

KfK 4705
April 1990

Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilung in Wandkanälen von Stabbündeln 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 4705

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

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 $L/D_h = 32.76$, 16.91 bzw. 8.44 . Die Reynoldszahl der Untersuchungen betrug $Re = 1.28 \times 10^5$.

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.

Distributions of velocity and turbulence in wall subchannels of rod bundles 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 $L/D_h = 32.76$, 16.91 and 8.44 , respectively. The Reynolds number of this investigation was $Re = 1.28 \times 10^5$.

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 redistribution 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 .

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 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 Kanalausstritt verschoben.

3. Versuchsdurchführung

In diesem Bericht werden die Meßergebnisse für drei Experimente mit dem in den Ebenen V4, V5 und V6 eingebauten Abstandshalter (Abb.1) dokumentiert. Die Meßergebnisse für die Ebenen V1 bis V3 ($L/D_h = 89.9$ bis 40.4) sind in /11/ 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 Meßebe zu

$$L/D_h = 32.76 \text{ für Meßebe V4,}$$

$$L/D_h = 16.91 \text{ für Meßebe V5,}$$

und

$$L/D_h = 8.44 \text{ für Meßebe V6.}$$

Die Messungen erfolgten bei Reynoldszahlen von $Re = 1.28 \times 10^5$.

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°) 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 /12/ 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 /12/.

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 Stabbüdels 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-Koverters 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 /12/ 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 /13/ ausgewertet. Für die Hitzdraht-Messungen wird dabei die von Hooper /14/ 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° ab. Die Hitzdrähte werden im eigenen Labor gefertigt. Dazu wird ein Punktschweißgerät 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 /15/ 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 wandsenkrecht 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 V4, V5 bzw. V6 als Linien gleicher Geschwindigkeit dargestellt. Dabei sind die Strömungsgeschwindigkeiten auf die jeweilige Referenzgeschwindigkeit

$$u_R = 26.16 \text{ ms}^{-1} \text{ für Ebene V4 und}$$

$$u_R = 27.75 \text{ ms}^{-1} \text{ für die Ebenen V5 und V6}$$

bezogen.

Die Abbildungen zeigen, daß die Geschwindigkeitsverteilung nicht symmetrisch bezüglich der Symmetrieachsen senkrecht zu den Kanalwänden zwischen den Stäben bzw. durch die Stabzentren ist. Das ist zum geringeren Teil bedingt durch

die Abstandshalterstruktur, jedoch vorwiegend durch die starke Randblockade, die in den Abbildungen skizziert ist. Die Asymmetrie der Geschwindigkeitsverteilung wächst mit steigender Annäherung an den Abstandshalter, also für kleineres L/D_h , wie den Höhenliniendarstellungen deutlich zu entnehmen ist. Es fällt besonders auf, daß in den Wandkanälen mit der starken Randversperrung für alle L/D_h die Maximalgeschwindigkeit im Spalt zwischen den Stäben auftritt (Q1 und Q4).

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 derartige Effekte nicht festgestellt werden. Zum einfacheren Vergleich sind die entsprechenden Ergebnisse (für gleiche L/D_h) in Tab. 2 angegeben. Die Tendenzen sind teils umgekehrt zu den hier für die Randversperrung festgestellten. Das zeigt deutlich, welchen starken Einfluß die Randversperrung auf die Geschwindigkeitsverteilung ausübt. Für $L/D_h = 8.44$ betrug die größte Abweichung des Durchsatzes im Quadranten Q3 4.1% vom mittleren Durchsatz für den Fall ohne Randversperrung. Der entsprechende Wert liegt bei 21,7% für den hier untersuchten Fall mit Randversperrung.

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 der Abstandshalter ist (Tab. 3). Für $L/D_h = 32.76$ beträgt der Unterschied 20.3%, er wächst auf 29.9% für $L/D_h = 16.91$ und auf 41% für $L/D_h = 8.44$ an. Dabei ist das Verhältnis jeweils auf den Durchsatz im blockierten Wandkanal (Q1 + Q4) bezogen.

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 /8,9/. An den Stabwänden sind die Wandschubspannungen in den Quadranten Q2 und Q3 deutlich höher als in den übrigen Quadranten. Während die Kontaktstelle zwischen Gitterabstandshalter und Stabwand nur in der Ebene V4 ($L/D_h = 32.76$) bei $\phi = -60^\circ$ andeutungsweise zu erkennen ist, kann man die Kontaktstelle bei $\phi = +60^\circ$ deutlich erkennen am relativen Minimum der Wandschubspannung. Bei den Messungen ohne Randversperrung gab es ein entsprechend deutlich ausgeprägtes Minimum ebenfalls für $\phi = -60^\circ$. An der anderen Stabwand (Q4/Q3) ist die Kontaktstelle bei $\phi = 0^\circ$ überhaupt nicht sichtbar. Bei den Messungen ohne Randversperrung lag ein ausgeprägtes Minimum der Wandschubspannung für $\phi = 0^\circ$ vor.

An den Kanalwänden unterscheiden sich die Wandschubspannungsverteilungen im Vergleich zu den Messungen ohne Randversperrung noch drastischer. Während bei den früheren Messungen die Verläufe an beiden Wänden ähnlich waren, sind sie für die Messungen mit Randversperrung völlig verschieden. In den Quadranten Q3/Q2 mit dem deutlich höheren Massendurchsatz ist die Wandschubspannung ebenfalls deutlich höher als in den Quadranten Q4/Q1, die stark blockiert sind. Wie bei den Messungen ohne Randversperrung tritt für $L/D_h = 8.44$ erstmals bei $Z = -60$ mm ein relatives Minimum auf, das durch die Kontaktstelle zwischen Abstandshalter und Kanalwand hervorgerufen ist.

Die Wandschubspannungsverteilungen hängen viel sensitiver von Störungen im Strömungskanal ab als die Geschwindigkeiten. Wegen

$$\tau_w = \frac{\lambda}{8} \rho u_m^2 \quad (4)$$

und

$$\lambda \sim \text{Re}^{-0.2} = \left(\frac{u_m D_h}{\nu} \right)^{-0.2} \quad (5)$$

ist

$$\tau_w \sim u_m^{1.8} \quad (6)$$

Daher beträgt z.B. im Quadranten Q3 für $L/D_h = 8.44$ die Abweichung der Wandschubspannung 39.0% von der mittleren Wandschubspannung aus allen Quadranten, hingegen beträgt die Abweichung der mittleren Geschwindigkeit nur 21.7% 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 $\pm 1.1\%$ für $L/D_h = 32.76$ und steigen auf $\pm 3.3\%$ für $L/D_h = 16.91$ und $\pm 4.4\%$ für $L/D_h = 8.44$ an für die einzelnen Quadranten. Für die Teilkanäle sind die Abweichungen mit $\pm 2.6\%$, $\pm 3.7\%$ bzw. $\pm 7.9\%$ 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. Außerdem gibt es einen deutlichen Impulstransport über die Spalte zwischen Stäben, der aus den Geschwindigkeitsgradienten parallel zu den Stabwänden deutlich erkennbar ist (Abb. 6, 7 und 8).

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

Aus den Höhenlinienbildern ist die Asymmetrie der Verteilung der axialen Turbulenzintensität sichtbar und zwar sowohl bezüglich der Achse durch die Stabzentren als auch bezüglich der Achse senkrecht zu den Kanalwänden. An den Höhenliniendarstellungen fällt auf, daß die axiale Turbulenzintensität im Bereich des blockierten Wandkanals (Q1 und Q4) mit sinkendem L/D_h immer gleichmäßiger und weniger strukturiert entwickelt. Dabei wächst das Niveau der axialen Turbulenzintensität mit sinkendem L/D_h . Im unblockierten Wandkanal (Q2 und Q3) ist mit sinkendem L/D_h immer deutlicher die Struktur des Abstandshalters zu erkennen.

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 mit τ_{av} aus Tab. 1 zu

$$u_{av}^* = \sqrt{\frac{\tau_{av}}{\rho}} \quad (7)$$

ergibt.

Es zeigt sich, daß für $L/D_h = 32.76$ der Mittelwert der axialen Turbulenzintensität in den Quadranten Q2 und Q3 (unblockiert) noch deutlich höher ist als in den Quadranten Q1 und Q4 (blockiert), wie es für $L/D_h \geq 40.37$ festgestellt wurde [11]. Für $L/D_h = 16.91$ ergibt sich jedoch eine Änderung. Zwar ist der Mittelwert im

/11/. Für $L/D_h = 16.91$ ergibt sich jedoch eine Änderung. Zwar ist der Mittelwert im Quadranten Q3 immer noch am höchsten, jedoch im Quadranten Q2 am niedrigsten. Für $L/D_h = 8.44$ sind die Mittelwerte der axialen Turbulenzintensität am größten in den blockierten Quadranten Q1 und Q4, dagegen fallen die Mittelwerte in den Quadranten Q2 und Q3 stark ab.

Gleichzeitig steigt der Absolutwert des Mittelwerts der axialen Turbulenzintensität mit sinkendem L/D_h deutlich an. In /11/ wurde der Absolutwert angegeben, der auf die Referenzschubspannungsgeschwindigkeit bezogen war. Rechnet man die Werte um auf die mittlere Wandschubspannungsgeschwindigkeit, so ergibt sich für $L/D_h = 62.77$ $(u'/u^*)_{av} = 1.616$ und der entsprechende Wert für $L/D_h = 40.37$ ist 1.649. Das bedeutet, daß der Mittelwert der axialen Turbulenzintensität mit sinkendem L/D_h stetig ansteigt.

Betrachtet man die Verhältnisse der Mittelwerte der axialen Turbulenzintensität getrennt nach blockiertem und unblockiertem Wandkanal, so ergibt sich daß der Mittelwert für $L/D_h \geq 32.76$ mit sinkendem L/D_h leicht ansteigt und für $L/D_h < 32.76$ konstant bleibt im unblockierten Wandkanal (Q2 und Q3). Der Mittelwert im blockierten Wandkanal ist für $L/D \geq 32.76$ etwa 12% kleiner als im unblockierten Wandkanal und etwa konstant. Für $L/D_h = 16.91$ erreicht der Mittelwert im blockierten Wandkanal die gleiche Größe wie im unblockierten Wandkanal. Für $L/D_h = 8.44$ übersteigt der Mittelwert im blockierten Wandkanal den Wert im unblockierten Wandkanal um 25%.

Das bedeutet, daß die starke Blockade den Turbulenzinhalt im blockierten Wandkanal für $L/D_h = \leq 16.91$ stark erhöht, hervorgerufen durch die Ablösung und die sich anschließenden Vermischungsvorgänge im Nachlauf der Blockade.

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. Die Meßergebnisse zeigen für $L/D_h = 32.76$, daß es keine großen Variationen der Turbulenzintensität in den beiden Wandkanälen gibt. Für $L/D_h = 16.91$ bildet sich jedoch im blockierten Wandkanal (Q1 und Q4) eine Struktur aus, die für $L/D_h = 8.44$ deutlich zu erkennen ist. Es zeigt sich, daß die Turbulenzintensität senkrecht zur Wand mit wachsendem Wandabstand ansteigt und in der Mitte des Wandkanals die

höchsten Werte zu finden sind. Im unblockierten Wandkanal ändern sich die Turbulenzintensitäten senkrecht zur Wand nur schwach.

Aus den integrierten Mittelwerten (Tab. 4) ist die Änderung der Turbulenzintensität senkrecht zur Wand mit sinkendem L/D_h klarer zu erkennen. Wie für die axiale Turbulenzintensität festgestellt, ist auch die Turbulenzintensität senkrecht zur Wand in dem unblockiertem Wandkanal (Q2 und Q3) für $L/D_h = 32.76$ und 16.44 am größten. Das kehrt sich für die Meßebene bei $L/D_h = 8.44$ mm um, jetzt ist die Turbulenzintensität im blockierten Wandkanal deutlich höher als im unblockierten. Da auch der Absolutwert des Mittelwerts mit sinkendem L/D_h ansteigt, ergibt sich, daß die gemittelte Turbulenzintensität im unblockierten Wandkanal nur schwach ansteigt mit sinkendem L/D_h (0.975-1.068-1.108 für $L/D_h = 32.76$ -16.91 und 8.44). Dagegen steigt die gemittelte Turbulenzintensität im blockierten Wandkanal stark an, nämlich von 0.758 über 0.951 auf 1.356 für $L/D_h = 32.76$, 16.91 bzw. 8.44. Damit liegt die mittlere Turbulenzintensität senkrecht zur Wand für $L/D_h = 8.44$ im blockierten Wandkanal um 22% höher als im unblockierten, eine deutliche Auswirkung der erhöhten Turbulenz im Nachlauf der Blockade.

5.3.3. Turbulenzintensität parallel zur Wand

Die Meßergebnisse der Turbulenzintensität parallel zur Wand, die in den Abb. 17 bis 19 als Höhenlinien für die drei angemessenen Ebenen dargestellt sind, lassen deutliche Strukturen erkennen. Für $L/D_h = 32.76$ ergeben sich ähnliche Strukturen wie für größere L/D_h /11/. Dagegen zeigt sich bereits für $L/D_h = 16.91$ und noch deutlicher für $L/D_h = 8.44$, daß die Turbulenzintensität parallel zur Wand im blockierten Wandkanal (Q1 und Q4) ansteigt, gut zu erkennen im Quadranten Q4 in der Nähe der Stabwand.

Die integrierten Mittelwerte der Turbulenzintensität parallel zur Wand (Tab. 5) zeigen die Trends noch stärker. Nur für $L/D_h = 37.6$ ist die mittlere Turbulenzintensität parallel zur Wand im unblockierten Wandkanal (Q2 und Q3) größer als im blockierten. Bereits für $L/D_h = 16.91$ ist die mittlere Turbulenzintensität parallel zur Wand in beiden Quadranten des blockierten Wandkanals (Q1 und Q4) höher als in den Quadranten des unblockierten Wandkanals.

Die Absolutwerte der mittleren Turbulenzintensität parallel zur Wand, bezogen auf die mittlere Wandschubspannungsgeschwindigkeit, steigen mit sinkendem

$L/D_h = 32.76$, 16.91 bzw. 8.44 ansteigen. Dagegen steigen die Werte für den blockierten Wandkanal von 1.118 über 1.451 auf 2.027 für $L/D_h = 32.76$, 16.91 bzw. 8.44 drastisch an. Die Ursache dafür liegt in der Blockade, die im Nachlauf eine sehr starke Querbewegung hervorruft, die sich in den hohen mittleren Turbulenzintensitäten parallel zu den Wänden manifestiert. Diese Querbewegung ist deutlicher höher als senkrecht zu den Wänden, da die Wände eine derartige Querbewegung stärker behindern. Daher ist die mittlere Turbulenzintensität parallel zur Wand etwa 50% höher als senkrecht zur Wand für $L/D_h = 8.44$ im blockierten Wandkanal. Gleichzeitig ist die mittlere Turbulenzintensität im blockierten Wandkanal etwa 50% höher als im unblockierten Wandkanal für $L/D_h = 8.44$.

5.3.4 Kinetische Energie der Turbulenz

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

$$k' = 0.5 (u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (8)$$

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.

Während die Struktur der Höhenlinien für $L/D_h = 32.76$ und 16.91 ähnlich der Struktur der Höhenlinien der axialen Turbulenzintensität ist, gilt das für $L/D_h = 8.44$ nur noch im unblockierten Wandkanal (Q2 und Q3). Im blockierten Wandkanal (Q1 und Q4) wirken sich die erhöhten Turbulenzintensitäten senkrecht zur Wand und besonders parallel zur Wand so aus, daß Unterschiede zwischen den Höhenlinien der kinetischen Energie der Turbulenz und der axialen Turbulenzintensität klar erkennbar sind.

Den integrierten Mittelwerten der kinetischen Energie der Turbulenz (Tab. 5) kann man entnehmen, daß die höchsten Werte im unblockierten Wandkanal nur für $L/D_h = 32.76$ auftreten. Für $L/D_h = 16.91$ finden sich die höchsten mittleren kinetischen Energien im Quadranten Q4, also im einen Teil des blockierten Wandkanals. Für $L/D_h = 8.44$ sind die mittleren kinetischen Energien der Turbulenz in beiden Quadranten des blockierten Wandkanals deutlich höher als im unblockierten.

beiden Quadranten des blockierten Wandkanals deutlich höher als im unblockierten.

Der Absolutwert der kinetischen Energie der Turbulenz bezogen auf das Quadrat der mittleren Wandschubspannungsgeschwindigkeit steigt mit sinkendem L/D_h stark an (letzte Zeile in Tab. 5). Trennt man die mittlere relative kinetische Energie nach blockiertem und unblockiertem Wandkanal auf, dann ergeben sich die Daten, die in Tab. 6 angegeben sind. In der Tabelle sind ebenfalls die Ergebnisse für $L/D_h = 62.77$ und $40.37/11/$ enthalten.

Man erkennt, daß die mittlere kinetische Energie der Turbulenz im unblockierten Wandkanal (Q2 und Q3) mit sinkendem L/D_h stetig ansteigt, allerdings nur schwach um etwa 23% von $L/D_h = 62.77$ nach $L/D_h = 8.44$. Dagegen ist die mittlere kinetische Energie im blockierten Wandkanal für $L/D_h \leq 32.76$ niedriger als im blockierten und nahezu konstant. Erst für $L/D_h = 19.61$ sind die mittleren kinetischen Energien der Turbulenz in unblockierten und blockierten Wandkanal gleich. Für $L/D_h = 8.44$ steigt die kinetische Energie der Turbulenz im blockierten Wandkanal drastisch an und ist mehr als 70% höher als im unblockierten Wandkanal. Dieser Anstieg wird durch die starke Blockade im Abstandshalter verursacht.

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 Ergebnisse für $L/D_h = 32.76$ sind relativ gleichmäßig, jedoch machen sich bei $L/D_h = 16.91$ Verzerrungen der Höhenlinien bemerkbar, die durch den Abstandshalter hervorgerufen sind. Für $L/D_h = 8.44$ sind die Höhenlinien viel stärker verschoben; deutliche Auswirkungen der Abstandshalterstruktur sind in den Quadranten Q2 und Q3 zu erkennen. In dem blockierten Wandkanal (Q1 und Q4) zeigen die Höhenlinien einen starken Einfluß der Blockade. Insbesondere in Kanalwandnähe sind die Schubspannungen senkrecht zur Wand sehr hoch.

Die Höhenlinien der gemessenen Schubspannung parallel zu den Wänden bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit, Abb. 26 bis 28, zeigen deutlich die Auswirkungen der einseitigen Blockade des Abstandshaltergitters auf die Verteilung. Im blockierten Wandkanal ist die Nullschub-

nen Wandkanal in den Quadranten Q4 schließen. Im unblockierten Wandkanal ist die Nullschubspannungslinie in den Quadranten Q2 verschoben, also liegt hier ein Impulstransport in den Quadranten Q2 vor. Der Impulstransport aus den Nachbarwandkanälen, der die Verschiebung der Nullschubspannungslinie bewirkt, ist auch die Ursache für die Verschiebung der Nullschubspannungslinie auf der Symmetrielinie senkrecht zu den Kanalwänden während im blockierten Wandkanal die Verschiebung in den Quadranten Q1 erfolgt, findet die Verschiebung im unblockierten Wandkanal in den Quadranten Q3 statt. Die Verschiebungen werden schwächer mit sinkendem L/D_h , so daß bei $L/D_h = 8.44$ die Verschiebungen auf der Symmetrielinie nur noch schwach sind.

Auffällig ist auch, daß die Schubspannungen parallel zu den Wänden im unblockierten Wandkanal stark abnehmen mit sinkendem L/D_h . Die maximalen Schubspannungen ergeben sich für $L/D_h = 32.76$ im Spalt zwischen den Stäben. Das bedeutet einen hohen Impulstransport durch den Spalt, der erforderlich ist, um das Geschwindigkeitsprofil zu vergleichmäßigen und die durch die Blockade hervorgerufene starke Umverteilung des Massendurchsatzes zurückzubilden. Aus dem gleichen Grund weitet sich das Gebiet hoher Schubspannungen parallel zur Wand für $L/D_h = 16.91$ im Spalt zwischen den Stäben erheblich aus und es erscheinen zwei neue Gebiete hoher Schubspannung auf der Linie größten senkrechten Wandabstandes in den Quadranten Q1 und Q4, also im blockierten Wandkanal. Für $L/D_h = 8.44$ weist praktisch der gesamte blockierte Wandkanal sehr hohe Schubspannungen auf, abgesehen von kleinen Gebieten nahe den Spalten zwischen beiden Quadranten. Diese hohen Schubspannungen drücken aus, daß sich praktisch im gesamten blockierten Wandkanal starke Impulsaustauschvorgänge abspielen, um die Massenstromumverteilung im Nachlauf der Blockade herbeizuführen. Die Höhenliniendarstellungen der Korrelationskoeffizienten der Schubspannung senkrecht zur Wand (Abb. 29 bis 31)

$$R_{uv} = \frac{-u'v'}{\sqrt{u'^2}\sqrt{v'^2}} \quad (9)$$

zeigen nahezu die gleichen Verläufe wie die Schubspannung selbst. Während es für $L/D_h = 32.76$ in Wandnähe relativ große Bereiche gibt, in denen der Korrelationskoeffizienten 0.4 übersteigt, werden diese Bereiche im blockierten Wandkanal für $L/D_h = 16.91$ erheblich kleiner. Sie verschwinden im Quadranten Q4 fast völlig. Für $L/D_h = 8.44$ sind sie im blockierten Wandkanal im Quadranten Q4 völlig verschwunden und im Quadranten Q1 sehr klein.

kanal für $L/D_h = 16.91$ erheblich kleiner. Sie verschwinden im Quadranten Q4 fast völlig. Für $L/D_h = 8.44$ sind sie im blockierten Wandkanal im Quadranten Q4 völlig verschwunden und im Quadranten Q1 sehr klein.

Die Einflüsse des Abstandshalters und der einseitigen Blockade sind ebenfalls gut zu erkennen in den Höhenliniendarstellungen des Korrelationskoeffizienten der Schubspannung parallel zu den Wänden, Abb. 32 bis 34. Das Gebiet von Korrelationskoeffizienten größer als 0.4 weitet sich von $L/D_h = 32.76$ nach $L/D_h = 8.44$ deutlich aus im Spalt zwischen den Stäben. Für $L/D_h = 8.44$ ergibt sich in weiten Teilen des blockierten Wandkanals (Q1 und Q4) ein Korrelationskoeffizient größer als 0.3, während im unblockierten Wandkanal nur zwei relativ kleine Gebiete auf der Linie größten senkrechten Wandabstands in den Quadranten Q2 und Q3 zu erkennen sind.

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 $Re = 1.28 \times 10^5$ für drei Ebenen mit Verhältnissen von Länge zwischen der Austrittskante des Abstandshalters und der Meßebene zum hydraulischen Durchmesser von $L/D_h = 32.76, 16.91$ und 8.44 .

Die gemessenen Geschwindigkeitsverteilungen zeigen, daß der Massendurchsatz im blockierten Wandkanal mit kleinerem L/D_h stark reduziert ist aufgrund der Blockade. Die Turbulenzintensitäten ändern sich nur schwach im unblockierten Wandkanal. Dagegen steigen die Turbulenzintensitäten für $L/D_h \leq 16.91$ in allen Richtungen stark an, besonders groß ist der Anstieg für die Turbulenzintensität parallel zu den Wänden. Der Anstieg der Turbulenzintensitäten läßt auch die kinetische Energie der Turbulenz mit sinkendem L/D_h stark ansteigen. Es ergibt sich, daß die über den blockierten Wandkanal gemittelte kinetische Energie der Turbulenz für $L/D_h = 8.44$ mehr als 70% höher ist als im unblockierten Wandkanal.

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

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 | Pitotrohr Außendurchmesser |
| 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 |
| 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 | grd | Umfangskoordinate |
| ν | m^2s^{-1} | kinematische Viskosität |
| ρ | Kgm^{-3} | Dichte |
| τ | 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 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**, 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**, Rechnergesteuerte Versuchsanlage zur Messung von Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen mit Hitzdrähten, KfK-Bericht Nr. 3744 (1984).
- /13/ **L. Vosáhló**, Computer programs for evaluation of turbulence characteristics from hot-wire measurements, KfK-Bericht Nr. 3743 (1984).
- /14/ **J.D. Hooper**, Fully developed turbulent flow through a rod cluster, Ph.D. Thesis, University of New South Wales, Sydney (Australia), (1980).
- /15/ **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 _n | | 32.76 | 16.91 | 8.44 | 32.76 | 16.91 | 8.44 |
| Q1 | r/φ | 0.943 | 0.906 | 0.881 | 0.911 | 0.869 | 0.806 |
| | x/y | 0.902 | 0.855 | 0.815 | 0.813 | 0.750 | 0.684 |
| | total | 0.927 | 0.886 | 0.855 | 0.868 | 0.817 | 0.750 |
| Q2 | r/φ | 1.080 | 1.092 | 1.121 | 1.143 | 1.147 | 1.214 |
| | x/y | 1.032 | 1.054 | 1.124 | 1.050 | 1.062 | 1.163 |
| | total | 1.061 | 1.077 | 1.122 | 1.102 | 1.110 | 1.192 |
| Q3 | r/φ | 1.144 | 1.204 | 1.214 | 1.284 | 1.377 | 1.417 |
| | x/y | 1.088 | 1.154 | 1.222 | 1.159 | 1.263 | 1.356 |
| | total | 1.122 | 1.184 | 1.217 | 1.229 | 1.327 | 1.390 |
| Q4 | r/φ | 0.910 | 0.875 | 0.834 | 0.851 | 0.800 | 0.714 |
| | x/y | 0.859 | 0.821 | 0.764 | 0.735 | 0.677 | 0.609 |
| | total | 0.890 | 0.853 | 0.806 | 0.800 | 0.746 | 0.668 |
| u _{av} /ms ⁻¹ , τ _{av} /Pa | | 23.44 | 22.83 | 22.97 | 1.397 | 1.341 | 1.373 |

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 _n | | 32.76 | 16.91 | 8.44 |
| Q1 | r/φ | 0.999 | 0.971 | 0.968 |
| | x/y | 0.983 | 0.974 | 0.990 |
| | total | 0.993 | 0.972 | 0.977 |
| Q2 | r/φ | 1.008 | 1.006 | 0.987 |
| | x/y | 0.976 | 0.993 | 0.997 |
| | total | 0.995 | 1.001 | 0.991 |
| Q3 | r/φ | 1.042 | 1.043 | 1.041 |
| | x/y | 1.001 | 1.005 | 1.041 |
| | total | 1.026 | 1.028 | 1.041 |
| Q4 | r/φ | 1.001 | 1.003 | 0.993 |
| | x/y | 0.965 | 0.992 | 0.988 |
| | total | 0.986 | 0.999 | 0.991 |
| u _{av} / ms ⁻¹ | | 25.71 | 26.61 | 27.36 |

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 | | |
| | 32.76 | 16.91 | 8.44 |
| Q1 + Q4 | 0.908 | 0.870 | 0.830 |
| Q2 + Q3 | 1.092 | 1.130 | 1.170 |

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 | | | L/D_h | | |
| | | 32.76 | 16.91 | 8.44 | 32.76 | 16.91 | 8.44 |
| Q1 | r/ϕ | 0.906 | 0.992 | 1.116 | 0.892 | 0.954 | 1.139 |
| | x/y | 0.913 | 0.980 | 1.113 | 0.882 | 0.860 | 1.035 |
| | total | 0.909 | 0.987 | 1.115 | 0.888 | 0.916 | 1.097 |
| Q2 | r/ϕ | 1.073 | 0.973 | 0.900 | 1.065 | 1.030 | 0.925 |
| | x/y | 1.035 | 0.983 | 0.988 | 1.092 | 1.035 | 0.899 |
| | total | 1.058 | 0.977 | 0.935 | 1.076 | 1.032 | 0.915 |
| Q3 | r/ϕ | 1.065 | 0.980 | 0.755 | 1.117 | 1.017 | 0.832 |
| | x/y | 1.166 | 1.108 | 0.979 | 1.150 | 1.109 | 0.949 |
| | total | 1.105 | 1.031 | 0.845 | 1.130 | 1.054 | 0.879 |
| Q4 | r/ϕ | 0.926 | 1.012 | 1.126 | 0.904 | 1.011 | 1.106 |
| | x/y | 0.932 | 0.994 | 1.075 | 0.909 | 0.979 | 1.114 |
| | total | 0.929 | 1.005 | 1.105 | 0.906 | 0.998 | 1.109 |
| $(u'/u^*)_{av}, (v'/u^*)_{av}$ | | 1.719 | 1.805 | 2.036 | 0.884 | 1.034 | 1.235 |

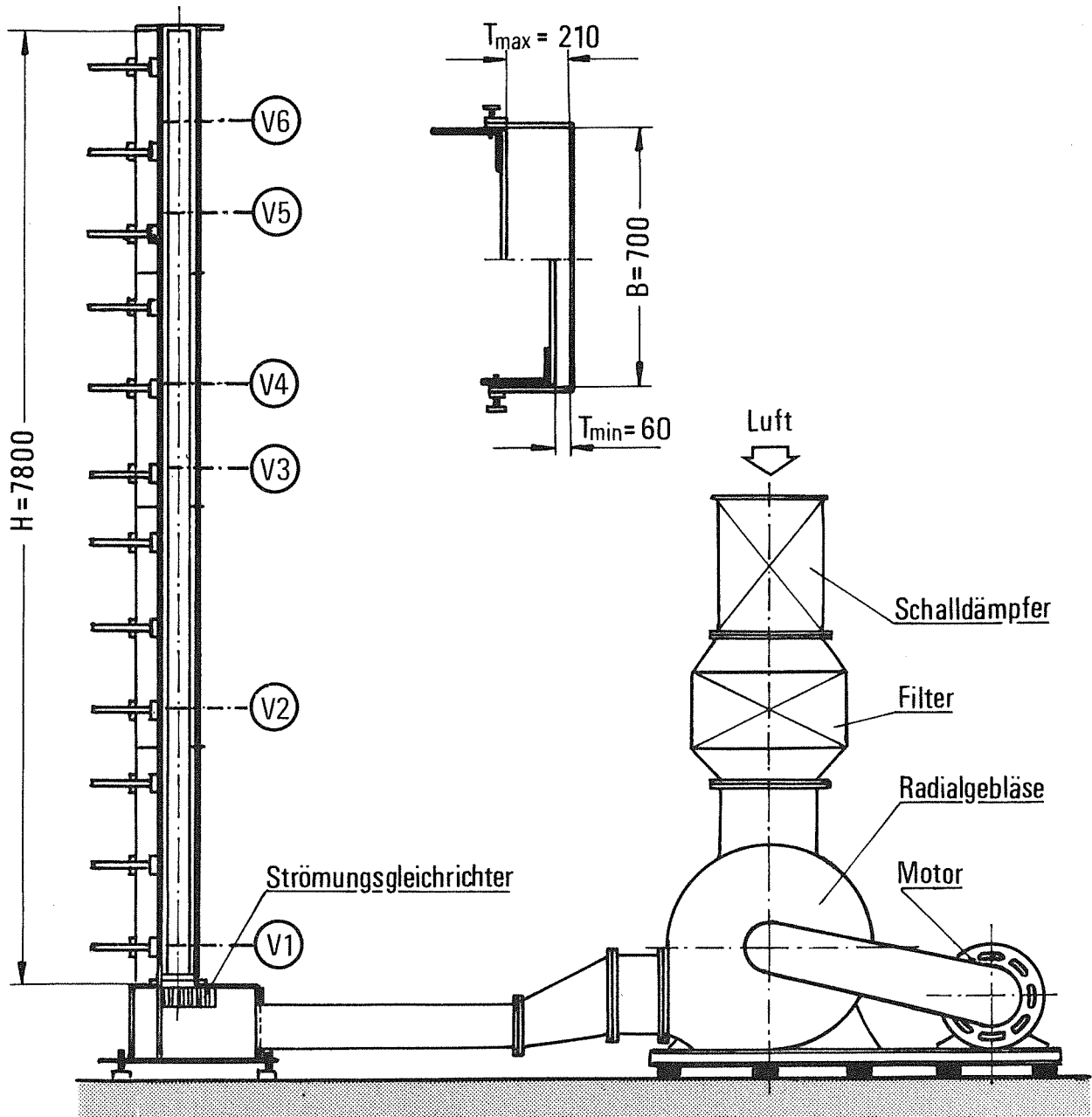
Tabelle 4. Mittelwerte der axialen und der zur Wand senkrechten Turbulenzintensitäten in den Quadranten und deren Teilkanäle bezogen auf den Mittelwert aus allen vier Quadranten.

| Quadrant | | Relative mittlere Turbulenzintensität parallel zur Wand | | | Relative mittlere kinetische Energie der Turbulenz | | |
|-----------------------------------|----------|---|-------|-------|--|-------|-------|
| L/D_h | | 32.76 | 16.91 | 8.44 | 32.76 | 16.91 | 8.44 |
| Q1 | r/ϕ | 0.924 | 1.039 | 1.195 | 0.821 | 0.991 | 1.275 |
| | x/y | 0.887 | 0.960 | 1.175 | 0.810 | 0.904 | 1.217 |
| | total | 0.909 | 1.008 | 1.187 | 0.817 | 0.956 | 1.252 |
| Q2 | r/ϕ | 1.048 | 0.987 | 0.866 | 1.126 | 0.975 | 0.781 |
| | x/y | 1.005 | 0.916 | 0.814 | 1.068 | 0.952 | 0.831 |
| | total | 1.032 | 0.959 | 0.846 | 1.103 | 0.966 | 0.802 |
| Q3 | r/ϕ | 1.070 | 0.924 | 0.708 | 1.147 | 0.949 | 0.566 |
| | x/y | 1.094 | 0.995 | 0.820 | 1.299 | 1.160 | 0.841 |
| | total | 1.080 | 0.952 | 0.752 | 1.208 | 1.033 | 0.676 |
| Q4 | r/ϕ | 0.987 | 1.099 | 1.245 | 0.873 | 1.066 | 1.317 |
| | x/y | 0.966 | 1.055 | 1.170 | 0.872 | 1.011 | 1.200 |
| | total | 0.979 | 1.081 | 1.215 | 0.873 | 1.044 | 1.271 |
| $(w'/u^*)_{av}, (k'/u^{*2})_{av}$ | | 1.184 | 1.389 | 1.688 | 2.674 | 3.215 | 4.510 |

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 | 62.77 | 40.37 | 32.76 | 16.91 | 8.44 |
| Q2 + Q3 | 2.704 | 2.837 | 3.090 | 3.213 | 3.333 |
| Q1 + Q4 | 2.226 | 2.148 | 2.260 | 3.215 | 5.689 |

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



KfK

Abb. 1 Versuchsanlage (schematisch)

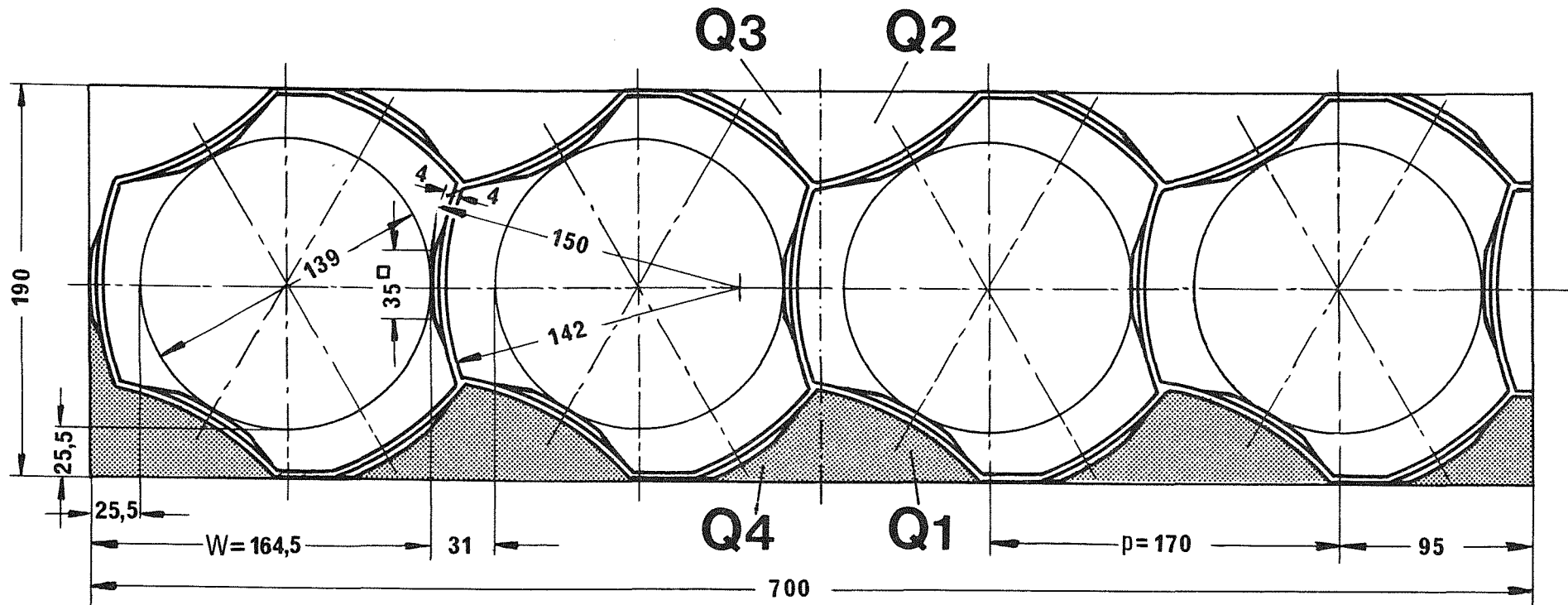


Abb. 2 Querschnitt der Abstandshaltergeometrie mit Randblockade

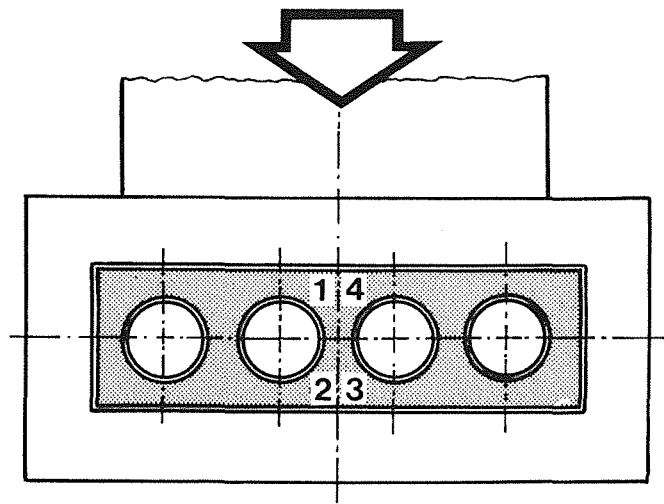


Abb. 3 Aufsicht auf den Strömungskanal mit den Eintrittsbedingungen

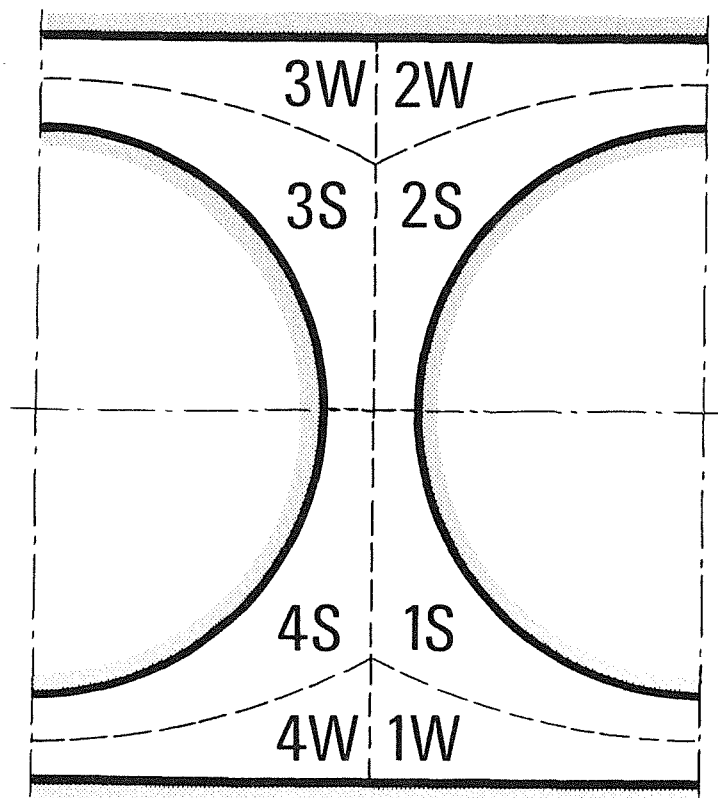


Abb. 4 Teilkanäle des untersuchten Strömungsquerschnitts

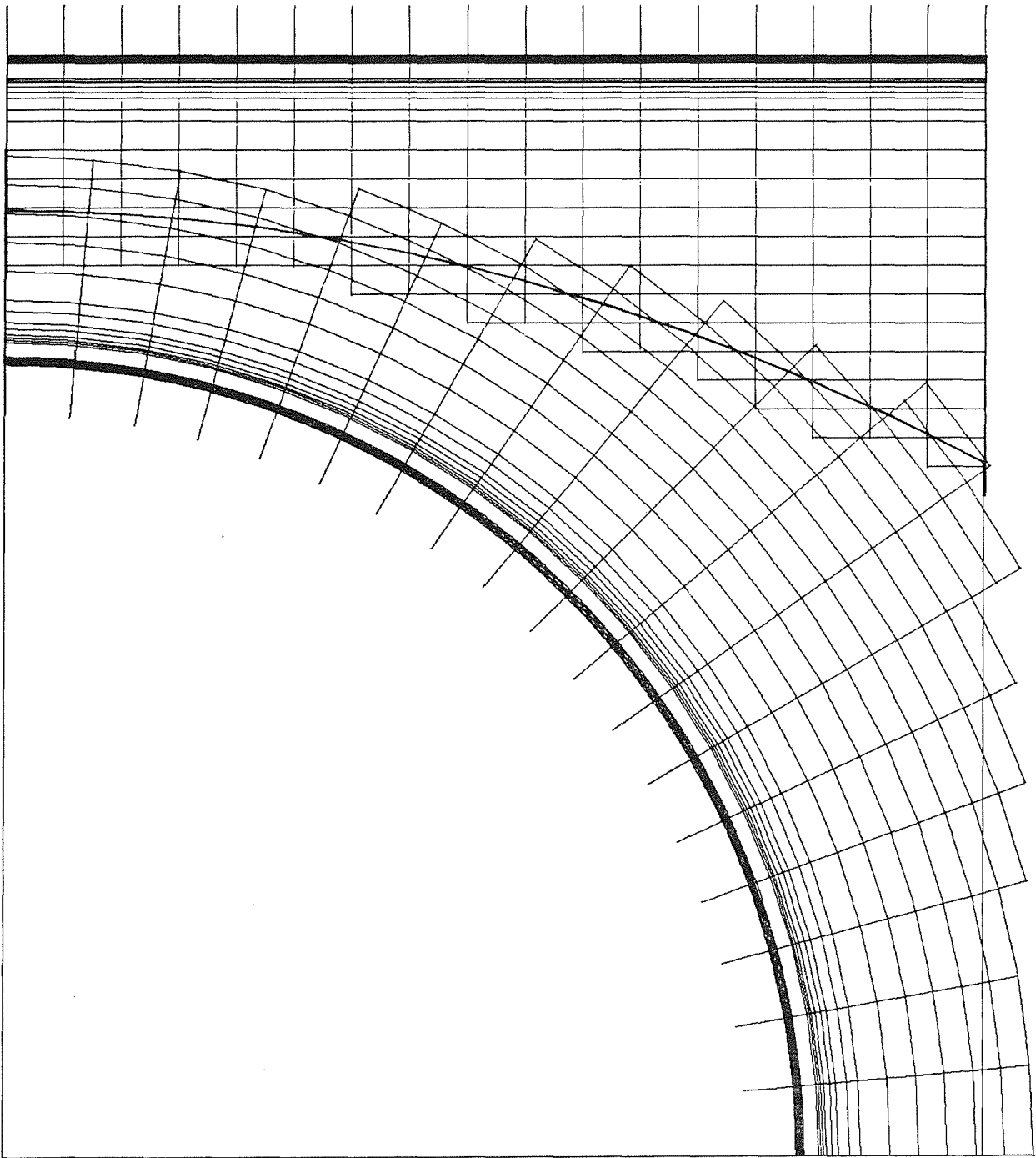


Abb. 5 Verteilung der Meßpositionen in einem Quadranten

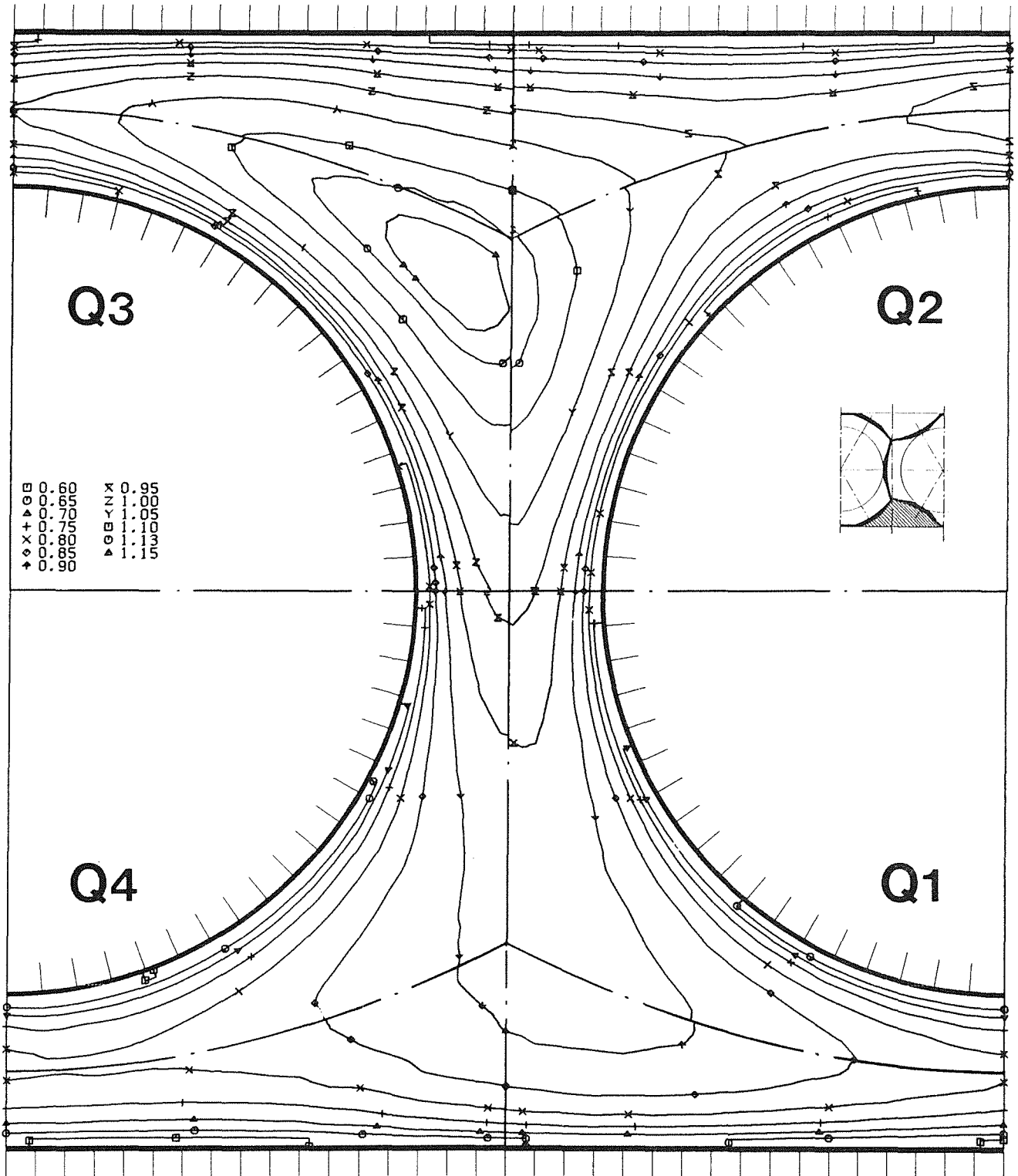


Abb. 6 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 32.76$

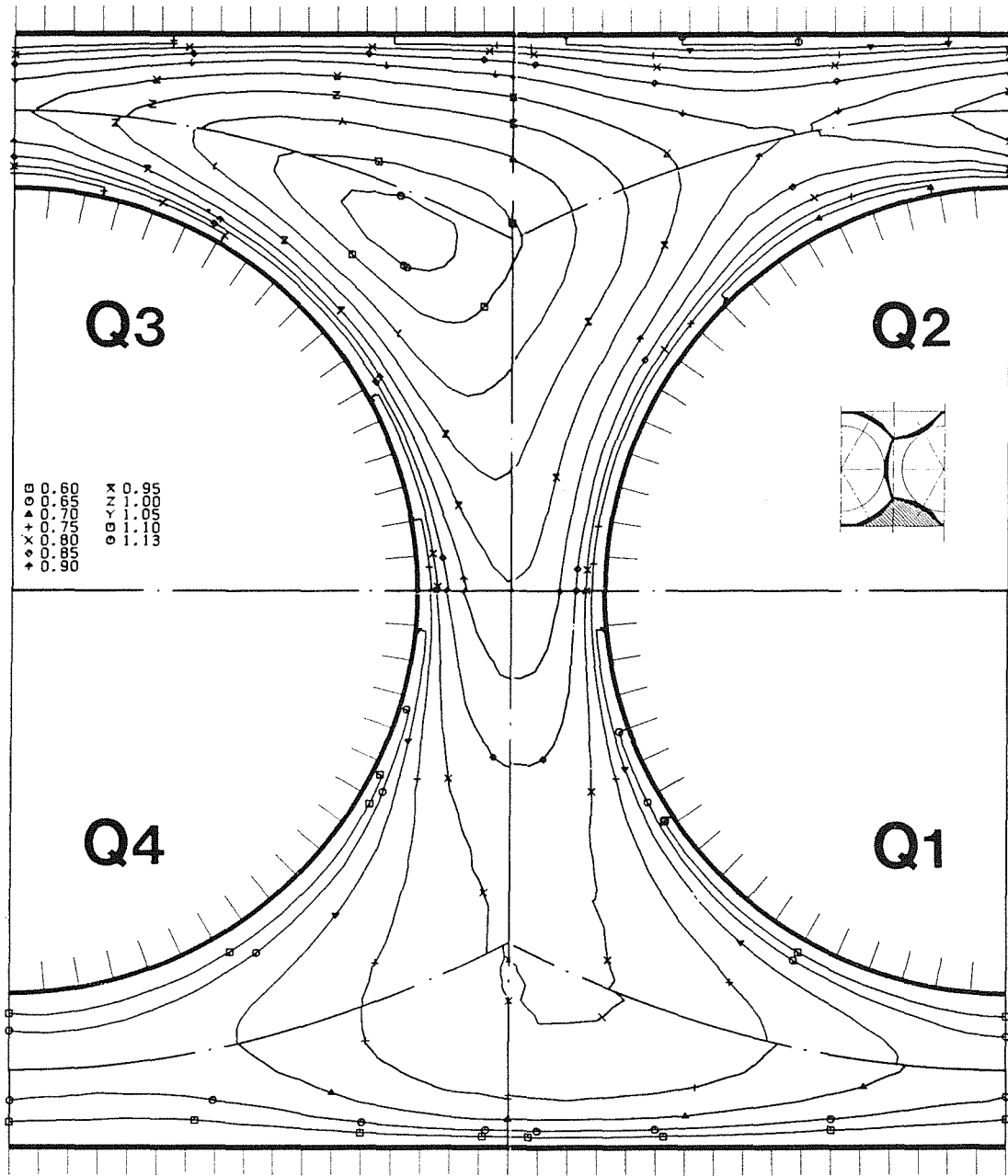


Abb. 7 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit für $L/D_n = 16.91$

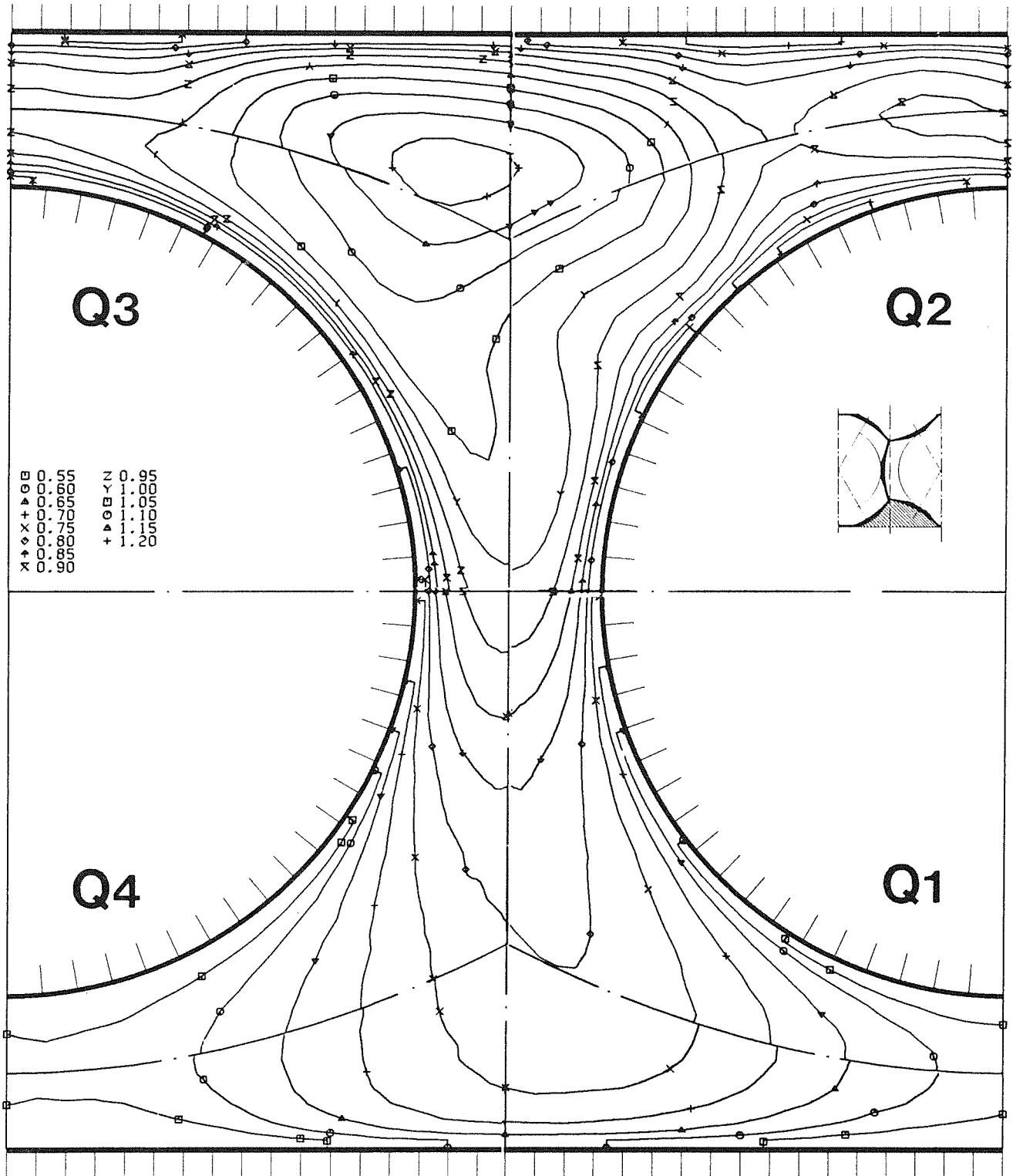


Abb. 8 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 8.44$

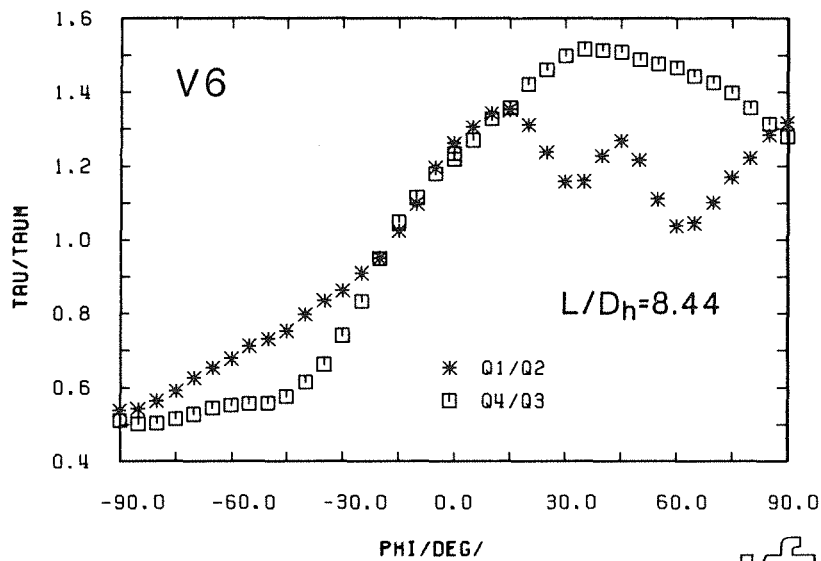
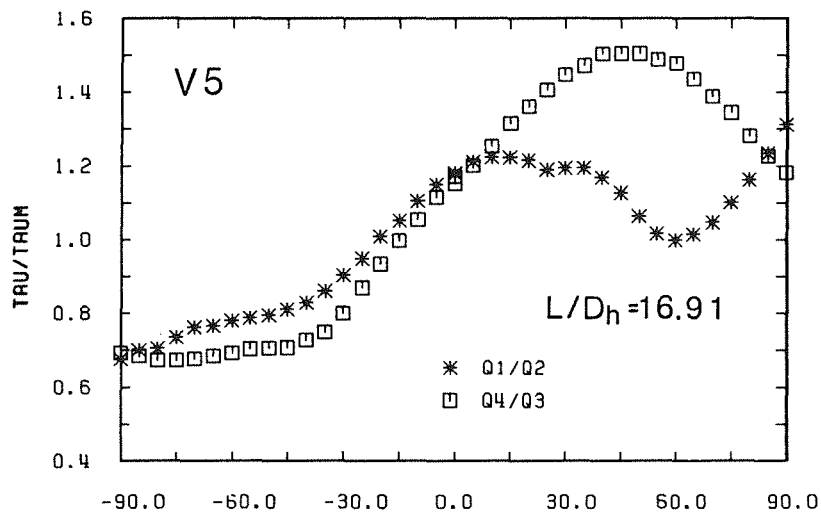
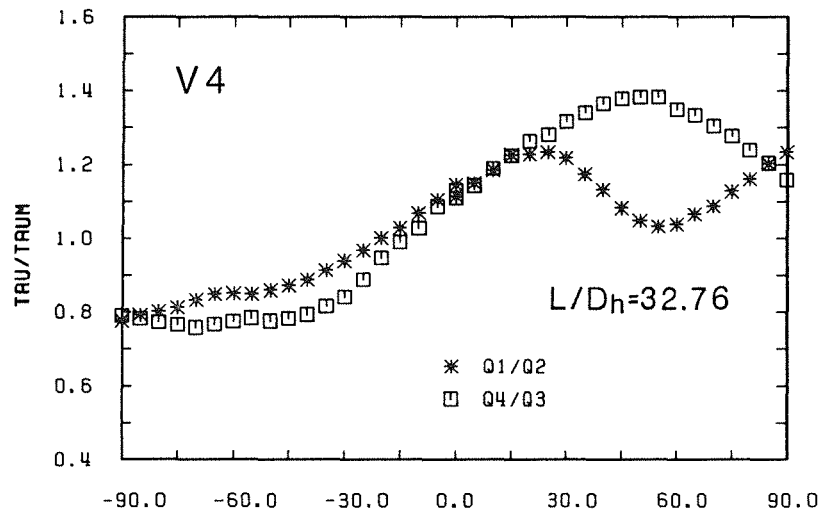


Abb. 9 Wandschubspannungsverteilungen bezogen auf den Mittelwert aus allen vier Quadranten (r/ϕ)

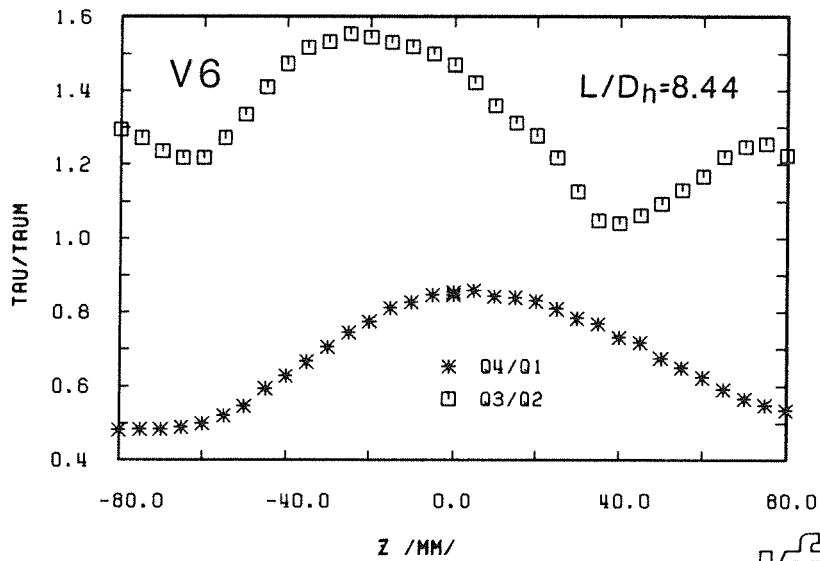
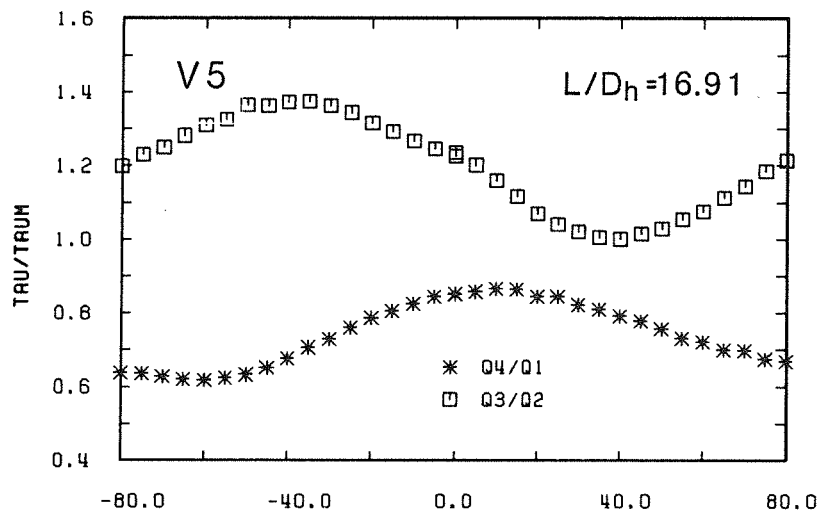
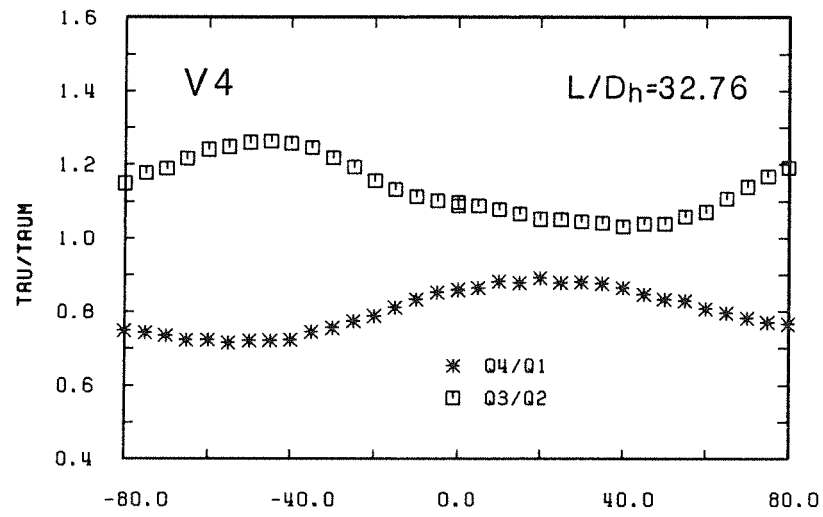


Abb.10 Wandschubspannungsverteilungen bezogen auf den Mittelwert aus allen vier Quadranten (x/y)

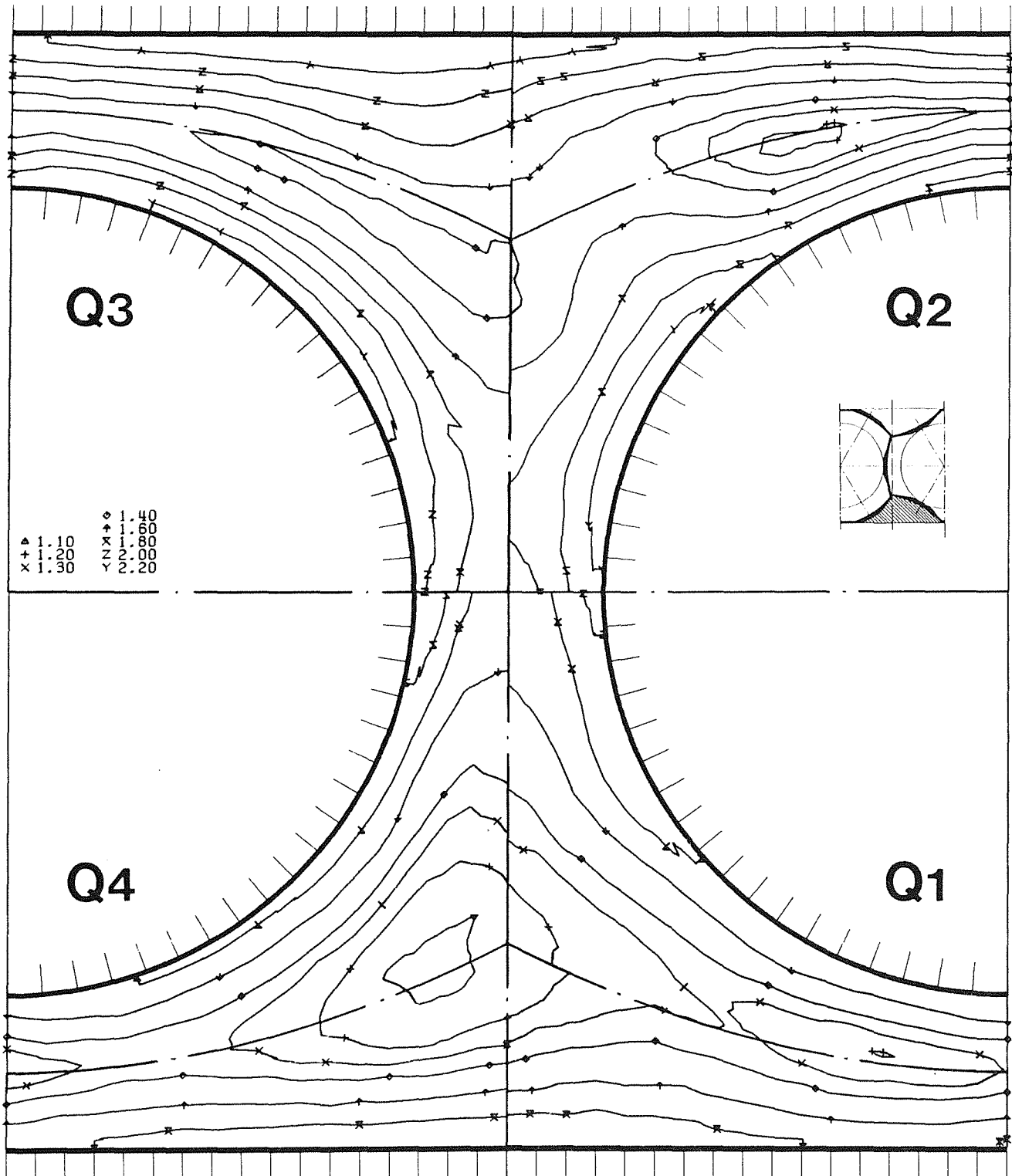


Abb.11 Axiale Turbulenzintensität bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 32.76$

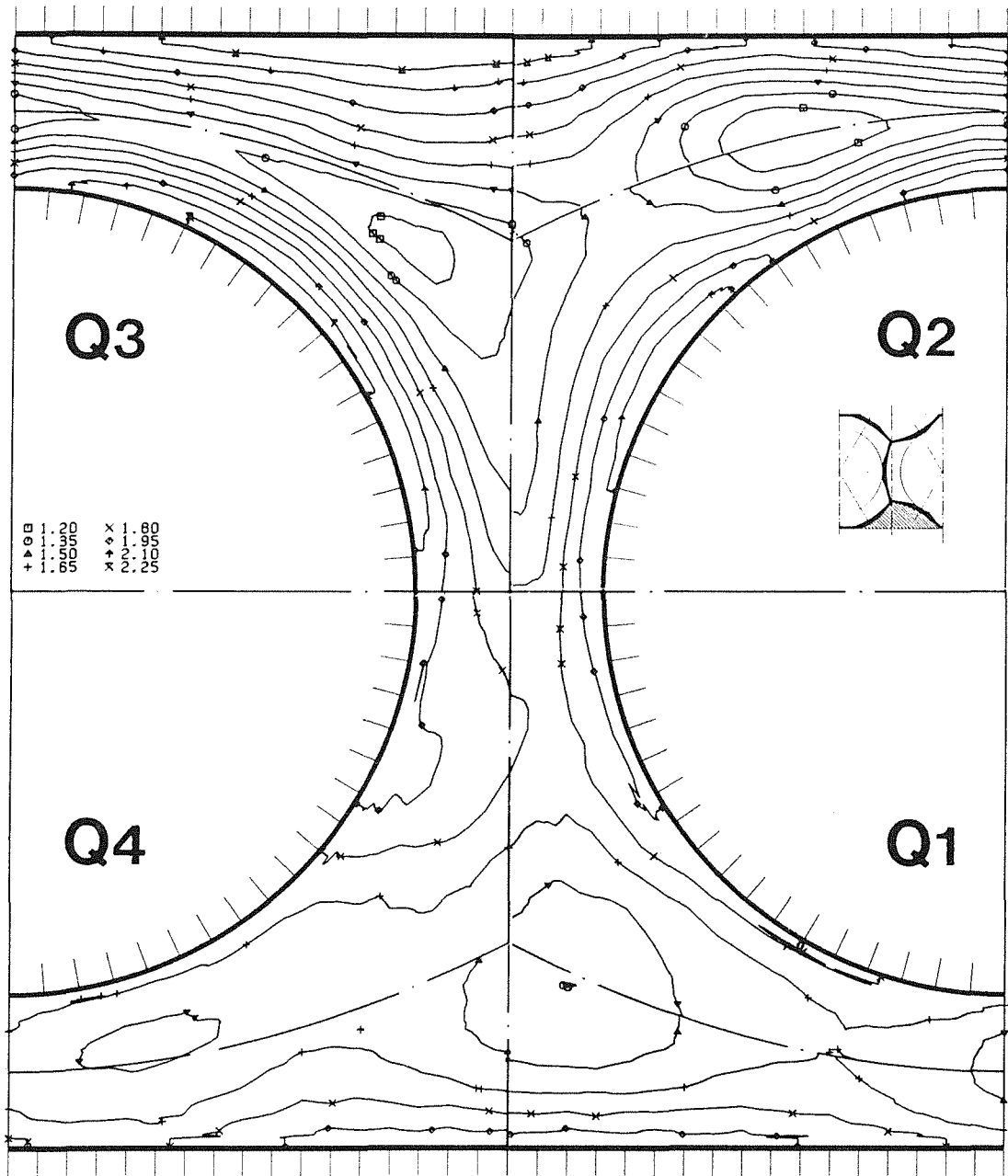


Abb.12 Axiale Turbulenzintensität bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 16.91$

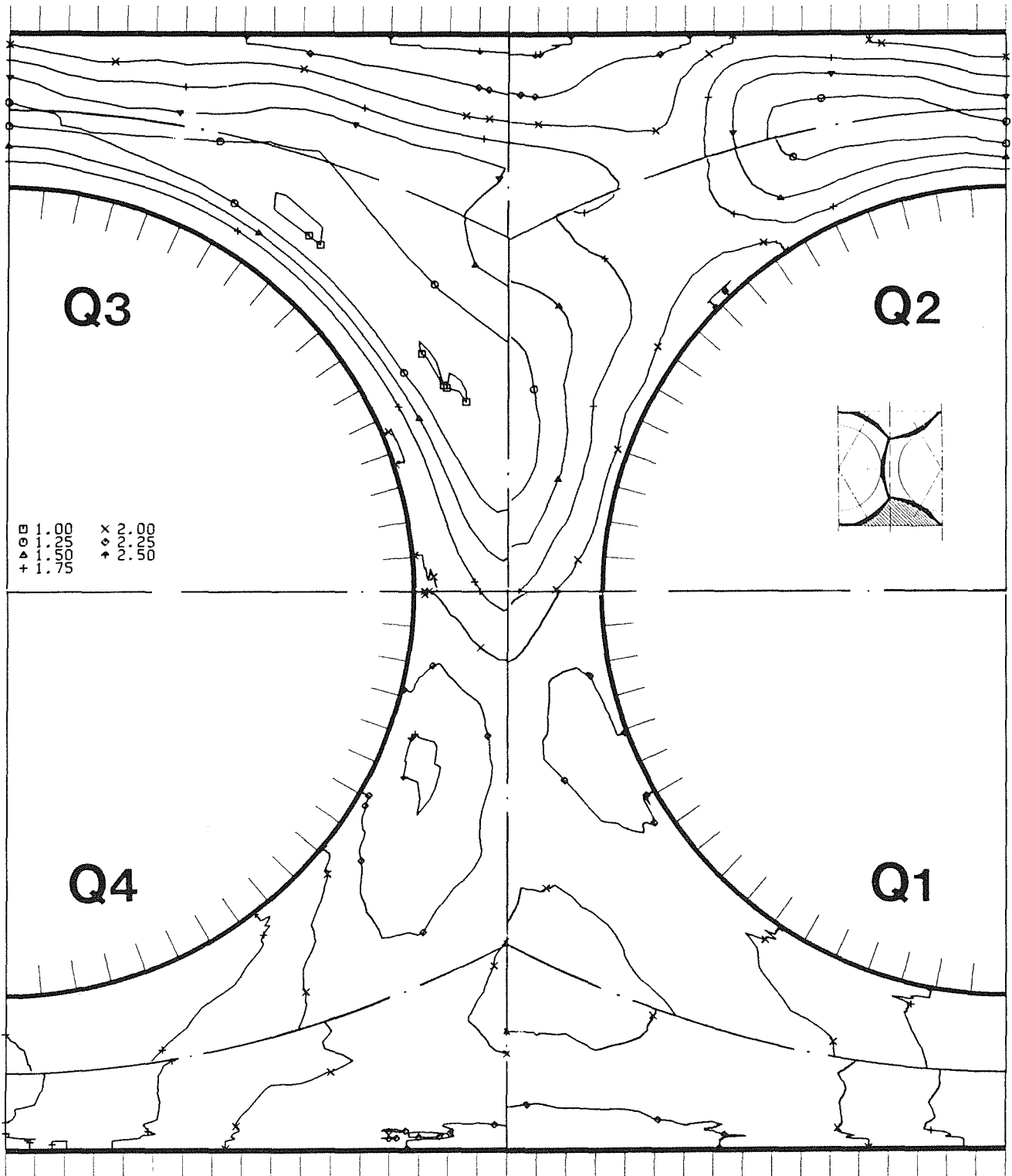
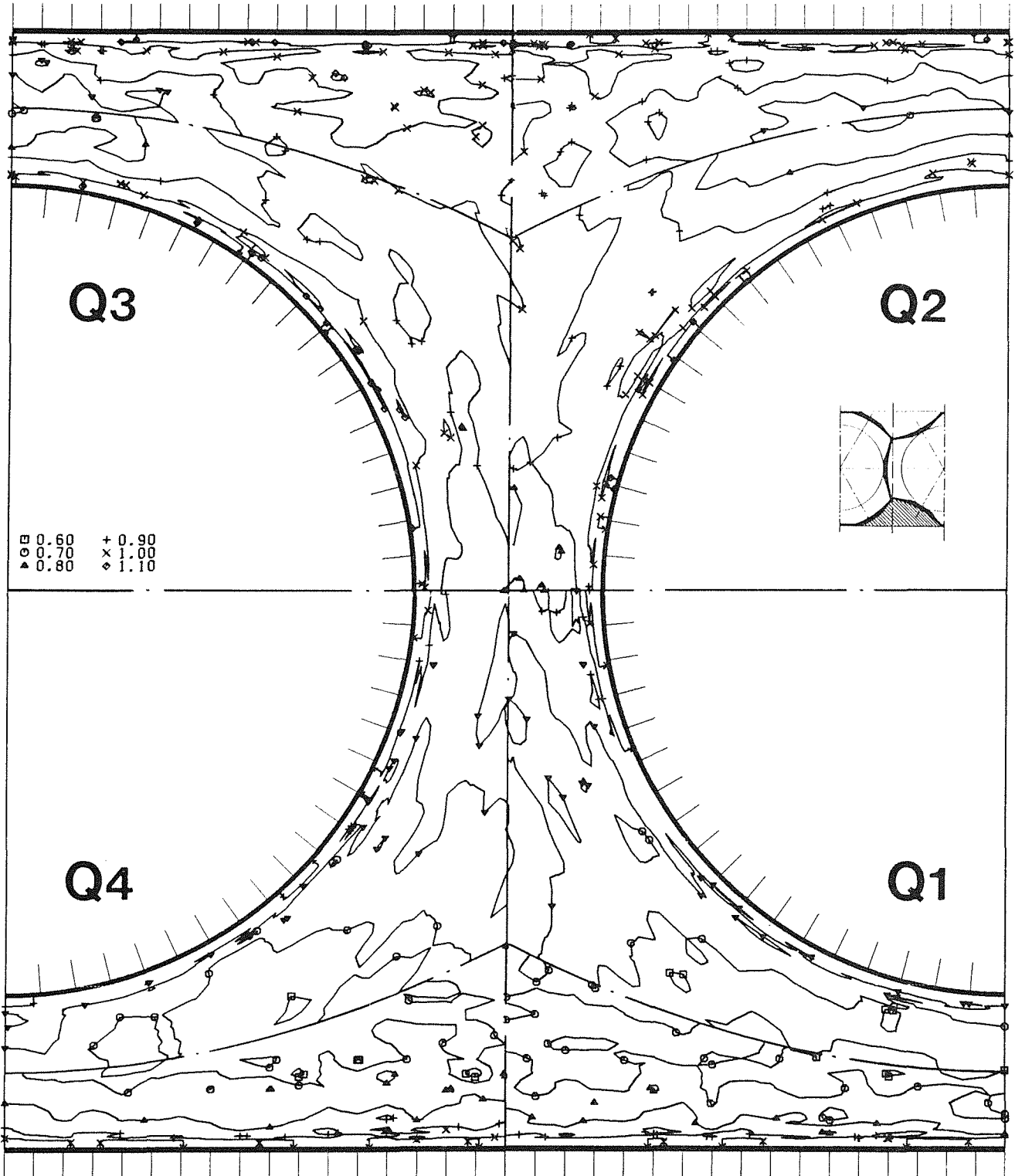


Abb.13 Axiale Turbulenzintensität bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 8.44$



kfk

Abb.14 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 32.76$

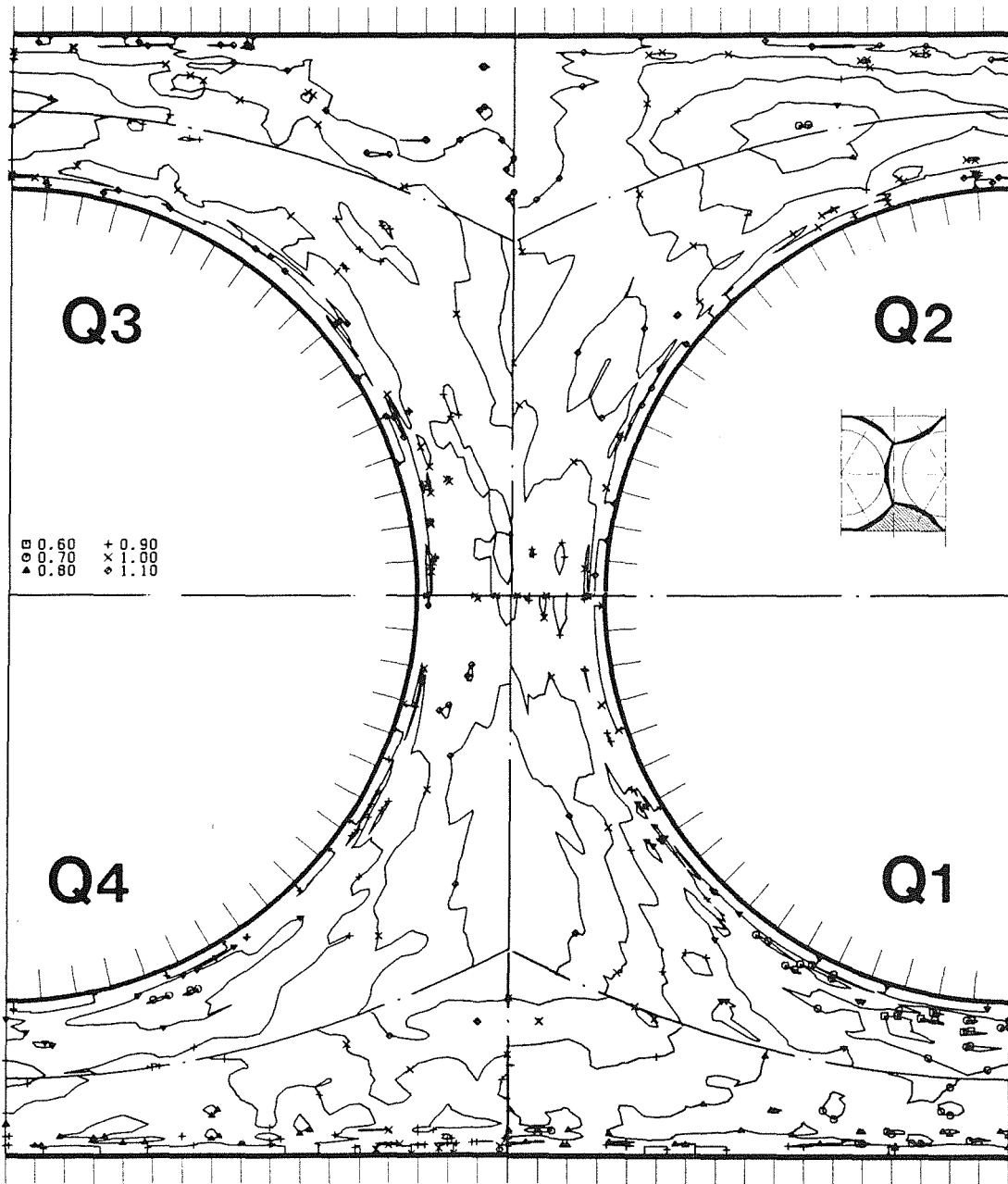


Abb.15 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 16.91$

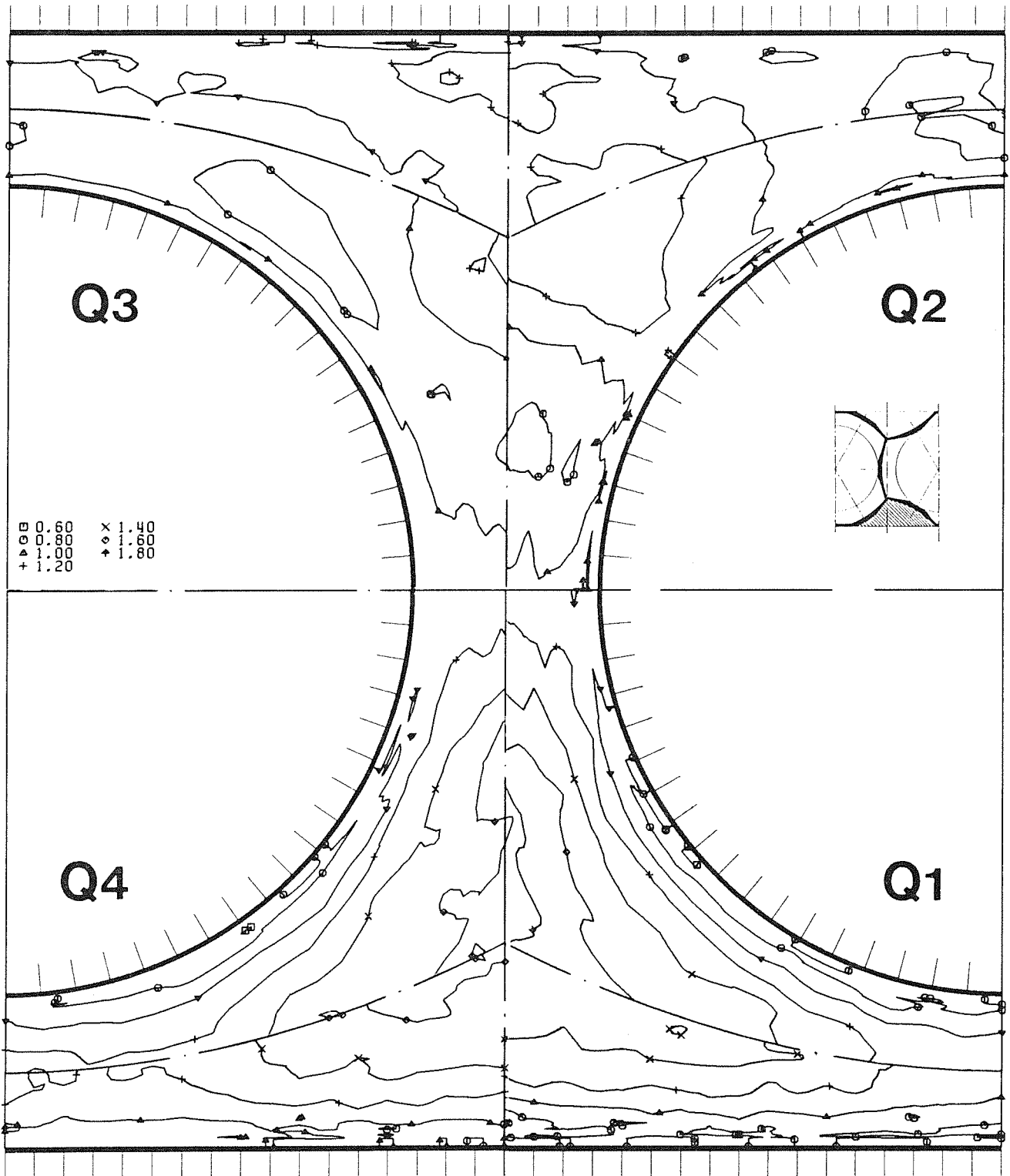


Abb.16 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 8.44$

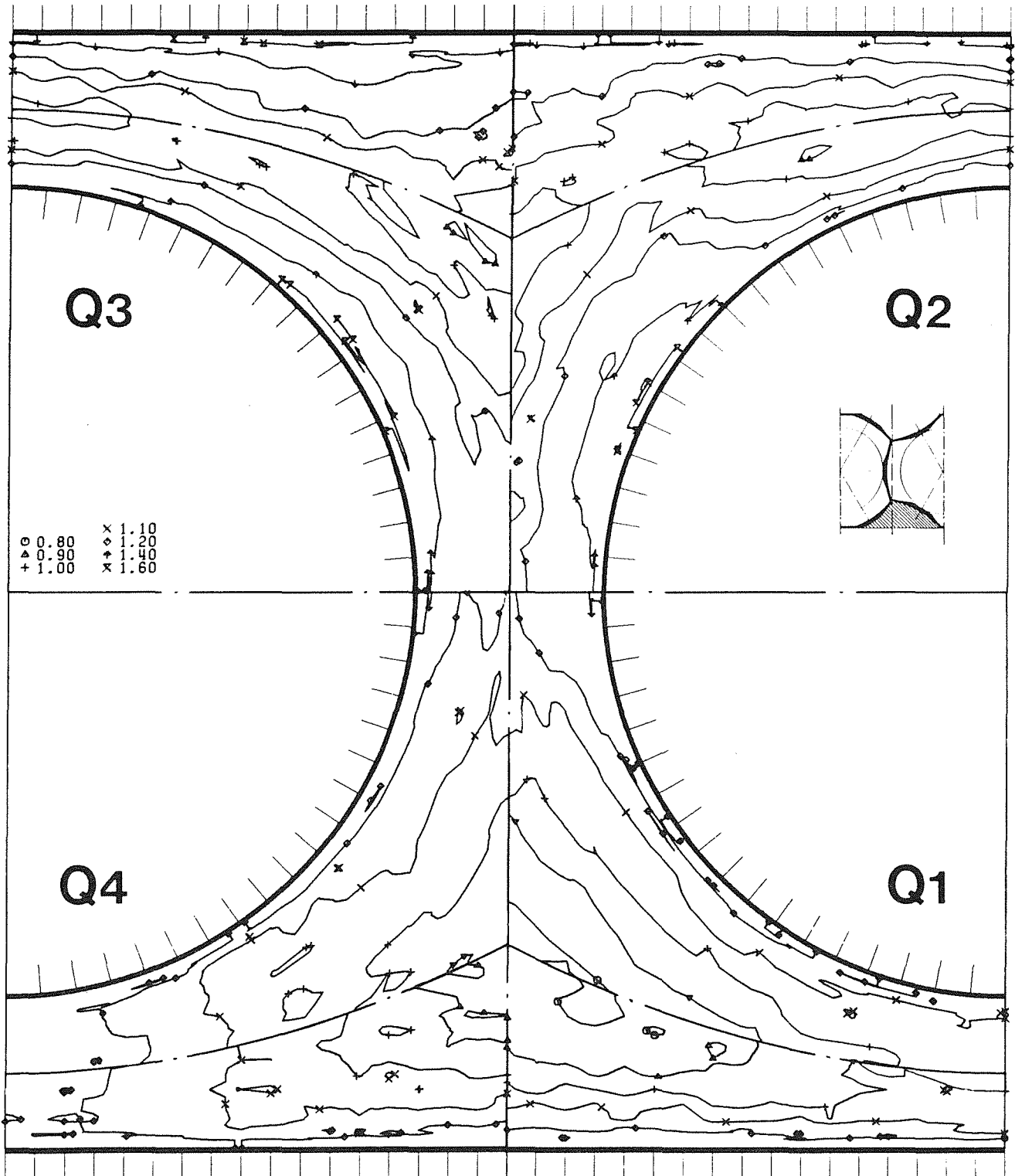


Abb.17 Turbulenzintensität parallel zur Wand bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 32.76$

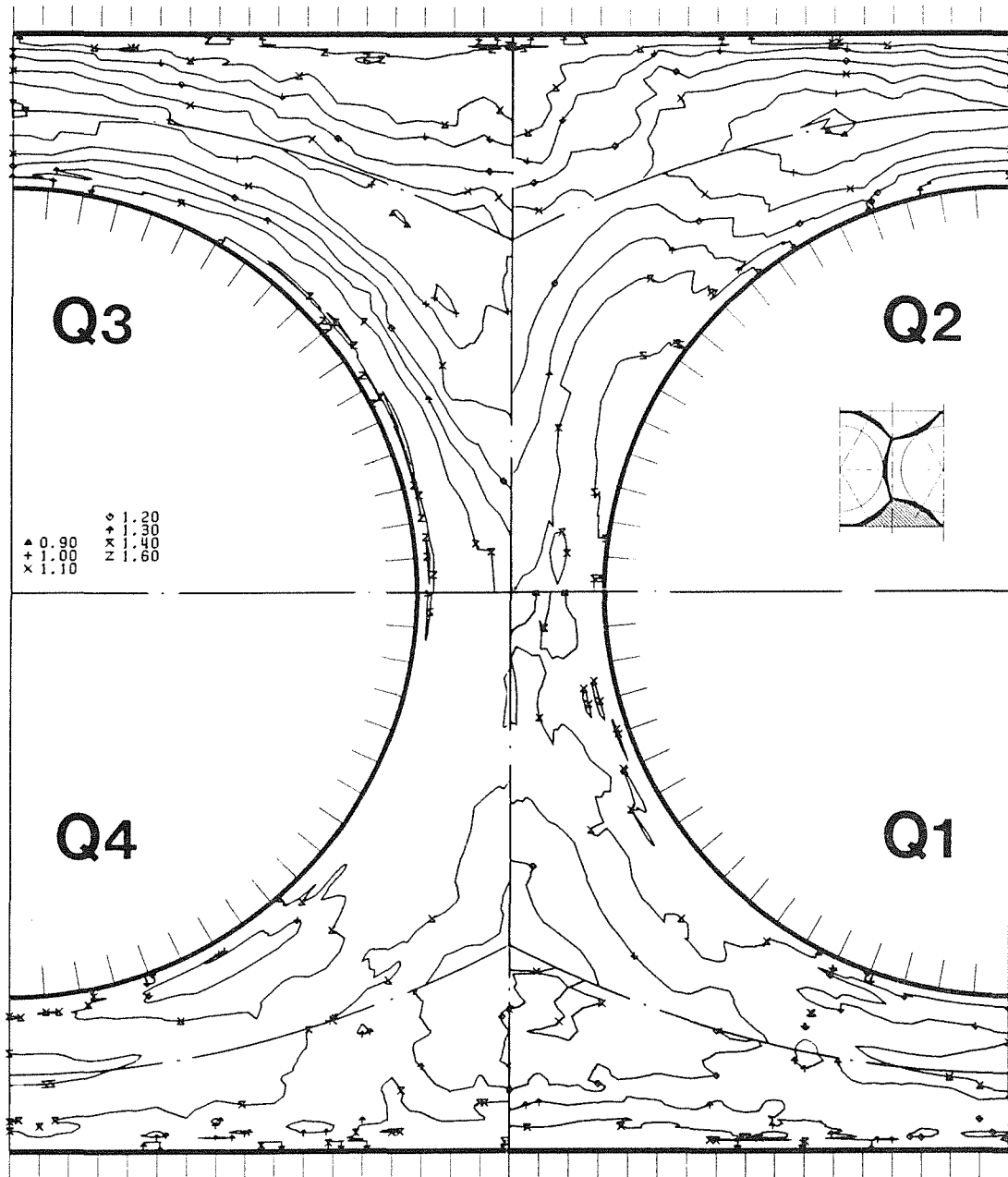
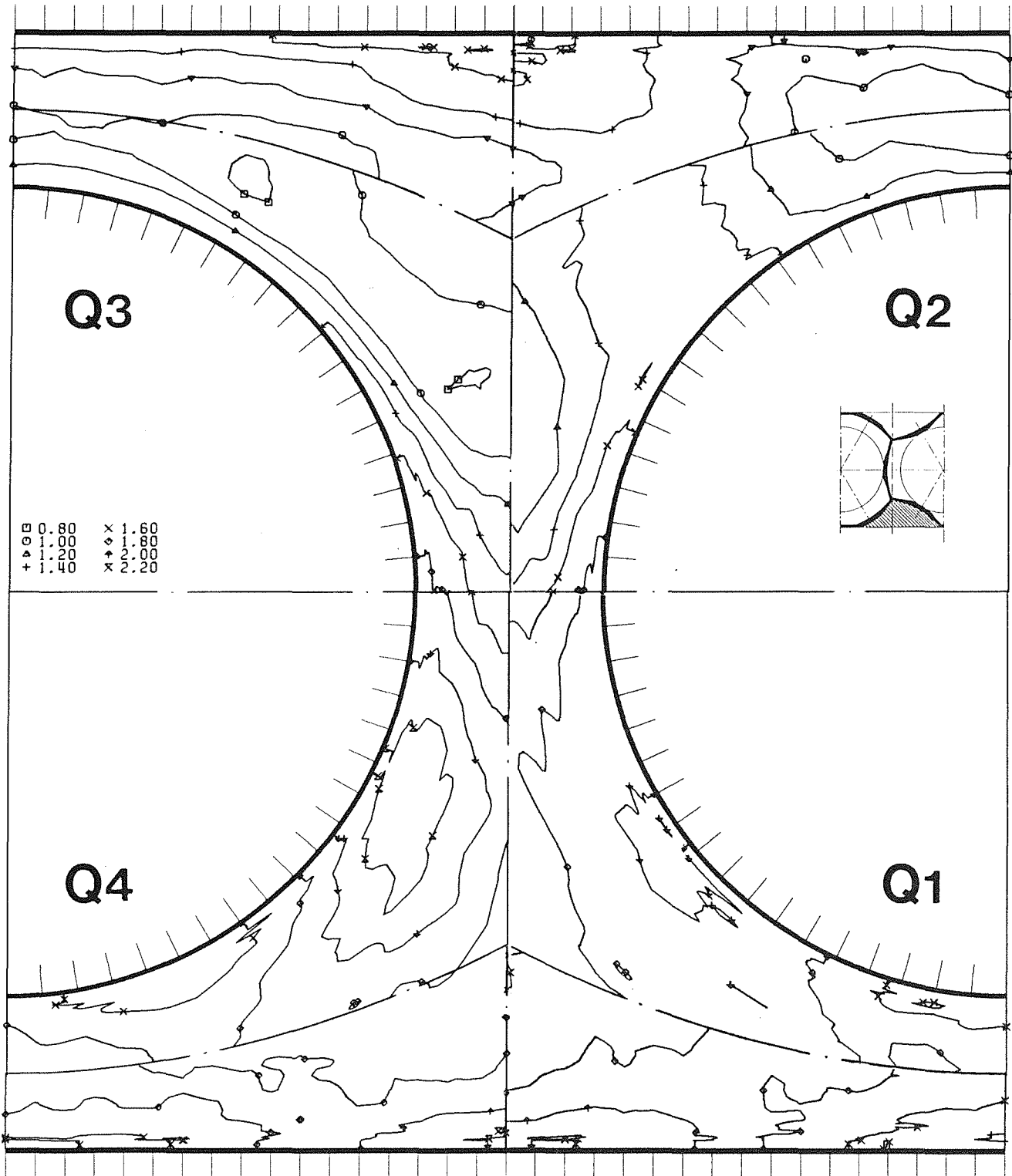


Abb.18 Turbulenzintensität parallel zur Wand bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 16.91$



KfK

Abb.19 Turbulenzintensität parallel zur Wand bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 8.44$

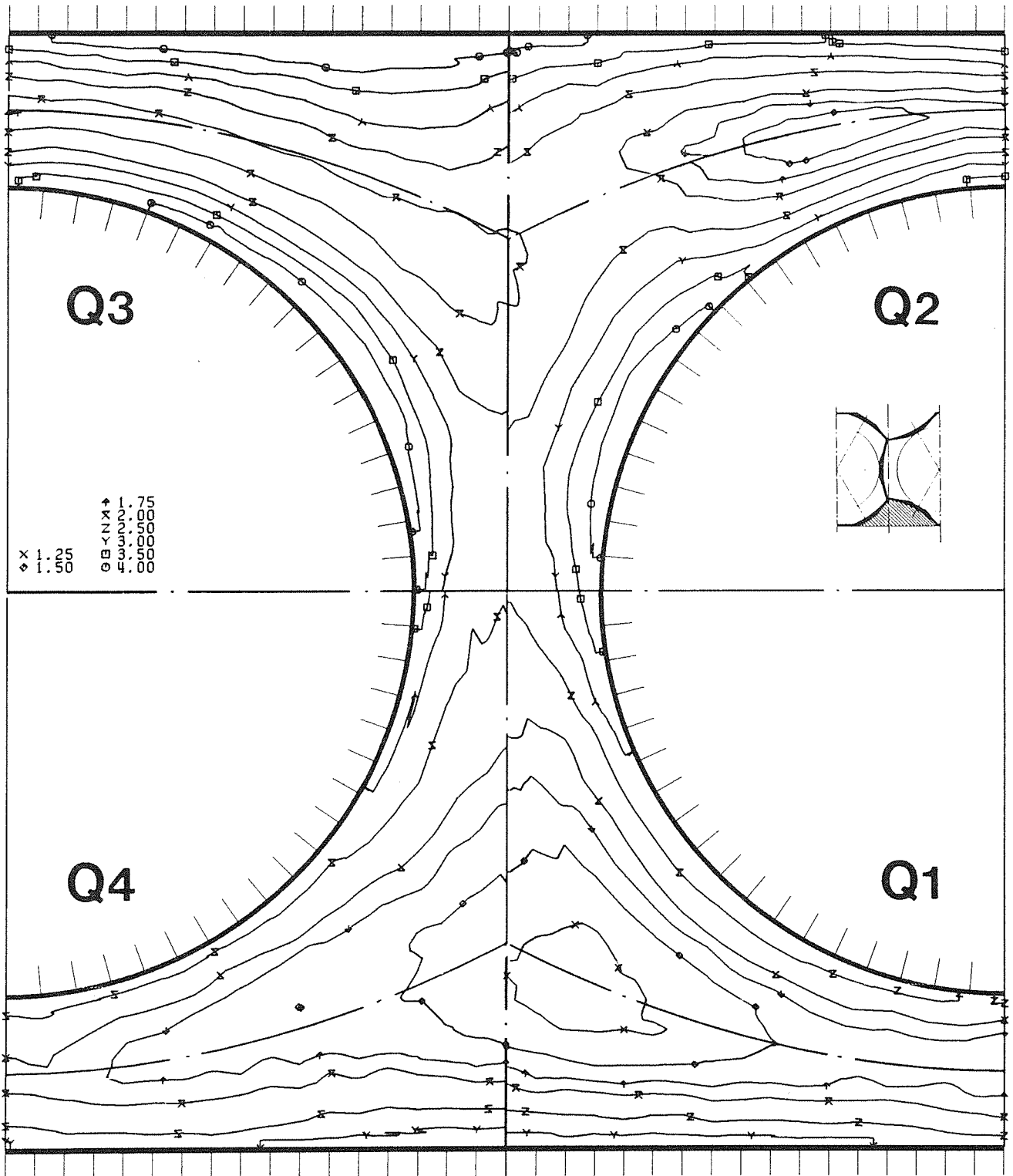


Abb.20 Kinetische Energie der Turbulenz bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 32.76$

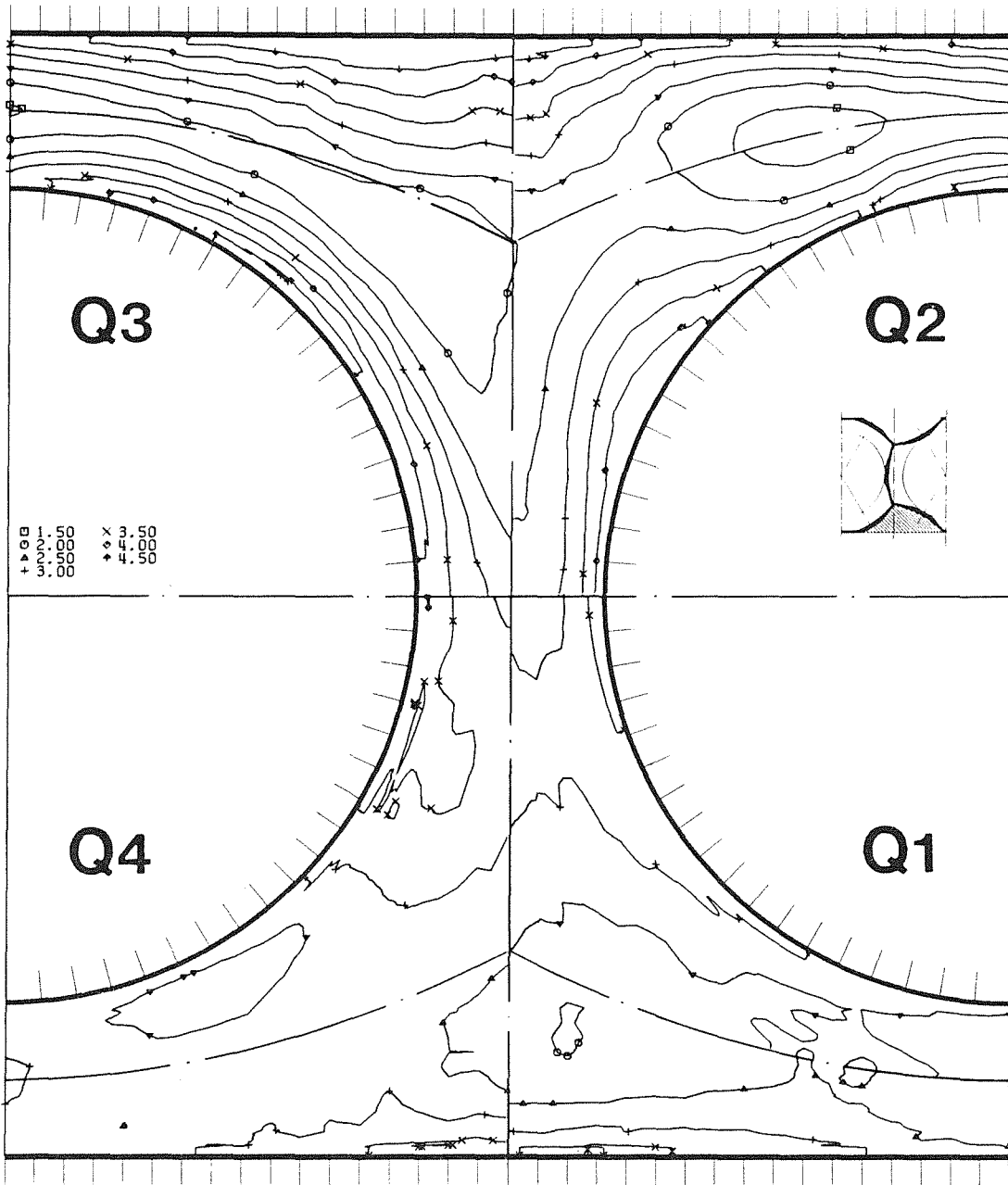


Abb.21 Kinetische Energie der Turbulenz bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 16.91$

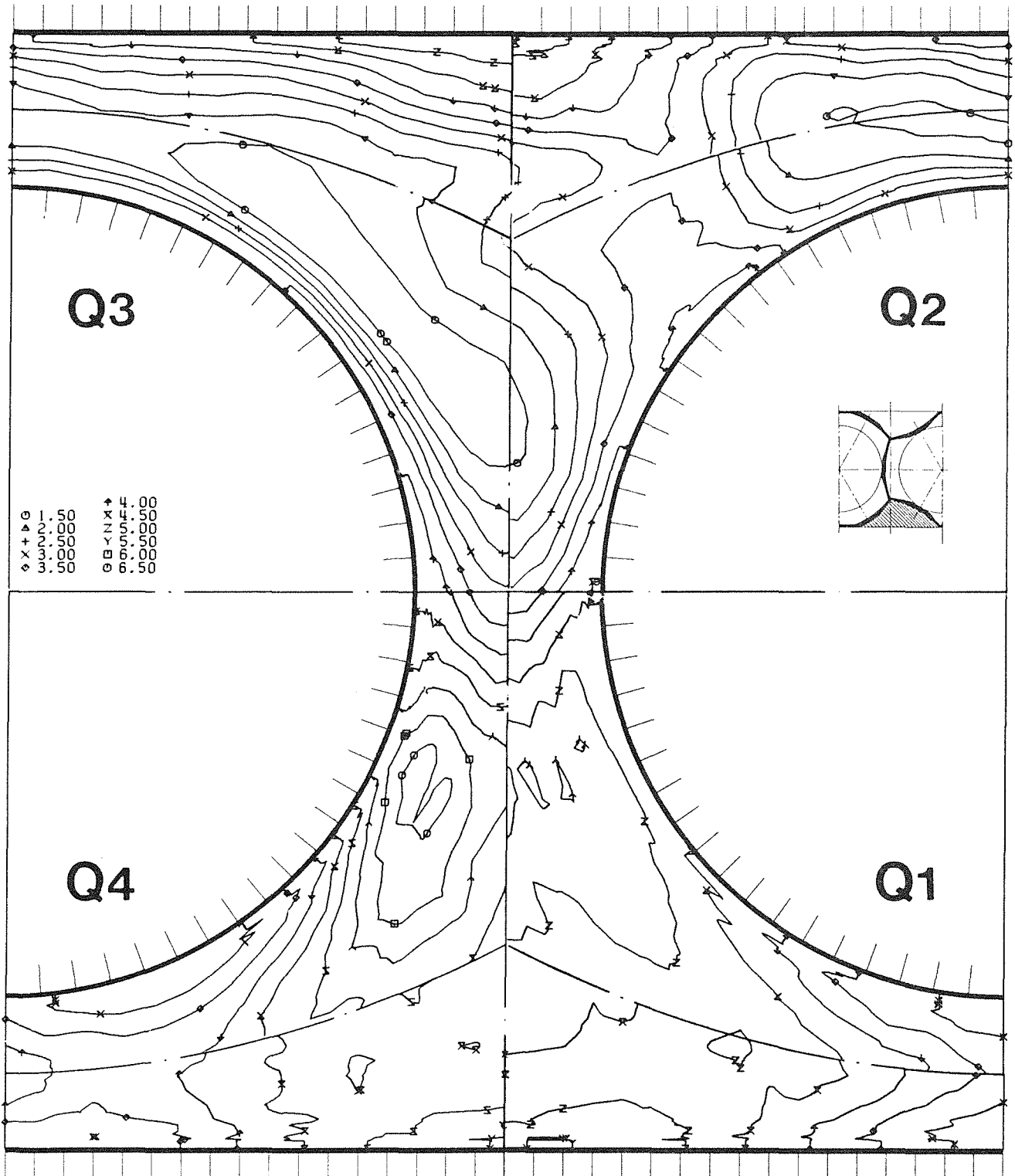


Abb.22 Kinetische Energie der Turbulenz bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 8.44$

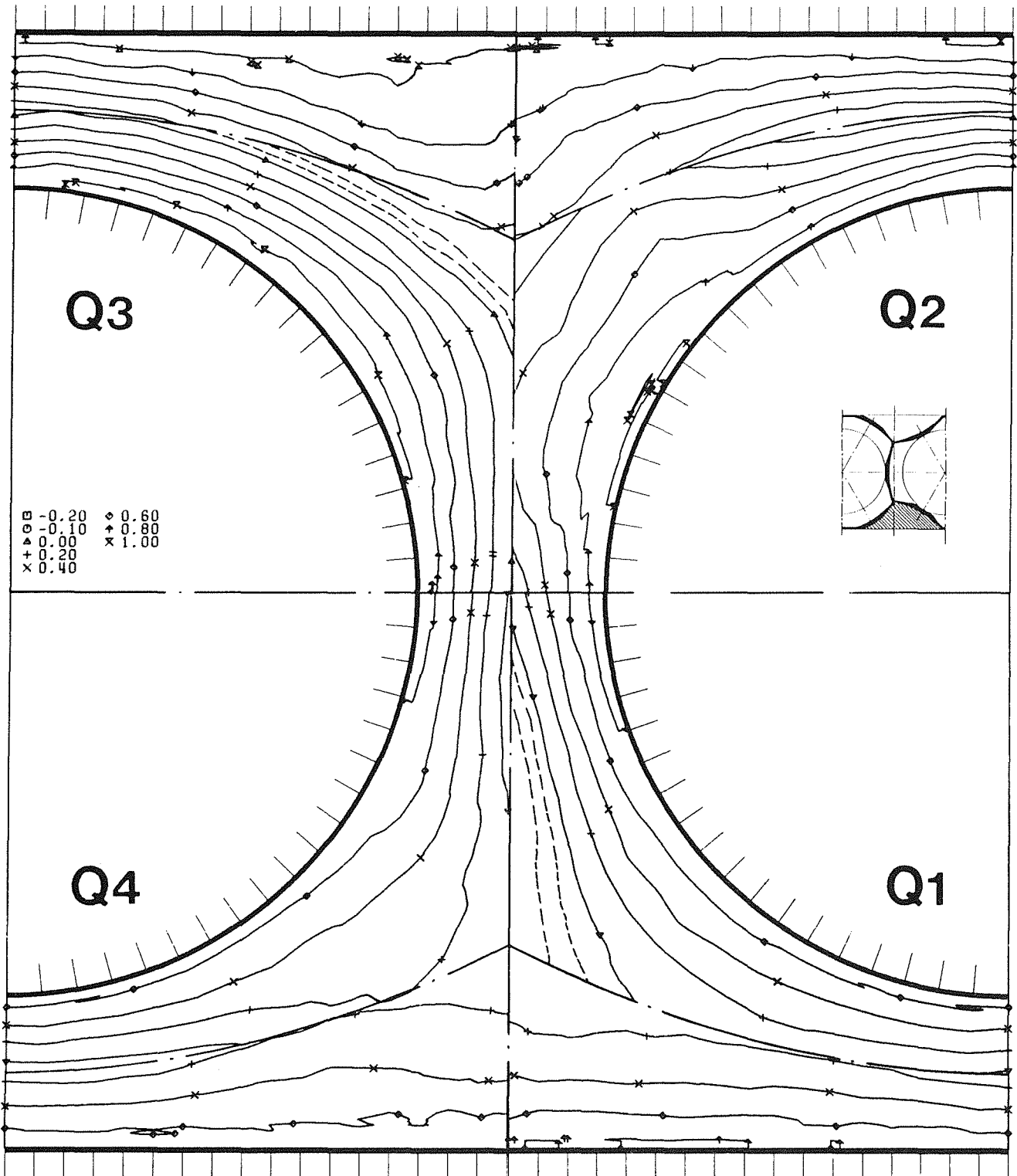


Abb.23 Schubspannung senkrecht zur Wand bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 32.76$

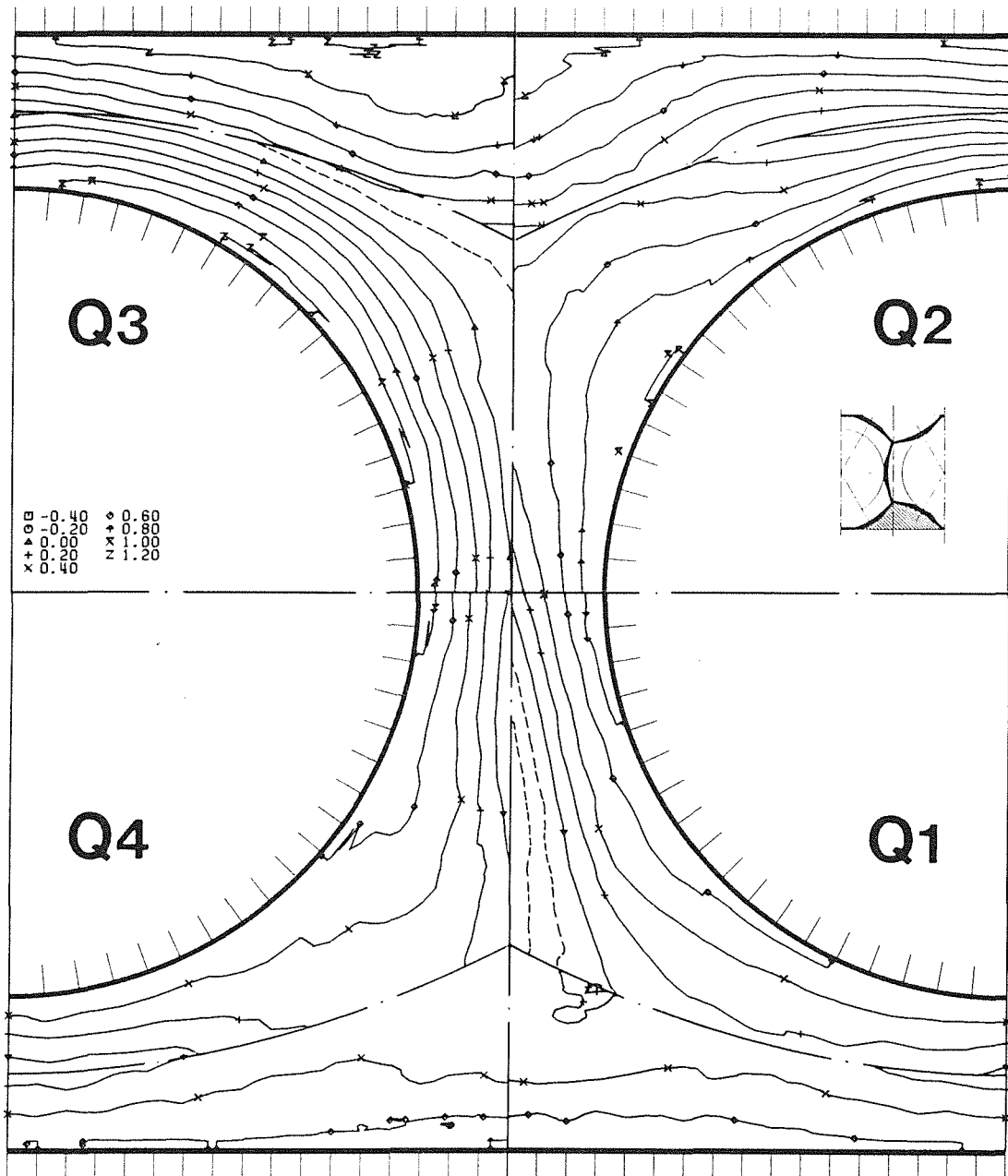
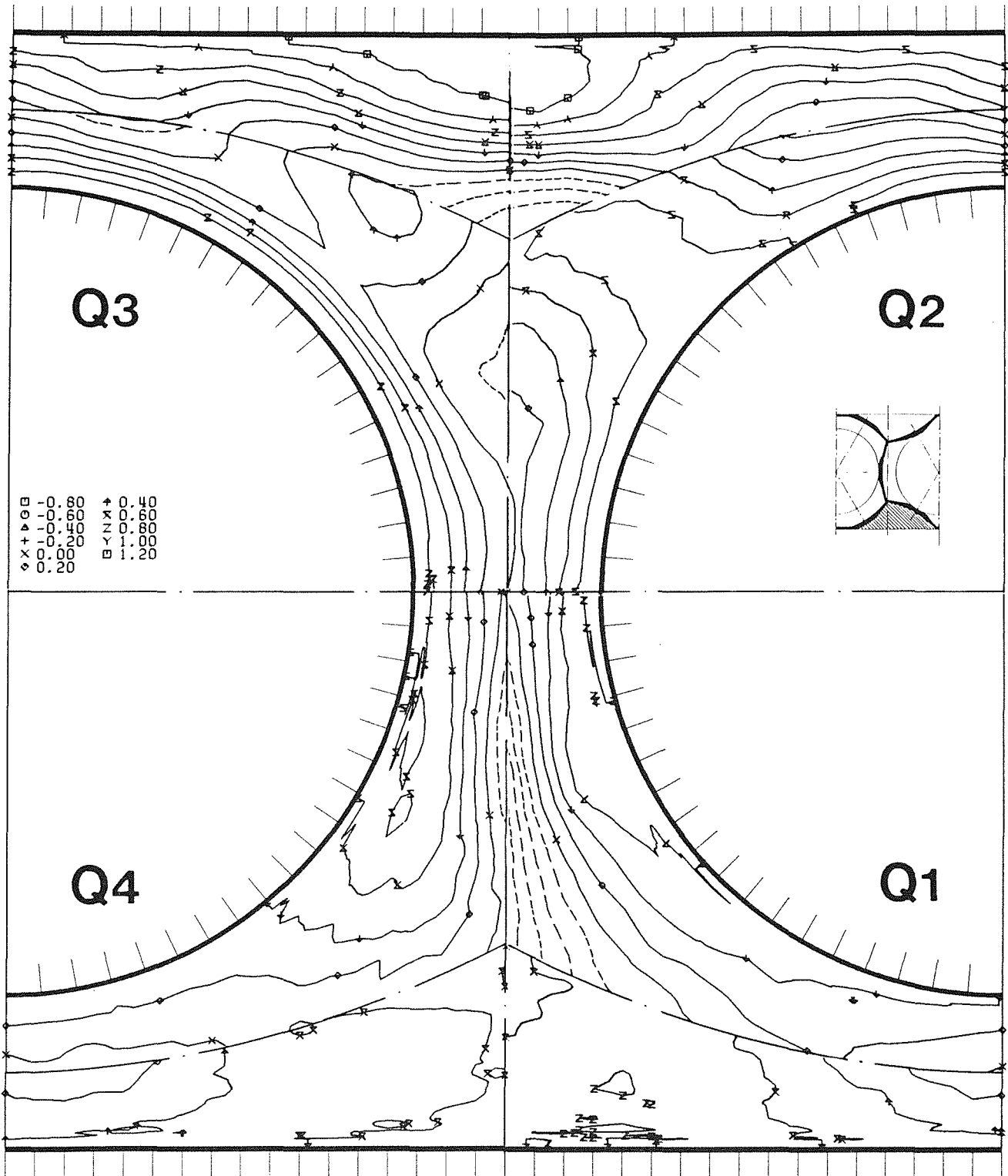
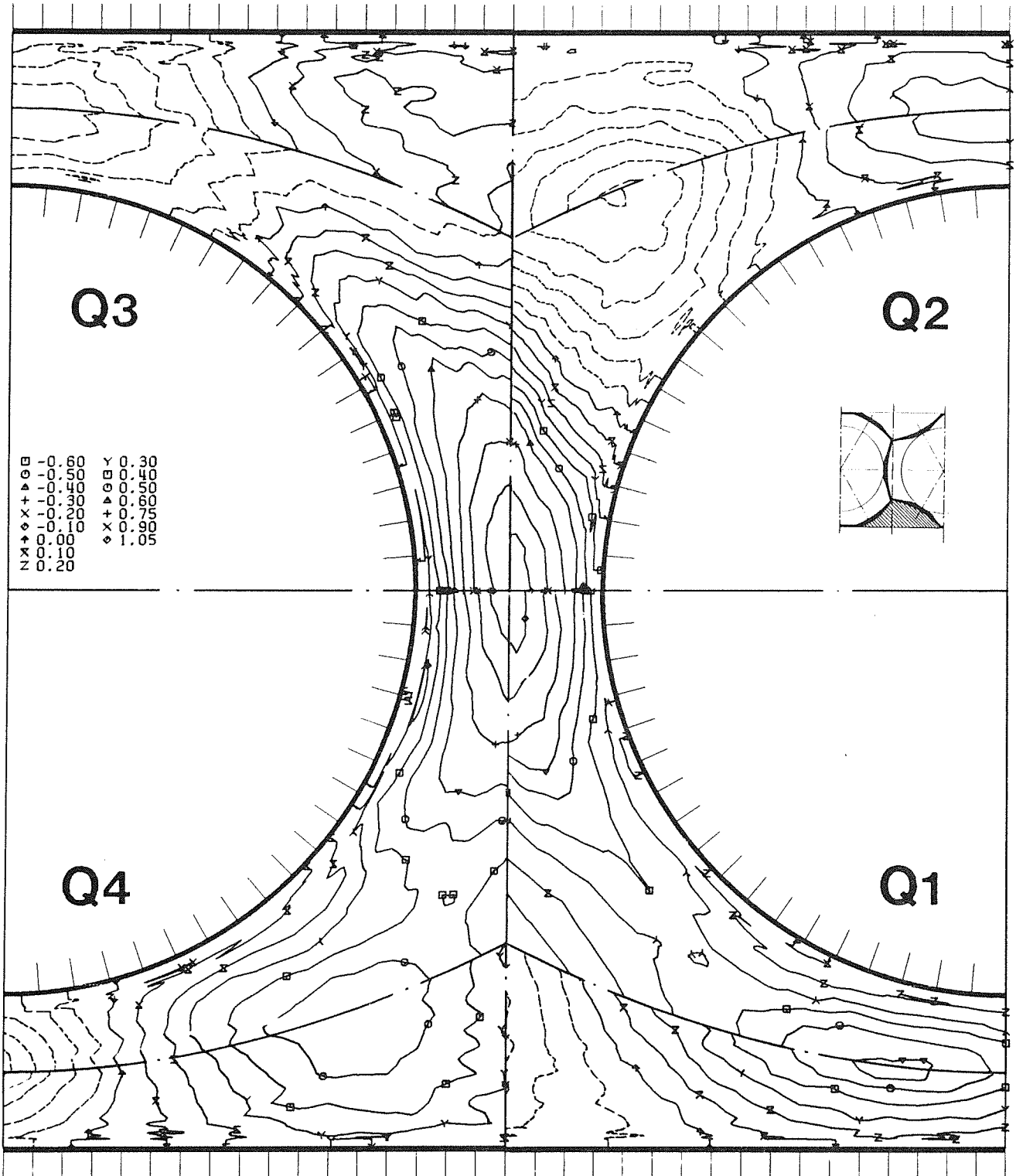


Abb.24 Schubspannung senkrecht zur Wand bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für $L/D_n = 16.91$



KfK

Abb.25 Schubspannung senkrecht zur Wand bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für $L/D_n = 8.44$



kfk

Abb.26 Schubspannung parallel zur Wand bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 32.76$

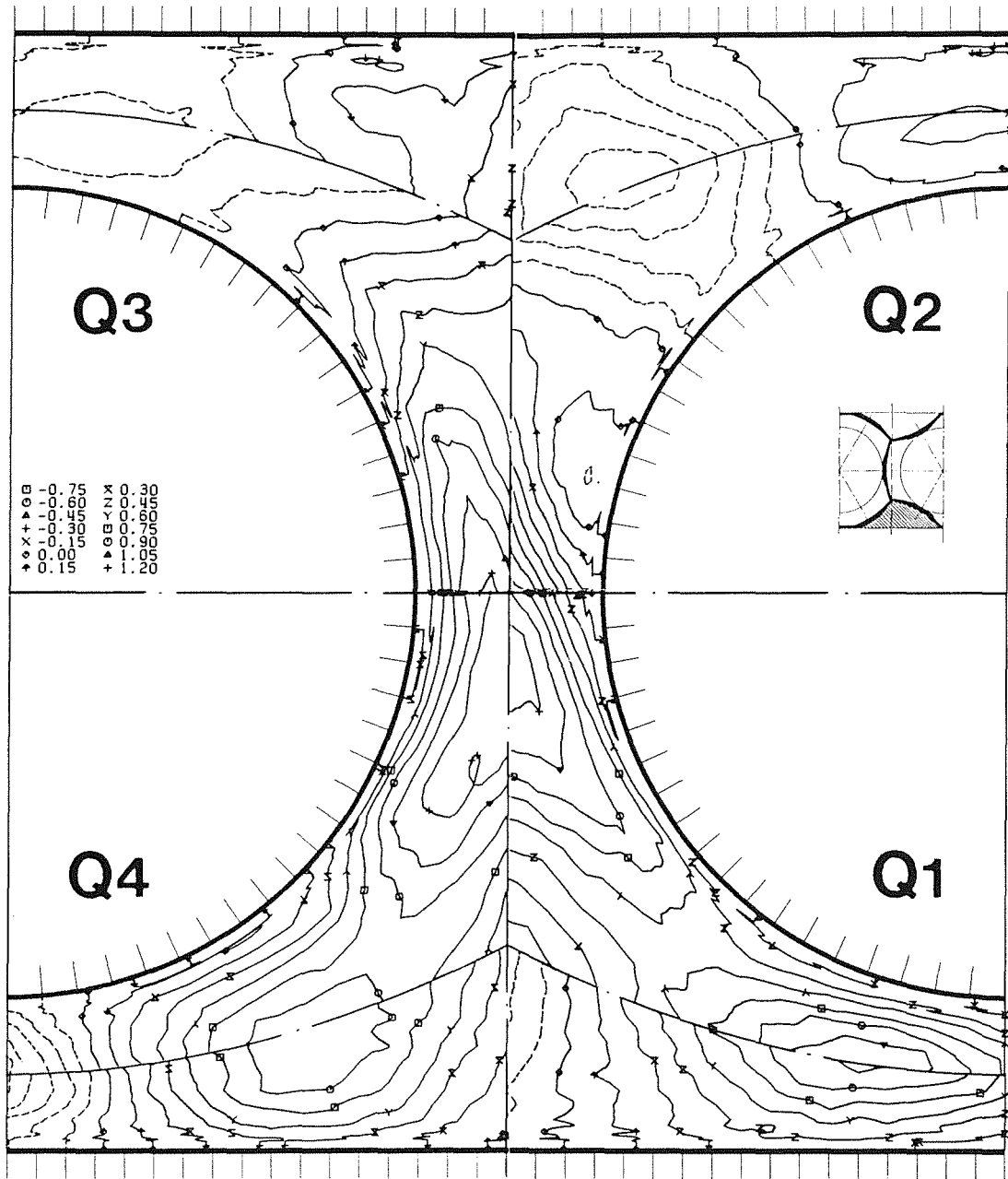
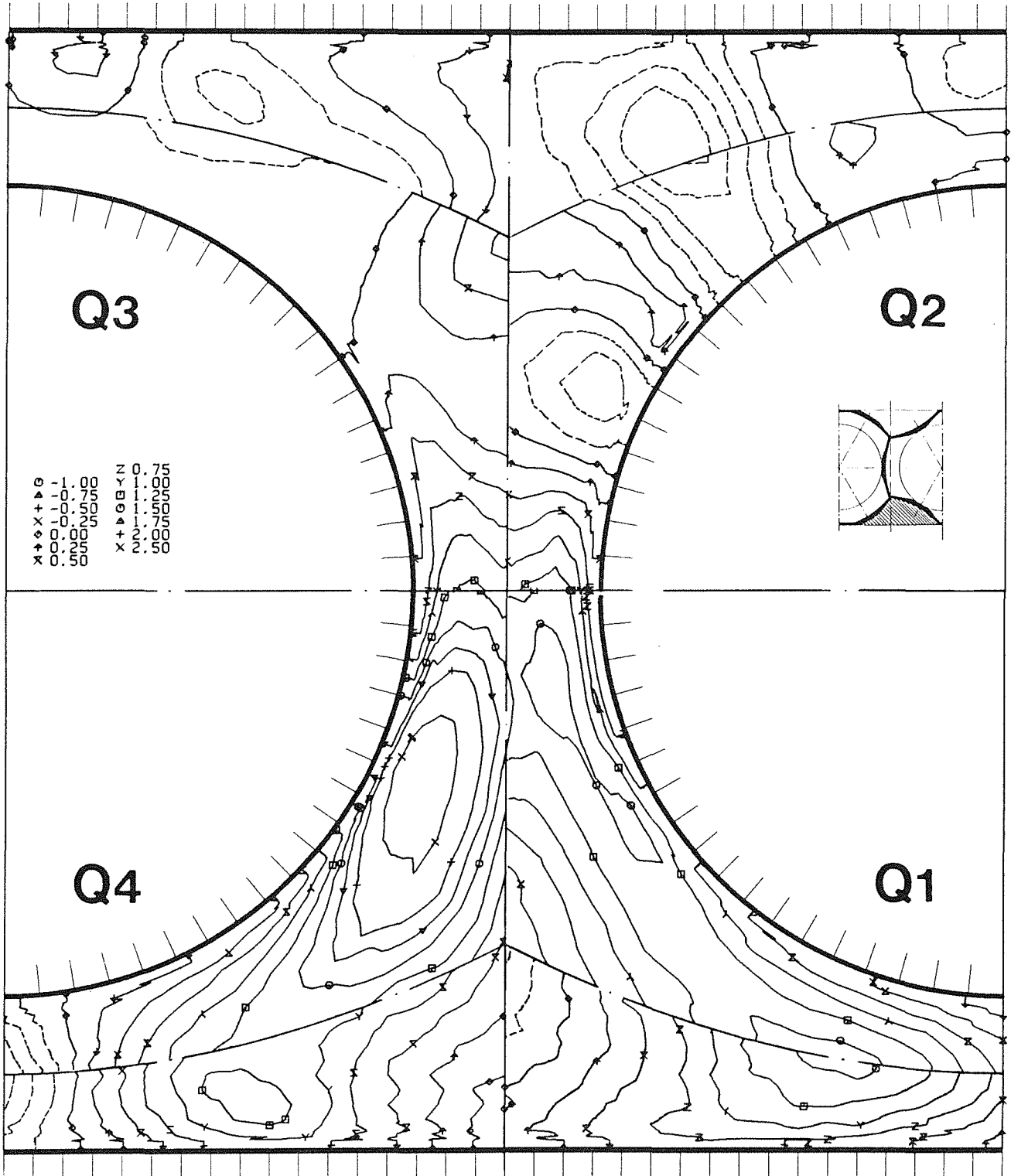


Abb.27 Schubspannung parallel zur Wand bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 16.91$



kfk

Abb.28 Schubspannung parallel zur Wand bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit für $L/D_h = 8.44$

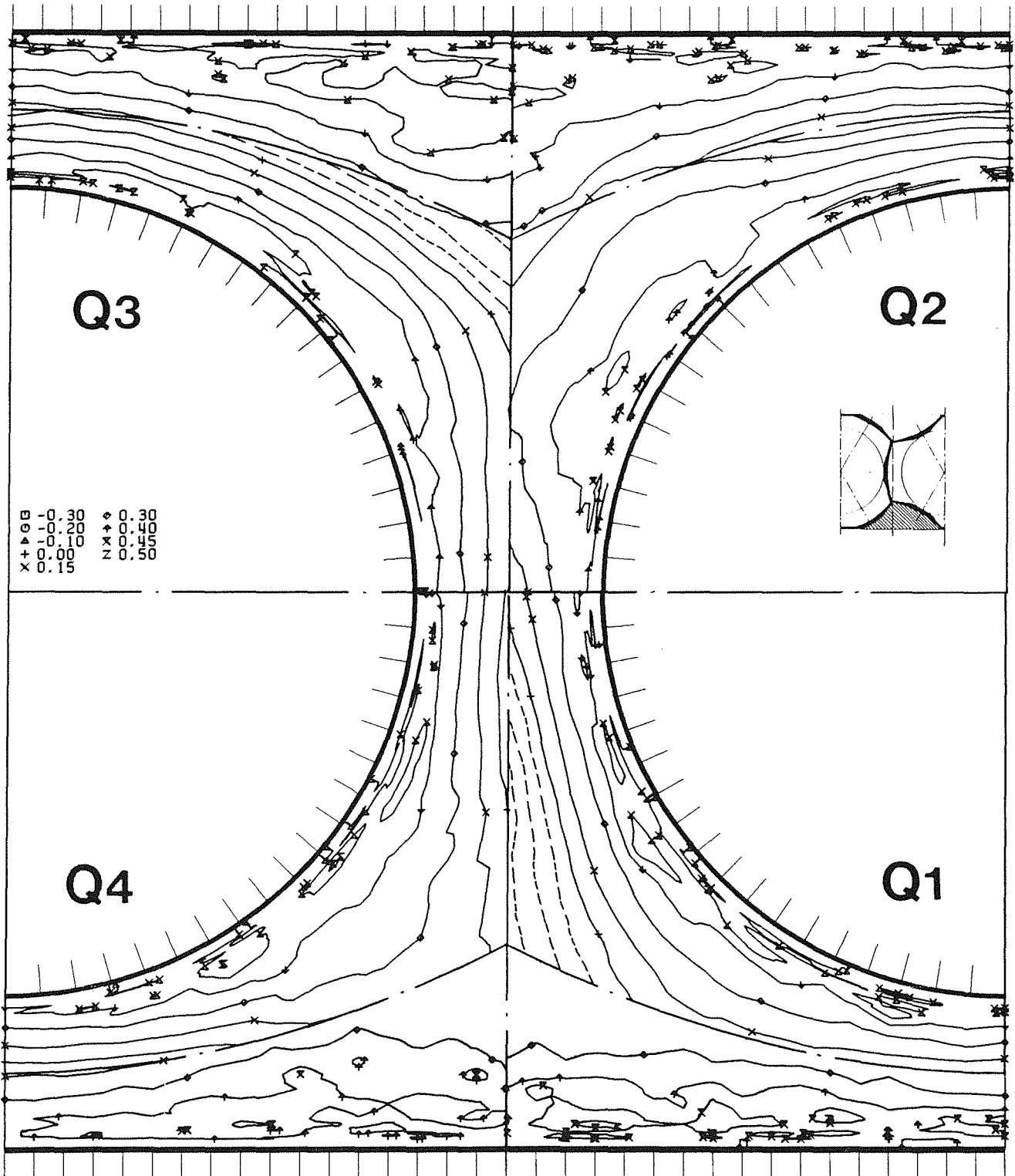


Abb.29 Korrelationskoeffizient der Schubspannung senkrecht zur Wand für $L/D_h = 32.76$

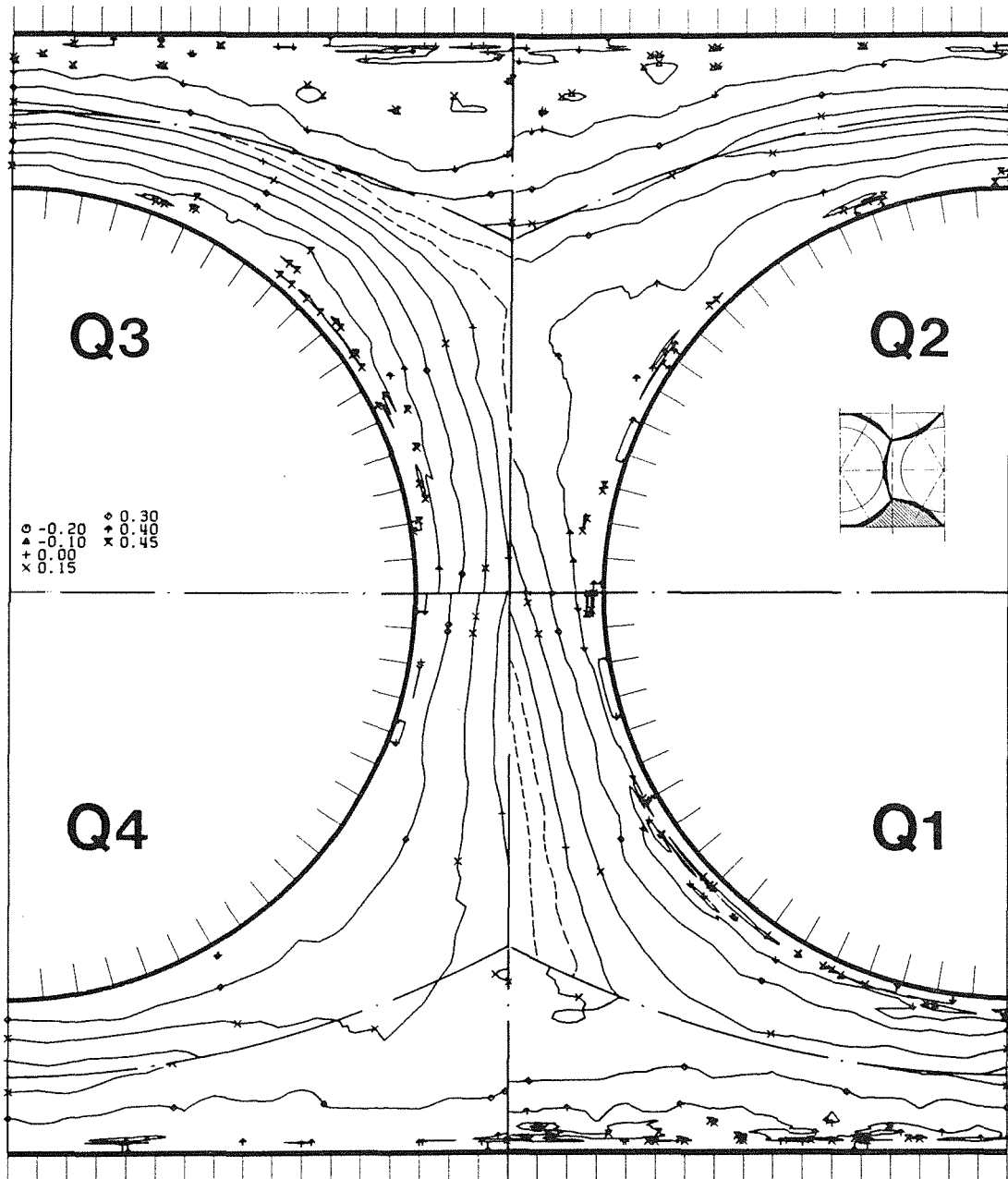
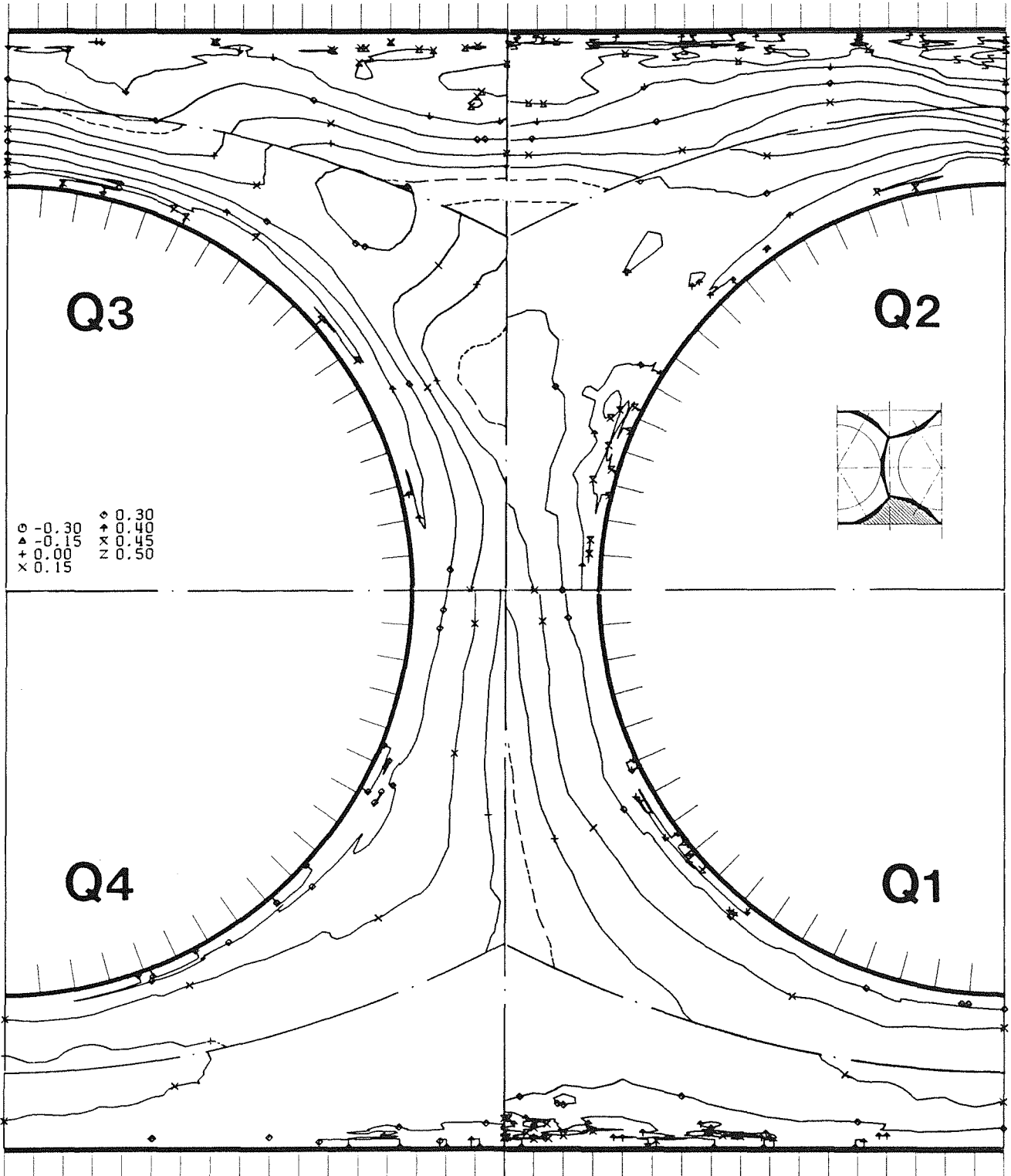


Abb.30 Korrelationskoeffizient der Schubspannung senkrecht zur Wand für $L/D_h = 16.91$



KfK

Abb.31 Korrelationskoeffizient der Schubspannung senkrecht zur Wand für $L/D_h = 8.44$

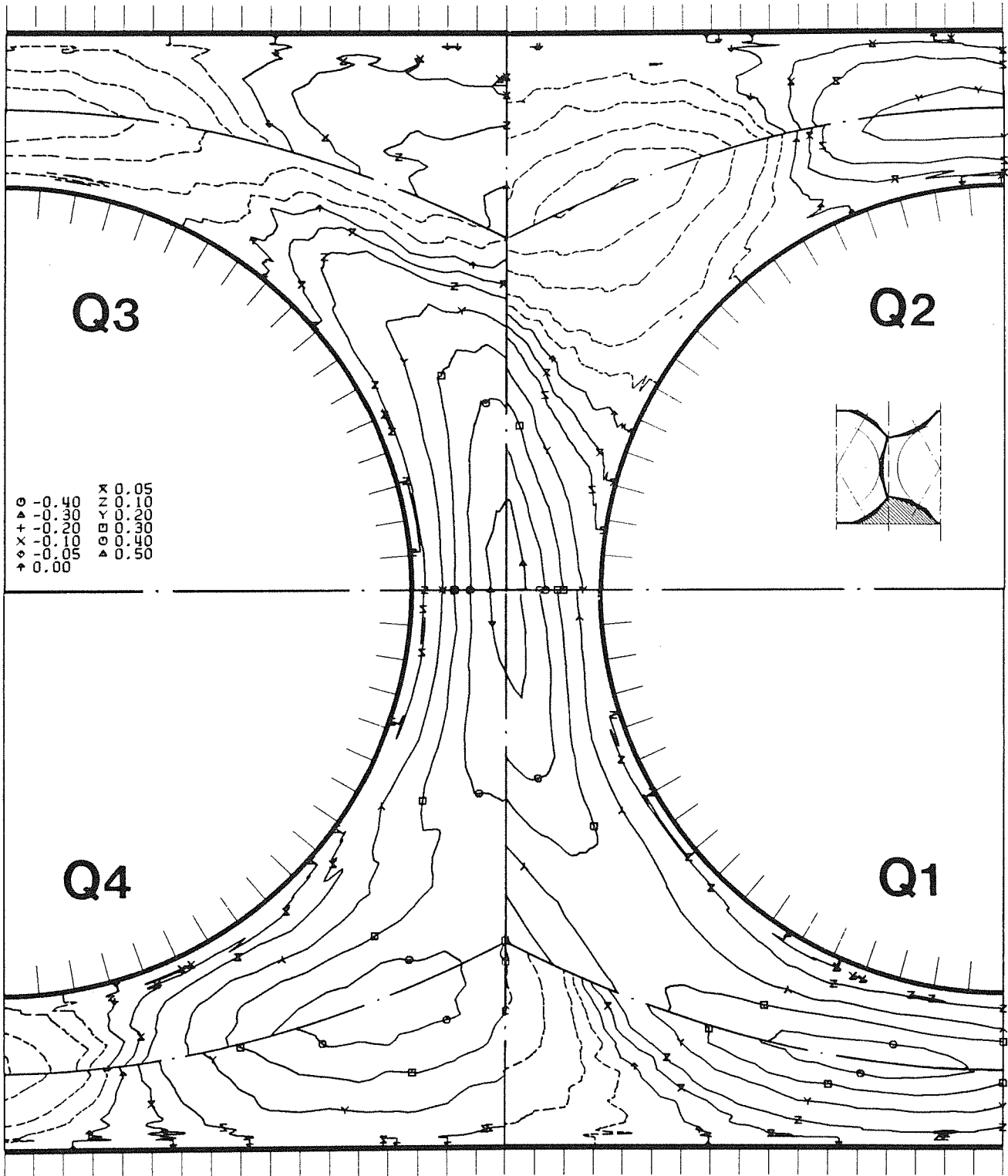


Abb.32 Korrelationskoeffizient der Schubspannung parallel zur Wand für $L/D_h = 32.76$

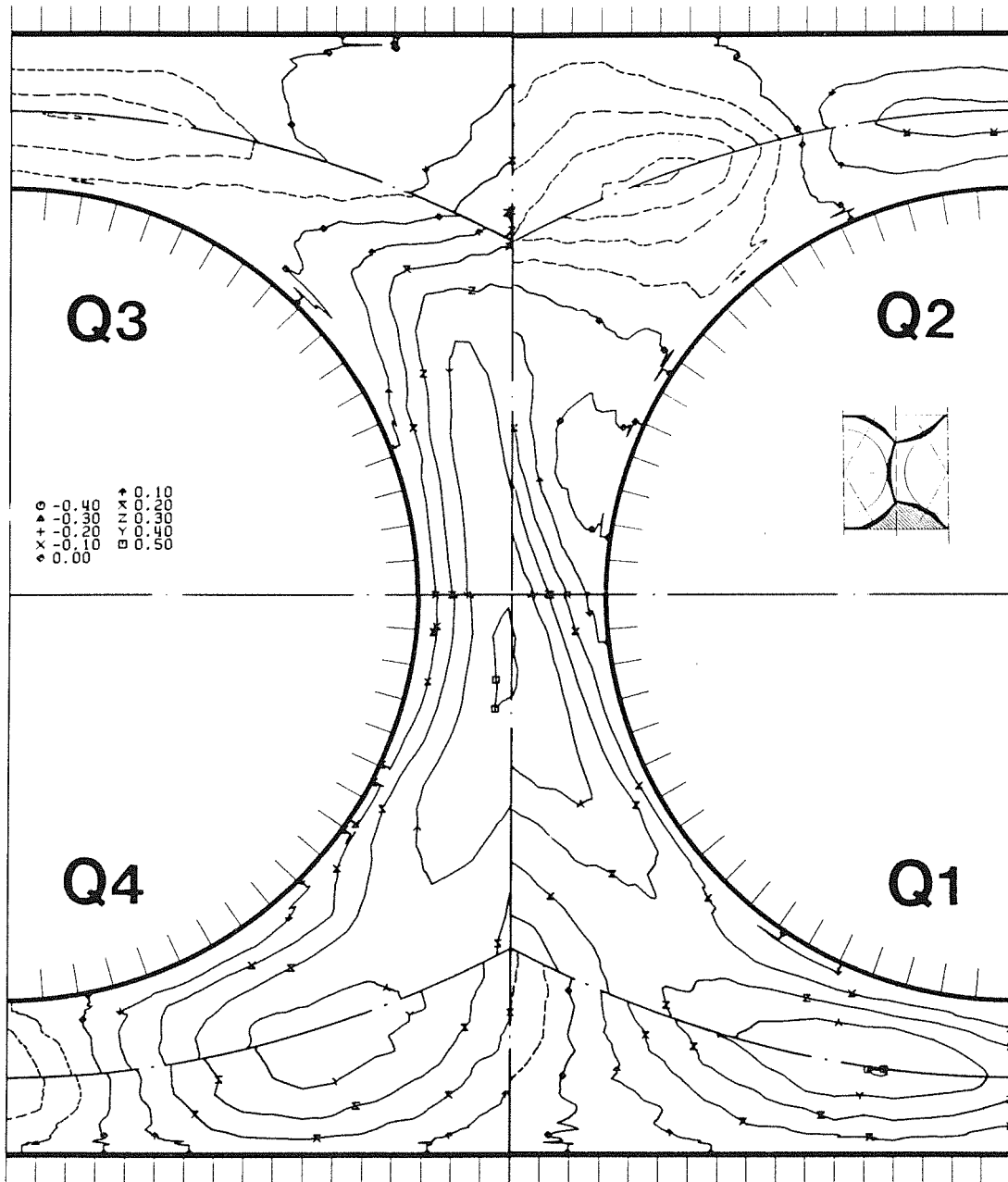


Abb.33 Korrelationskoeffizient der Schubspannung parallel zur Wand für $L/D_h = 16.91$

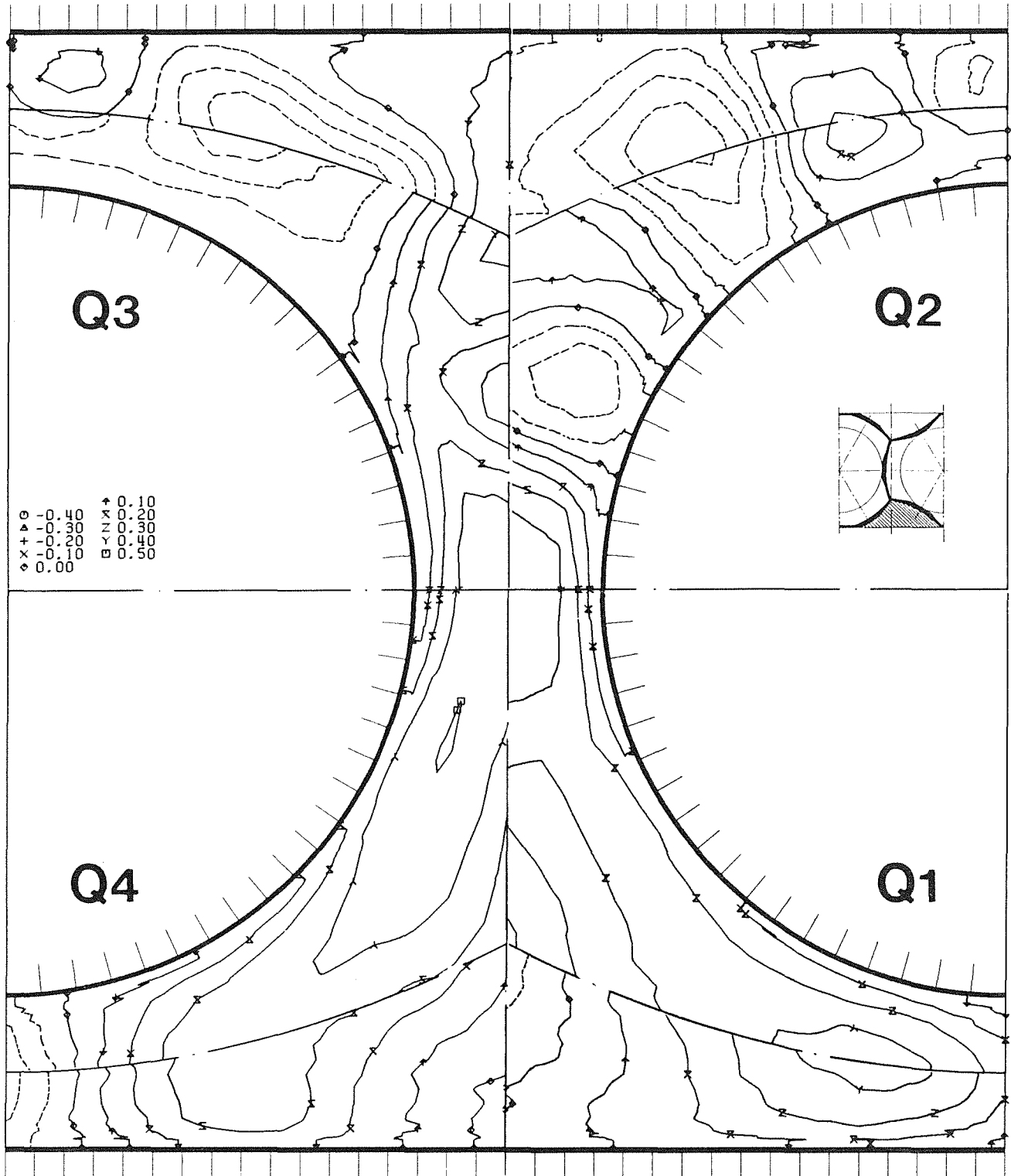


Abb.34 Korrelationskoeffizient der Schubspannung parallel zur Wand
für $L/D_h = 8.44$