

KfK 4199
März 1987

Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen in Wandkanälen von Stabbündeln in drei Ebenen hinter einem Gitterabstandshalter

K. Rehme
Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Schneller Brüter

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Schneller Brüter

KfK 4199

Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen in Wandkanälen von
Stabbündeln in drei Ebenen hinter einem Gitterabstandshalter

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 war ein SNR-typisches Abstandshaltergitter für Verhältnisse von Abstand zwischen Abstandshaltergitter und Meßebene zu hydraulischem Durchmesser von $L/D_h=40.4$, 32.8 bzw. 16.9 vorhanden. Die Reynoldszahl der Untersuchungen betrug $Re=1.45 \cdot 10^5$.

Die Ergebnisse zeigen, daß Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen bereits bei $L/D_h=40.4$ durch den Abstandshalter beeinflußt werden. Mit wachsender Annäherung an den Abstandshalter steigen die Auswirkungen auf die Strömungs- und Turbulenzverteilung.

Velocity and turbulence distributions in wall subchannels of a rod bundle in three axial planes downstream of a spacer grid

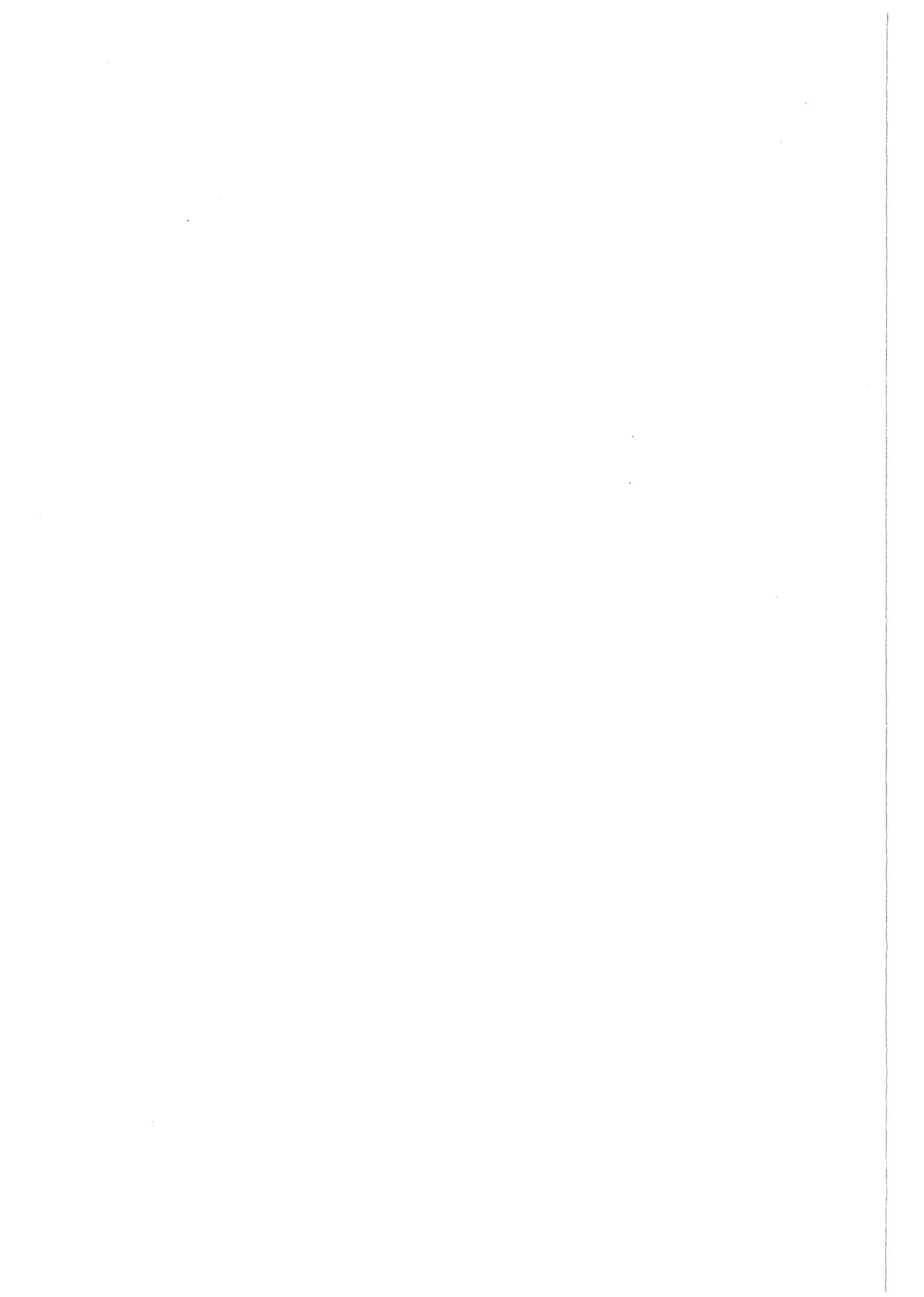
Abstract

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 at ratios of distance between the spacer grid and the measuring plane and the hydraulic diameter of $L/D_h=40.4$, 32.8 , and 16.9 , respectively. The Reynolds number of this investigation was $Re=1.45 \cdot 10^5$.

The results show that the distributions of the velocity and of the turbulence are affected by the spacer grid already for $L/D_h=40.4$. The effects of the spacer grid increase with decreasing distance from the spacer grid.

Inhalt

1. Einleitung	3
2. Teststrecke	5
3. Versuchsdurchführung	6
4. Auswertung der Meßergebnisse	10
5. Ergebnisse	11
5.1 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit	11
5.2 Wandschubspannung	13
5.3 Reibungsbeiwert	15
5.4 Turbulenzintensitäten und kinetische Energie der Turbulenz	16
5.4.1 Axiale Turbulenzintensität	16
5.4.2 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand	17
5.4.3 Turbulenzintensität parallel zur Wand	18
5.4.4 Kinetische Energie der Turbulenz	18
5.5 Schubspannungen und Korrelationskoeffizienten	19
5.6 Quellterm für die axiale Wirbelstärke	21
6. Schlußfolgerungen	22



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 Brennelementenbündeln 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 Temperaturverteilungen 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 Abstandhaltergitter bereitzustellen. Voraussetzung für eine Berechnung der detaillierten Temperaturverteilung ist nämlich die hinreichend genaue Berechnung der Geschwindigkeitsverteilung.

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 700×190 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 kleiner 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. Der Strömungsquerschnitt wird durch den Abstandshalter maximal um 17.96% versperrt (in Abstandshaltermitte). An der Ein- und Austrittsseite des Abstandshalters reduziert sich die Versperrung auf 10.77% . Die Versperrung in den ausgemessenen Wandkanälen beträgt 18.96% .

Die Messungen erfolgen im offenen Austrittsquerschnitt des Kanals. 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 weitere Experimente dokumentiert. Die Ergebnisse der Referenzmessung ohne eingebauten Abstandshalter in zwei gegenüberliegenden Wandkanälen (Meßebe E0) und die Ergebnisse der Ebenen E1 und E2 sind in /7/ beschrieben.

Der hydraulische Durchmesser der Wandkanäle

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

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

$$L/D_h = 40.37 \text{ für Meßebe E3,}$$

$$L/D_h = 32.76 \text{ für Meßebe E4,}$$

und

$$L/D_h = 16.91 \text{ für Meßebe E5.}$$

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 Datenleitungen 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 /8/ 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 /8/.

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 500 Einzelmessungen bestimmt. Die dabei zugelassene Standardabweichung beträgt 0.6% .

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

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

Standardabweichung ist selten erforderlich, zuweilen dann, wenn die Witterungsbedingungen (Wind) sehr ungünstig sind. Für den Gleichspannungsanteil der Brückenspannung wird stets eine Standardabweichung von 0.6% zugelassen. Es soll an dieser Stelle erwähnt werden, daß dieses Verfahren neu ist und sich von dem früher verwendeten Verfahren /8/ 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 IBM3090/Siemens 7890 zur Auswertung übertragen.

4. Auswertung der Meßergebnisse

Die Meßergebnisse werden mit dem HDRA-Rechenprogramm /9/ ausgewertet. Für die Hitzdraht-Messungen wird dabei die von Hooper /10/ vorgeschlagene Methode verwendet, allerdings mit dem Unterschied, daß alle in die Auswertung eingehenden Konstanten des Abkühlungsgesetzes (Abhängigkeit der Hitzdrahtbrücken-Ausgangsspannung von der Strömungsgeschwindigkeit) durch Eichungen bestimmt werden. Aus der Richtungsempfindlichkeit bei der Anströmung des schrägen Hitzdrahtes wird der effektive Winkel des Hitzdrahtes bestimmt. Die bei den vorliegenden Versuchen ermittelten effektiven Winkel der verwendeten Hitzdrähte weichen nur um maximal $0,27^\circ$ vom Nominalwinkel 45° ab (s. Tabelle 1). Dies ist gegenüber den früheren Versuchen eine sehr geringe Abweichung, sie wird dadurch erreicht, daß die Hitzdrähte im eigenen Labor gefertigt werden. 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. Die Maximalwerte der Korrekturen für die Geschwindigkeiten aus den Pitotrohr-Messungen auf die Referenzbedingungen ($p=0.1 \text{ MPa}$, $T=25^\circ\text{C}$) sind in Tab.2 angegeben, aufgeteilt nach Quadranten und jeweils für beide Bereiche (r/ϕ und x/y). Die Korrekturen aufgrund der Änderungen der Wetterbedingungen (Luftdruck und -temperatur) sind kleiner als 5.8%.

Die bei den vorliegenden Messungen maximalen Korrekturfaktoren der Hitzdrahtspannungen auf die Referenztraverse sind in Tabelle 3 angegeben. Die Maximalwerte liegen bei allen Versuchen für den geraden Hitzdraht unter 1.7% und für den schrägen Hitzdraht unter 2.3%. Die Korrekturfaktoren auf die Referenzbedingungen sind in Tabelle 4 enthalten. Diese Korrekturfaktoren sind bei allen Versuchen für den geraden kleiner als 2.1% und für den schrägen Hitzdraht kleiner als 1.7%.

5. Ergebnisse

In diesem Bericht werden die Ergebnisse in Form von Höhenlinien dargestellt und diskutiert. Für die beiden ausgemessenen Wandkanäle wurden mithilfe eines Rechenprogramms /11/ die Höhenlinien aus den Meßergebnissen ermittelt, und zwar für jeden der zwei Bereiche (r/ϕ und x/y) in jedem Quadranten ein Höhenlinienbild. Die Höhenlinienbilder (acht) wurden dann zusammengeklebt. Die Meßergebnisse wurden nicht geglättet, sondern so verwendet, wie sie ermittelt wurden. Durch die Zusammensetzung des Gesamtbildes aus acht Einzelbildern entstehen an den Schnittstellen (Linien größten wandsenkrechten Abstandes und Symmetrielinien) zum Teil Sprünge. Für die senkrecht zur Zeichenebene liegenden Daten (Geschwindigkeit, axiale Turbulenzintensität) spiegeln die Sprünge an den Schnittstellen die Qualität der Ergebnisse wider, da die acht Teile der Bilder zu unterschiedlichen Zeiten nacheinander gemessen wurden.

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

5.1 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit

Die gemessenen zeitlichen Mittelwerte der Strömungsgeschwindigkeit sind in den Abb. 6,7 und 8 für die drei Meßebenen E3, E4 bzw. E5 als Linien gleicher Geschwindigkeit dargestellt. Dabei sind die Strömungsgeschwindigkeiten auf die Referenzgeschwindigkeit

$$u_R = 27.75 \text{ ms}^{-1}$$

bezogen.

Die Abbildungen zeigen, daß die Geschwindigkeitsverteilung bereits für $L/D_h = 40.4$ (E3) nicht mehr symmetrisch bezüglich der Symmetrieachse

senkrecht zu den Kanalwänden zwischen den Stäben ist. Für die Ebene E2 ($L/D_h = 62.8$) bestand noch Symmetrie /7/. Die Asymmetrie der Geschwindigkeitsverteilung wird größer bei weiterer Annäherung an den Abstandshalter, bedingt durch die asymmetrische Geometrie des Abstandshalters (Abb.2). Das aus den Höhenlinien erkennbare Anwachsen der maximalen Geschwindigkeit mit sinkendem L/D_h ist auf das Anwachsen der mittleren Geschwindigkeit zurückzuführen (Tabelle 5).

Die Asymmetrie der Geschwindigkeitsverteilung bezüglich der Symmetrieachse durch die Stabzentren, die schon für größere L/D_h -Verhältnisse beobachtet wurde /7/, ist auch in den Höhenlinienbildern für $L/D_h = 40.4$ bis 16.9 deutlich sichtbar. Diese Asymmetrie wird durch die Strömungsbedingungen am Einlauf in den Kanal verursacht. Der Massenstrom in den Quadranten Q2 und Q3 ist höher als in den Quadranten Q1 und Q4. Die für die Ebenen E1 und E2 /7/ beobachtete leichte Vergleichmäßigung der Strömungsverteilung setzt sich in den Ebenen E3 bis E5 nicht weiter fort, sondern die Strömungsverteilung wird wieder etwas ungleichmäßiger. Die Ursache hierfür kann nur im Einfluß des Abstandshalters gesehen werden, der zwar nominell symmetrisch zur Achse durch die Stabzentren ist, jedoch durch Fertigungstoleranzen bedingt tatsächlich nicht völlig symmetrisch ist.

Sehr viel deutlicher werden die Verhältnisse, wenn man die Geschwindigkeitsverteilungen in den einzelnen Quadranten und in den beiden Teilen der Quadranten integriert. Tabelle 5 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.5 angegeben ist.

Für alle Ebenen ist der Massendurchsatz im Quadranten Q3 am größten, wie schon bei den früher untersuchten Ebenen /7/. Den geringsten Massendurchsatz hat für die Ebenen E3 und E5 der Quadrant Q1, für die Ebene E4 der Quadrant Q4. Die Ungleichmäßigkeit in der Strömungsverteilung wächst von Ebene E3 mit 1.9% über 4.1% für die Ebene E4 auf 5.8% für die Ebene E5 an. Betrachtet man die Strömungsverteilungen in den beiden Gebieten (r/ϕ und x/y) der einzelnen Quadranten, dann zeigt sich, daß die größten Massendurchsätze für beide Gebiete im Quadranten Q3 auftreten. Für das Gebiet nahe der Stabwand (r/ϕ) ist der geringste Massendurchsatz für alle Ebenen im Quadranten Q1; für das Gebiet nahe der Kanalwand (x/y) wechselt der geringste Massendurchsatz vom Quadranten Q4 für die Ebenen E3 und E5 in den Quadranten Q1 für die

Ebene E5. Bezogen auf den Mittelwert in den beiden Gebieten steigen die Unterschiede zwischen den einzelnen Quadranten von 2.7% in Ebene E3 über 4.3% in Ebene E4 auf 7.4% in Ebene E5 für die Gebiete nahe der Stabwand an. Für die Gebiete nahe der Kanalwand sind die Unterschiede mit 1.0% für Ebene E3, 3.7% für Ebene E4 und 3.2% für die Ebene E5 stets kleiner als für die Gebiete nahe der Stabwand.

Insgesamt kann man feststellen, daß der Abstandshalter die Strömungsverteilung ab der Ebene E3, d.h. für $L/D_h = 40.4$, signifikant verändert.

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

5.2 Wandschubspannung

Die gemessenen Wandschubspannungen zeigen die gleichen Trends wie die Geschwindigkeitsverteilungen. Abbildung 9 zeigt die Wandschubspannungsverteilungen an den Stäben in den drei Ebenen. Dabei ist $\phi = 0^\circ$ die Position zwischen den Stäben und $\phi = -90^\circ$ 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 $x = -85.0$ 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.

Die Wandschubspannungen an der Stabwand geben die mit Annäherung an den Abstandshalter wachsende Asymmetrie der Strömungsverteilung gut wieder. Ab der Ebene E3 ($L/D_h = 40.4$) zeigen sich in der Verteilung in den Quadranten Q1 und Q2 relative Minima bei etwa $\pm 40-50^\circ$, die durch die Kontaktstellen zwischen Abstandshalter und Stab verursacht werden. Diese relativen Minima (Einbuchtungen) in der Verteilung prägen sich mit wachsender Annäherung an den Abstandshalter stärker aus. Am Stab in den Quadranten Q3 und Q4 finden sich entsprechende Einbuchtungen der Wandschubspannungsverteilung nicht, da an diesen Positionen keine Kontaktstelle zwischen Stab und Abstandshalter

besteht. An diesem Stab liegt die Kontaktstelle bei $\phi=0^\circ$. Es ist deutlich zu erkennen, daß mit wachsender Annäherung der Meßebeane an den Abstandshalter (von E3 nach E5) das Minimum der Wandschubspannungsverteilung bei $\phi=0^\circ$ ausgeprägter wird.

Während die Wandschubspannungsverteilung entlang den Kanalwänden für die Ebene E3 relativ symmetrisch verläuft und an beiden Wänden etwa gleich ist, ergeben sich für die Ebenen E4 und E5 stärkere Abweichungen. Besonders für die Ebene E5 fällt das relative Minimum von τ_w an der Kanalwand im Quadranten Q4 bei $x \approx -50$ mm auf, das ebenfalls durch die Kontaktstelle zwischen Abstandshalter und Kanalwand hervorgerufen wird.

Durch Integration der Wandschubspannungsverteilungen erhält man die Mittelwerte der Wandschubspannung in den einzelnen Quadranten und in den Teilen der Quadranten. Die Daten sind in Tab.6 enthalten, dabei wurden die Mittelwerte auf die mittlere Wandschubspannung im gesamten ausgemessenen Gebiet (alle vier Quadranten) bezogen.

Bis auf wenige Ausnahmen ergeben sich für die Wandschubspannungen die gleichen Verhältnisse wie für die mittleren Geschwindigkeiten (Tab.5). In den Quadranten oder Teilen der Quadranten, in denen die mittlere Geschwindigkeit am höchsten ist, hat auch die mittlere Wandschubspannung den höchsten Wert und umgekehrt. Die Ausnahmen finden sich bei den Wandschubspannungen, die im Quadranten Q4 in den Ebenen E3 und E4 Minimalwerte aufweisen, während die mittleren Geschwindigkeiten im Quadranten Q1 minimale Werte zeigen. Jedoch sind die Unterschiede zwischen den mittleren Geschwindigkeiten bzw. den Wandschubspannungen der Quadranten Q1 und Q4, gering.

Die Unterschiede zwischen den mittleren Wandschubspannungen in den einzelnen Quadranten sind größer als die Unterschiede in den mittleren Geschwindigkeiten. Die Differenzen von $\pm 2.7\%$ in der Ebene E3, steigen auf $\pm 4.9\%$ bei E4 und $\pm 5.0\%$ in der Ebene E5 an. An der Stabwand (r/ϕ) steigen die Unterschiede von $\pm 3.0\%$ in der Ebene E3 über $\pm 5.1\%$ bei E4 auf $\pm 6.5\%$ in der Ebene E5 an. An der Kanalwand sind die Differenzen in den Ebenen E3 mit 2.2% E4 mit $\pm 4.7\%$ und in der Ebene E5 mit $\pm 4.0\%$ stets kleiner als an der Stabwand.

Wegen

$$\tau_w = \lambda \rho u_m^2 / 8 \quad (4)$$

und

$$\lambda \sim Re^{-0.2} = (u_m D / \nu)^{-0.2} \quad (5)$$

ist

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

Potenziert man die relativen mittleren Geschwindigkeiten aus Tab.5 mit 1.8, dann stimmen die Ergebnisse für die Quadranten in der Regel besser als 1.0% mit den Werten der relativen mittleren Wandschubspannungen aus Tab.6 überein. Für die Teile der einzelnen Quadranten ergeben sich hingegen Abweichungen bis 2.5%. Auch hieraus ist die Wirkung des Abstandshaltergitters auf die Strömungsverteilung zu ersehen; denn bei den früher ausgemessenen Ebenen E0 bis E2 war die Abweichung durchweg kleiner als 0.5%. Die relativ großen Differenzen zwischen den mittleren Wandschubspannungen in den einzelnen Teilen der Quadranten und den über die mittleren Geschwindigkeiten nach Gl. (6) berechneten Wandschubspannungen zeigen, daß ein Impulstransport zwischen den Teilen der Unterkanälen besteht, der durch den Abstandshalter hervorgerufen wird.

5.3 Reibungsbeiwert

Aus den gemessenen Wandschubspannungen und den mittleren Strömungsgeschwindigkeiten errechnet sich der Reibungsbeiwert zu

$$\lambda = 8 \tau_w / (\rho u_m^2) \quad (7)$$

Die Ergebnisse sind in Tab.1 enthalten. Wenn man berücksichtigt, daß die Reynoldszahlen in den einzelnen Quadranten leicht voneinander abweichen, liegen die Reibungsbeiwerte aller Quadranten innerhalb $\pm 1.1\%$. Der Mittelwert ergibt sich zu $\lambda = 0.01649$ bezogen auf $Re = 1.451 \cdot 10^5$ durch eine Korrektur mit $Re^{-0.2}$.

Für das Experiment in der Ebene E1 wurde die axiale Verteilung des statischen Druckes gemessen. Daraus errechnet sich der Reibungsbeiwert zu $\lambda = 0.01630$.

Die Differenz zwischen den Reibungsbeiwerten aus der Messung des statischen Drucks und dem Mittelwert aus den Wandschubspannungsmessungen (Tab.7) beträgt nur 1.2%. Beide Werte stimmen damit innerhalb der Meßunsicherheiten überein. Der Mittelwert für die neu ausgemessenen Ebenen ist jedoch geringfügig höher als in den Ebenen E0-E2, wahrscheinlich durch den Einfluß des Abstandshaltergitters.

Für das Kreisrohr ergibt sich für $Re=1.451 \cdot 10^5$ nach der Beziehung von Maubach /12/

$$(\lambda)^{-0.5} = 2.035 \lg (Re\sqrt{\lambda}) - 0.989 \quad (8)$$

$\lambda_R=0.01687$. Damit liegen die experimentellen Reibungsbeiwerte aus den Wandschubspannungsmessungen für den ausgemessenen Wandkanal in den 3 Ebenen etwa 2,2% unter dem Reibungsbeiwert des Kreisrohres.

5.4 Turbulenzintensitäten und kinetische Energie der Turbulenz

5.4.1 Axiale Turbulenzintensität

Die gemessenen axialen Turbulenzintensitäten sind für die drei Ebenen in den Abb.11-13 als Linien gleicher Intensität dargestellt. Die Meßwerte wurden dazu auf einen Referenzwert der Wandschubspannungsgeschwindigkeit bezogen. Als jeweiliger Referenzwert wurde die Wandschubspannungsgeschwindigkeit im Quadranten Q1 bei $\phi=0^\circ$ gewählt.

Für alle Ebenen ergeben sich sehr gleichmäßige und ähnliche Strukturen der axialen Turbulenzintensität. Die axiale Turbulenzintensität ist weitgehend symmetrisch zur Linie durch die Stabzentren für die Ebenen E3 und E4. Dagegen ist die Verteilung der axialen Turbulenzintensität in der Ebene E5 stärker asymmetrisch. Das gleiche trifft für alle Ebenen hinsichtlich der Symmetrieachse zwischen den Stäben zu. Hier macht sich die Auswirkung der Abstandshalterstruktur deutlich bemerkbar. Deutlich sichtbar sind die Gebiete relativ hoher Turbulenzintensität auf den Linien größten Wandabstandes: für $\phi \approx 20^\circ$ jeweils von der Symmetrielinie durch die Stabzentren und für jeweils

$\phi \approx 65^\circ$. Diese relativen Maxima, eigentlich Sattelpunkte, ergaben sich durch den periodischen Impulstransport zwischen zwei Nachbarkanälen über die Positionen engsten Wandabstandes, wie frühere Untersuchungen gezeigt haben /13/. Die axiale Turbulenzintensität ist in der Ebene E5 deutlich geringer als in den beiden anderen Ebenen; man beachte dabei, daß die Symbole für die Höhenlinien bei der Ebene E5 gegenüber den anderen Ebenen geändert sind. Um die Unterschiede in den einzelnen Ebenen und in den einzelnen Quadranten quantitativ angeben zu können, wurden die Turbulenzintensitäten integriert, um den Mittelwert der Turbulenzintensität zu bestimmen. Tabelle 8 enthält die berechneten Mittelwerte in den Quadranten und in den jeweiligen Teilgebieten für alle Ebenen.

Wie die letzte Zeile der Tab.8 zeigt, ist der Gesamtmittelwert der axialen Turbulenzintensität in Ebene E5 kleiner als in den beiden anderen Ebenen. Eine Analyse der Mittelwerte in Tab. 8 ergibt, daß für alle Ebenen die axialen Turbulenzintensitäten in den Quadranten Q2 und Q3 höher sind als in den Quadranten Q1 und Q4. Das gleiche Ergebnis wurde für die mittleren Geschwindigkeiten erhalten. In den einzelnen Teilgebieten (r/ϕ und x/y) und in den Quadranten ergeben sich Abweichungen vom jeweiligen Mittelwert von -4% bis +9%. Die Unterschiede sind höher als in den Ebenen E0 bis E2 die maximal $\pm 3\%$ betragen /7/.

5.4.2 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand

Die gemessenen Turbulenzintensitäten senkrecht zur Wand sind in den Abb.14-16 für die drei Ebenen als Höhenlinien dargestellt. Wenn man berücksichtigt, daß die Turbulenzintensitäten senkrecht zur Wand mit einer größeren Meßunsicherheit behaftet sind, ergeben sich relativ gleichmäßige Verteilungen. Einflüsse des Abstandshaltergitters auf die wandsenkrechte Turbulenzintensität sind nicht feststellbar. Die integrierten Mittelwerte der Turbulenzintensität senkrecht zur Wand sind in Tab. 9 angegeben. Die Abweichungen vom jeweiligen Mittelwert in den einzelnen Quadranten bzw. in den Teilgebieten (r/ϕ und x/y) ergeben sich zu $\pm 10\%$. Die Abweichungen sind damit nur unwesentlich höher als in den Ebenen E0 bis E2.

5.4.3 Turbulenzintensität parallel zur Wand

Die Meßergebnisse der Turbulenzintensität parallel zur Wand, die in den Abb.17-19 für die drei Ebenen gezeigt sind, lassen eine sehr gleichmäßige und für alle Ebenen ganz ähnliche Struktur erkennen. Die Übergänge der Höhenlinien an den Symmetrielinien sind sehr glatt. Ab Ebene E4 ist ein Einfluß des Abstandshaltergitters auf die Verteilung der Turbulenzintensität parallel zur Wand festzustellen, dieser Einfluß ist in der Ebene E5 deutlich ausgeprägt.

Die Mittelwerte der Turbulenzintensität parallel zur Wand (Tab. 10) zeigen die gleichen Tendenzen, die bereits für die axiale Turbulenzintensität festgestellt wurden. Die Abweichungen vom jeweiligen Mittelwert in den Quadranten und in den Teilen der Quadranten liegen mit $\pm 7\%$ in den Ebenen E3 und E4 gleich hoch wie in den früher gemessenen Ebenen E0 bis E2; sie steigen jedoch für die Ebene E5 auf $\pm 10\%$ an. Dieser Anstieg deutet ebenfalls auf die Wirkung des Abstandshaltergitters auf die Verteilung der Turbulenzintensität parallel zu den Wänden hin.

5.4.4. Kinetische Energie der Turbulenz

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

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

Die ermittelten Werte sind in den Abb.20-22, bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit, dargestellt.

Die sehr gleichmäßigen Verläufe lassen deutlich die Gebiete relativ hoher kinetischer Energie auf den Linien größten Wandabstandes erkennen (Sattelpunkte). Die Positionen der Sattelpunkte decken sich mit denen der axialen Turbulenzintensität.

Während die Höhenlinien der kinetischen Energie der Turbulenz in der Ebene E3 noch relativ symmetrisch verlaufen, ist die Verteilung in der Ebene E4 schwach, in der Ebene E5 jedoch deutlich asymmetrisch als Folge der Einflüsse des

Abstandshaltergitters. Außerdem ist die kinetische Energie in der Ebene E5 deutlich niedriger als in den beiden übrigen Ebenen. Das wird besonders deutlich an den Höhenlinien in den Gebieten größten Wandabstandes. Hierbei ist zu beachten, daß die Symbole für die Höhenlinien bei der Ebene E5 gegenüber den übrigen Ebenen geändert wurden.

Die Mittelwerte der kinetischen Energie der Turbulenz für die Quadranten und die einzelnen Teile der Quadranten (r/ϕ und x/y) sind in Tab. 11 angegeben. Die Abweichungen in den einzelnen Quadranten sowie in ihren Teilen liegen bei $\pm 7\%$ für die Ebene E3. Die Abweichungen steigen mit $\pm 9\%$ bei Ebene E4 leicht und mit $\pm 13\%$ bei Ebene E5 jedoch deutlich an. Der Gesamtmittelwert der kinetischen Energie der Turbulenz ist in Ebene E5 etwa 14% kleiner als in Ebene E4 (s. letzte Zeile der Tab. 11) und bestätigt damit den Eindruck aus den Höhenliniendarstellungen (s.o.).

5.5 Schubspannungen und Korrelationskoeffizienten

Die Höhenlinien der gemessenen Schubspannung senkrecht zur Wand sind in den Abb.23-25 für die drei Ebenen dargestellt. Die Ergebnisse sind für alle Ebenen sehr gleichmäßig. In Spaltmitte zwischen den Stäben verschwindet die Schubspannung senkrecht zur Wand aus Symmetriegründen bei der Ebene E3, während die Position der Nullschubspannung in der Ebene E4 schwach und in der Ebene E5 deutlich in Richtung des Stabes in den Quadranten Q1 und Q2 verschoben ist, weil das Abstandshaltergitter am Stab in den Quadranten Q3 und Q4 auf der Symmetrielinie durch die Stabzentren einen Berührungspunkt hat. Schon in der Ebene E3 fällt auf, daß die Höhenlinien der Schubspannung senkrecht zur Wand bei etwa $\phi=40^\circ$ von der Symmetrielinie durch die Stabzentren in den Quadranten Q1 und Q2 von den Wänden ausgebogen sind. Diese Tendenz ist in den Ebenen E4 und E5 noch verstärkt. Die Ursache ist ebenfalls der jeweilige Kontaktpunkt des Abstandshaltergitters mit dem Stab an diesen Positionen. In den Spalten zwischen den Stäben und den Kanalwänden verschwindet die wandsenkrechte Schubspannung jeweils an einer Position, die näher zum Stab liegt als der Hälfte des Abstandes zwischen Stab und Wand entspricht. Wegen der unterschiedlichen Wandkrümmung von Stab und Kanalwand liegt hier keine Symmetrie vor.

Die Höhenlinien der gemessenen Schubspannungen parallel zu den Wänden, Abb.26-28, zeigen, daß die Verteilung in der Ebene E3 noch weitgehend

symmetrisch ist. Dagegen zeigen sich bereits für die Ebene E4 deutliche Abweichungen von der Symmetrie. Hier macht sich der Einfluß des Abstandshalters auf den Impulstransport parallel zu den Wänden bemerkbar, insbesondere bei jeweils $\phi = 40^\circ$ von der Symmetrielinie durch die Stabzentren in den Quadranten Q1 und Q2. Diese Effekte sind in der Ebene E3 bereits schwach zu erkennen; sie sind in der Ebene E5 deutlich ausgeprägt. Unter den Kontaktstellen Abstandshaltergitter-Stab bei $\phi = 0^\circ$ in den Quadranten Q3 und Q4 sind in der Ebene E5 ebenfalls Auswirkungen des Abstandshaltergitters zu sehen. Ebenso zeigen sich an den Kontaktstellen des Abstandshalters mit den Kanalwänden an der Kanalwand Auswirkungen in allen Spalten zwischen Stäben und Kanalwänden.

Die Höhenliniendarstellungen für die Korrelationskoeffizienten der Schubspannung senkrecht zur Wand:

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

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

$$R_{uv} \approx 0.4 \div 0.5 \quad (\text{Abb.29-31}).$$

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

Die entsprechenden Korrelationskoeffizienten der Schubspannung parallel zur Wand:

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

die in den Abb. 32-34 dargestellt sind, zeigen einen ganz ähnlichen Verlauf wie die Schubspannung selbst.

Die ebenfalls gemessenen transversen Schubspannungen, $-\overline{\rho v'w'}$, sind im gesamten ausgemessenen Bereich sehr klein, und das für alle drei Ebenen. Die Ergebnisse sind stark durch die Meßunsicherheiten beeinflußt und werden daher in diesem Bericht nicht gezeigt.

5.6. Quellterm für die axiale Wirbelstärke

Die Differenz der Turbulenzintensitäten in Richtung parallel und senkrecht zur Wand $-\rho(\overline{w'^2} - \overline{v'^2})$ wird als Quellterm für die axiale Wirbelstärke angesehen /14/. Die Ergebnisse, bezogen auf das Quadrat der Wandschubspannungsgeschwindigkeit, in Höhenliniendarstellung (Abb. 35-37) zeigen relativ gleichmäßige Verläufe für die drei Ebenen. Dabei muß man berücksichtigen, daß die Differenz zweier relativ großer Werte dargestellt ist. Nur in Gebieten größten Wandabstandes fällt die Differenz zwischen den Turbulenzintensitäten parallel und senkrecht zur Wand auf Null ab. In den übrigen Gebieten fallen die Daten von Werten zwischen 0.8 und 1.0 in Wandnähe wesentlich schwächer mit wachsendem Wandabstand, als bei Kreisrohren beobachtet wird.

6. Schlußfolgerungen

An einem Stabbündel aus vier parallelen Stäben in einem Rechteckkanal für ein Stababstandsverhältnis von $P/D=1.223$ und ein Wandabstandsverhältnis $W/D=1.183$ wurden detailliert Geschwindigkeits-, Wandschubspannungs- und Turbulenzverteilungen im Nachlauf eines SNR-typischen Abstandshaltergitters gemessen. Die Meßergebnisse zeigen, daß für $L/D_h=40.4$ hinter dem Abstandshalter die ersten Auswirkungen auf die Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen sichtbar sind. Die Auswirkungen werden mit zunehmender Annäherung an den Abstandshalter für $L/D_h=32.8$ bzw. 16.9 stärker ausgeprägt.

Die Asymmetrie der Abstandshalterstruktur bewirkt eine Asymmetrie der Geschwindigkeitsverteilung und in den Verteilungen der axialen Turbulenzintensität, der kinetischen Energie der Turbulenz sowie in den Schubspannungen senkrecht und parallel zu den Wänden. Deutlich erkennbar sind die stromaufwärts von den Meßebenen liegenden Kontaktstellen zwischen Abstandshalter und den Stab- bzw. Kanalwänden.

Besonders die Wandschubspannungsverteilung zeigt unterhalb den Kontaktstellen zwischen Abstandshalter und Stab- und Kanalwänden relative Minima, die sich mit wachsender Annäherung der Meßebene an das Abstandshaltergitter stärker ausprägen.

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

Nomenklatur

D	m	Stabdurchmesser
d	m	Durchmesser
D _h	m	hydraulischer Durchmesser
d _p	m	Pitotrohr Außendurchmesser
F	m ²	Fläche
H	m	Kanalhöhe
h	m	Höhe
$\overline{k'}$	m ² s ⁻²	kinetische Energie der Turbulenz
L	m	Länge
P	m	Stabmittelpunktsabstand
p	Pa	Druck
R	-	Korrelationskoeffizient
Re	-	Reynoldszahl
r	m	Koordinate senkrecht zur Stabwand
T	K	Temperatur
U	m	Umfang
u	ms ⁻¹	Geschwindigkeit
u _m	ms ⁻¹	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
u'	ms ⁻¹	Schwankungsgeschwindigkeit in axialer Richtung
u*	ms ⁻¹	Wandschubspannungsgeschwindigkeit
v'	ms ⁻¹	Schwankungsgeschwindigkeit senkrecht zur Wand
W	m	Wandabstand
w'	ms ⁻¹	Schwankungsgeschwindigkeit parallel zur Wand
x	m	Koordinate parallel zur Kanalwand
y	m	Koordinate senkrecht zur Kanalwand
λ	-	Reibungsbeiwert
φ	grd	Umfangskoordinate
ν	m ² s ⁻¹	kinematische Viskosität
ρ	Kgm ⁻³	Dichte
τ	Pa	Schubspannung

Indizes

R	Referenzbedingungen
w	Wand

Literatur

- /1/ K. Rehme, Turbulenzstruktur im Wandkanal eines Stabbündels ($P/D = W/D = 1.148$) für drei Ebenen im Einlauf, KfK-Bericht Nr. 4027 (1986).
- /2/ K. Rehme, Turbulente Strömung durch Wandkanäle eines Stabbündels ($P/D = W/D = 1.30$), KfK-Bericht Nr. 4061 (1986).
- /3/ G. Trippe, Experimentelle Untersuchungen turbulenter Strömungen in axial durchströmten Stabbündeln ohne und mit gitterförmigen Abstandshaltern, KfK-Bericht Nr. 2834 (1979).
- /4/ M.R. Yeung and L. Wolf, Multi-cell slug flow heat transfer analysis for finite LMFBR bundles, Nucl. Eng. Design, Vol.62, Nos. 1-3, pp. 101-121 (1980).
- /5/ W. Slagter, Finite element solution of axial turbulent flow in a bare rod bundle using a one-equation turbulence model, Nucl. Sci. Eng., Vol.82, pp.243-259 (1982).
- /6/ H.-G. Kaiser, Näherungslösungen für den Impulstransport bei turbulenter Strömung in engen Stabgitterbündeln nach der Methode der finiten Elemente, Dissertation, Techn. Universität Braunschweig (1985).
- /7/ K. Rehme, Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen in Wandkanälen von Stabbündeln mit einem Gitterabstandshalter, KfK-Bericht Nr. 4094 (1986).
- /8/ K. Rehme, Rechnergesteuerte Versuchsanlage zur Messung von Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen mit Hitzdrähten, KfK-Bericht Nr. 3744 (1984).
- /9/ L. Vosáhlo, Computer programs for evaluation of turbulence characteristics from hot-wire measurements, KfK-Bericht Nr. 3743 (1984).
- /10/ J.D. Hooper, Fully developed turbulent flow through a rod cluster, Ph.D. Thesis, University of New South Wales, Sydney (Australia), (1980).

- /11/ 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).
- /12/ K. Maubach, Reibungsgesetze turbulenter Strömungen, Chemie-Ing.-Technik 42 (15), pp.995-1004 (1970).
- /13/ J.D. Hooper and K. Rehme, Large-scale structural effects in developed turbulent flow through closely-spaced rod arrays, J. Fluid Mech. 145, pp. 305-337 (1984).
- /14/ M.A. Hague et al., An observation on the origin of secondary flow in straight noncircular ducts, Wärme- und Stoffübertragung 17, pp.93-95 (1983).

Tabelle 1: Effektiver Winkel des schrägen Hitzdrahtes
(aus Eichung)

Winkel in /Grad/		Q1	Q2	Q3	Q4
E3	R/P	45.05	45.05	45.03	45.02
	X/Y	45.00	44.98	45.06	44.91
E4	R/P	44.73	44.84	44.93	44.76
	X/Y	45.00	45.03	44.88	44.85
E5	R/P	44.88	44.90	44.95	45.04
	X/Y	44.83	44.96	44.95	45.02

Tabelle 2: Maximale Korrekturfaktoren (Referenzbedingungen)
- Pitotrohr-Messungen -

E3		MAX	MIN
Q1	R/P	1.054	1.038
	X/Y	1.058	1.037
Q2	R/P	1.017	0.989
	X/Y	1.014	0.996
Q3	R/P	1.006	0.978
	X/Y	1.012	0.999
Q4	R/P	1.038	1.023
	X/Y	1.058	1.033
E4		MAX	MIN
Q1	R/P	1.026	1.010
	X/Y	1.015	0.991
Q2	R/P	0.987	0.959
	X/Y	0.992	0.975
Q3	R/P	1.016	0.990
	X/Y	0.971	0.951
Q4	R/P	0.976	0.951
	X/Y	0.977	0.963
E5		MAX	MIN
Q1	R/P	0.975	0.954
	X/Y	0.974	0.952
Q2	R/P	0.988	0.978
	X/Y	0.987	0.968
Q3	R/P	0.993	0.964
	X/Y	1.003	0.988
Q4	R/P	0.978	0.965
	X/Y	0.968	0.951

Tabelle 3: Maximale Korrekturfaktoren (Referenztraverse)

		Gerader Draht		Schräger Draht	
E3		MAX	MIN	MAX	MIN
Q1	R/P	1.007	0.998	1.009	0.999
	X/Y	1.005	1.002	1.007	0.995
Q2	R/P	1.008	1.003	1.009	0.998
	X/Y	1.004	0.995	1.017	0.999
Q3	R/P	1.004	0.999	1.010	1.002
	X/Y	1.002	0.996	1.011	0.995
Q4	R/P	1.007	0.989	1.008	0.998
	X/Y	1.006	0.995	1.013	1.000
E4		MAX	MIN	MAX	MIN
Q1	R/P	1.004	0.998	1.021	1.001
	X/Y	1.005	0.999	1.014	0.996
Q2	R/P	1.005	0.999	1.003	0.991
	X/Y	1.005	0.983	1.012	0.992
Q3	R/P	1.002	0.994	1.016	1.002
	X/Y	1.006	0.997	1.017	0.987
Q4	R/P	1.005	0.991	1.009	0.996
	X/Y	1.004	0.997	1.016	0.995
E5		MAX	MIN	MAX	MIN
Q1	R/P	1.005	0.995	1.006	0.984
	X/Y	1.003	0.998	1.006	0.994
Q2	R/P	1.000	0.994	1.006	0.989
	X/Y	1.006	0.990	1.000	0.977
Q3	R/P	1.001	0.994	1.006	0.995
	X/Y	1.009	1.000	1.006	0.984
Q4	R/P	1.001	0.994	1.013	1.003
	X/Y	1.001	0.993	1.006	1.000

Tabelle 4: Maximale Korrekturfaktoren (Referenzbedingungen)

		Gerader Draht		Schräger Draht	
E3		MAX	MIN	MAX	MIN
Q1	R/P	1.009	0.997	1.007	0.990
	X/Y	1.001	1.003	1.017	0.996
Q2	R/P	1.005	0.999	1.013	0.994
	X/Y	1.018	1.003	1.011	0.990
Q3	R/P	1.003	1.001	1.002	0.998
	X/Y	1.001	1.000	1.005	0.998
Q4	R/P	1.021	1.001	1.016	0.996
	X/Y	1.020	1.004	1.010	0.994
E4		MAX	MIN	MAX	MIN
Q1	R/P	1.002	1.000	1.004	0.996
	X/Y	1.001	0.999	1.001	0.994
Q2	R/P	1.001	0.998	1.003	0.998
	X/Y	1.006	1.000	1.000	0.993
Q3	R/P	0.997	0.993	1.004	0.991
	X/Y	0.996	0.992	1.004	0.995
Q4	R/P	0.998	0.994	0.997	0.993
	X/Y	0.996	0.992	1.004	0.995
E5		MAX	MIN	MAX	MIN
Q1	R/P	1.001	0.997	1.002	0.991
	X/Y	0.998	0.995	1.002	0.997
Q2	R/P	0.995	0.993	1.002	0.991
	X/Y	0.997	0.994	1.001	0.993
Q3	R/P	0.999	0.995	1.001	0.993
	X/Y	1.001	0.998	1.006	0.997
Q4	R/P	0.995	0.993	0.998	0.992
	X/Y	0.996	0.991	0.999	0.992

Tabelle 5: Mittlere Geschwindigkeiten in den Unterkanälen und Teilen der Unterkanäle bezogen auf die mittlere Geschwindigkeit in allen vier Quadranten

Kanal		Meßebe		
		E3	E4	E5
Q1	R/P	1.002	0.999	0.971
	X/Y	0.981	0.983	0.974
Q1		0.994	0.993	0.972
Q2	R/P	1.014	1.008	1.006
	X/Y	0.975	0.976	0.993
Q2		0.998	0.995	1.001
Q3	R/P	1.029	1.042	1.043
	X/Y	0.989	1.001	1.005
Q3		1.013	1.026	1.028
Q4	R/P	1.006	1.001	1.003
	X/Y	0.979	0.965	0.992
Q4		0.995	0.986	0.999
$U_{av} / \text{ms}^{-1} /$		25.57	25.71	26.61

Tabelle 6: Mittlere Wandschubspannungen in den einzelnen Quadranten bezogen auf den Mittelwert in allen vier Quadranten

Kanal		Meßebe		
		E3	E4	E5
Q1	R/P	1.027	1.021	0.967
	X/Y	0.953	0.961	0.935
Q1		0.995	0.995	0.953
Q2	R/P	1.033	1.029	1.030
	X/Y	0.930	0.929	0.984
Q2		0.988	0.985	1.010
Q3	R/P	1.070	1.092	1.088
	X/Y	0.971	0.995	1.001
Q3		1.027	1.049	1.050
Q4	R/P	1.027	1.013	1.002
	X/Y	0.949	0.917	0.968
Q4		0.993	0.971	0.987
τ_{av} /Pa/		1.586	1.594	1.687

Tabelle 7: Reibungsbeiwerte in den einzelnen Quadranten

Kanal		Meßebene		
		E3	E4	E5
Q1	λ	0.01670	0.01667	0.01644
	Re	142500	143200	145200
Q2	λ	0.01645	0.01644	0.01644
	Re	143200	143500	149400
Q3	λ	0.01661	0.01646	0.01622
	Re	145300	148000	153400
Q4	λ	0.01665	0.01647	0.01614
	Re	142800	142300	149100
Ges.	λ	0.01660	0.01651	0.01631
	Re	143500	144200	149300

Tabelle 8: Mittelwerte der axialen Turbulenzintensitäten in den einzelnen Unterkanälen und Teilen der Unterkanäle bezogen auf den Mittelwert in allen vier Quadranten

Kanal		Meßebene		
		E3	E4	E5
Q1	R/P	0.962	0.961	0.963
	X/Y	0.990	0.982	0.976
Q1		0.973	0.970	0.968
Q2	R/P	0.995	0.995	1.046
	X/Y	1.031	1.006	1.030
Q2		1.009	0.999	1.039
Q3	R/P	0.981	0.995	0.996
	X/Y	1.063	1.090	1.080
Q3		1.014	1.033	1.030
Q4	R/P	0.982	0.976	0.945
	X/Y	1.037	1.031	0.990
Q4		1.004	0.998	0.969
u'_{av}/u^*_{Ref}		1.520	1.560	1.432

Tabelle 9: Mittelwerte der senkrechten Turbulenzintensitäten in den einzelnen Unterkanälen und Teilen der Unterkanäle bezogen auf den Mittelwert in allen vier Quadranten

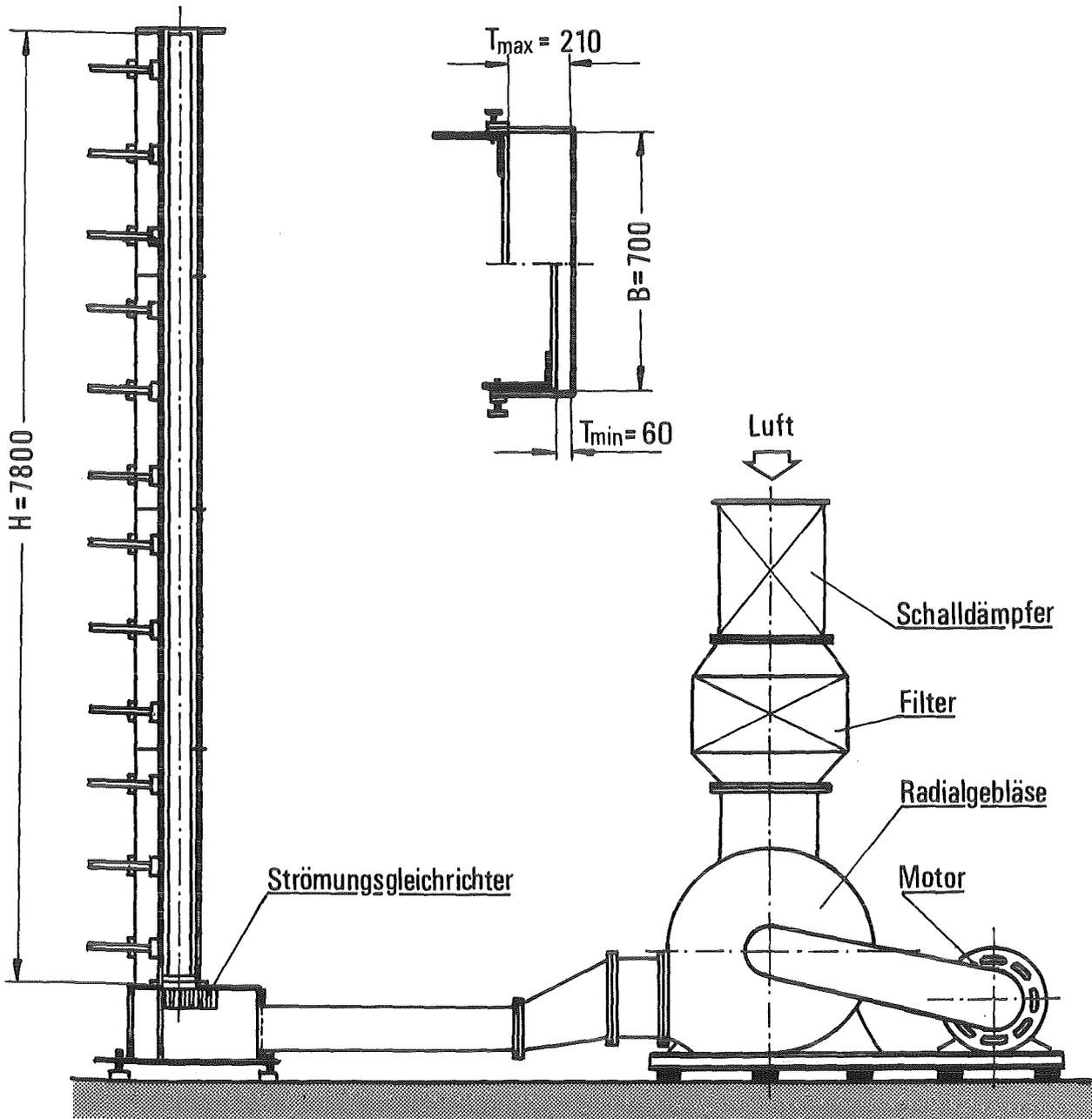
Kanal		Meßebeene		
		E3	E4	E5
Q1	R/P	0.997	0.903	0.949
	X/Y	0.998	1.013	0.957
Q1		0.997	0.947	0.952
Q2	R/P	1.014	0.990	1.052
	X/Y	1.048	1.089	1.081
Q2		1.028	1.029	1.064
Q3	R/P	1.060	1.011	1.037
	X/Y	1.023	0.995	1.076
Q3		1.047	1.004	1.052
Q4	R/P	0.926	1.011	0.898
	X/Y	0.931	1.032	0.982
Q4		0.928	1.019	0.932
v'_{av}/u^*_{Ref}		0.831	0.871	0.830

Tabelle 10: Mittelwerte der azimuthalen Turbulenzintensitäten in den einzelnen Unterkanälen und Teilen der Unterkanäle bezogen auf den Mittelwert in allen vier Quadranten

Kanal		Meßebeene		
		E3	E4	E5
Q1	R/P	0.977	0.921	0.967
	X/Y	0.968	0.968	0.930
Q1		0.973	0.940	0.952
Q2	R/P	1.020	1.007	1.068
	X/Y	1.043	1.054	1.075
Q2		1.029	1.026	1.071
Q3	R/P	1.058	1.001	1.025
	X/Y	1.046	1.030	1.086
Q3		1.054	1.013	1.049
Q4	R/P	0.946	1.013	0.897
	X/Y	0.941	1.035	0.973
Q4		0.944	1.022	0.927
w'_{av}/u^*_{Ref}		1.016	1.069	1.005

Tabelle 11: Mittelwerte der kinetischen Turbulenzenergie in den einzelnen Unterkanälen und Teilen der Unterkanäle bezogen auf den Mittelwert in allen vier Quadranten

Kanal		Meßebeene		
		E3	E4	E5
Q1	R/P	0.942	0.882	0.919
	X/Y	0.975	0.973	0.925
Q1		0.955	0.918	0.921
Q2	R/P	1.005	0.989	1.091
	X/Y	1.074	1.066	1.097
Q2		1.033	1.020	1.093
Q3	R/P	1.028	0.997	1.025
	X/Y	1.106	1.123	1.159
Q3		1.059	1.047	1.078
Q4	R/P	0.927	0.983	0.860
	X/Y	0.993	1.065	0.978
Q4		0.953	1.015	0.907
k'_{av}/u^{*2}_{Ref}		2.105	2.262	1.983



KJK

Abb. 1 Versuchsanlage (schematisch)

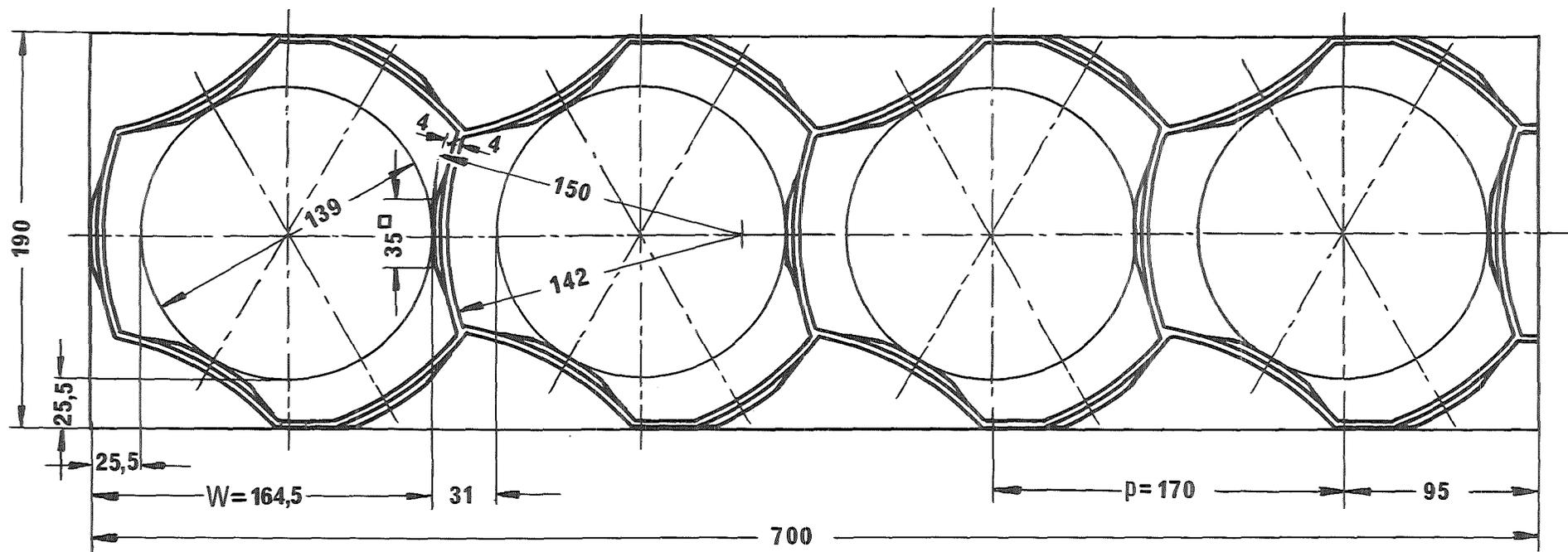


Abb. 2 Querschnitt der Abstandshaltergeometrie

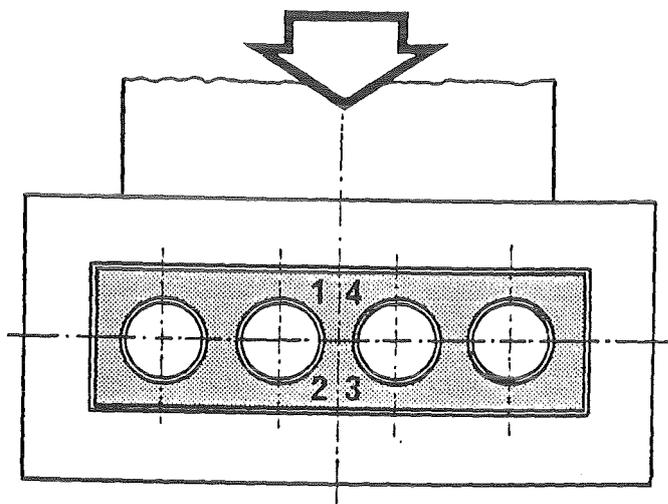


Abb. 3 Aufsicht auf den Strömungskanal mit den Eintrittsbedingungen

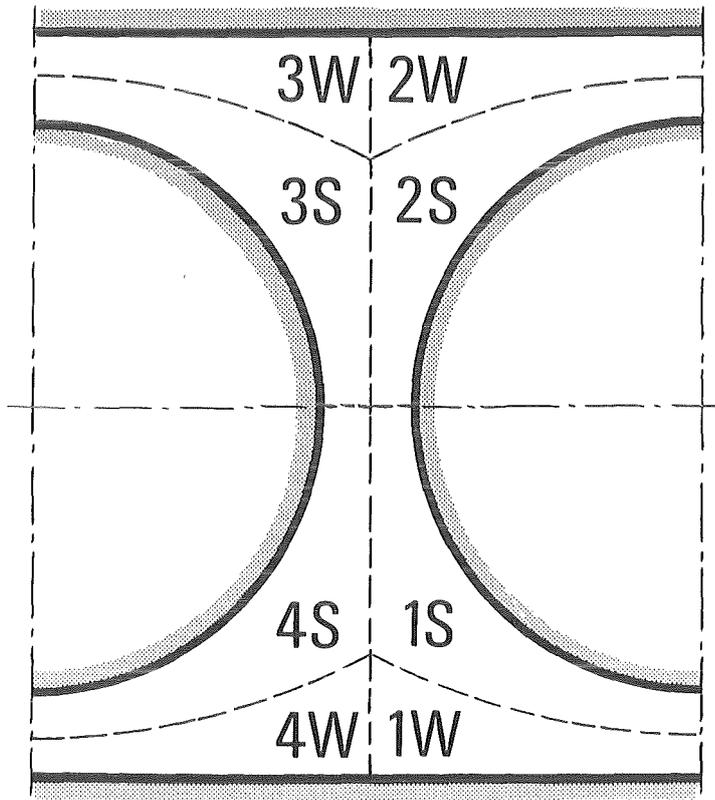
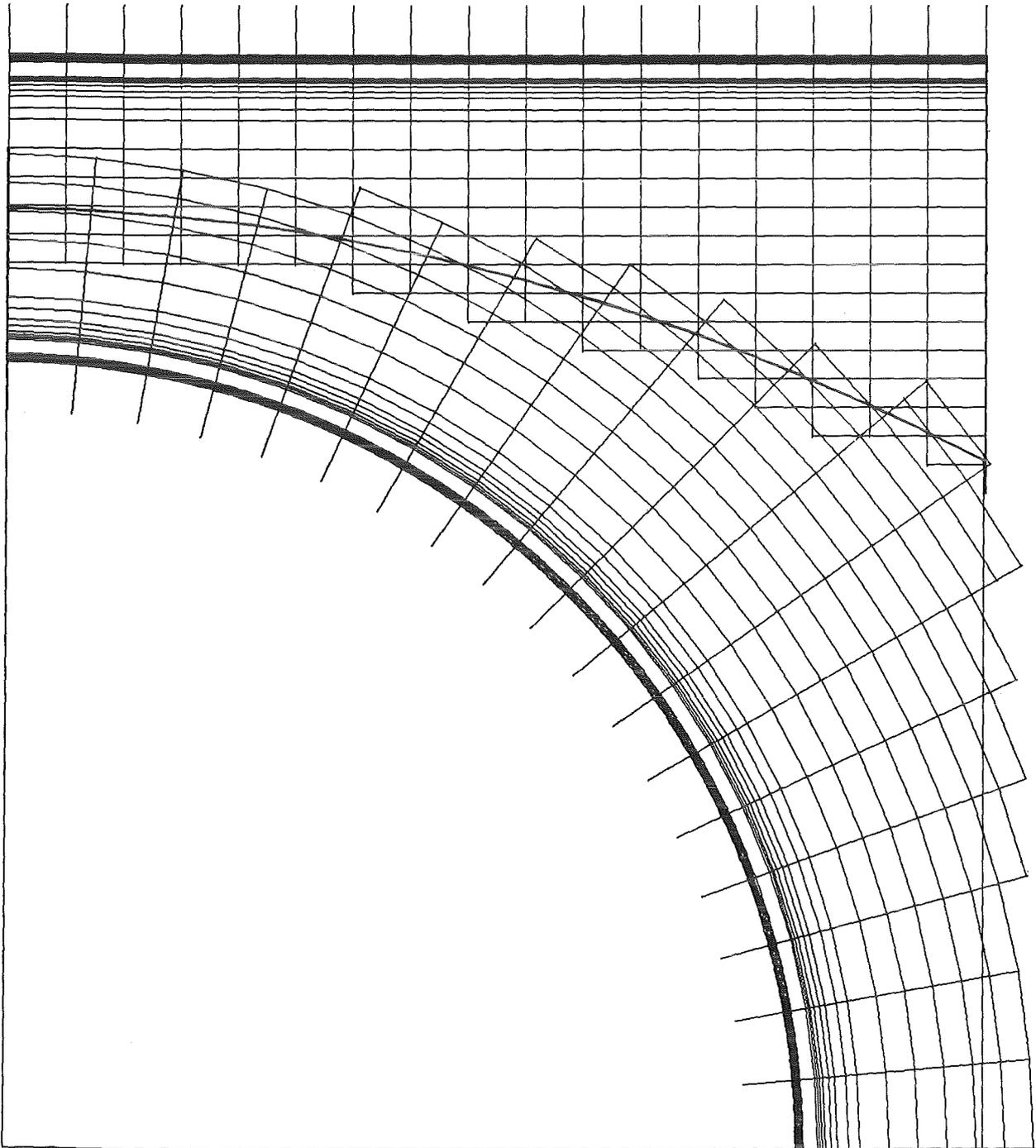


Abb. 4 Teilkanäle des untersuchten Strömungsquerschnitts



KJK

Abb. 5 Verteilung der Meßpositionen in einem Quadranten

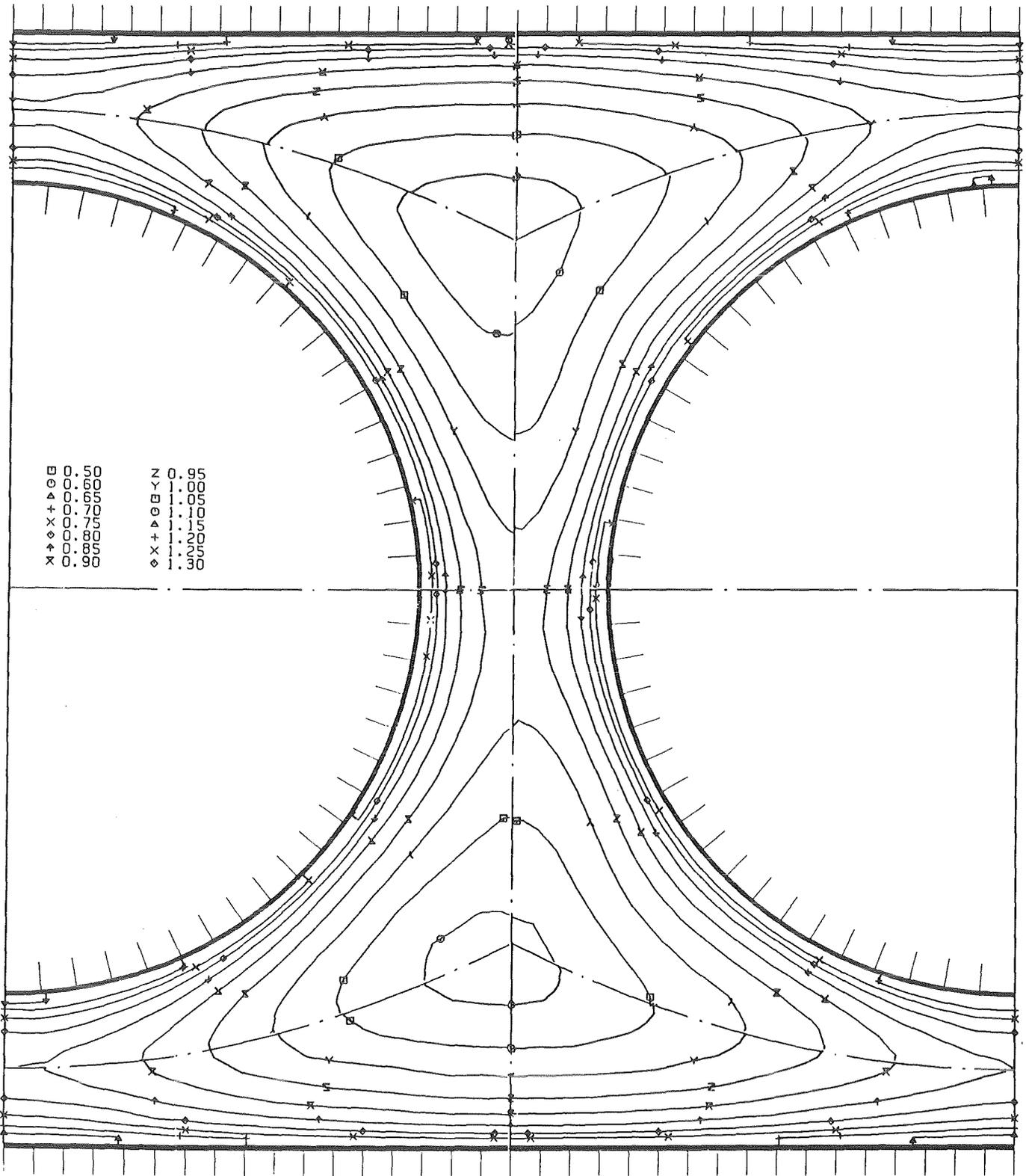


Abb. 6 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit
in der Ebene E3

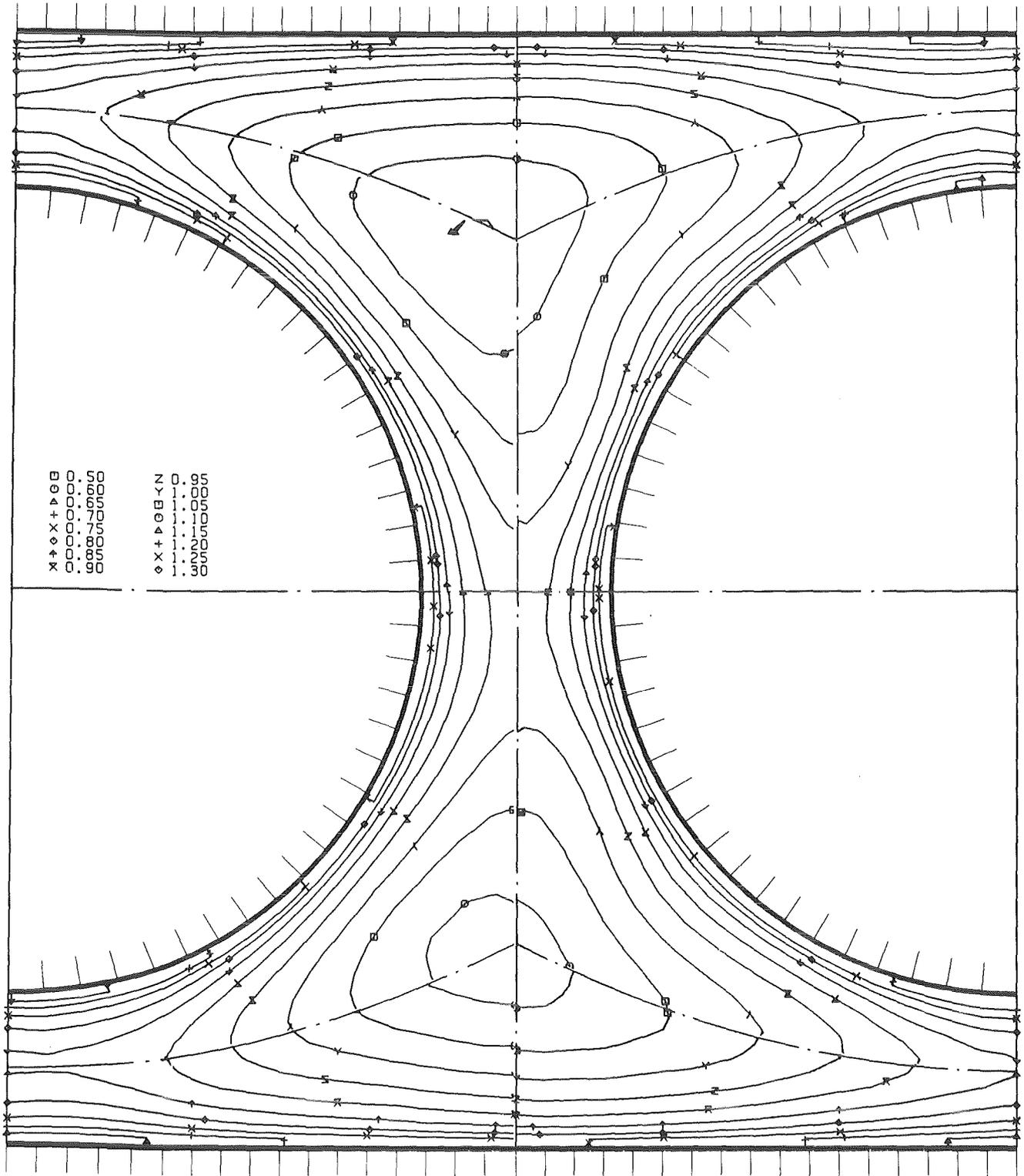


Abb. 7 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit in der Ebene E4

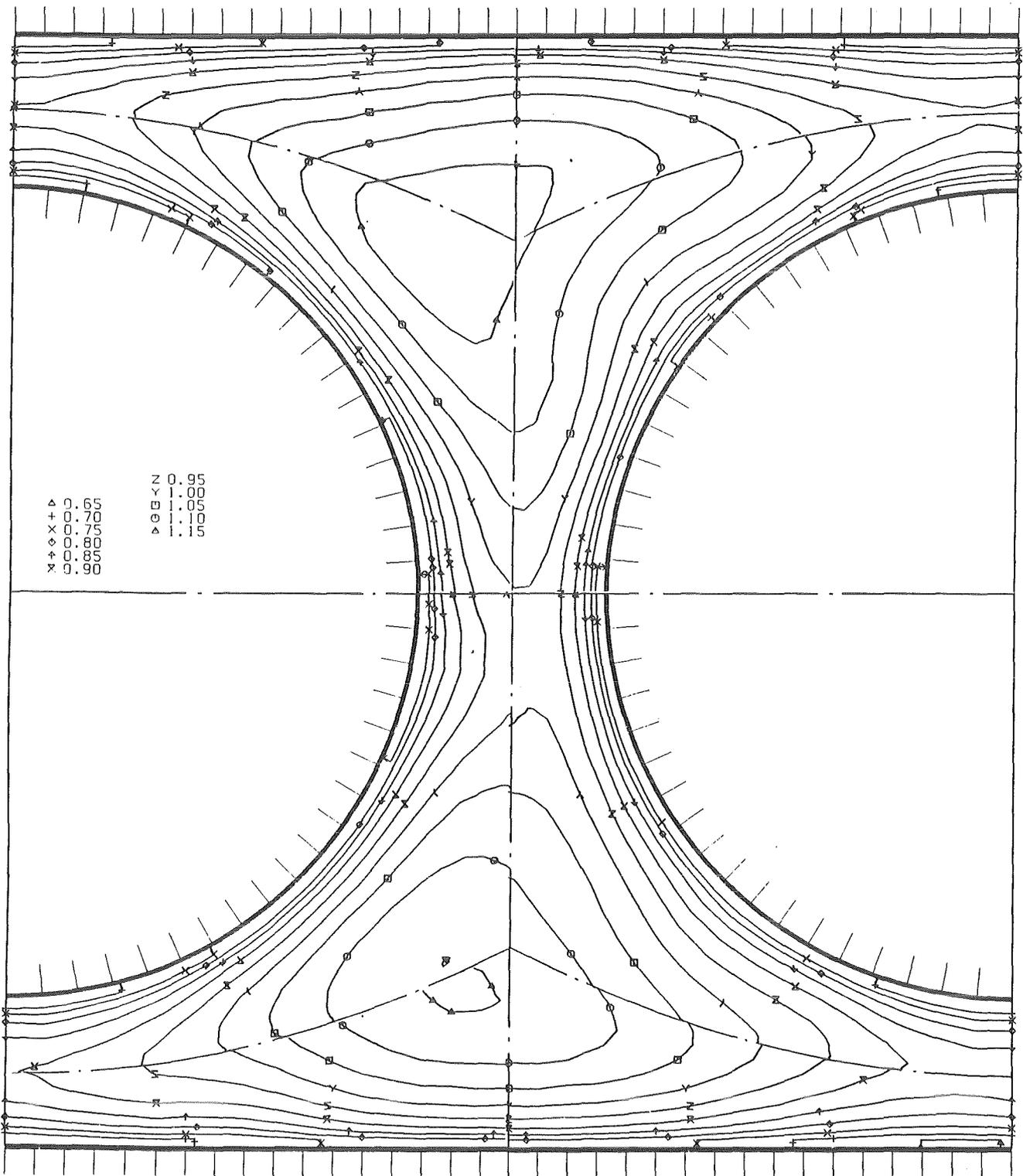


Abb. 8 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit
in der Ebene E5

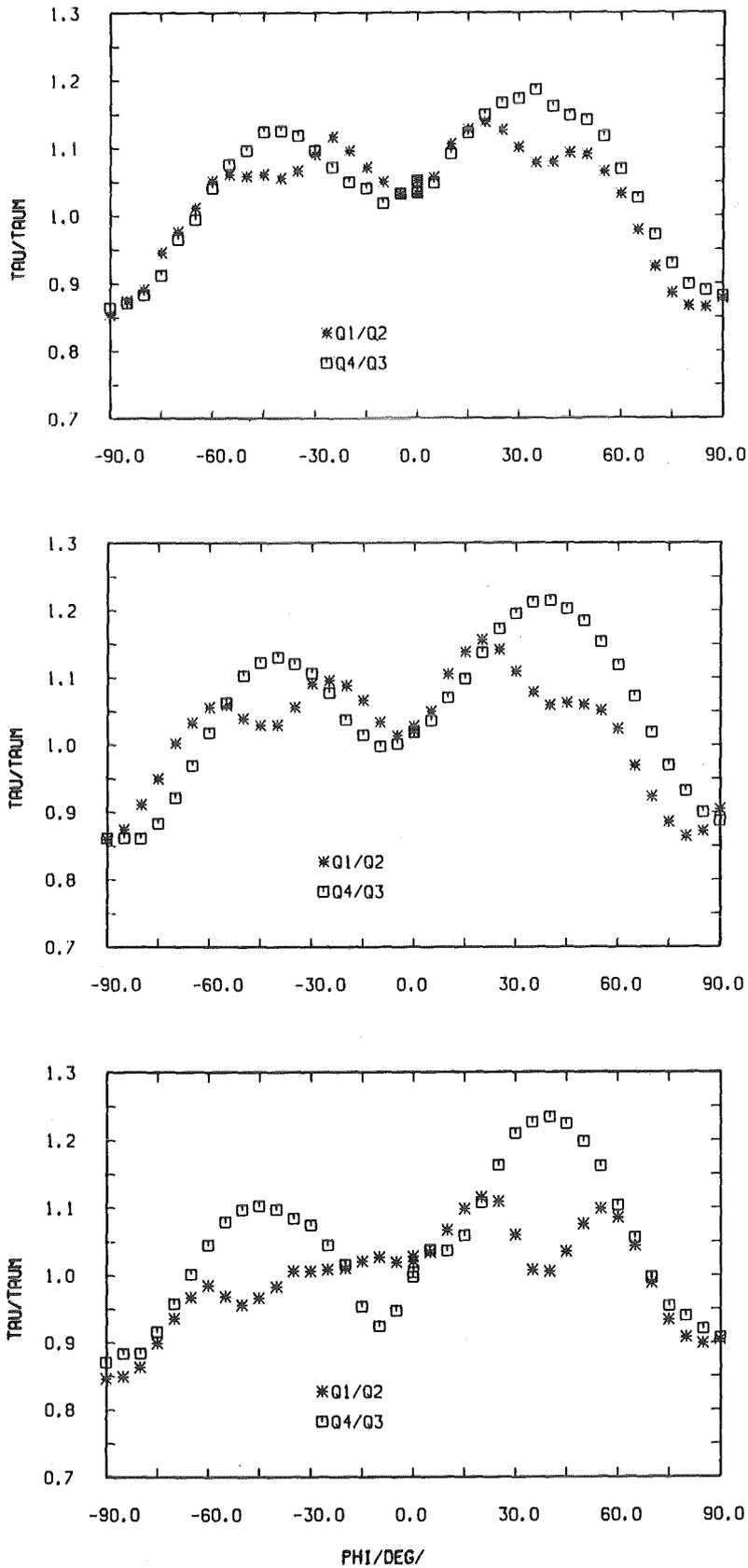


Abb. 9 Wandschubspannungsverteilungen bezogen auf den Mittelwert aus allen vier Quadranten (r/ϕ)

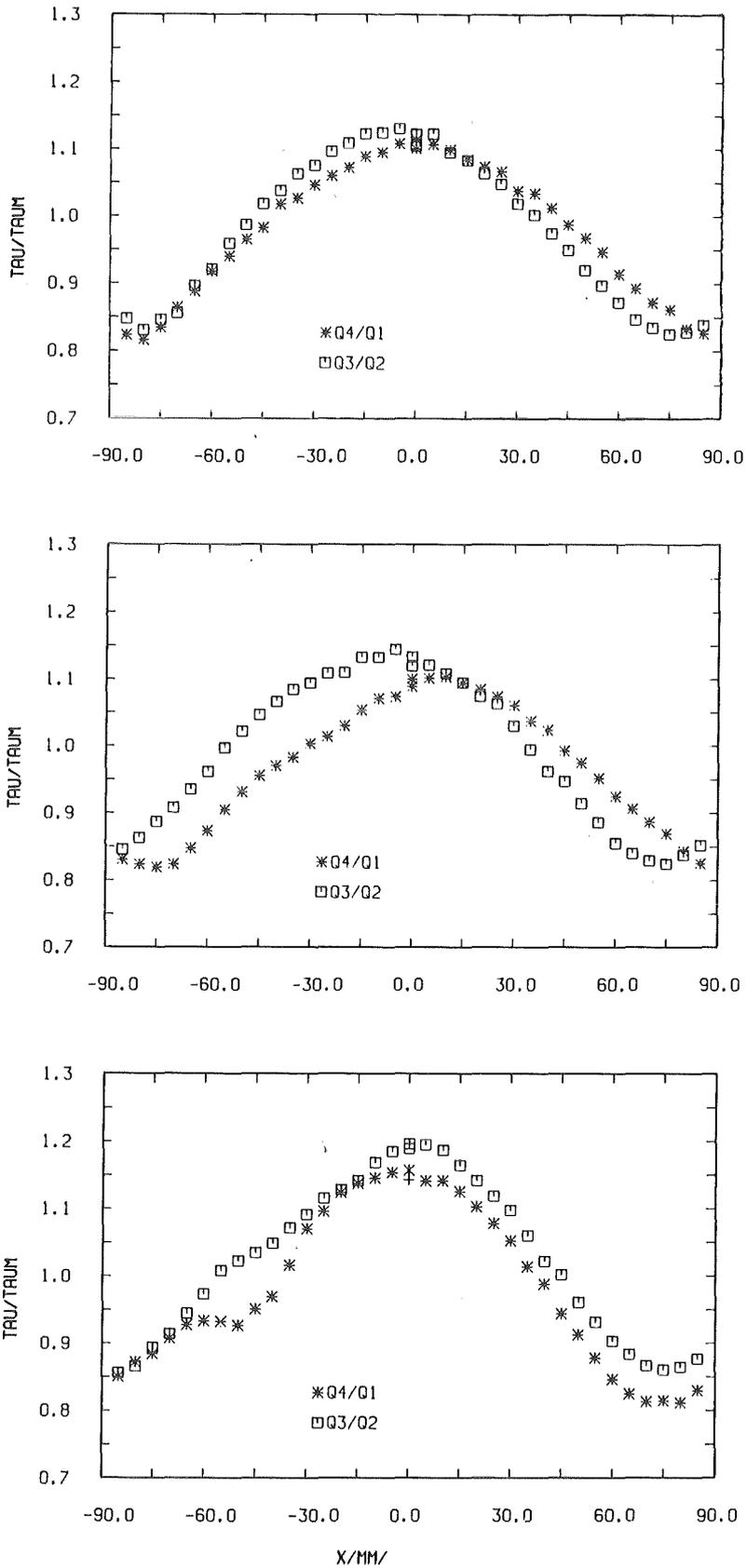


Abb.10 Wandschubspannungsverteilungen bezogen auf den Mittelwert aus allen vier Quadranten (x/y)

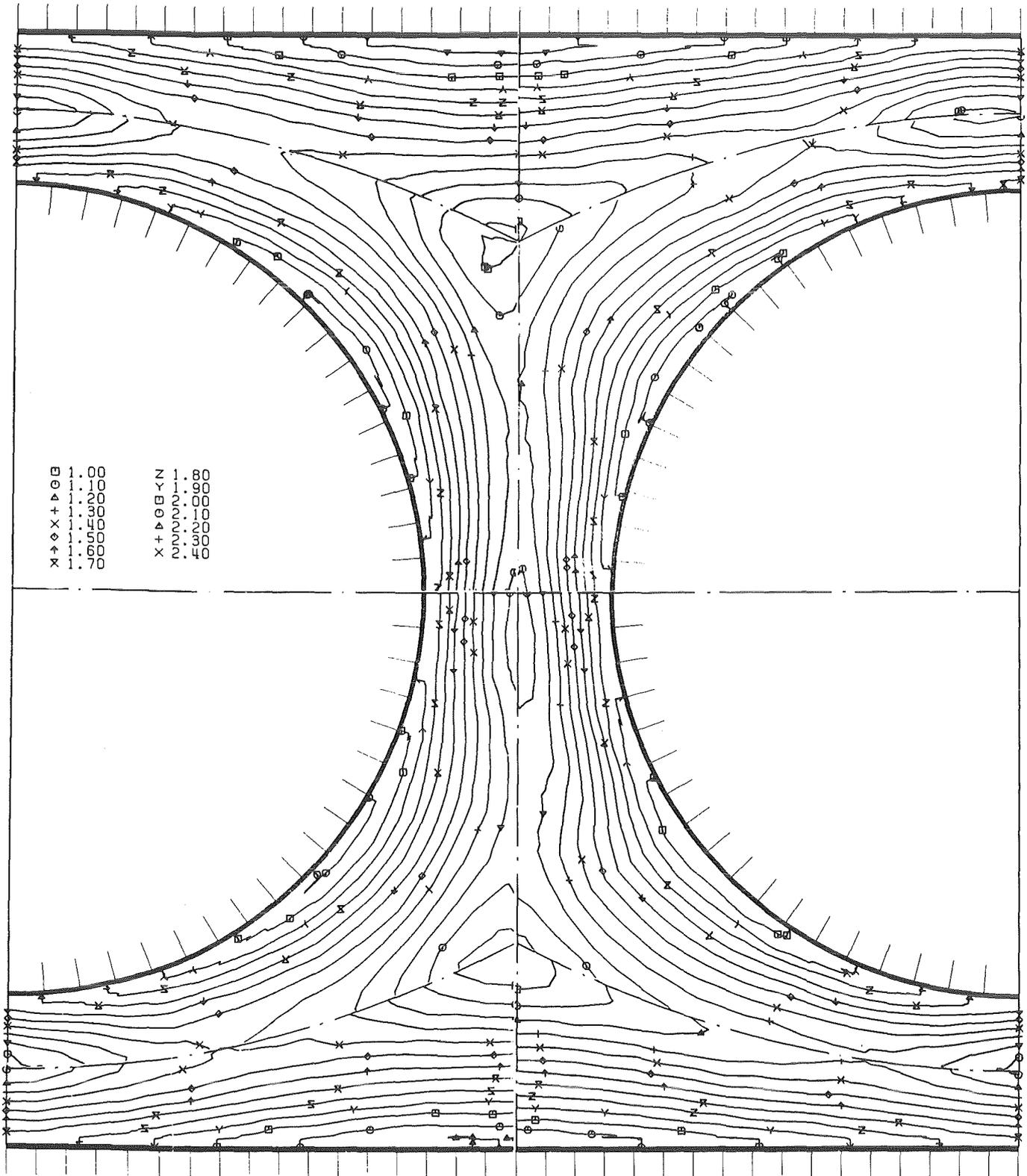


Abb.11 Axiale Turbulenzintensität in der Ebene E3

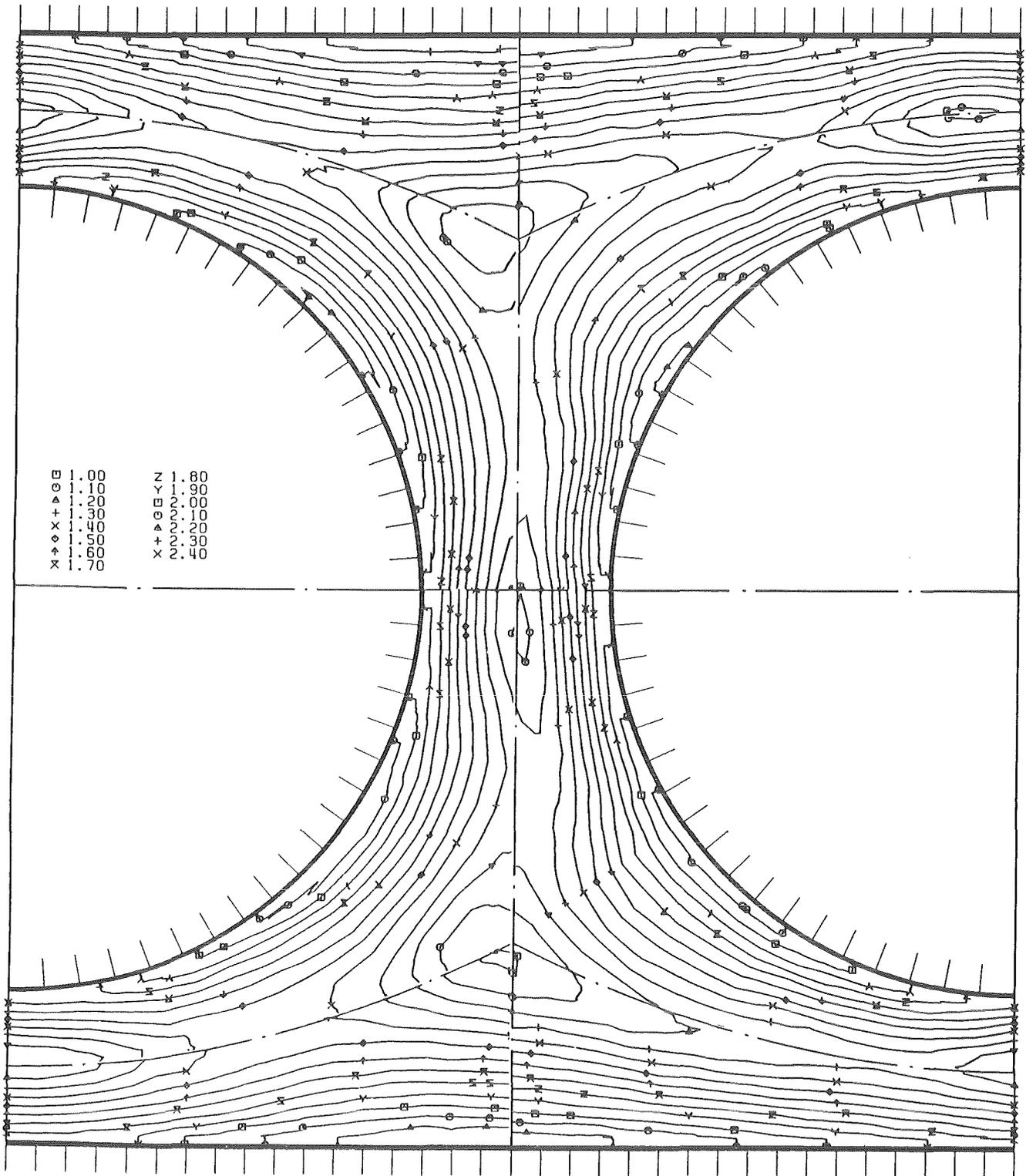
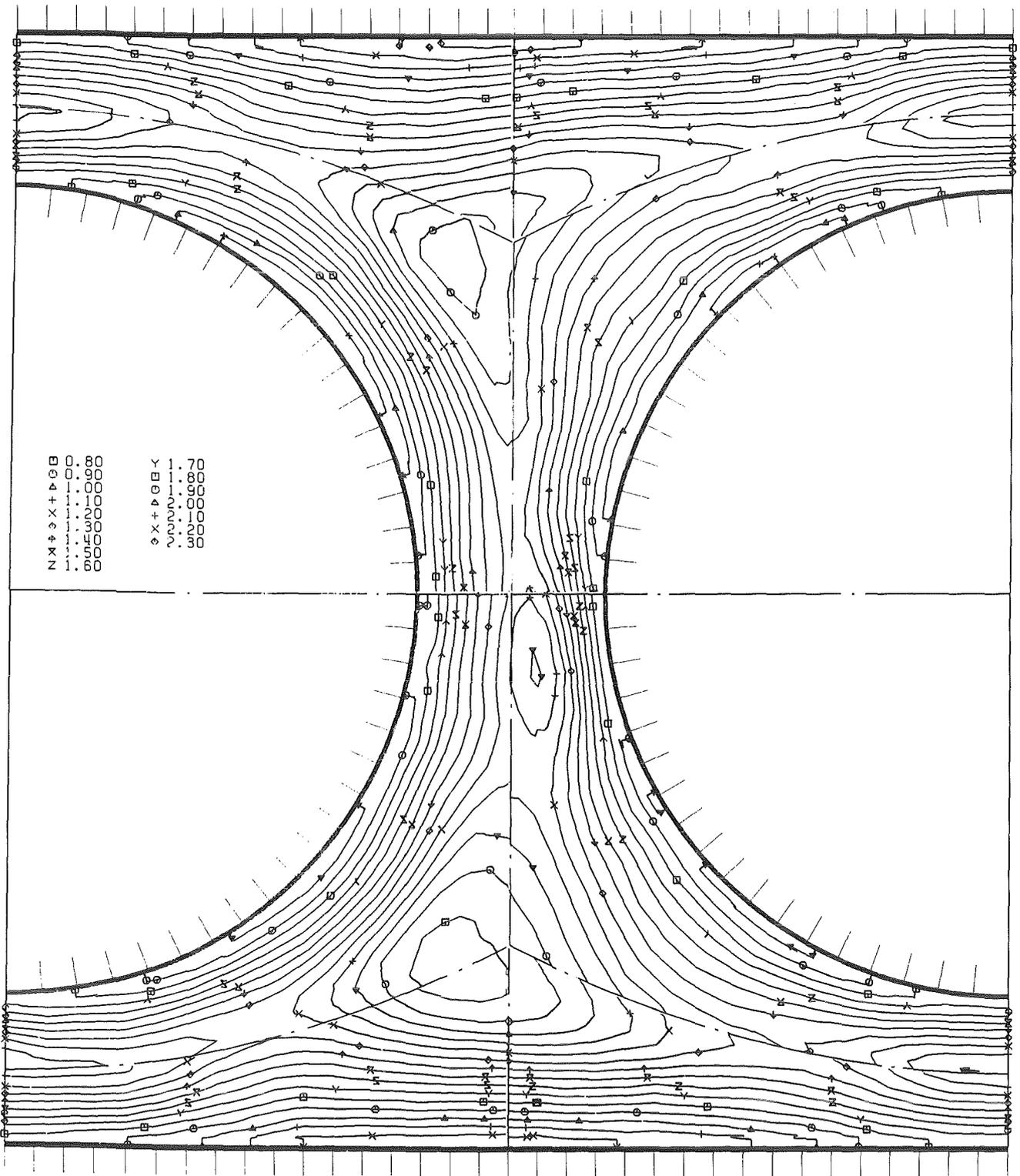
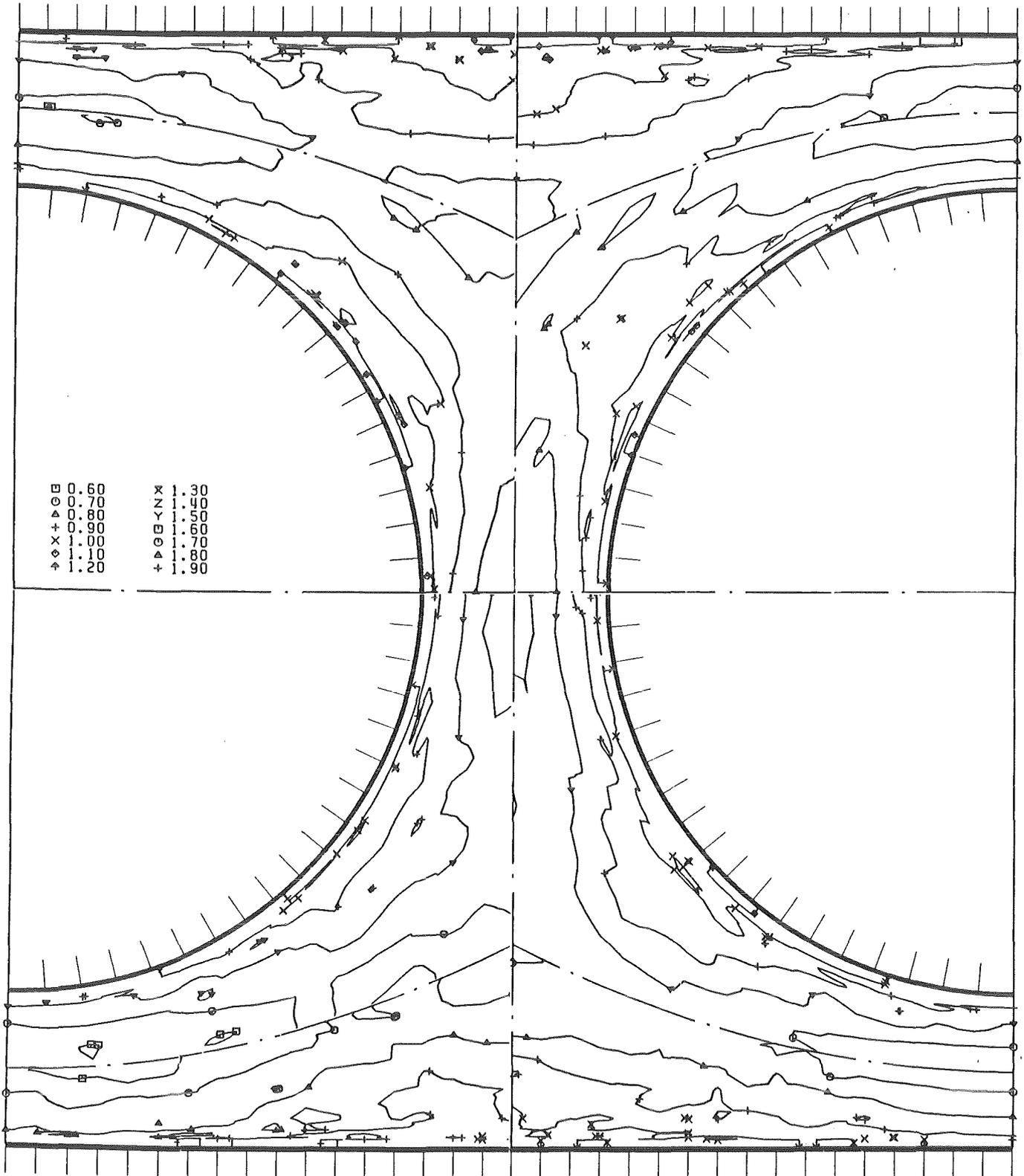


Abb.12 Axiale Turbulenzintensität in der Ebene E4



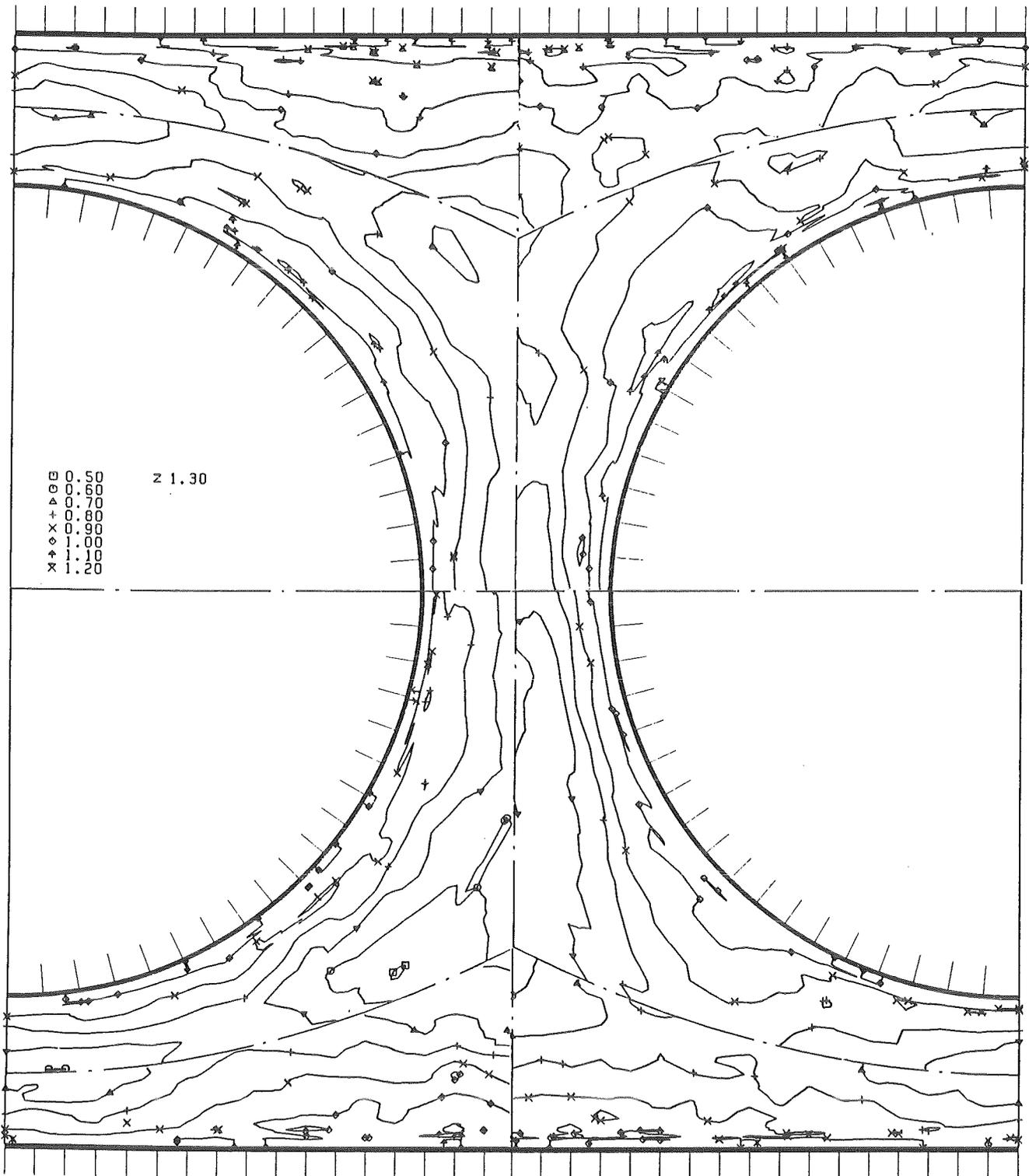
KfK

Abb.13 Axiale Turbulenzintensität in der Ebene E5



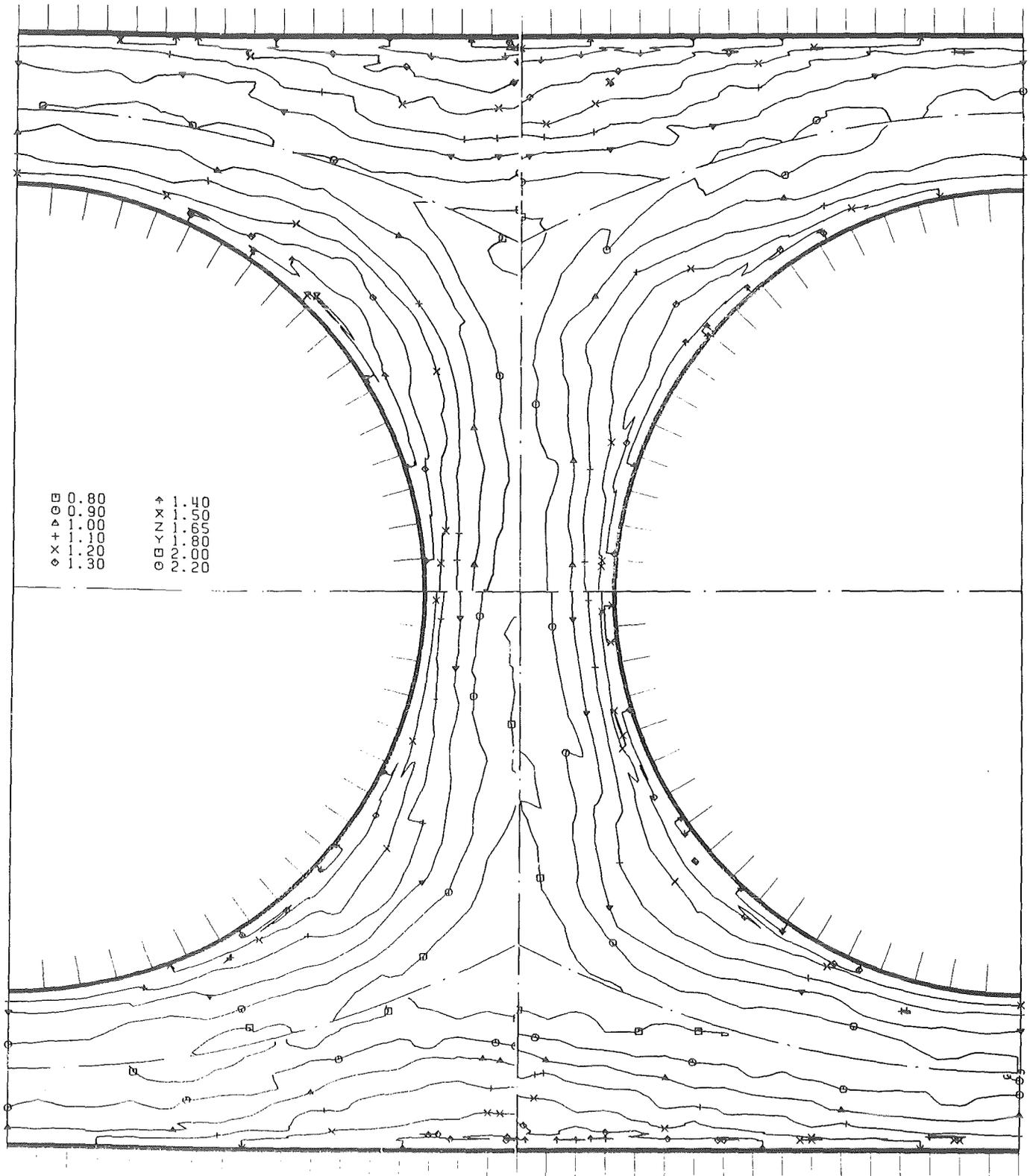
KTK

Abb.14 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand in der Ebene E3



KfK

Abb.16 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand in der Ebene E5



KfK

Abb. 17 Turbulenzintensität parallel zur Wand in der Ebene E3

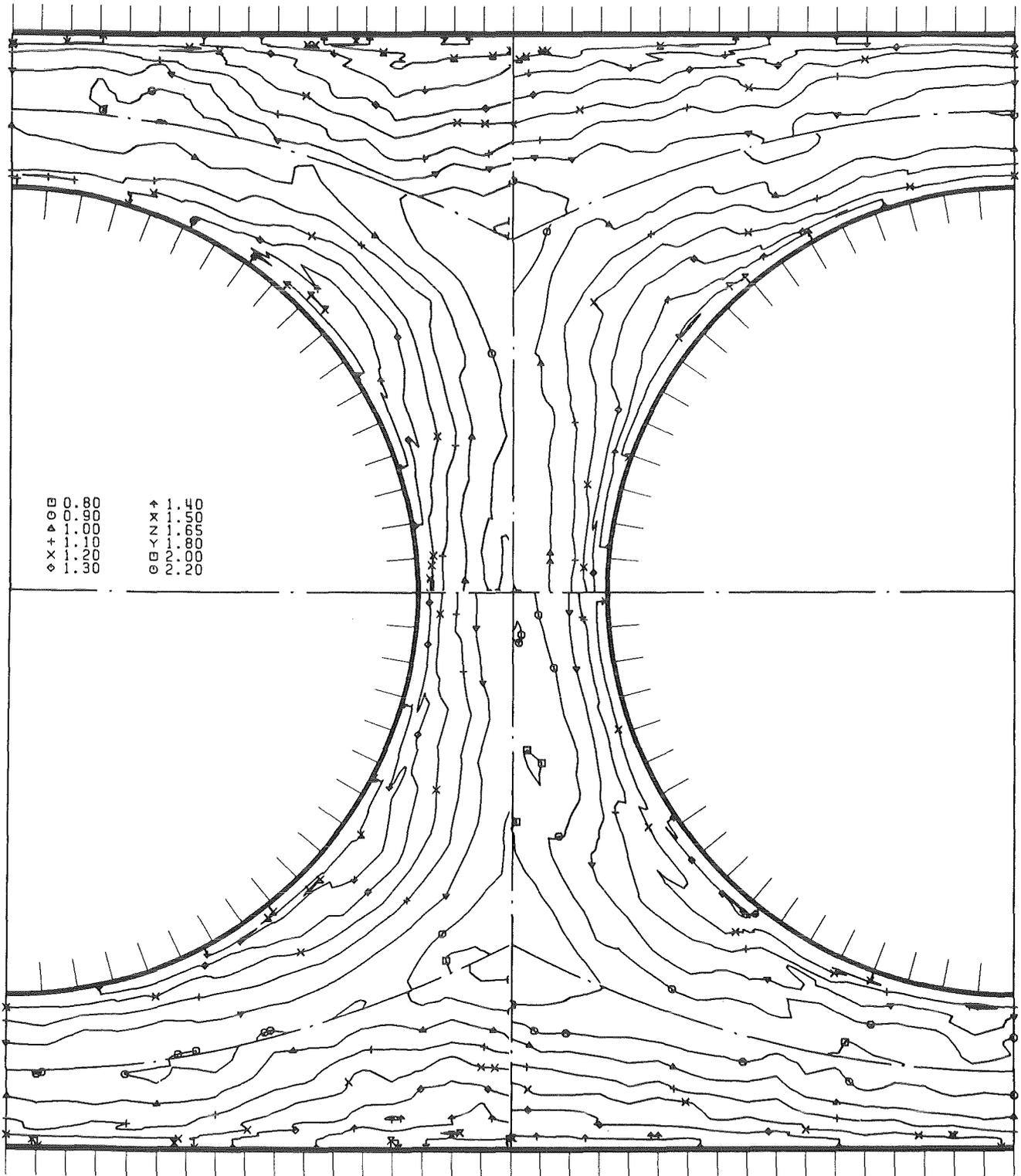


Abb.18 Turbulenzintensität parallel zur Wand in der Ebene E4

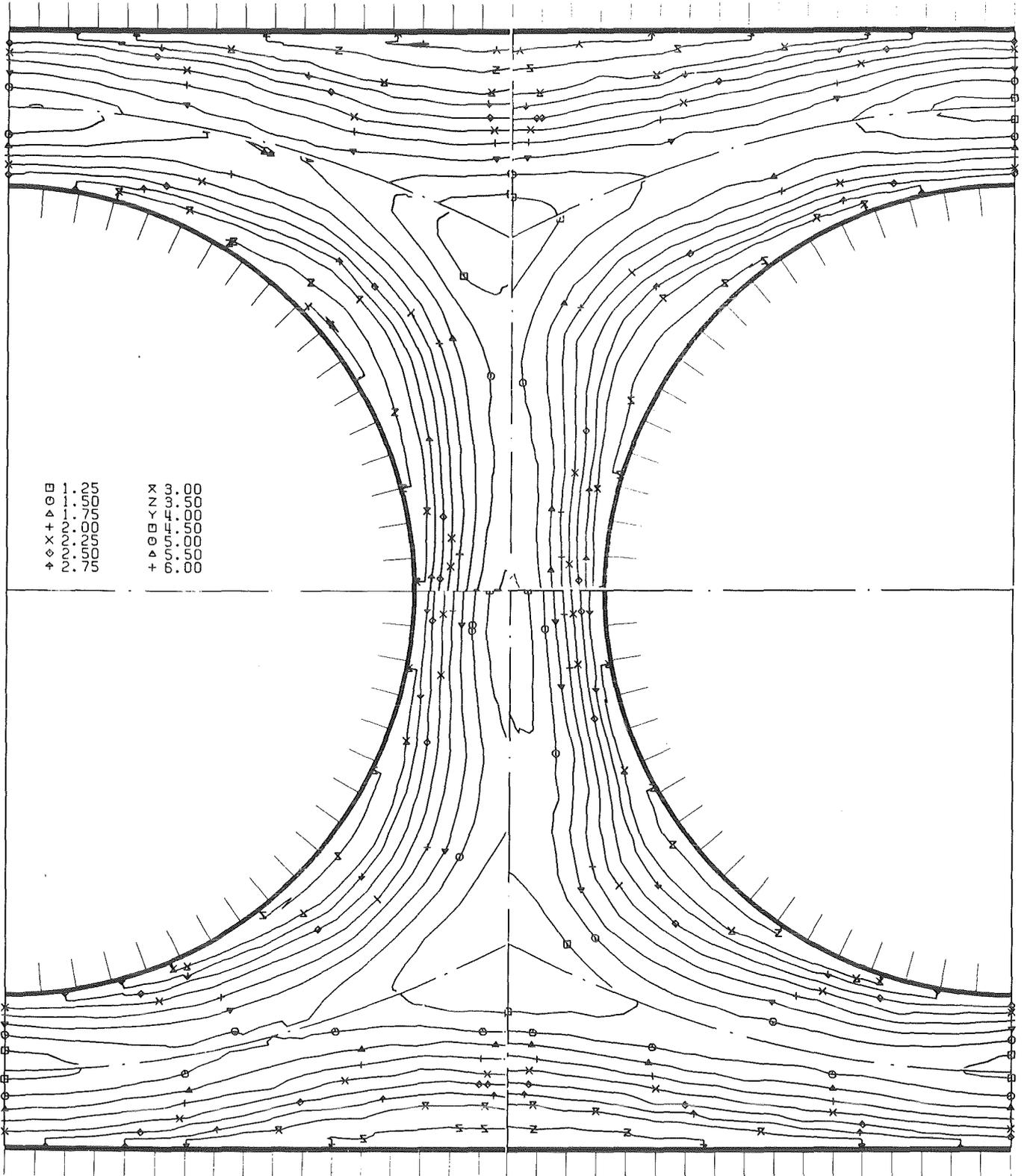


Abb.20 Kinetische Energie der Turbulenz in der Ebene E3

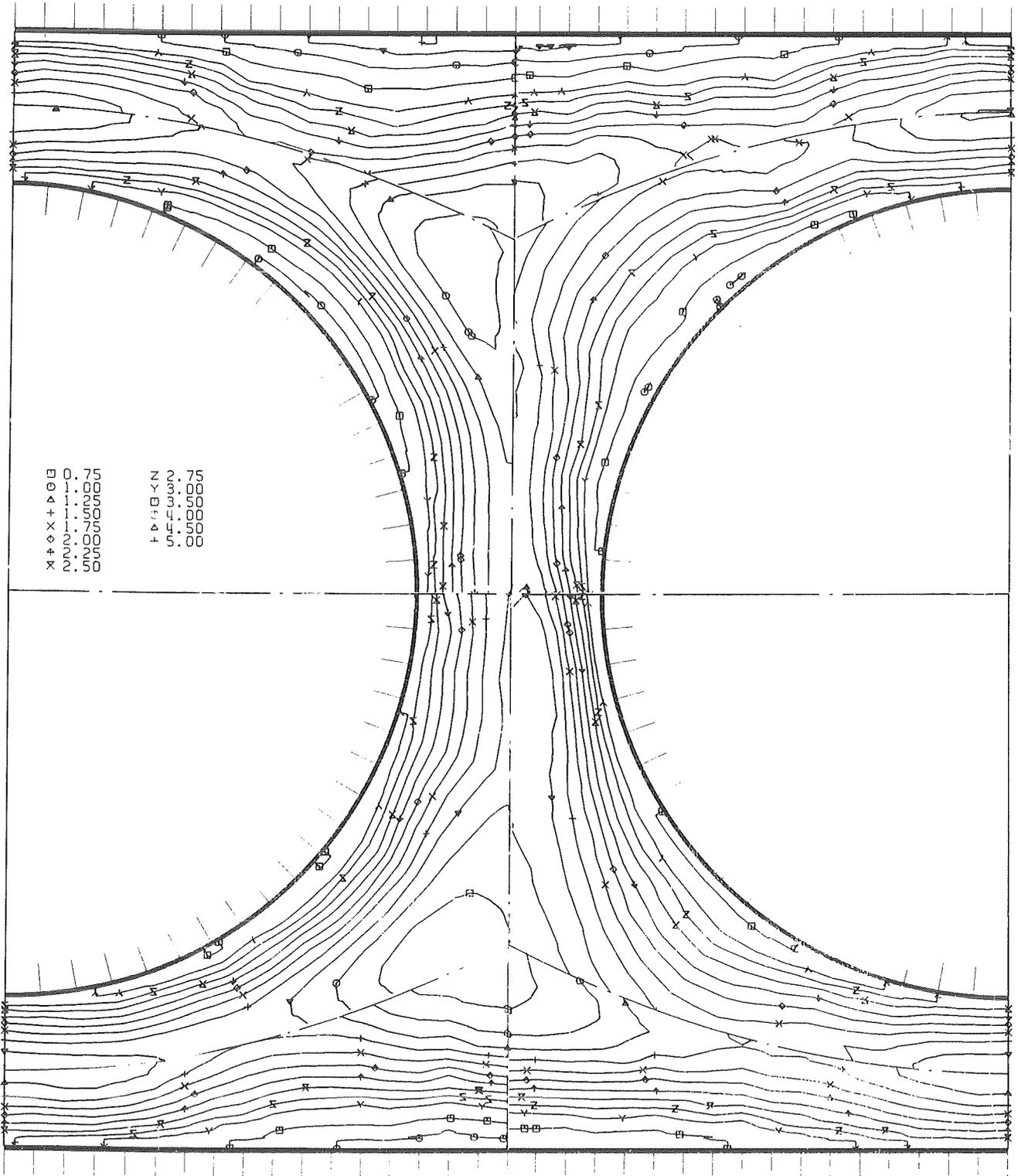
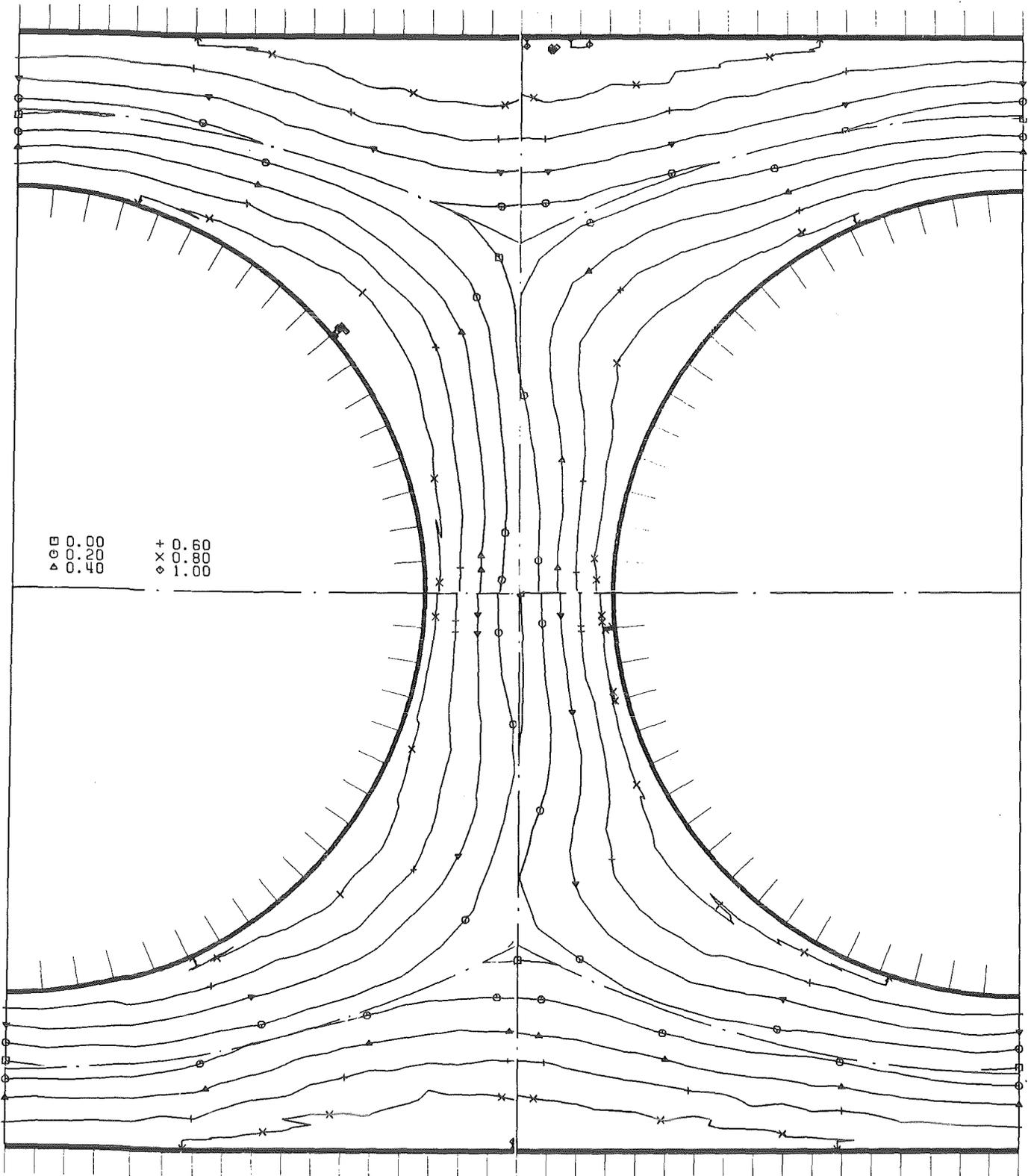
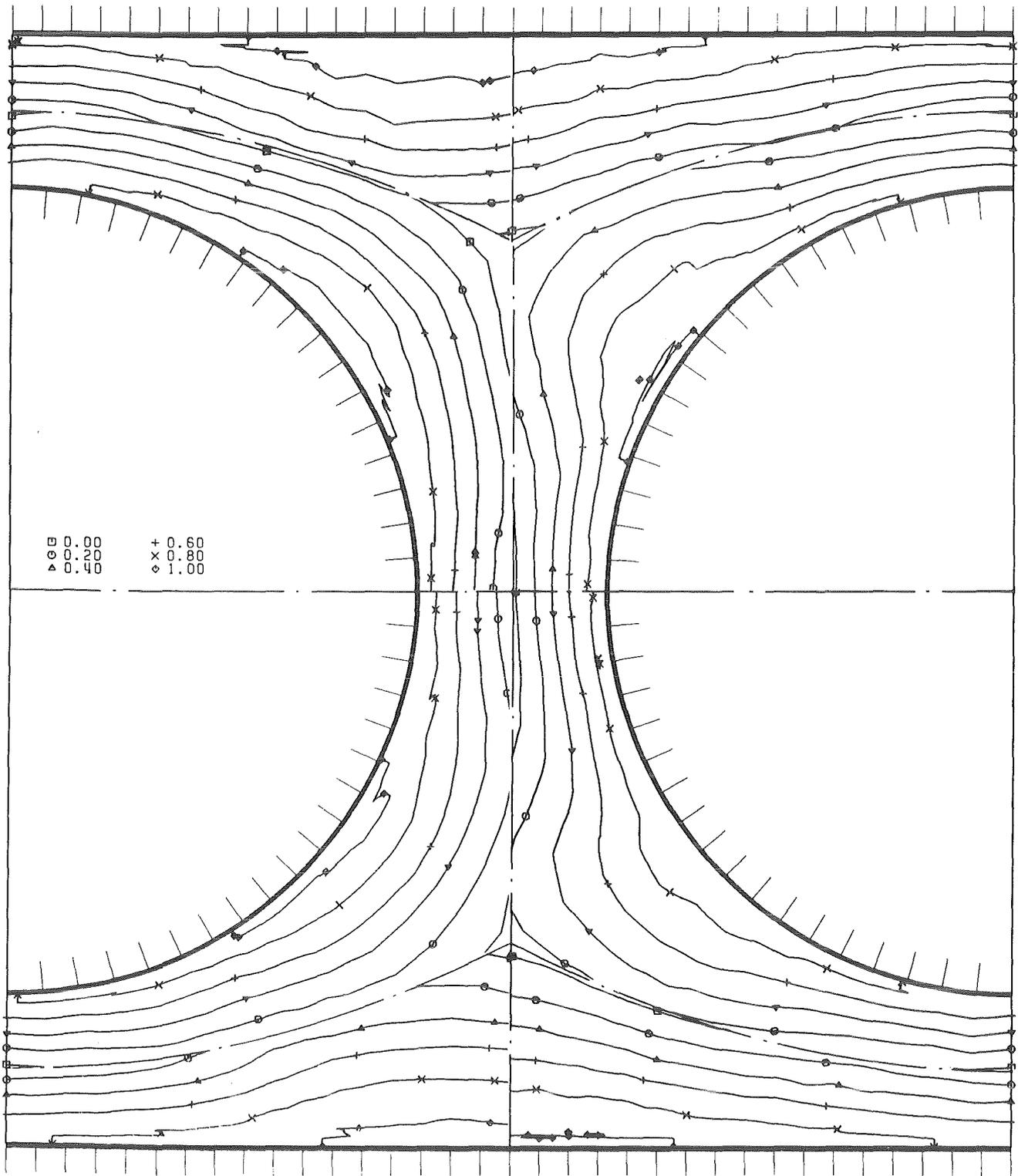


Abb.22 Kinetische Energie der Turbulenz in der Ebene E5



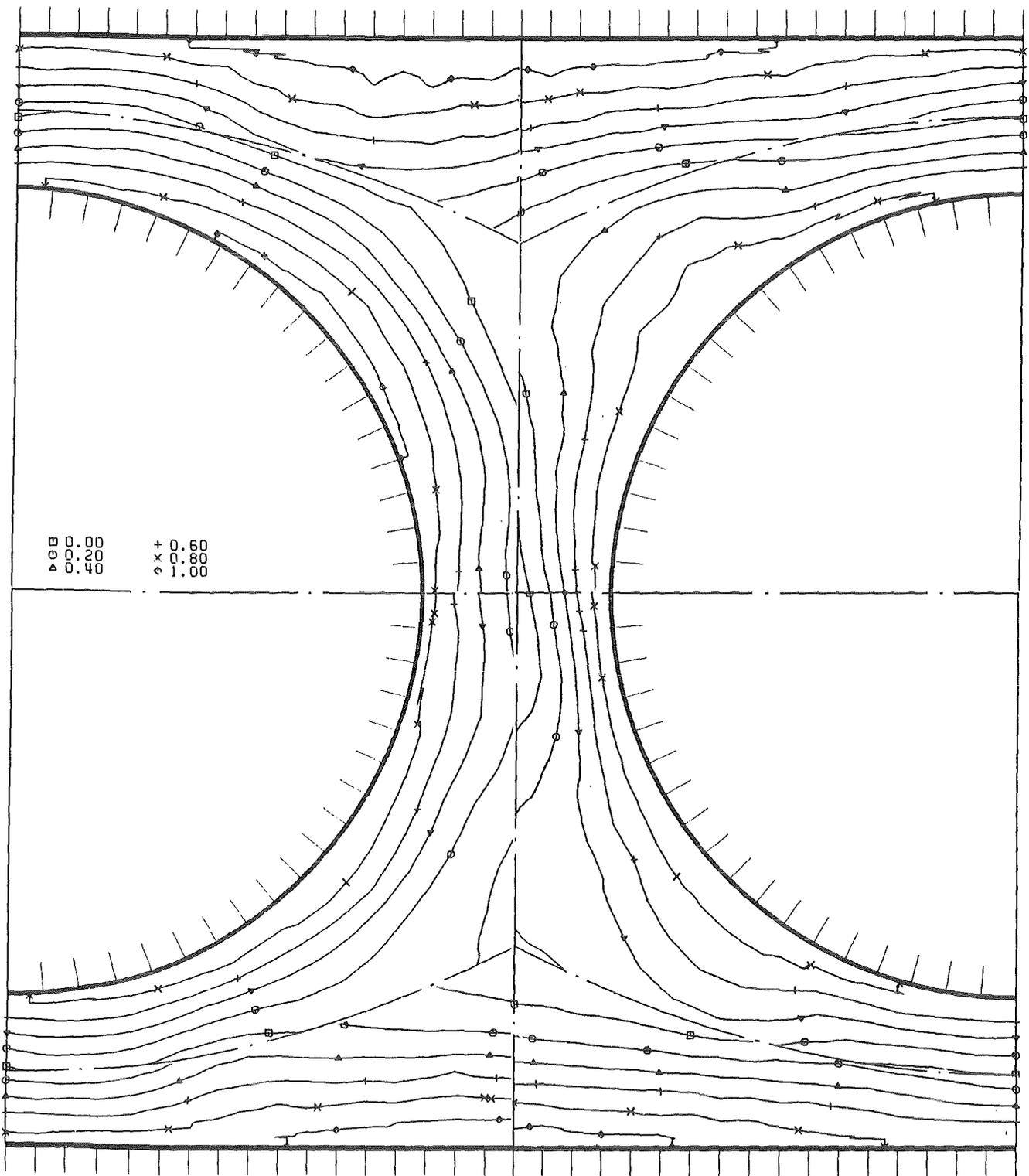
KfK

Abb. 23 Turbulente Schubspannung senkrecht zur Wand in der Ebene E3



KfK

Abb.24 Turbulente Schubspannung senkrecht zur Wand in der Ebene E4



KfK

Abb.25 Turbulente Schubspannung senkrecht zur Wand in der Ebene E5

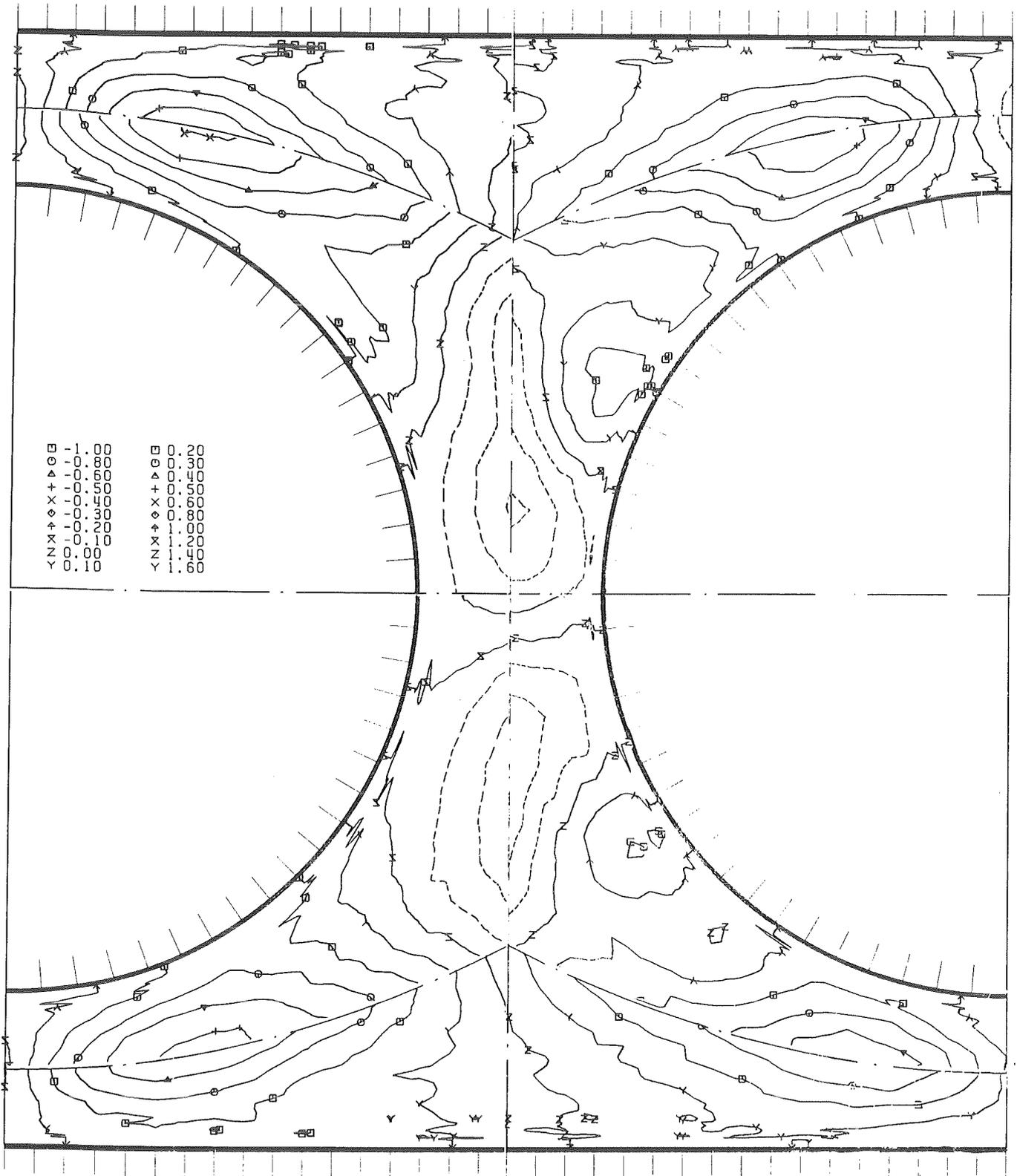
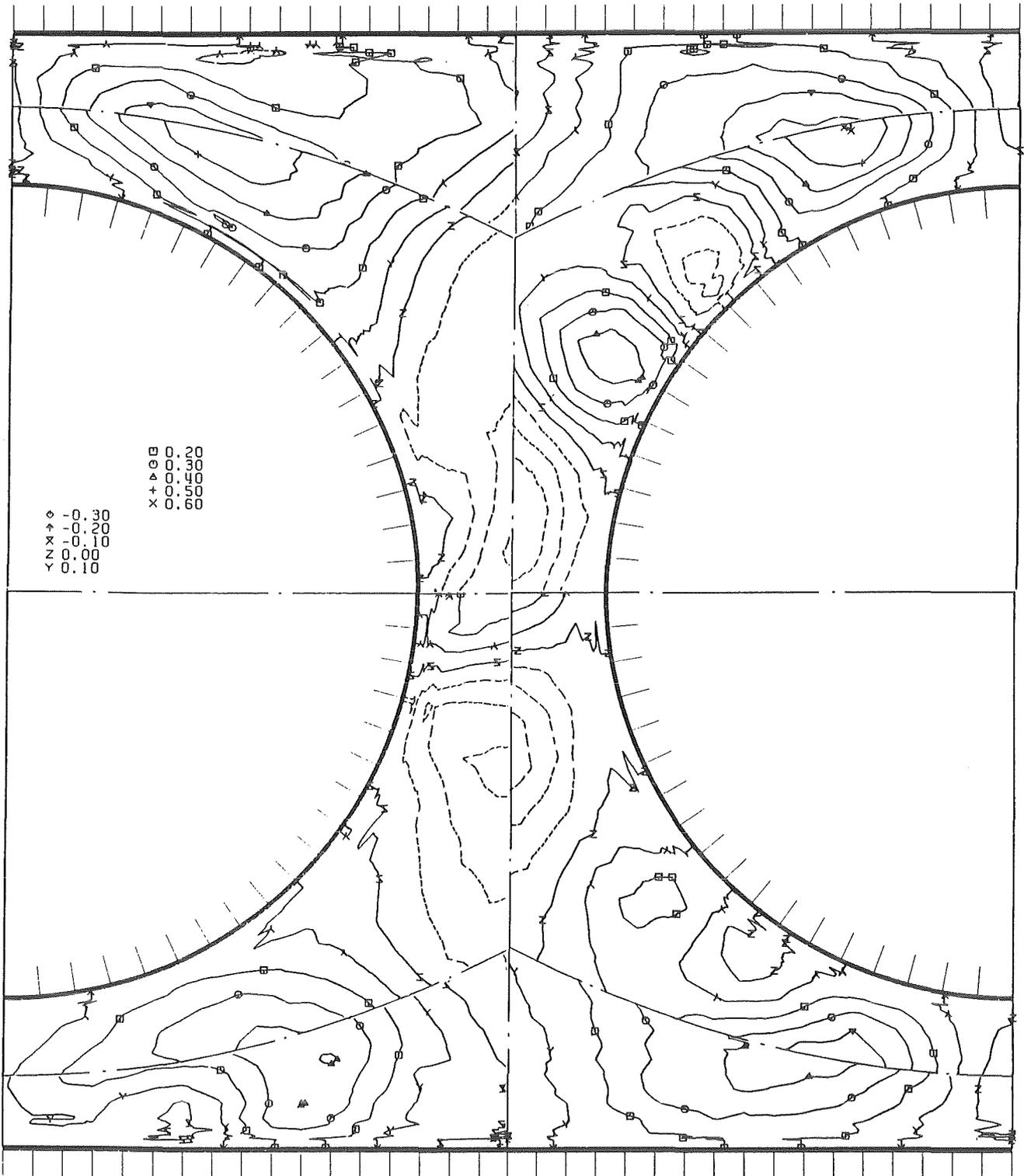


Abb.26 Turbulente Schubspannung parallel zur Wand in der Ebene E3



KfK

Abb.28 Turbulente Schubspannung parallel zur Wand in der Ebene E5

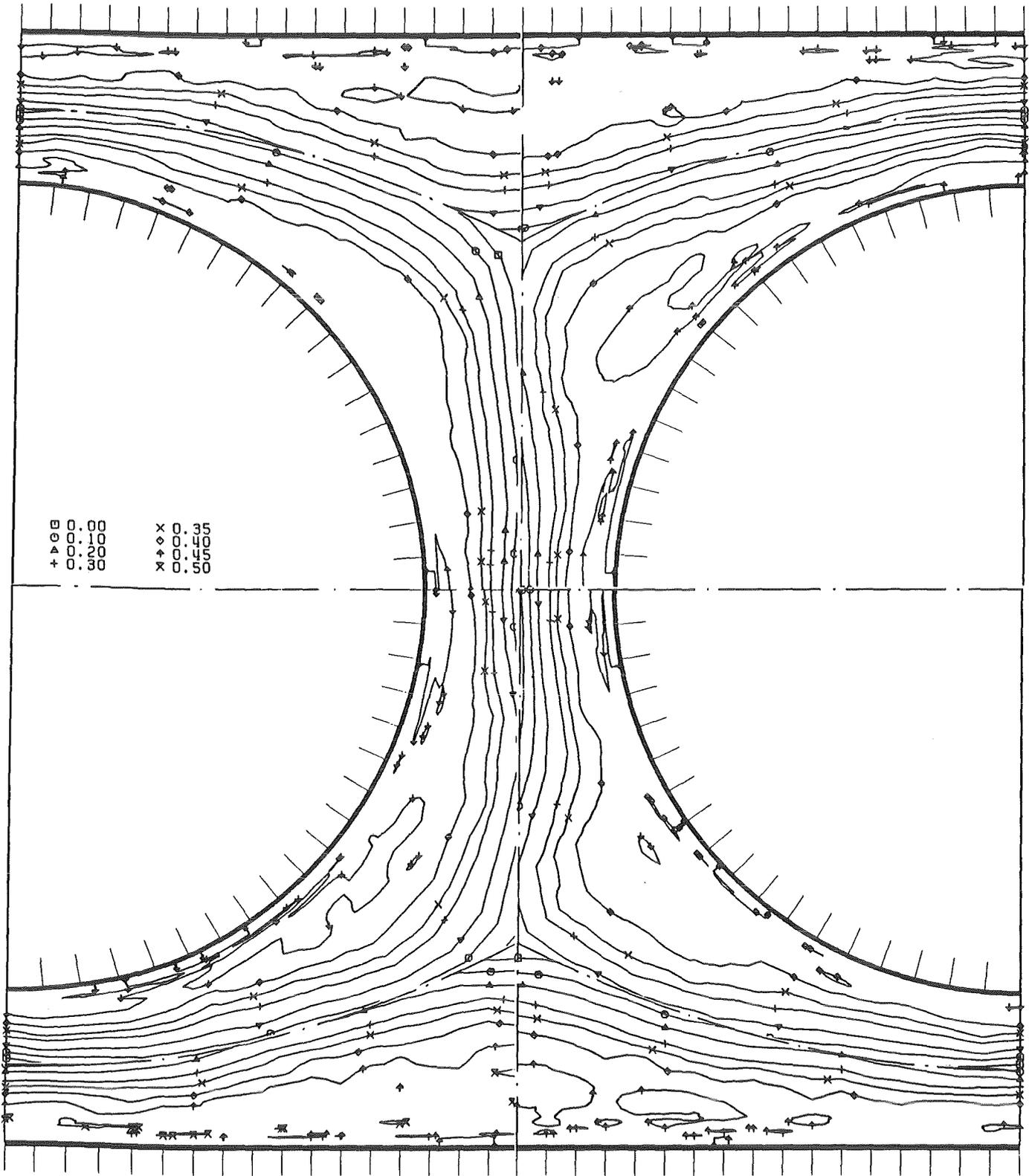
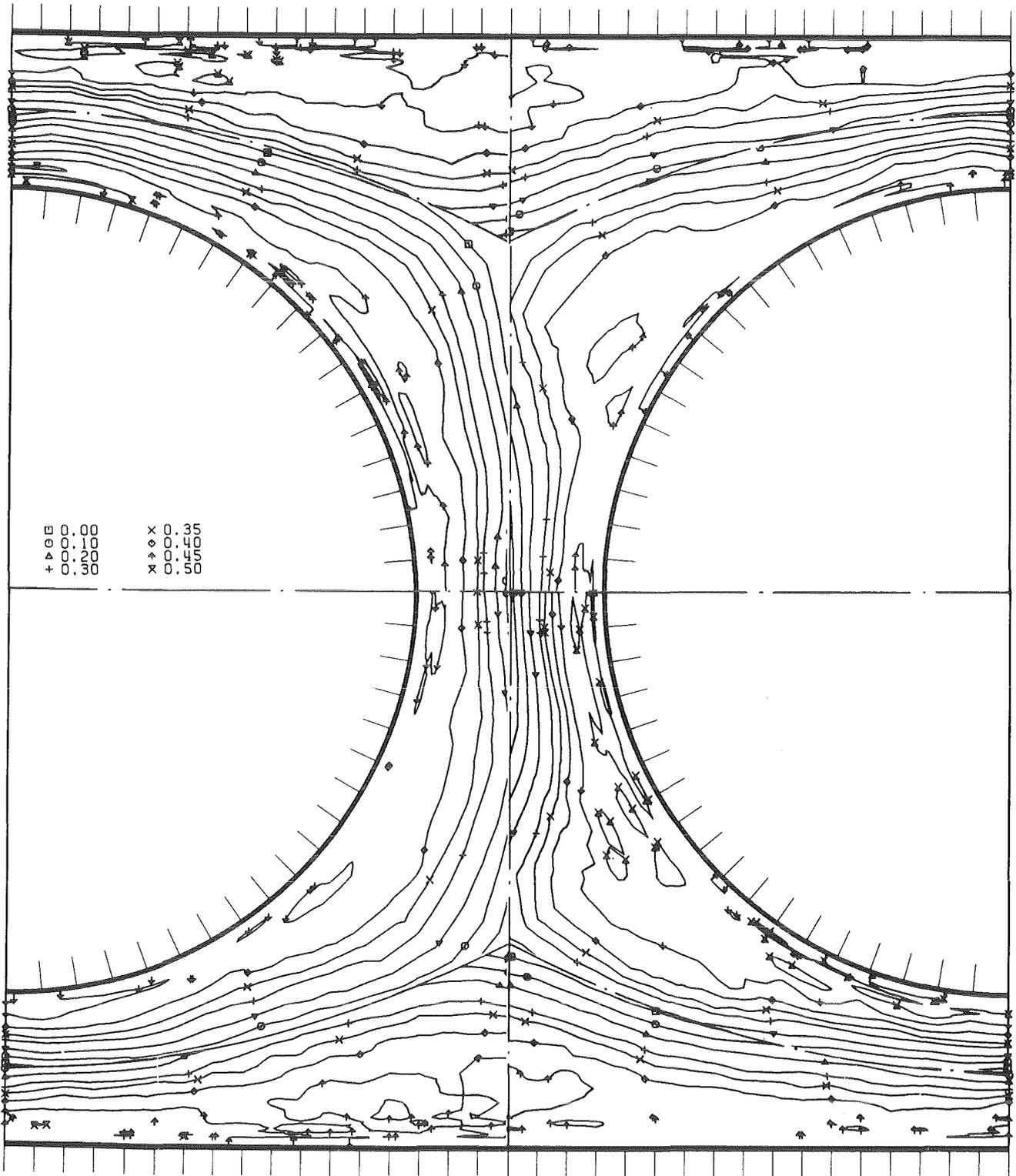


Abb. 29 Korrelationskoeffizient der Schubspannung senkrecht zur Wand in der Ebene E3



KfK

Abb.30 Korrelationskoeffizient der Schubspannung senkrecht zur Wand in der Ebene E4

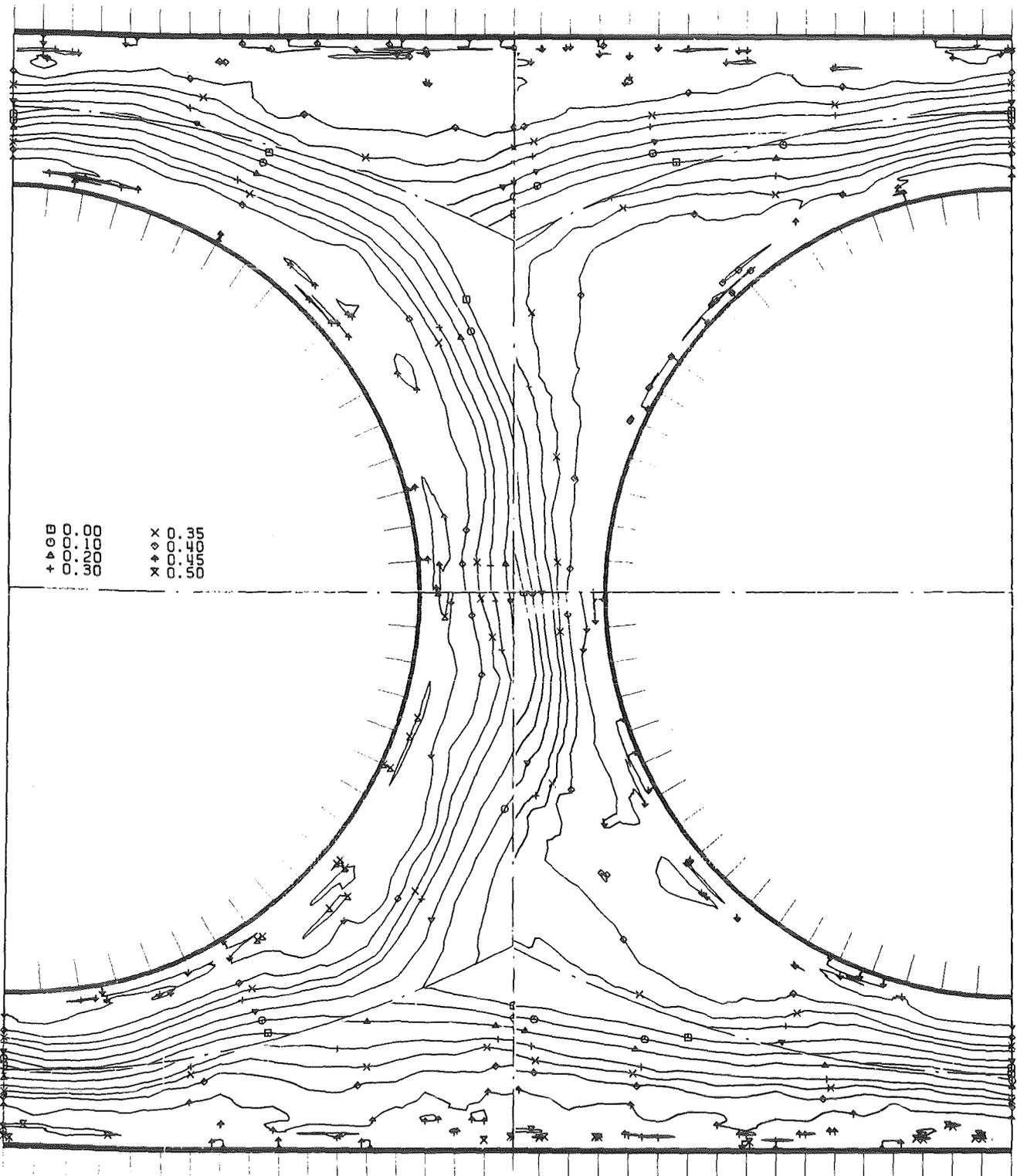


Abb.31 Korrelationskoeffizient der Schubspannung senkrecht zur Wand in der Ebene E5

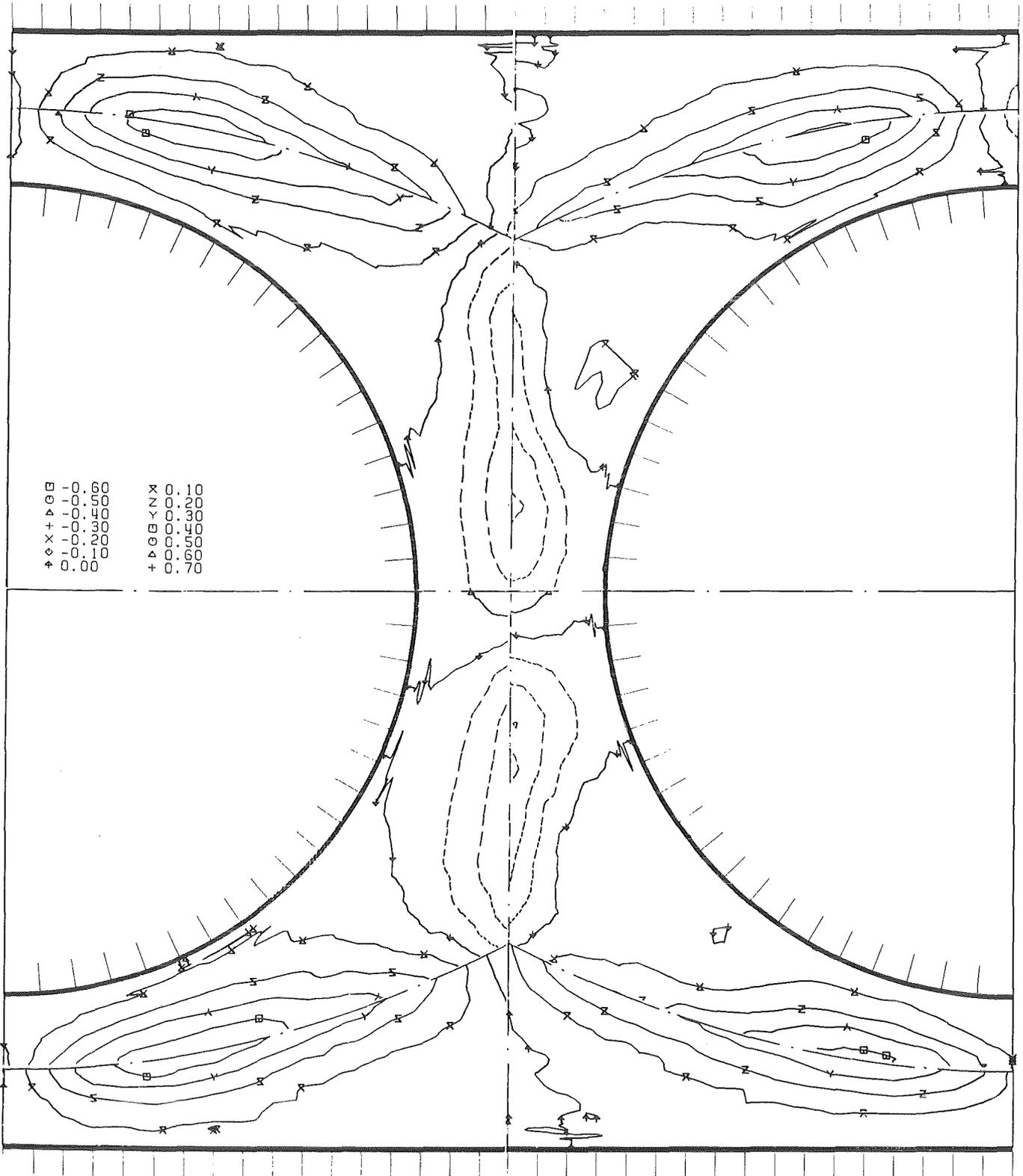
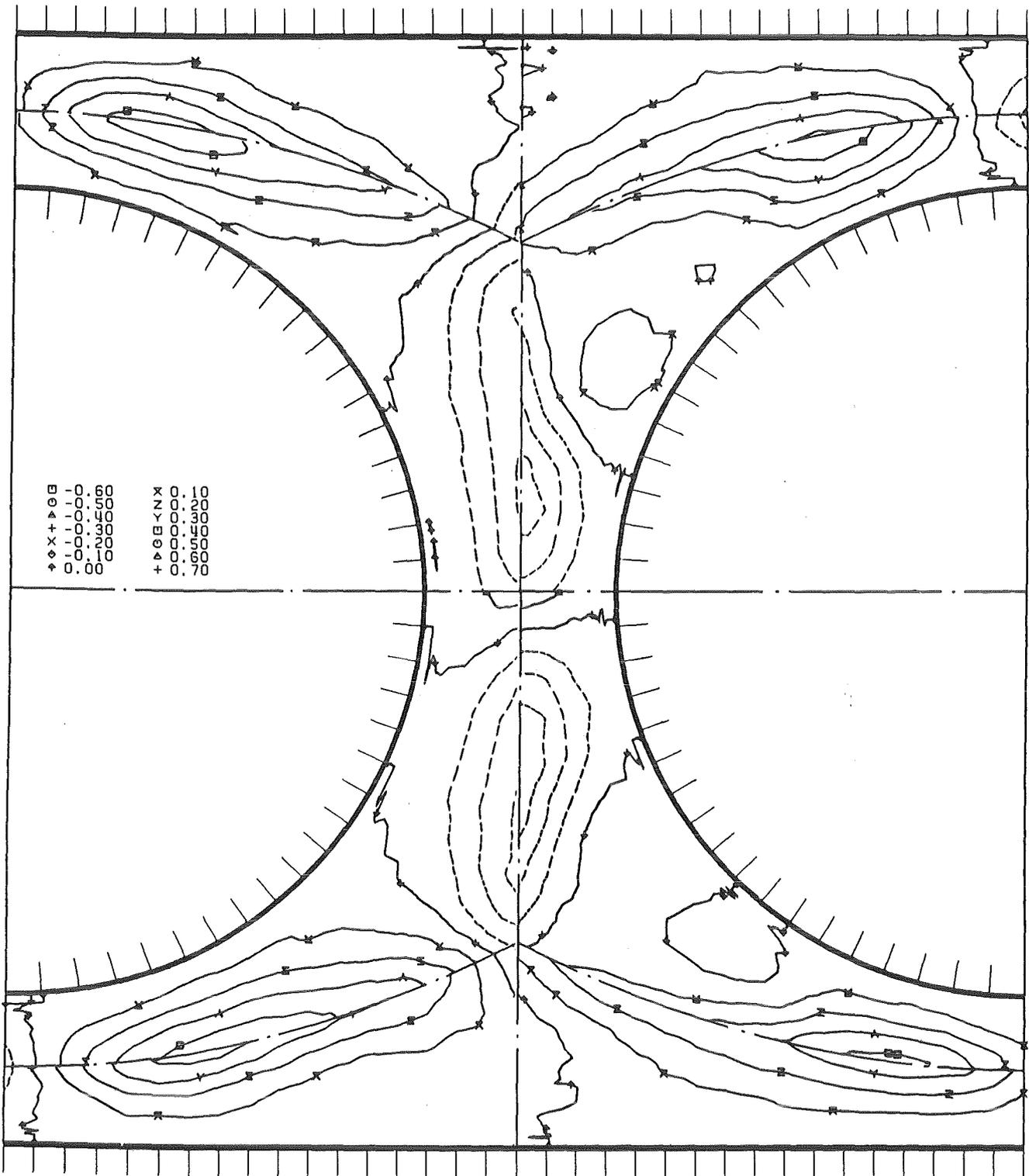
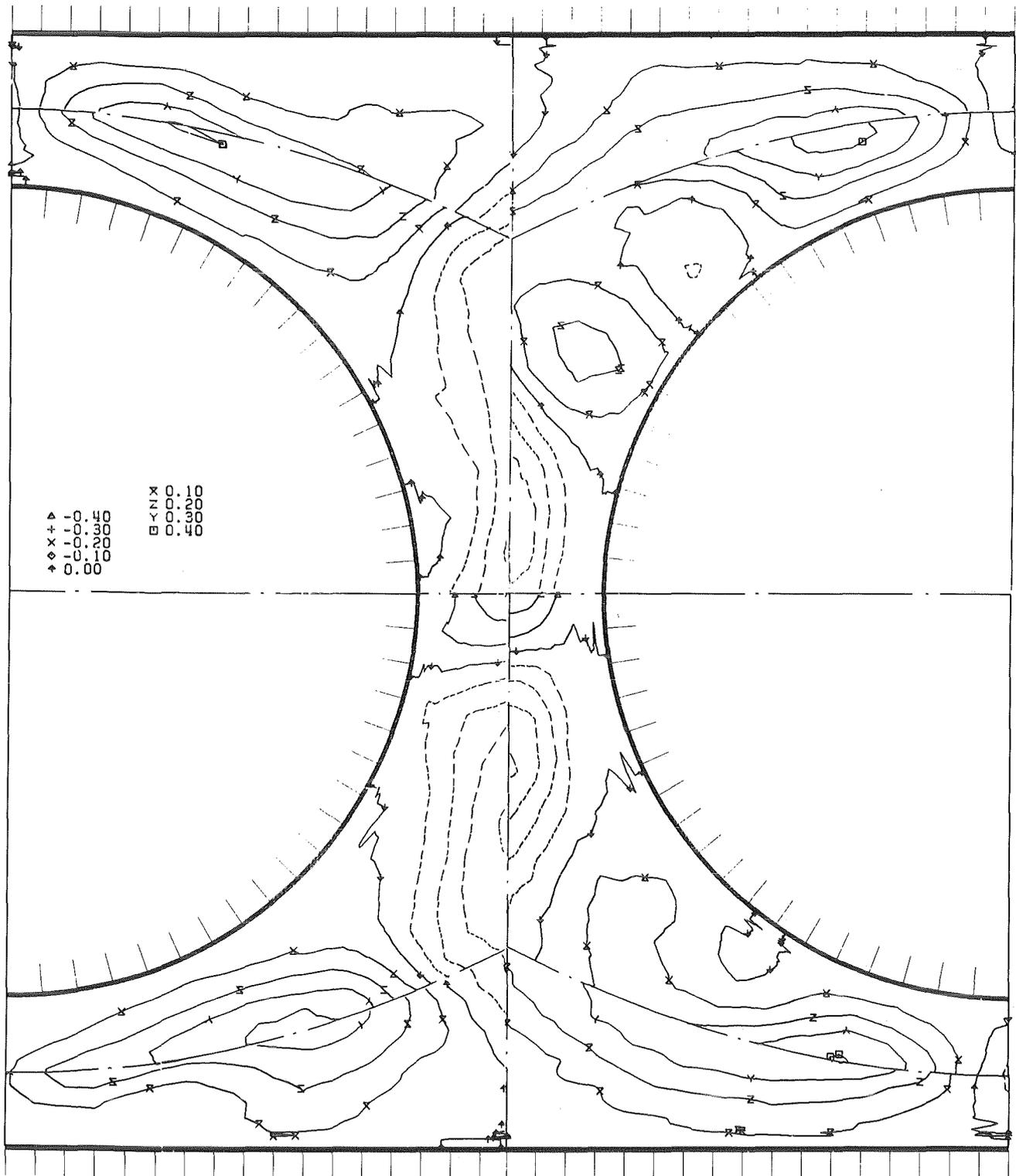


Abb.32 Korrelationskoeffizient der Schubspannung parallel zur Wand in der Ebene E3



KfK

Abb.33 Korrelationskoeffizient der Schubspannung parallel zur Wand in der Ebene E4



KfK

Abb.34 Korrelationskoeffizient der Schubspannung parallel zur Wand
in der Ebene E5

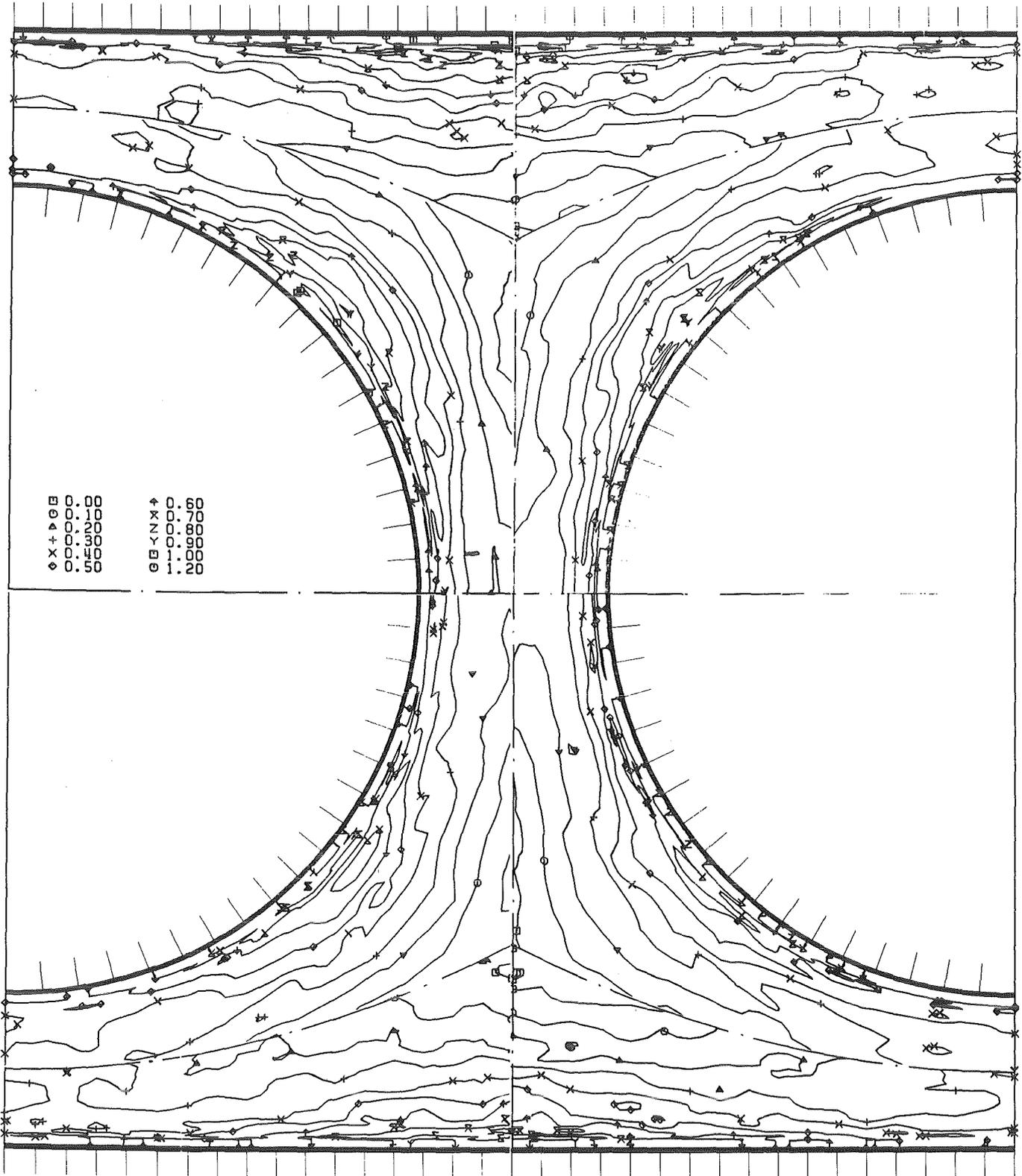


Abb.35 Quellterm für die axiale Wirbelstärke in der Ebene E3

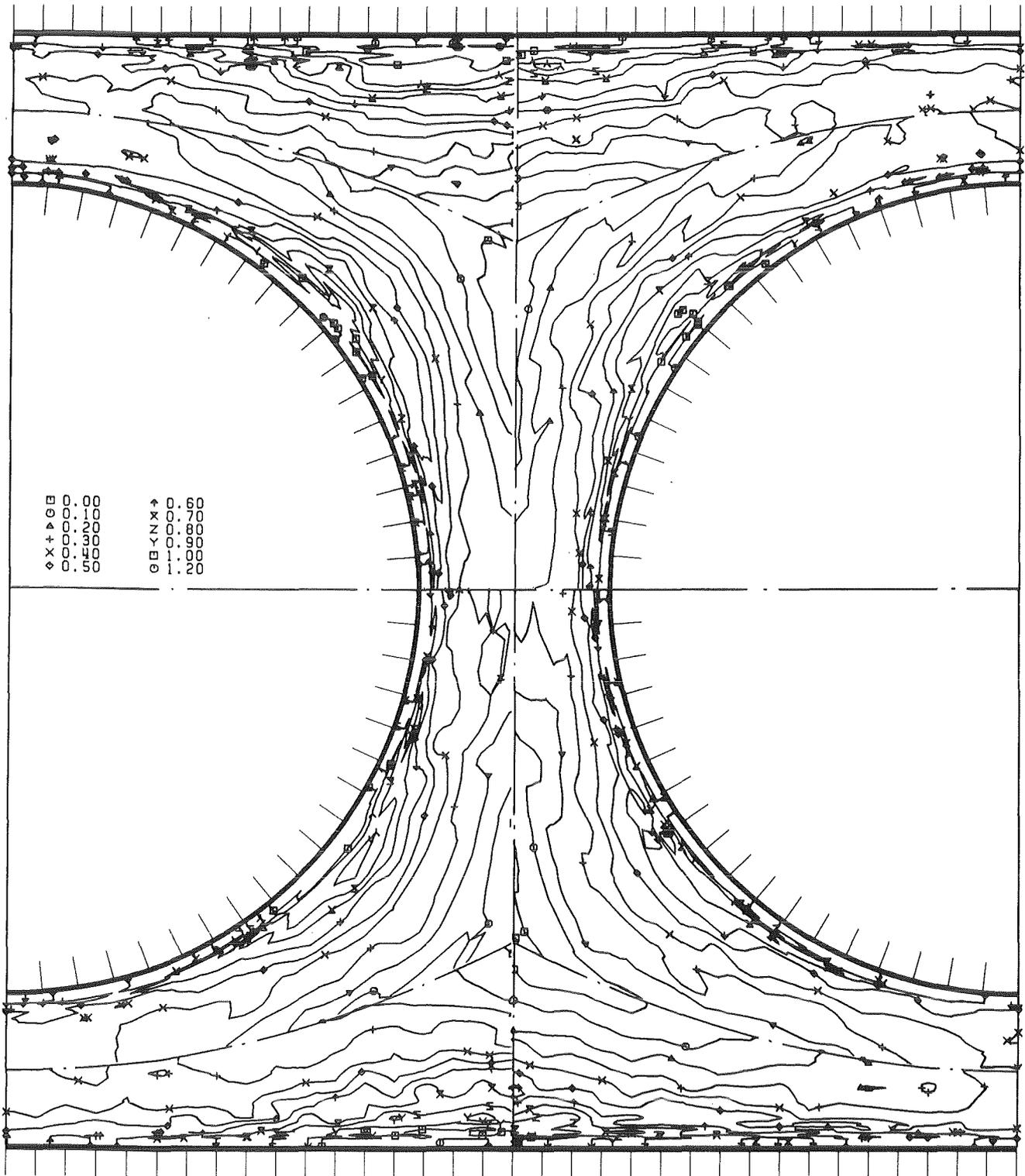


Abb.36 Quellterm für die axiale Wirbelstärke in der Ebene E4

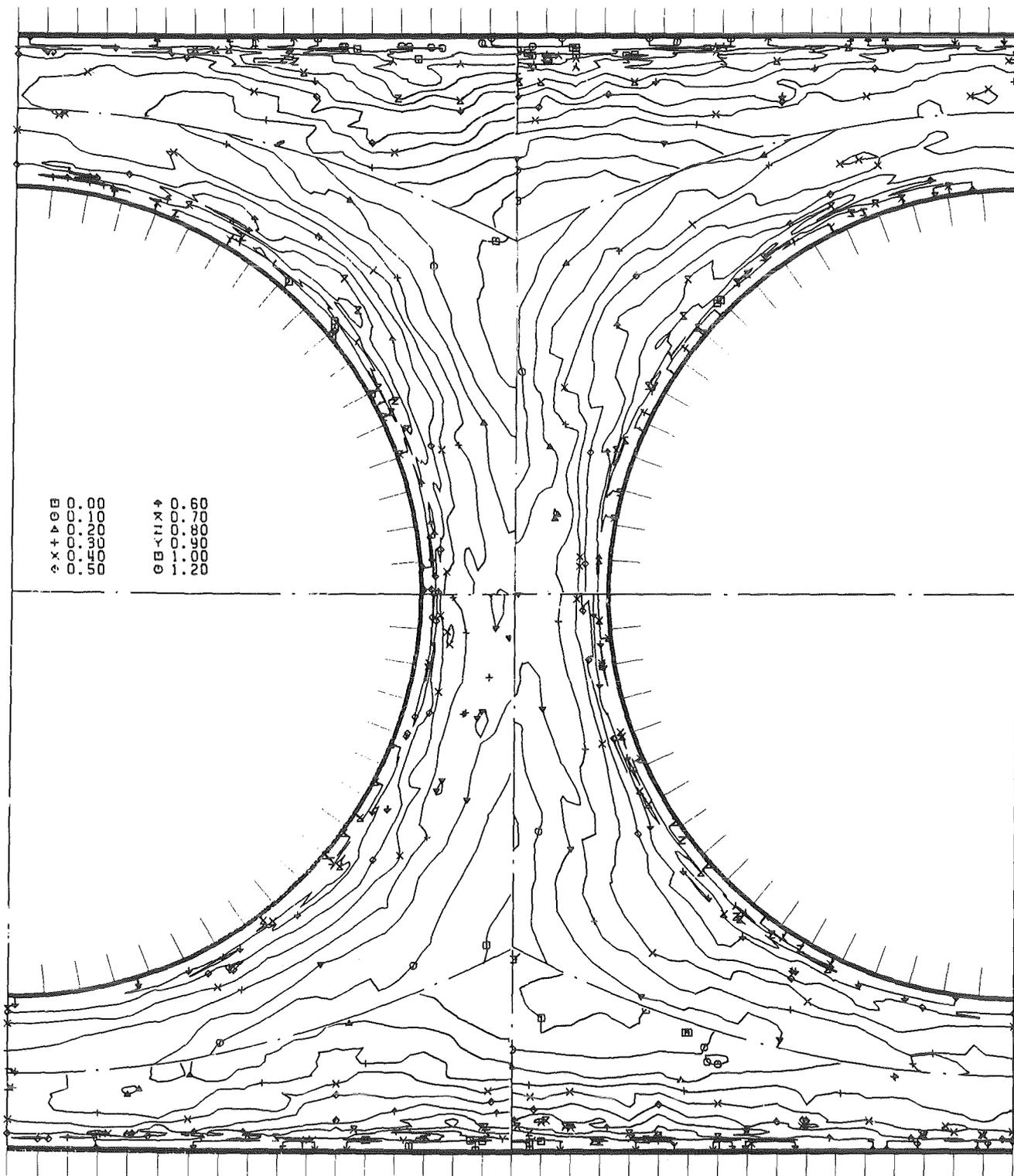


Abb.37 Quellterm für die axiale Wirbelstärke in der Ebene E5