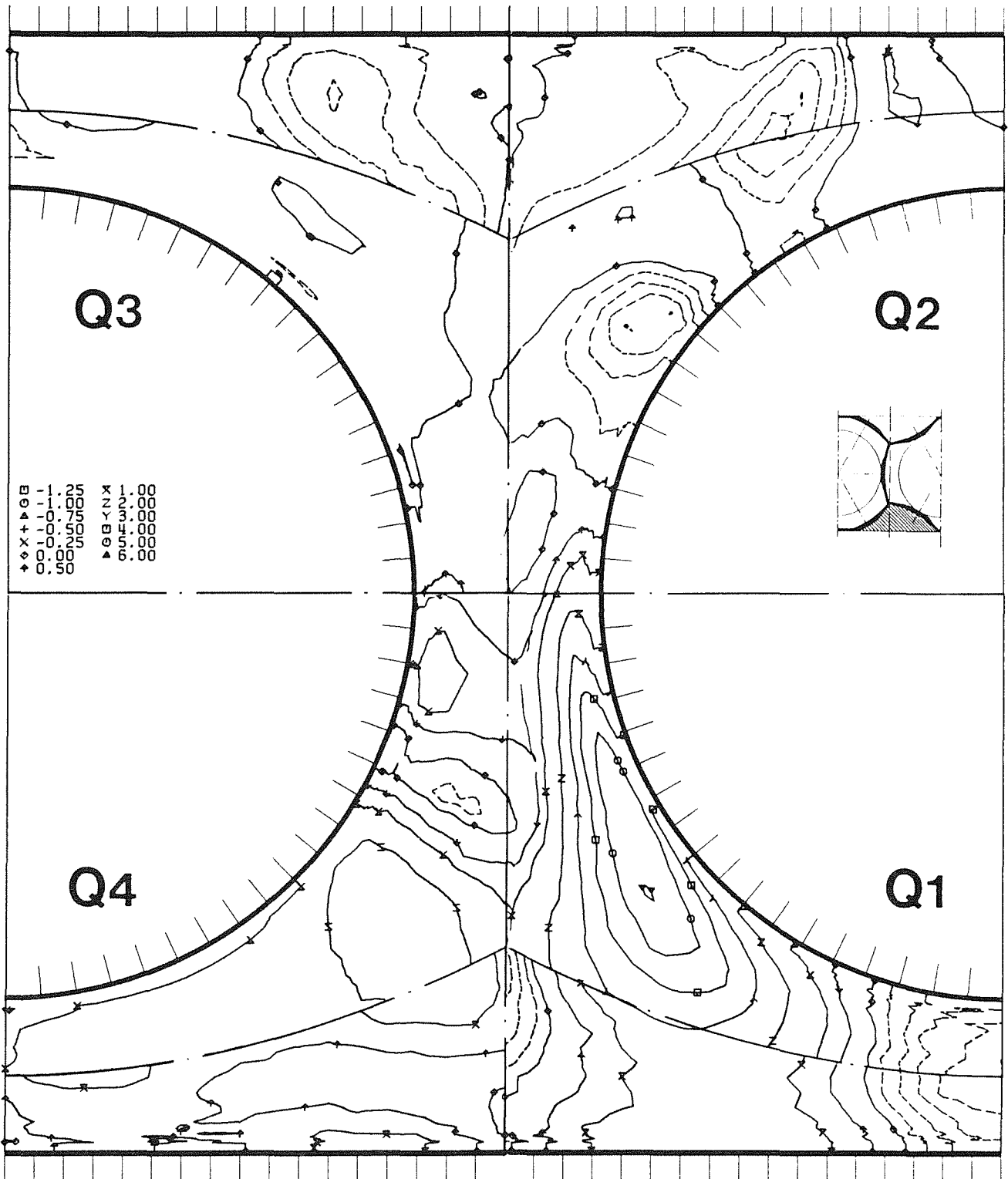


Abb.26 Schubspannung parallel zur Wand bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für  $L/D_h = 4.61$

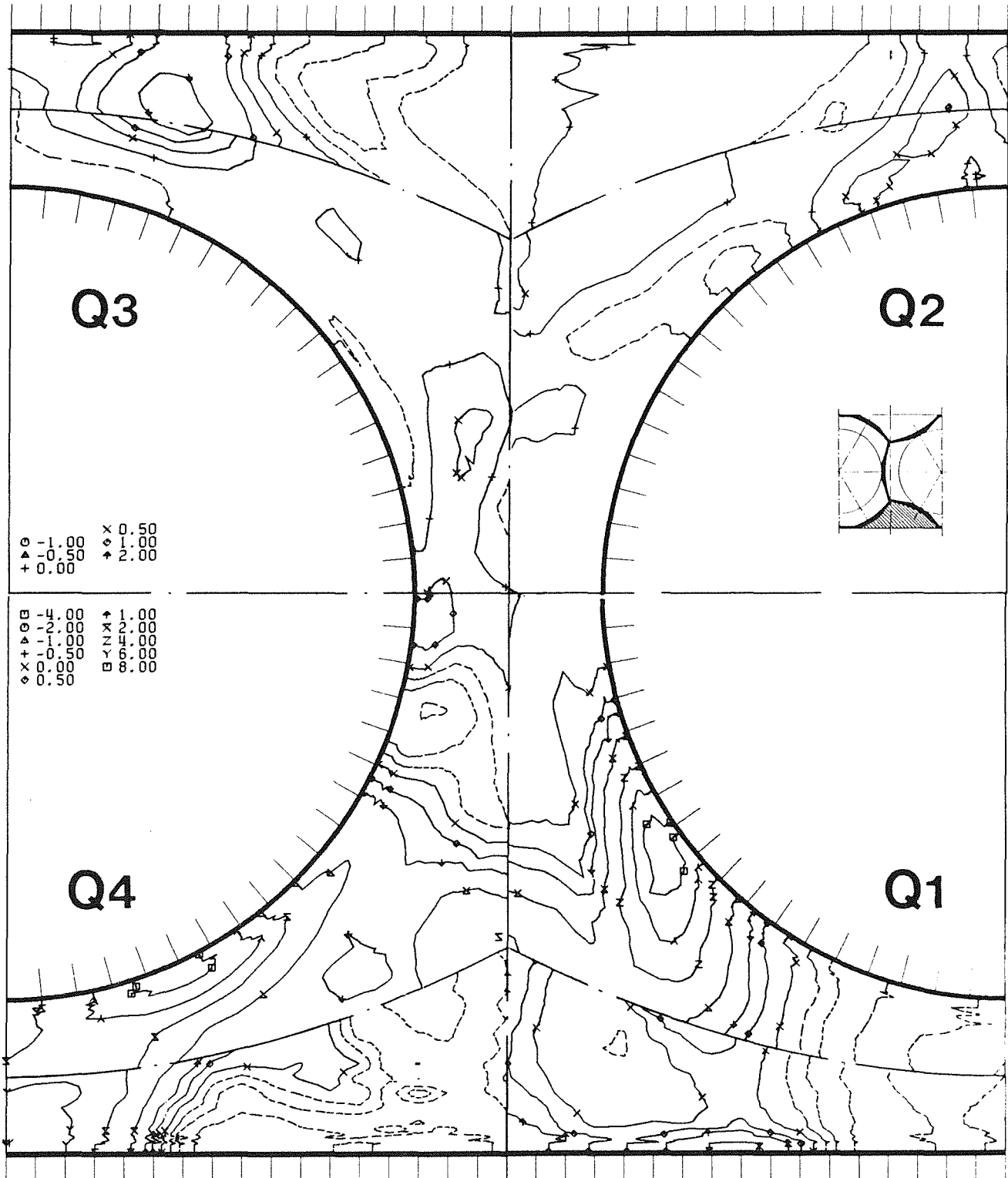


Abb.27 Schubspannung parallel zur Wand bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für  $L/D_h = 1.93$

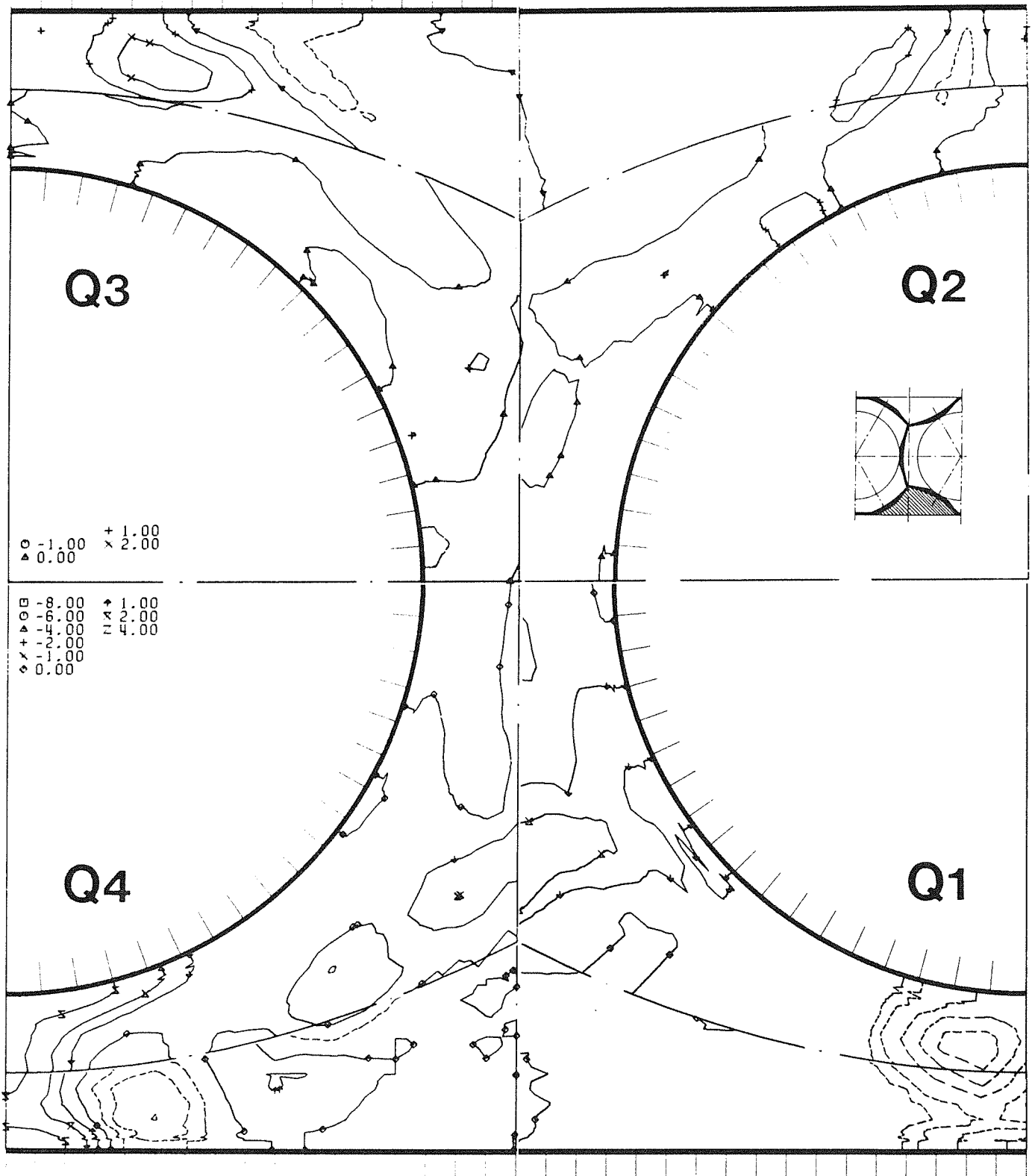


Abb.28 Schubspannung parallel zur Wand bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für  $L/D_h = 0.96$

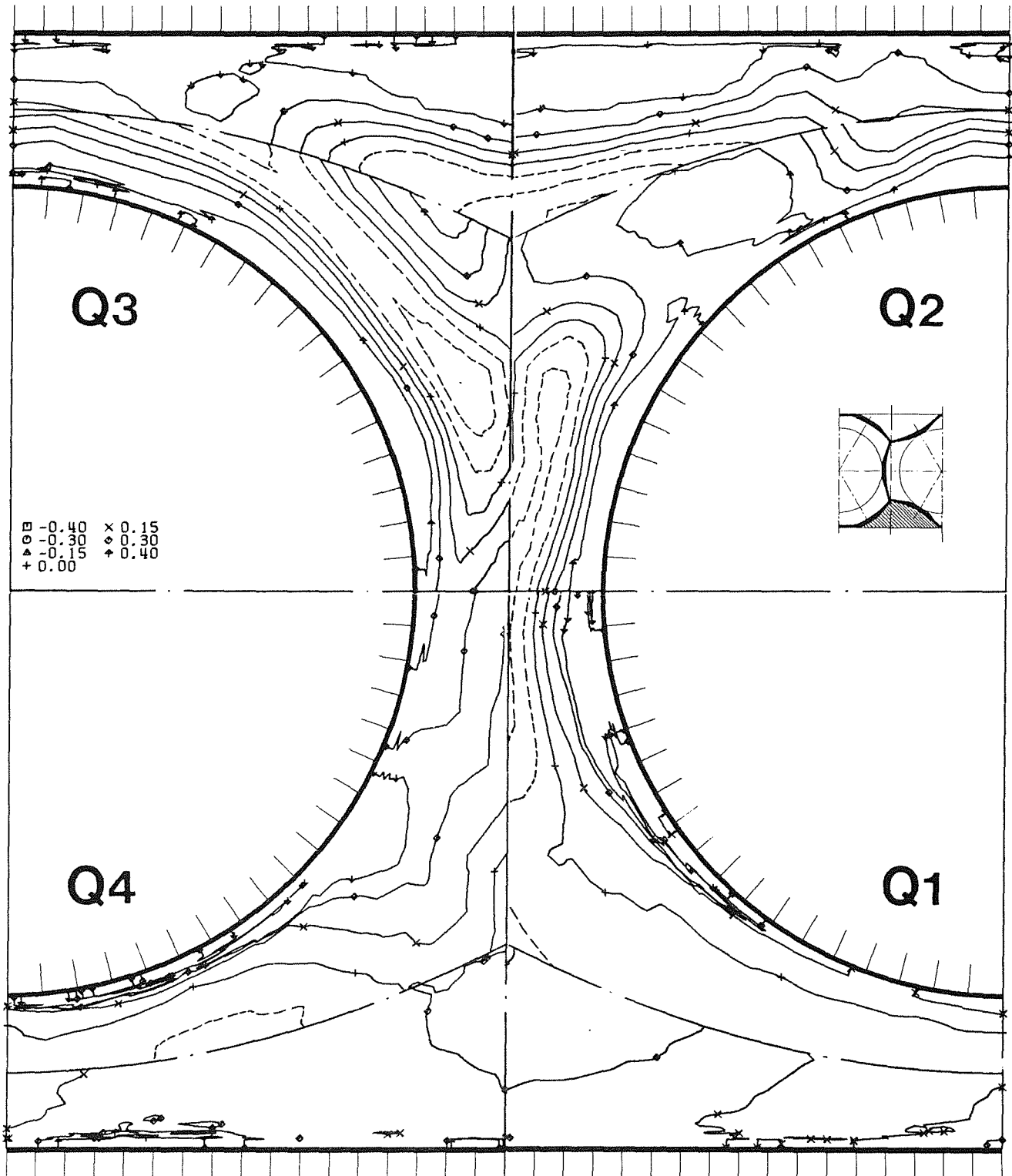


Abb.29 Korrelationskoeffizient der Schubspannung senkrecht zur Wand  
für  $L/D_h = 4.61$

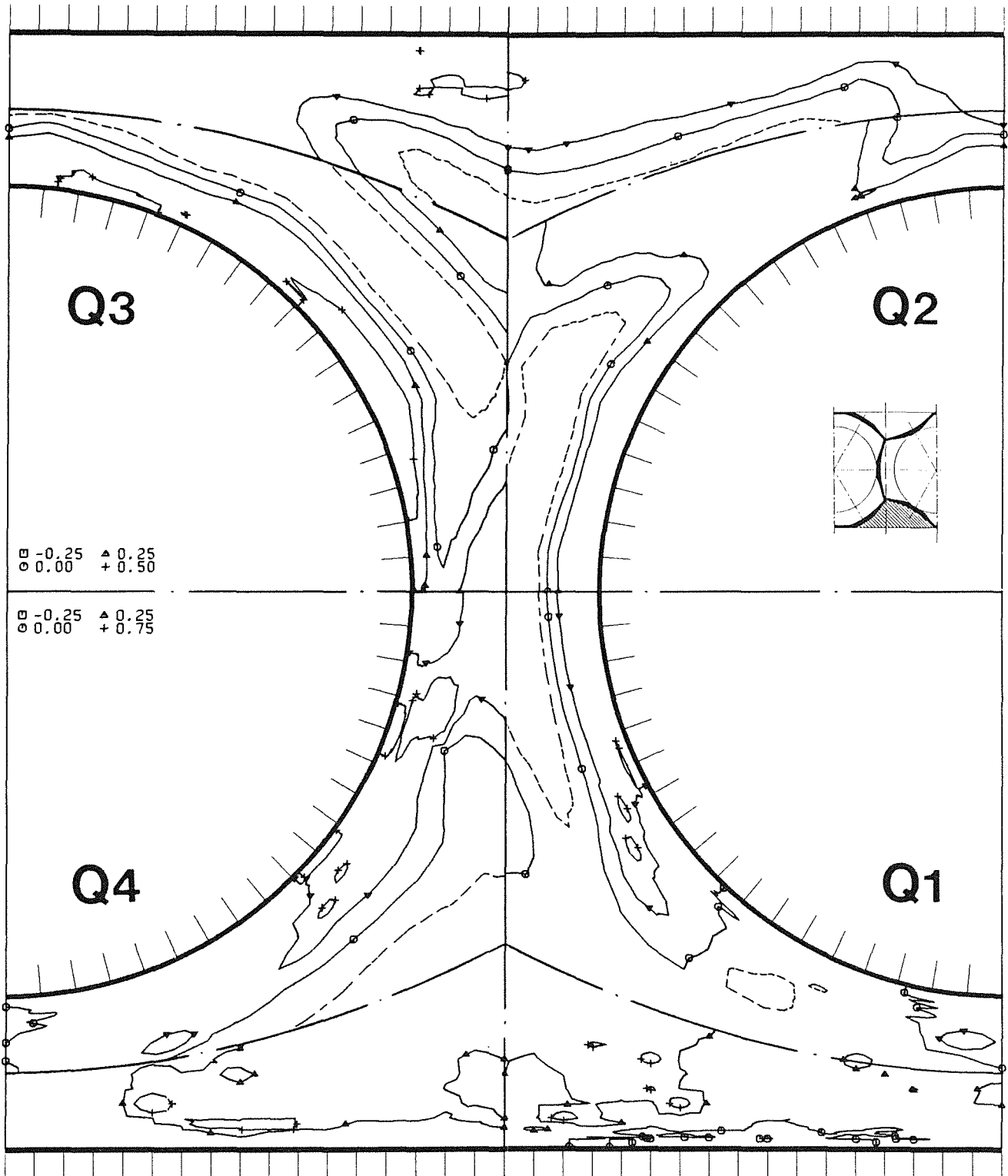


Abb.30 Korrelationskoeffizient der Schubspannung senkrecht zur Wand  
für  $L/D_h = 1.93$



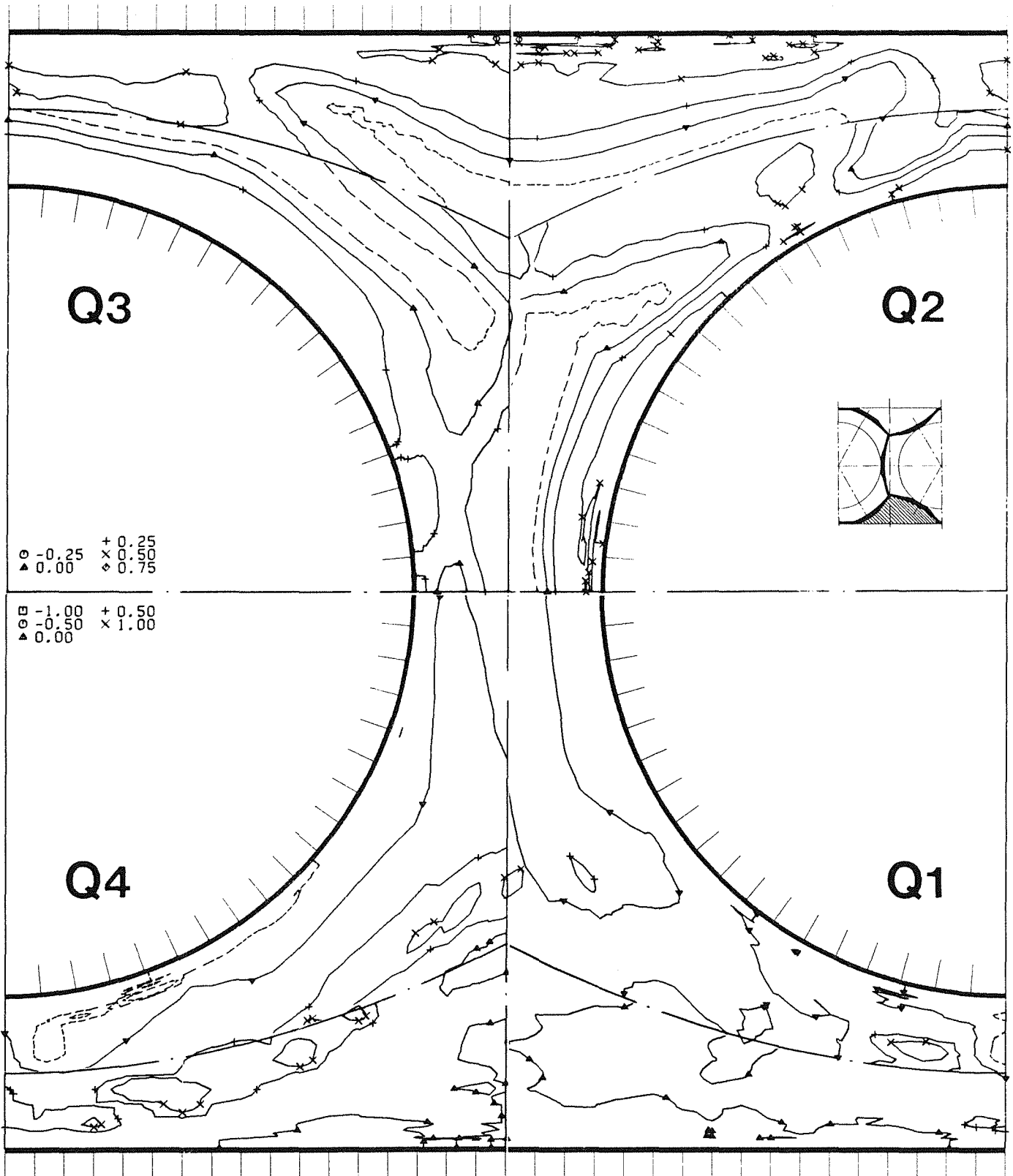


Abb.31 Korrelationskoeffizient der Schubspannung senkrecht zur Wand für  $L/D_h = 0.96$

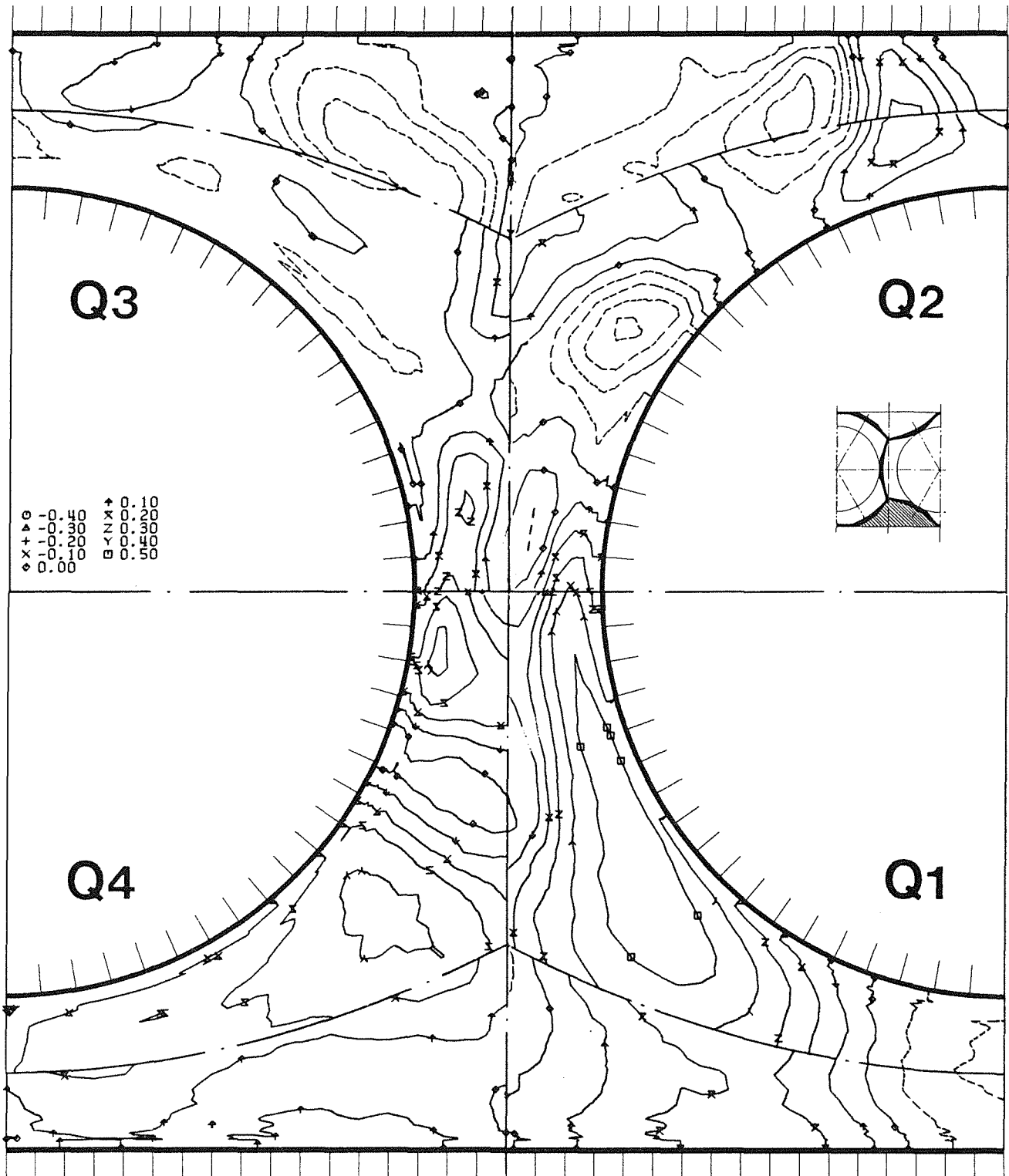


Abb.32 Korrelationskoeffizient der Schubspannung parallel zur Wand  
für  $L/D_h = 4.61$

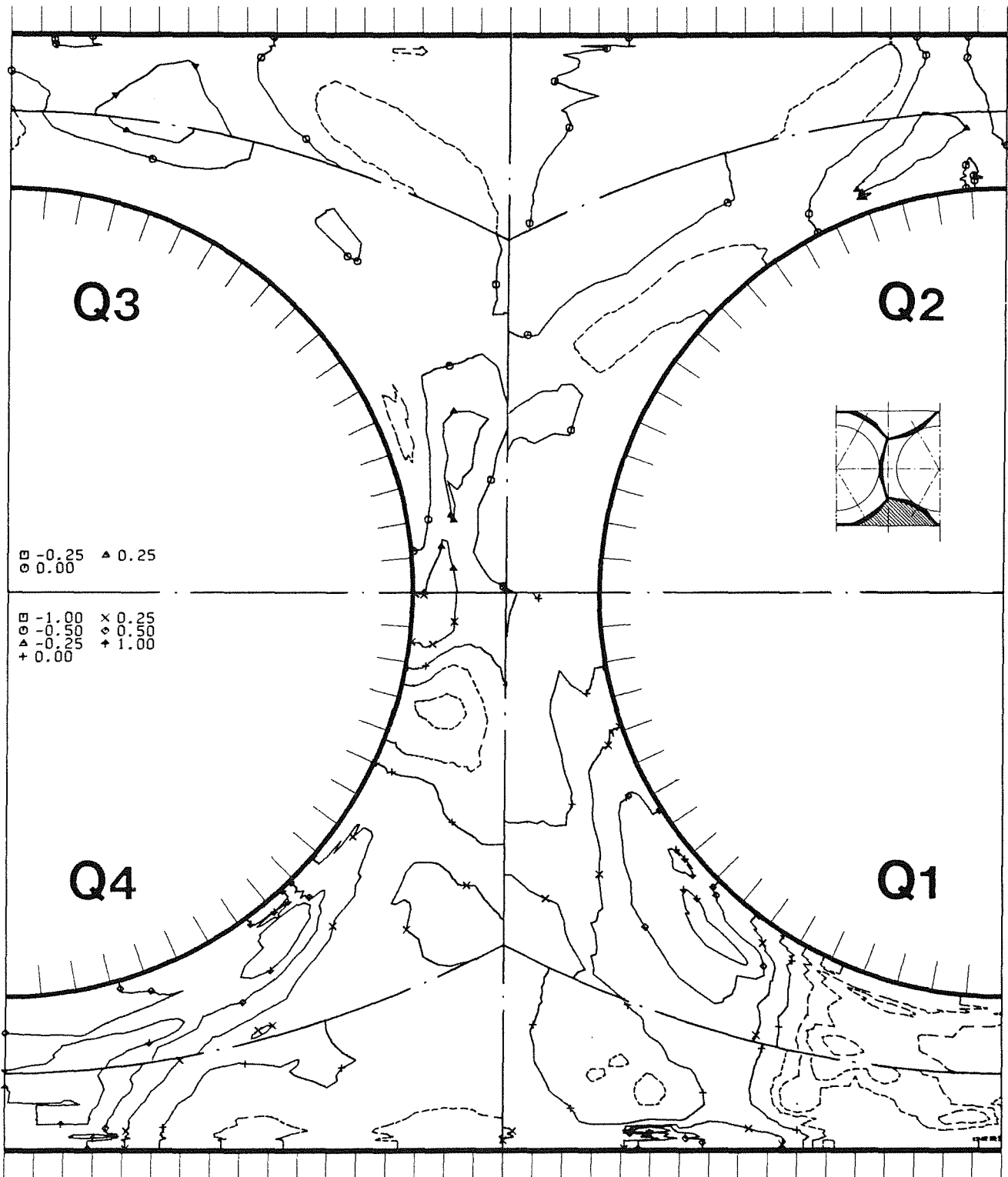


Abb.33 Korrelationskoeffizient der Schubspannung parallel zur Wand  
für  $L/D_h = 1.93$

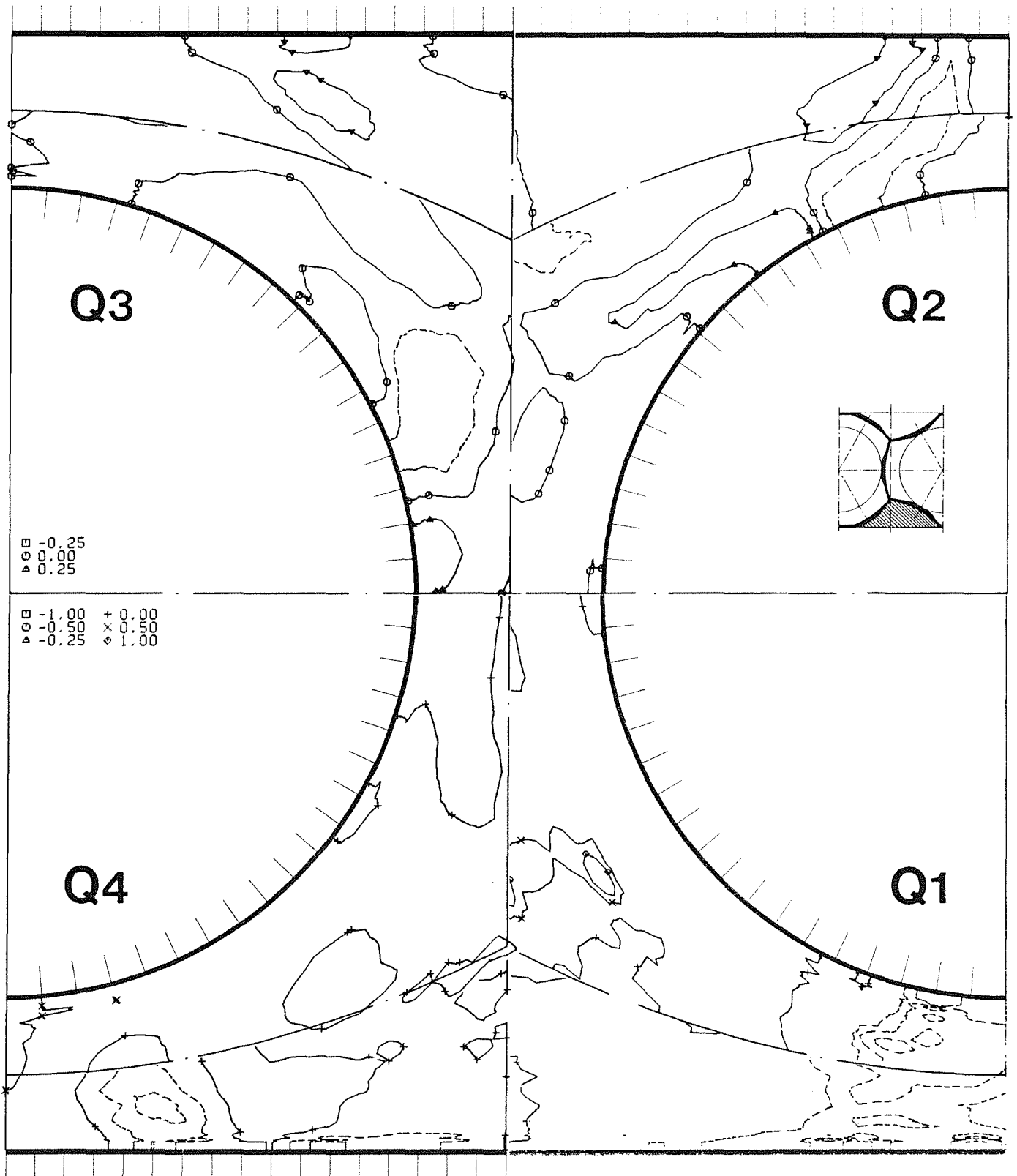


Abb.34 Korrelationskoeffizient der Schubspannung parallel zur Wand  
für  $L/D_h = 0.96$

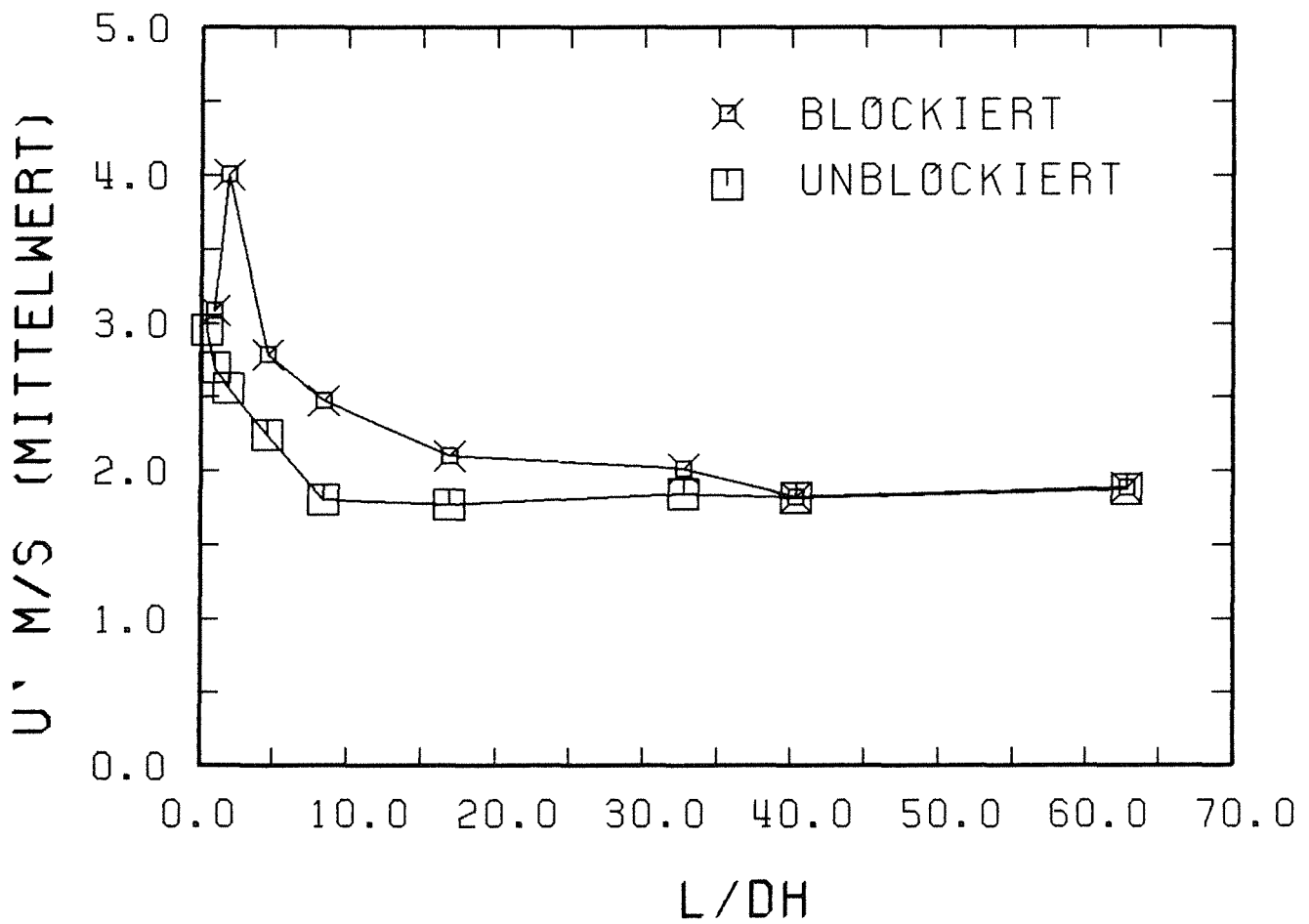


Abb.35 Axiale Turbulenzintensität, gemittelt in zwei Wandkanälen, als Funktion von Länge zu hydraulischem Durchmesser hinter dem Abstandhalter mit und ohne Blockade

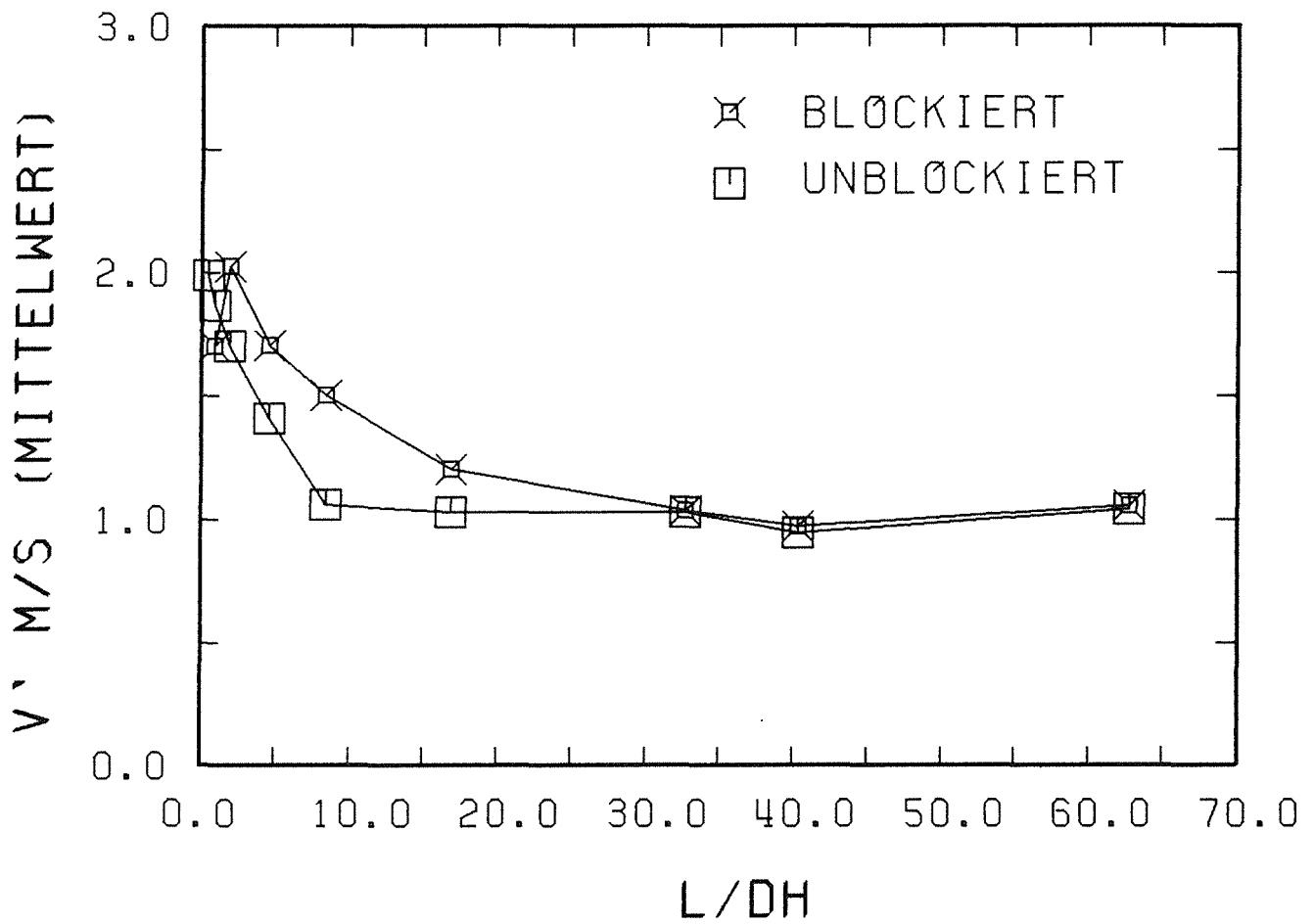


Abb.36 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand , gemittelt in zwei Wandkanälen, als Funktion von Länge zu hydraulischem Durchmesser hinter dem Abstandshalter mit und ohne Blockade

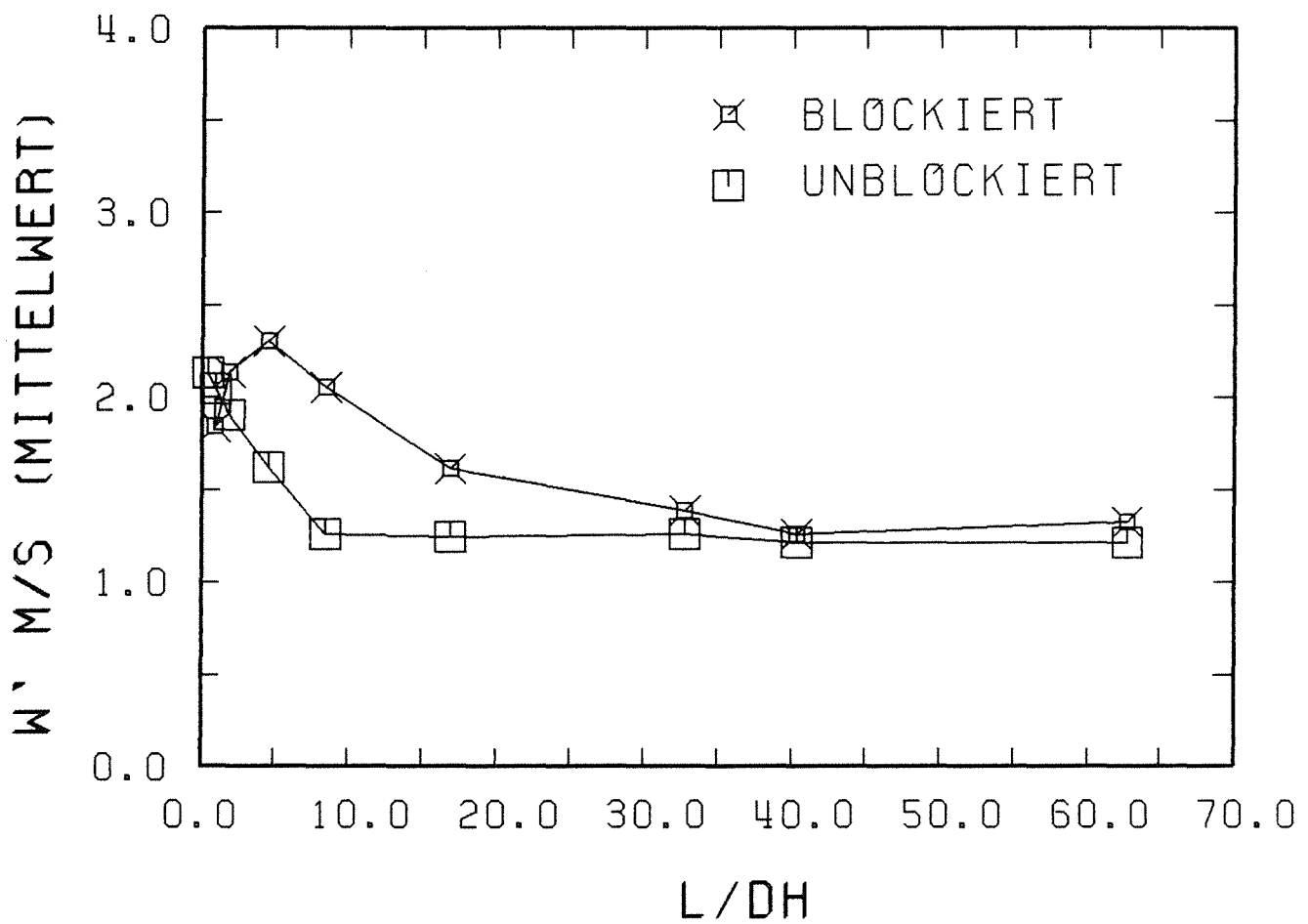


Abb.37 Turbulenzintensität parallel zur Wand , gemittelt in zwei Wandkanälen, als Funktion von Länge zu hydraulischem Durchmesser hinter dem Abstandshalter mit und ohne Blockade

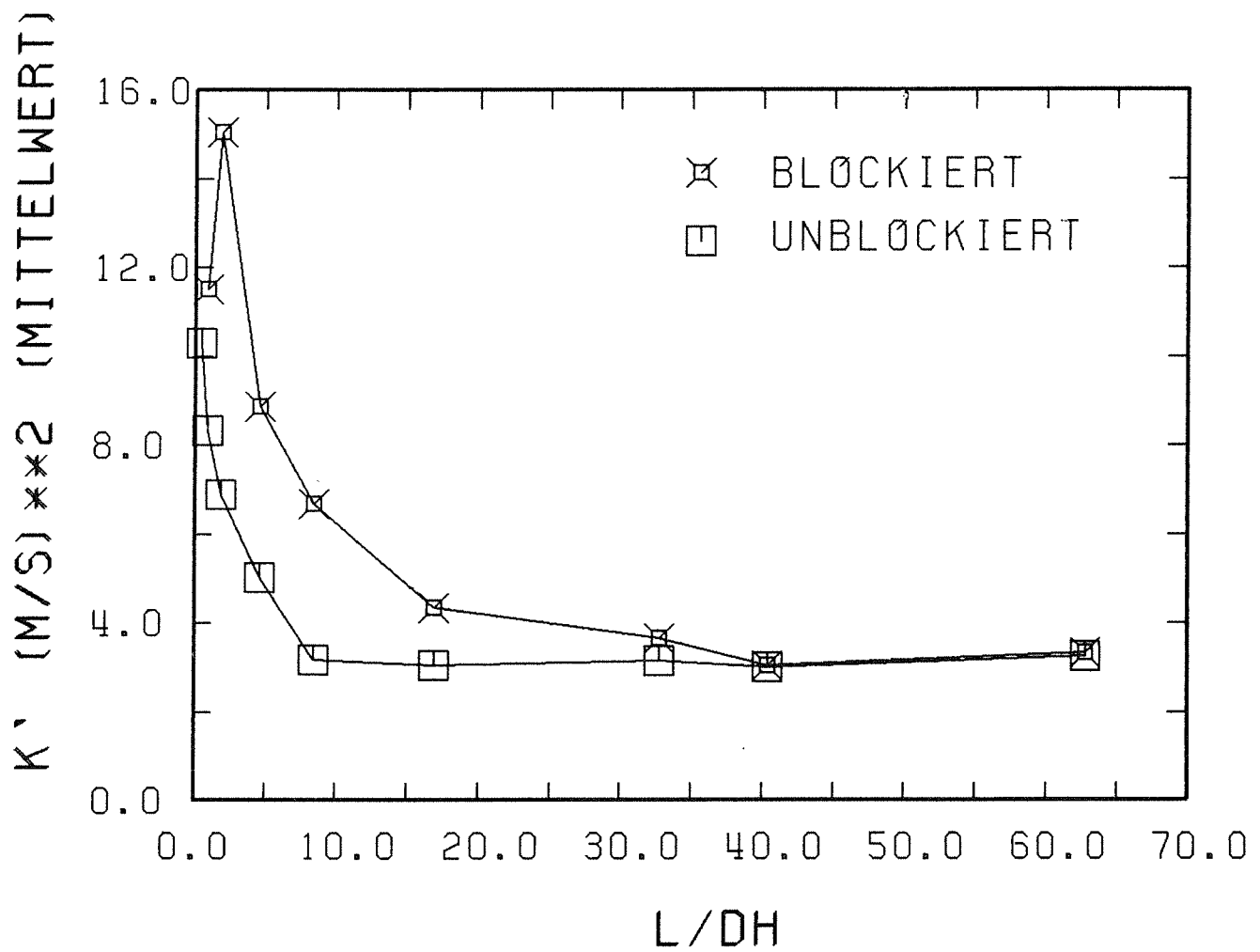


Abb.38 Turbulente kinetische Energie, gemittelt in zwei Wandkanälen, als Funktion von Länge zu hydraulischem Durchmesser hinter dem Abstandhalter mit und ohne Blockade