

KfK 4408
Juni 1988

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

K. Rehme
Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Schneller Brüter

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

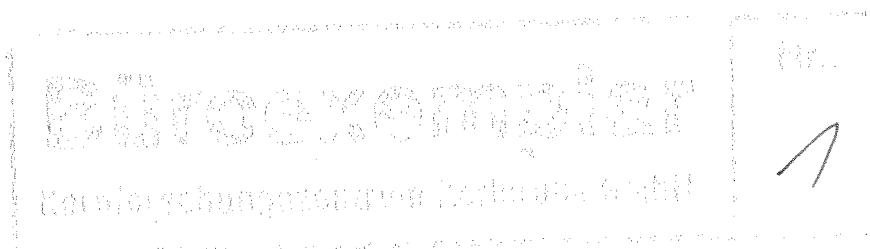
**Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Schneller Brüter**

KfK 4408

**Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen in Wandkanälen von
Stabbündeln in drei Ebenen unmittelbar 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 Meßebeine zu hydraulischem Durchmesser von $L/D_h=0.96$, 0.49 bzw. 0.25 vorhanden. Die Reynoldszahl der Untersuchungen betrug $Re=1.55 \cdot 10^5$.

Die Ergebnisse zeigen, daß Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen vollständig durch den Abstandshalter geprägt sind. 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 immediately 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 $L/D_h=0.96$, 0.49 , and 0.25 , respectively. The Reynolds number of this investigation was $Re=1.55 \cdot 10^5$.

The results show that the distributions of the velocity and of the turbulence are completely governed by the spacer grid. 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 Turbulenzintensitäten und kinetische Energie der Turbulenz	15
	5.4 Schubspannungen und Korrelationskoeffizienten	16
6.	Schlußfolgerungen	18

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 Brennelementebündeln 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 Brennelementebündeln eine z.T. massive Massenumverteilung zwischen den Unterkanälen hervorrufen /3/.

Für ein sicheres und zuverlässiges Betriebsverhalten der Brennelementebündel 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 Verifikation 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.

2. Teststrecke

Die Untersuchungen wurden an der SIROCCO (=Spacer In ROd Cluster data COmpilation)-Anlage, bestehend aus einem Stabbündel mit 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 Kanalaustritt 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/, die Ergebnisse der Ebenen E3 bis E5 in /8/, der Ebenen E6 bis E8 in /9/ 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

$$L/D_h = 0.96 \text{ für Meßebe E9,}$$

$$L/D_h = 0.49 \text{ für Meßebe E10,}$$

und

$$L/D_h = 0.25 \text{ für Meßebe E11.}$$

Abgesehen von der Ebene E11, bei der Messungen nur in einem Wandkanal stattfanden, wurden jeweils in zwei benachbarten, sich gegenüberliegenden Wandkanälen (Abb.3) gemessen:

- 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 /10/ 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 /10/.

Die Drehzahl des Gebläsemotors wird vom Rechner so geregelt, daß bei Änderungen von Luftdruck- und -temperatur die Reynoldszahl an einem festen Ort innerhalb $\pm 0.15\%$ konstant gehalten wird. Als Ort wurde eine Position in einem Eckkanal des Stabbündels gewählt, an der die Strömungsgeschwindigkeit mit einem Pitotrohr (fest eingebautes Pitotrohr) gemessen wird.

Die Ausgangsspannungen der Drucktransmitter für den Barometerstand und den Staudruck am fest eingebauten Pitotrohr sowie des Temperaturfühlers (PT 100) werden als Mittelwerte aus 500 Einzelmessungen bestimmt. Dabei wird eine Standardabweichung von 0.6% zugelassen, d.h. falls die Standardabweichung aus 500 Einzelmessungen größer als $0,6\%$ ist, wird die Messung wiederholt. Die Standardabweichung bei der Messung von Barometerstand und Lufttemperatur ist i.a. kleiner 0.3% .

Bei den Pitotrohr- bzw. Prestonrohrmessungen wird die Ausgangsspannung des Drucktransmitters als Mittelwert aus 5000 Einzelmessungen bestimmt. Die dabei zugelassene Standardabweichung beträgt 0.6% .

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

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

ist selten erforderlich, zuweilen dann, wenn die Witterungsbedingungen (Wind) sehr ungünstig sind. Für den Gleichspannungsanteil der Brückenspannung wird stets eine Standardabweichung von 0.6% zugelassen. Es soll an dieser Stelle erwähnt werden, daß dieses Verfahren neu ist und sich von dem früher verwendeten Verfahren /10/ 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 /11/ ausgewertet. Für die Hitzdraht-Messungen wird dabei die von Hooper /12/ 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 0.18° 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 ($p=0.1$ 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 5.1%.

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 1.4% und für den schrägen Hitzdraht unter 3.3%. Die Korrekturfaktoren auf die Referenzbedingungen sind in Tabelle 4 enthalten. Diese Korrekturfaktoren sind bei allen Versuchen für den geraden kleiner als 0.7% und für den schrägen Hitzdraht kleiner als 1.2%.

5. Ergebnisse

In diesem Bericht werden die Ergebnisse in Form von Höhenlinien dargestellt und diskutiert. Für die beiden ausgemessenen Wandkanäle wurden mithilfe eines Rechenprogramms /13/ 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 E9, E10 bzw. E11 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 Geschwindigkeitsverteilungen in allen drei Ebenen vollständig durch die Abstandshalterstruktur geprägt sind. Durch die

geschlossenen Höhenlinien in den Gebieten zwischen Abstandshalter und den Stab- und Kanalwänden wird die Abstandshalterstruktur, die in den Abbildungen schematisch dargestellt ist, deutlich hervorgehoben.

Rückströmung tritt nur auf für die Ebene E11, d.h. für $L/D_h = 0.25$, und zwar an der Kanalwand im Quadranten Q4 sowie an der Stabwand im Quadranten Q1 für $\phi = 60^\circ$ vom Spalt zwischen den Stäben. Das sind jeweils Kontaktstellen zwischen Abstandshaltergitter und Stab- bzw. Kanalwand. Für die weitere Kontaktstelle im Spalt zwischen den Stäben im Quadranten Q4 tritt keine Rückströmung auf, das liegt an dem Spalt von ca. 2 mm zwischen Abstandshaltergitter und Stabwand an dieser Position, der durch Fertigungstoleranzen des Abstandshalters bedingt ist. Wie bereits oben erwähnt, wurde für die Ebene E11 nur ein Wandkanal ausgemessen, nämlich der Wandkanal, der durch die Quadranten Q1 und Q4 gebildet wird. Das hatte mehrere Gründe: Erstens hatte sich bei den Messungen in den Ebenen E9 und E10 gezeigt, daß die Strömungs- und Turbulenzverteilung zur Symmetrieachse durch die Stäbe weitgehend symmetrisch und daher eine Messung in beiden Wandkanälen nicht erforderlich war. Zweitens waren die Turbulenzintensitäten unmittelbar hinter den Abstandshaltergitter so hoch, daß die Annahme kleiner Intensitäten bei der Auswertung der Hitzdrahtergebnisse nicht mehr gerechtfertigt ist. Drittens trat bei der Ebene E11 erstmalig eine Rückströmung auf, wodurch die Ermittlung des Massendurchsatzes durch Integration der Geschwindigkeitsverteilung nicht mehr genau genug möglich war, da mit Pitotrohren Rückströmungen nicht gemessen werden können. Daher sind auch die in Tab.5 angegebenen mittleren Geschwindigkeiten in den Unterkanälen für die Ebene E11 nur qualitativ zu betrachten.

In den mittleren Geschwindigkeiten der Ebenen E9 und E10 ergeben sich signifikante Unterschiede gegenüber den weiter vom Abstandshaltergitter entfernt liegenden Ebenen E1 bis E8. Erstmals für die Ebene E9 ist die mittlere Geschwindigkeit- und damit der Massendurchsatz - im Quadranten Q2 höher als in Q3; das war bei allen früher ausgemessenen Ebenen umgekehrt. Die Ursache hierfür liegt in der größeren Versperrung des Strömungsquerschnitts im Quadranten Q3, insbesondere an der Kanalwand. Die mittlere Geschwindigkeit im Gebiet nahe der Kanalwand (x/y) sinkt im Quadranten Q3 stark, während sie im Quadranten Q2 stark ansteigt. Die Quadranten Q2 und Q3 haben insgesamt, wie bei allen früher ausgemessenen Ebenen, einen höheren Massendurchsatz als die Quadranten Q1 und Q4. Diese schwach asymmetrische Verteilung des

Massendurchsatzes ist auf die Eintrittsbedingungen in die Teststrecke zurückzuführen /7,8,9/.

Während jedoch bis zur Ebene E8 stets die kleinste mittlere Geschwindigkeit im Quadranten Q1 auftrat, ist die kleinste mittlere Geschwindigkeit in den Ebenen E9 bis E11 stets im Quadranten Q4 zu finden. Auch dies ist auf die unterschiedliche Versperrung der Quadranten Q1 und Q4 durch das Abstandshaltergitter zurückzuführen. Entsprechend der gegenüber Q2 stärkeren Versperrung des Quadranten Q3, ist die Versperrung des Quadranten Q4 größer als für Q1, natürlich ebenfalls an der Kanalwand, wie der relativ starke Abfall der mittleren Geschwindigkeit im Gebiet nahe der Kanalwand (x/y) im Quadranten Q4 zeigt. Dagegen steigt die mittlere Geschwindigkeit im Gebiet nahe der Kanalwand im Quadranten Q1 stark an mit wachsender Annäherung der Meßebeane an das Abstandshaltergitter.

5.2 Wandschubspannung

Die gemessenen Wandschubspannungen zeigen die gleichen Trends wie die Geschwindigkeitsverteilungen. Abb.9 zeigt die Wandschubspannungsverteilungen an den Stäben in den drei Ebene. Dabei ist $\phi = 0^\circ$ die Position zwischen den Stäben und $\phi = -90^\circ$ 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 $x = -85$ mm 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, der in Tab.6 in der letzten Zeile angegeben ist.

Deutlich ist im Verlauf der Wandschubspannungen die Auswirkung des Abstandshaltergitters zu erkennen. Die lokalen Minima am Stab bei $\phi = \pm 60^\circ$ in den Quadranten Q1 und Q2 prägen sich mit wachsender Annäherung an den Abstandshalter stärker aus, bedingt durch die Kontaktstelle zwischen Stabwand und Abstandshaltergitter. In der Ebene E11 geht die Wandschubspannung gegen Null; in den Rückströmgebieten sind Messungen der Wandschubspannung nicht möglich. Dagegen bleibt das Minimum der Wandschubspannung am Stab in den Quadranten Q3 und Q4 bei $\phi = 0^\circ$ etwa konstant zwischen den Ebenen E9 und E11. Wie bereits unter 5.1 diskutiert, liegt hier kein Kontakt zwischen Stab und

Abstandshaltergitter, sondern aufgrund von Fertigungstoleranzen ein Spalt von ca. 2 mm vor.

Gut zu erkennen im Verlauf der Wandschubspannungsverteilung ist ebenfalls, daß die Wandschubspannungen im Quadranten Q3 höher als in Q4 bzw. im Quadranten Q2 höher als in Q1 sind. Diese Unterschiede sind bedingt durch die bereits diskutierten unterschiedlichen Massenstromverteilungen im Eintritt in die Teststrecke.

An den Kanalwänden sinken die Wandschubspannungen unterhalb der Kontaktstellen zwischen Kanalwand und Abstandshalter ebenfalls von der Ebene E9 ($L/D_h = 0.96$) zur Ebene E11 ($L/D_h = 0.25$) stark ab. Kontaktstellen liegen vor für $x = -85$ bis -50 mm bzw. für $x = 80$ bis 85 mm. In der Ebene E11 liegt in dem relativ großen Kontaktgebiet Rückströmung vor und daher werden die Wandschubspannungen negativ - dargestellt als null. Für die Kontaktstellen zwischen Kanalwand und Abstandshalter in den Quadranten Q1 und Q2 ergeben sich auch für die Ebene E11 keine negativen Wandschubspannungen durch Rückströmung. Auch in diesem Fall besteht kein Kontakt zwischen Abstandshalter und Kanalwand, sondern dort sind kleine Spalte aus Fertigungstoleranzen vorhanden. Insgesamt gesehen sind die Wandschubspannungen in den Quadranten Q3 und Q2 höher als für Q4 und Q1 wegen der oben erwähnten unterschiedlichen Verteilung der Massenströme. Am ausgeprägtesten sind die Unterschiede für die Ebene E11.

Die Mittelwerte der Wandschubspannungen in den einzelnen Quadranten und den Teilen der Quadranten sind in Tab.6 enthalten. Dabei wurden die Mittelwerte auf die mittlere Wandschubspannung im gesamten ausgemessenen Bereich (alle vier Quadranten) bezogen.

Im wesentlichen ergeben sich für die mittleren Wandschubspannungen die gleichen Verhältnisse wie für die mittleren Geschwindigkeiten, wenn man davon absieht, daß in der Ebene E9 die mittleren Wandschubspannungen in den Quadranten Q3 bzw. Q4 im Gegensatz zu den mittleren Geschwindigkeiten etwas höher sind als in den Quadranten Q2 bzw. Q1. Durch die relativ stärkere Versperrung des Strömungsquerschnitts in den Quadranten Q3 und Q4 gegenüber Q1 und Q2 sind in den Ebenen E10 und E11 die mittleren Wandschubspannungen wie die mittleren Geschwindigkeiten in den Quadranten Q1 und Q2 höher als in den Quadranten Q3 und Q4. Die Auswirkung der unterschiedlichen Versperrung zeigt sich auch in den Teilkanälen der Quadranten. Die mittleren Wandschubspannungen steigen an der Kanalwand

(x/y) in den Quadranten Q1 und Q2, sowie an der Stabwand (r/φ) in den Quadranten Q3 und Q4 stark an mit wachsender Annäherung an den Abstandshalter wegen der relativ geringeren Versperrung. Dagegen fallen die mittleren Wandschubspannungen nahe der Stabwand (r/φ) schwach in den Quadranten Q1 und Q2, hingegen in den Quadranten Q3 und Q4 sehr stark ab, da hier die relative Versperrung am größten ist.

5.3 Turbulenzintensitäten und kinetische Energie der Turbulenz

Die gemessenen axialen Turbulenzintensitäten sind in den Abb.11 bis 13 für die drei Ebenen als Linien gleicher Turbulenzintensität dargestellt. Dabei wurden die Meßwerte auf eine Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit $u_{R^*} = \tau_w/\rho$ bezogen; hierfür wurde die Wandschubspannungsgeschwindigkeit im Spalt zwischen den Stäben bei $\phi = 0^\circ$ im Quadranten Q1 gewählt.

Die Höhenliniendarstellungen der axialen Turbulenzintensität sind völlig durch die Struktur des Abstandshalters geprägt, dessen Konturen deutlich zu erkennen sind. Dabei sind die Höhenlinien zur Achse durch die Stabzentren weitgehend symmetrisch. Unmittelbar stromabwärts der Abstandshalterstruktur treten sehr hohe Turbulenzintensitäten in axialer Richtung auf, verursacht durch das Abreißen der Strömung an den Strukturen. Die durch Integration berechneten Mittelwerte der axialen Turbulenzintensität sind in Tab.7 für die Quadranten und die Teile der Quadranten angegeben. Für die Ebenen E9 bis E11 sind diese Mittelwerte höher als für alle weiter vom Abstandshalter entfernt liegenden Ebenen.

Auch die Turbulenzintensitäten senkrecht zu den Wänden sind unmittelbar unterhalb der Abstandshalterstruktur sehr hoch, wie die Abb.14 bis 16 für die Ebenen E9 bis E11 zeigen. In diesen Höhenliniendarstellungen der Turbulenzintensität senkrecht zu den Wänden ist ebenfalls die Abstandshalterstruktur deutlich zu erkennen. Die gemessenen Werte sind zur Achse durch die Stabzentren weitgehend symmetrisch. Die Mittelwerte der Turbulenzintensitäten senkrecht zur Wand sind in Tab.8 angegeben. Hier zeigt sich, wie für die axiale Turbulenzintensität, daß die Mittelwerte in den Ebenen E9 bis E11 deutlich höher sind als in den früher ausgemessenen Ebenen, die weiter vom Abstandshaltergitter entfernt waren.

Das gleiche Ergebnis wie für die Intensitäten in axialer und wandsenkrechter Richtung ergibt sich auch für die Turbulenzintensität parallel zur Wand, die in den Abb.17 bis 19 für die Ebenen E9 bis E11 als Höhenlinien dargestellt sind. Die aufintegrierten Mittelwerte der azimuthalen Turbulenzintensitäten sind in Tab.9 enthalten.

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

$$k' = 1/2 (u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (4)$$

Die ermittelten Werte sind in den Abb.20-22 als Höhenlinien dargestellt. Dabei wurde die kinetische Energie der Turbulenz auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit bezogen. Wie nicht anders zu erwarten, ist die kinetische Energie der Turbulenzbewegung besonders hoch unmittelbar hinter der Abstandshalterstruktur. Die gemessenen Turbulenzenergien sind dort drei- bis vierfach höher als an den Stab- und Kanalwänden. Das zeigt sich auch in den Mittelwerten der kinetischen Energie der Turbulenz, die in Tab.10 angegeben sind. In den Ebenen E9 bis E11 werden Mittelwerte der Turbulenzenergie im Strömungsquerschnitt gemessen, die um mehr als den Faktor 2.5 höher sind als in den weiter vom Abstandshalter entfernt liegenden Ebenen.

5.4 Schubspannungen und Korrelationskoeffizienten

Die Höhenlinien der gemessenen turbulenten Schubspannung senkrecht zur Wand sind in den Abb.23 bis 25 dargestellt für die drei Ebenen E9 bis E11. Dabei wurden die Schubspannungen senkrecht zu den Wänden jeweils an den Stab- bzw. Kanalwänden positiv definiert und auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit bezogen. Die Struktur des Abstandshaltergitters ist in den Höhenlinienbildern deutlich zu erkennen. Besonders an den Kontaktpunkten zwischen Abstandshaltergitter und der Kanal- bzw. Stabwänden sind die gemessenen Schubspannungen senkrecht zur Wand sehr hoch.

Das gleiche trifft zu für die Schubspannungen parallel zu den Wänden, die in den Abb. 26 bis 28 dargestellt sind.

Erstmals erreicht die transverse Schubspannung $v'w'$ in den Ebenen E9 bis E11 signifikante Werte, insbesondere unterhalb der Kontaktstellen zwischen Abstandshaltergitter und Stab- bzw. Kanalwänden. In den offenen Strömungsquerschnitten dagegen ist diese Schubspannung weiterhin sehr klein und aufgrund der Meßunsicherheit mit einem großen Relativfehler behaftet. Die Höhenlinien in den Abb.29 bis 31 zeigen daher sehr uneinheitliche Bilder für die Ebene E9, dagegen sind in den näher am Abstandshalter gelegenen Ebenen E10 und E11 Strukturen diese Schubspannung zu erkennen.

Die Korrelationskoeffizienten der turbulenten Schubspannungen sind für die Schubspannung senkrecht zur Wand in den Abb. 32 bis 34, für die Schubspannung parallel zur Wand in den Abb. 35 bis 37 und für die Transverse Schubspannung in den Abb.38 bis 40 als Höhenlinien dargestellt. Die Korrelationskoeffizienten spiegeln in wesentlichen die gemessenen turbulenten Schubspannungen wider. Abgesehen von den Korrelationskoeffizienten der transversen Schubspannung sind die Meßwerte zur Achse durch die Stabzentren in den Ebenen E9 und E10 weitgehend symmetrisch. Das bestätigt die Entscheidung, die Ebene E11 nur in zwei Quadranten (Q1 und Q4) auszumessen.

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 in den drei Ebenen unmittelbar hinter dem Abstandshalter, für $L/D_h = 0.96, 0.49$ und 0.25 , zeigen, daß die Verteilungen des zeitlichen Mittelwerts der Geschwindigkeit, der Turbulenzintensitäten und der turbulenten Schubspannungen durch die Struktur des Abstandshaltergitters geprägt sind.

Die Asymmetrie der Abstandshalterstruktur bewirkt eine Asymmetrie der Geschwindigkeitsverteilung und der Verteilungen der axialen Turbulenzintensität, der kinetischen Energie der Turbulenz sowie der 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. Für $L/D_h = 0.25$ tritt erstmals Rückströmung hinter dem Abstandshaltergitter auf.

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
k'	m ² s ⁻²	kinetische Energie der Turbulenz
L	m	Länge
P	m	Stabmittelpunktsabstand
p	Pa	Druck
Re	-	Reynoldszahl
r	m	Koordinate senkrecht zur Stabwand
T	K	Temperatur
U	m	Umfang
u	ms ⁻¹	Geschwindigkeit
u _m	ms ⁻¹	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
u'	ms ⁻¹	Schwankungsgeschwindigkeit in axialer Richtung
u*	ms ⁻¹	Wandschubspannungsgeschwindigkeit
v'	ms ⁻¹	Schwankungsgeschwindigkeit senkrecht zur Wand
W	m	Wandabstand
w'	ms ⁻¹	Schwankungsgeschwindigkeit parallel zur Wand
x	m	Koordinate parallel zur Kanalwand
y	m	Koordinate senkrecht zur Kanalwand
φ	grd	Umfangskoordinate
ρ	Kgm ⁻³	Dichte
τ	Pa	Schubspannung

Indizes

R	Referenzbedingungen
w	Wand

Literatur

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

- /10/ K. Rehme, Rechnergesteuerte Versuchsanlage zur Messung von Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen mit Hitzdrähten, KfK-Bericht Nr. 3744 (1984).
- /11/ L. Vosáhlo, Computer programs for evaluation of turbulence characteristics from hot-wire measurements, KfK-Bericht Nr. 3743 (1984).
- /12/ J.D. Hooper, Fully developed turbulent flow through a rod cluster, Ph.D. Thesis, University of New South Wales, Sydney (Australia), (1980).
- /13/ 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).

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

Winkel in /Grad/		Q1	Q2	Q3	Q4
E9	R/P	45.11	45.07	45.01	44.98
	X/Y	45.07	44.97	45.09	44.90
E10	R/P	45.07	44.83	44.99	44.82
	X/Y	44.89	44.83	44.83	44.96
E11	R/P	44.96	----	----	44.89
	X/Y	44.96	----	----	44.92

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

E9		MAX	MIN
Q1	R/P	0.990	0.980
	X/Y	0.991	0.983
Q2	R/P	1.026	1.003
	X/Y	1.023	1.011
Q3	R/P	0.995	0.973
	X/Y	0.993	0.980
Q4	R/P	1.012	0.998
	X/Y	1.022	1.002
E10		MAX	MIN
Q1	R/P	0.987	0.969
	X/Y	0.992	0.975
Q2	R/P	0.974	0.961
	X/Y	0.965	0.949
Q3	R/P	0.992	0.984
	X/Y	0.984	0.974
Q4	R/P	0.987	0.976
	X/Y	1.000	0.985
E11		MAX	MIN
Q1	R/P	0.990	0.975
	X/Y	0.986	0.972
Q4	R/P	0.965	0.956
	X/Y	0.983	0.963

Tabelle 3: Maximale Korrekturfaktoren (Referenztraverse)

		Gerader Draht		Schräger Draht	
E9		MAX	MIN	MAX	MIN
Q1	R/P	1.004	0.993	1.033	1.004
	X/Y	1.003	0.995	1.006	0.987
Q2	R/P	1.009	0.997	1.023	0.998
	X/Y	1.006	1.001	1.027	1.004
Q3	R/P	1.005	0.999	1.025	1.004
	X/Y	1.008	1.004	1.017	1.002
Q4	R/P	1.005	0.998	1.023	0.999
	X/Y	1.000	0.997	1.029	1.010
E10		MAX	MIN	MAX	MIN
Q1	R/P	1.010	1.003	1.018	1.002
	X/Y	1.004	1.000	1.015	0.999
Q2	R/P	1.005	0.996	1.010	0.998
	X/Y	1.005	0.995	1.023	1.001
Q3	R/P	1.005	0.999	1.018	1.003
	X/Y	1.014	0.999	1.003	0.991
Q4	R/P	1.006	1.002	1.014	1.001
	X/Y	1.006	0.992	1.020	1.003
E11		MAX	MIN	MAX	MIN
Q1	R/P	1.009	0.995	1.008	0.995
	X/Y	1.008	0.998	1.021	0.998
Q4	R/P	1.004	0.993	1.002	0.995
	X/Y	1.003	0.994	1.026	1.006

Tabelle 4: Maximale Korrekturfaktoren (Referenzbedingungen)

		Gerader Draht		Schräger Draht	
E9		MAX	MIN	MAX	MIN
Q1	R/P	1.004	1.001	1.002	0.996
	X/Y	1.007	1.003	1.007	0.997
Q2	R/P	1.002	0.998	1.003	0.996
	X/Y	0.999	0.998	1.002	0.994
Q3	R/P	0.998	0.996	1.003	0.994
	X/Y	0.998	0.996	1.001	0.996
Q4	R/P	1.001	0.999	1.002	0.993
	X/Y	1.002	1.001	0.999	0.991
E10		MAX	MIN	MAX	MIN
Q1	R/P	0.999	0.996	1.000	0.995
	X/Y	0.999	0.997	0.997	0.993
Q2	R/P	0.997	0.994	0.996	0.988
	X/Y	0.997	0.995	0.999	0.990
Q3	R/P	0.997	0.994	1.000	0.993
	X/Y	0.996	0.994	1.000	0.993
Q4	R/P	0.994	0.992	0.997	0.993
	X/Y	0.995	0.992	0.998	0.990
E11		MAX	MIN	MAX	MIN
Q1	R/P	1.000	0.996	1.000	0.993
	X/Y	0.999	0.995	1.002	0.993
Q4	R/P	1.006	1.002	1.006	0.995
	X/Y	1.006	1.000	1.000	0.991

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

Kanal		Meßebene		
		E9	E10	E11
Q1	R/P	0.965	0.958	0.979
	X/Y	1.037	1.039	1.085
Q1		0.993	0.990	1.021
Q2	R/P	0.987	0.992	-----
	X/Y	1.063	1.087	-----
Q2		1.017	1.030	-----
Q3	R/P	1.020	1.038	-----
	X/Y	0.980	0.968	-----
Q3		1.004	1.010	-----
Q4	R/P	1.016	1.021	1.060
	X/Y	0.939	0.893	0.857
Q4		0.985	0.970	0.979
$U_{av} / \text{ms}^{-1} /$		27.04	28.46	27.56

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

Kanal		Meßebeene		
		E9	E10	E11
Q1	R/P	0.979	0.956	0.937
	X/Y	0.966	0.980	1.062
Q1		0.973	0.966	0.992
Q2	R/P	0.996	0.993	0.972
	X/Y	1.022	1.125	1.200
Q2		1.008	1.051	1.072
Q3	R/P	1.146	1.234	1.317
	X/Y	0.983	0.808	0.628
Q3		1.035	1.047	1.015
Q4	R/P	1.084	1.159	1.258
	X/Y	0.856	0.648	0.489
Q4		0.984	0.935	0.921
τ_{av} /Pa/		1.690	1.680	1.469

Tabelle 7: Mittelwerte der axialen Turbulenzintensitäten in den einzelnen Unterkanälen und Teilen der Unterkanäle bezogen auf den Mittelwert in allen vier Quadranten

Kanal		Meßebeene		
		E9	E10	E11
Q1	R/P	1.092	1.082	1.124
	X/Y	0.871	0.849	0.846
Q1		1.004	0.989	1.014
Q2	R/P	1.037	1.004	-----
	X/Y	0.856	0.811	-----
Q2		0.965	0.927	-----
Q3	R/P	0.946	0.925	-----
	X/Y	1.141	1.197	-----
Q3		1.024	1.033	-----
Q4	R/P	0.908	0.879	0.896
	X/Y	1.156	1.310	1.123
Q4		1.007	1.050	0.986
u'_{av}/u^*_{Ref}		2.021	2.144	2.071

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

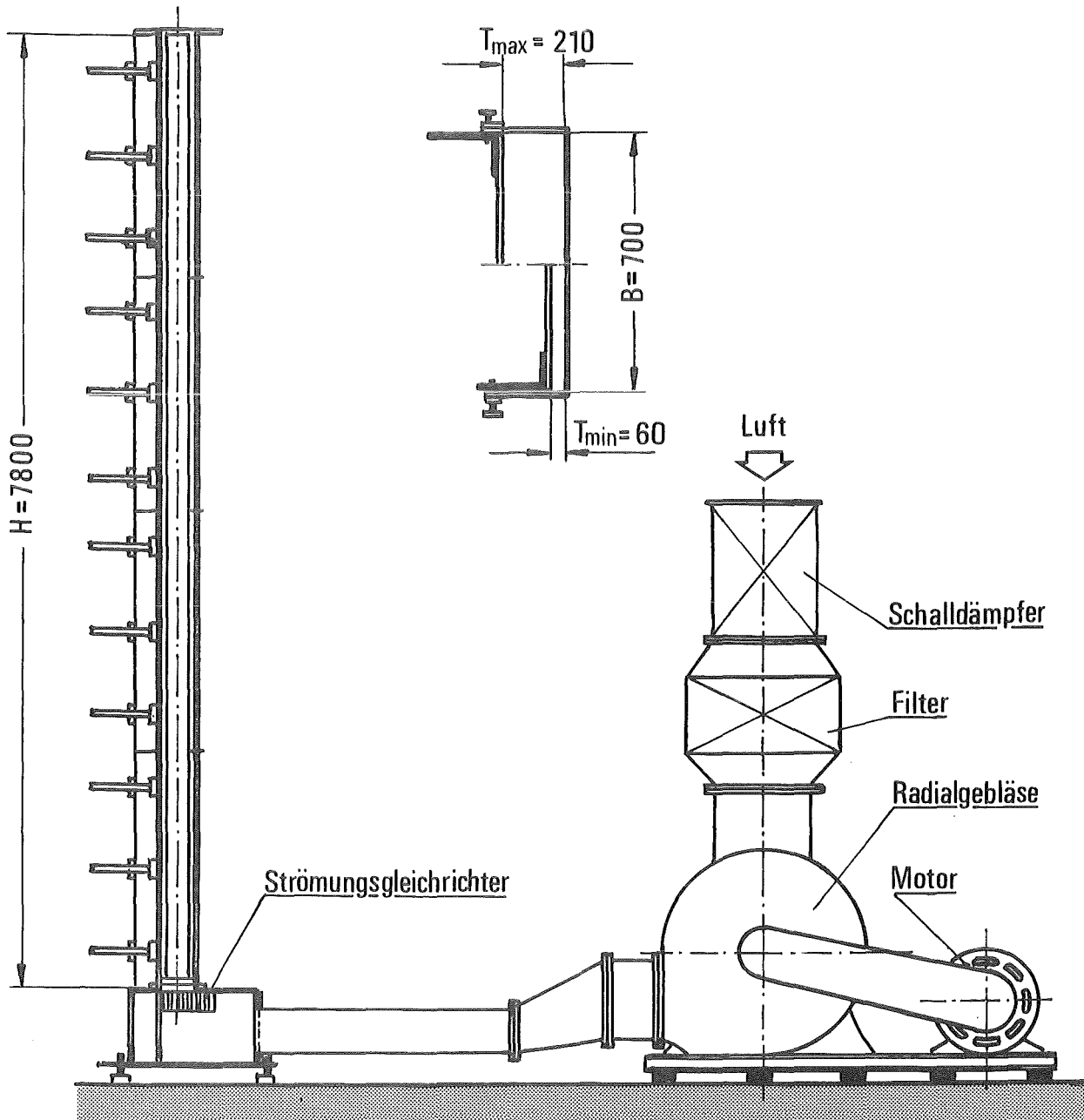
Kanal		Meßebeene		
		E9	E10	E11
Q1	R/P	1.146	1.119	1.067
	X/Y	0.777	0.744	0.706
Q1		0.999	0.970	0.923
Q2	R/P	1.082	1.070	-----
	X/Y	0.740	0.757	-----
Q2		0.942	0.945	-----
Q3	R/P	1.001	1.113	-----
	X/Y	1.064	1.047	-----
Q3		1.026	1.070	-----
Q4	R/P	0.940	1.012	1.078
	X/Y	1.163	1.018	1.074
Q4		1.029	1.015	1.077
v'_{av}/u^*_{Ref}		1.392	1.442	1.405

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

Kanal		Meßebeene		
		E9	E10	E11
Q1	R/P	1.153	1.147	1.103
	X/Y	0.817	0.798	0.775
Q1		1.019	1.008	0.973
Q2	R/P	1.062	1.051	-----
	X/Y	0.784	0.810	-----
Q2		0.951	0.955	-----
Q3	R/P	0.955	1.017	-----
	X/Y	1.125	1.089	-----
Q3		1.023	1.046	-----
Q4	R/P	0.891	0.935	1.013
	X/Y	1.182	1.075	1.049
Q4		1.007	0.991	1.027
w'_{av}/u^*_{Ref}		1.528	1.547	1.432

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

Kanal		Meßebeene		
		E9	E10	E11
Q1	R/P	1.236	1.203	1.184
	X/Y	0.700	0.643	0.575
Q1		1.023	0.980	0.942
Q2	R/P	1.100	1.037	-----
	X/Y	0.654	0.608	-----
Q2		0.922	0.866	-----
Q3	R/P	0.896	0.974	-----
	X/Y	1.246	1.257	-----
Q3		1.035	1.086	-----
Q4	R/P	0.814	0.851	0.943
	X/Y	1.330	1.393	1.232
Q4		1.020	1.067	1.058
$k'_{av}/u_*'^2_{Ref}$		4.638	5.428	5.414



KfK

Abb. 1 Versuchsanlage (schematisch)

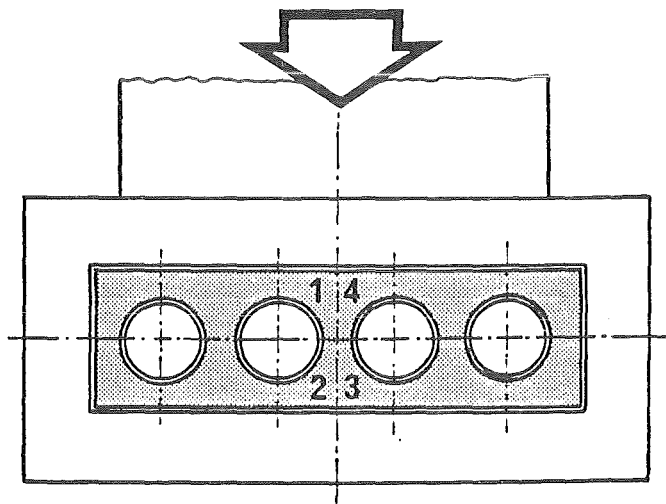


Abb. 3 Aufsicht auf den Strömungskanal mit den Eintrittsbedingungen

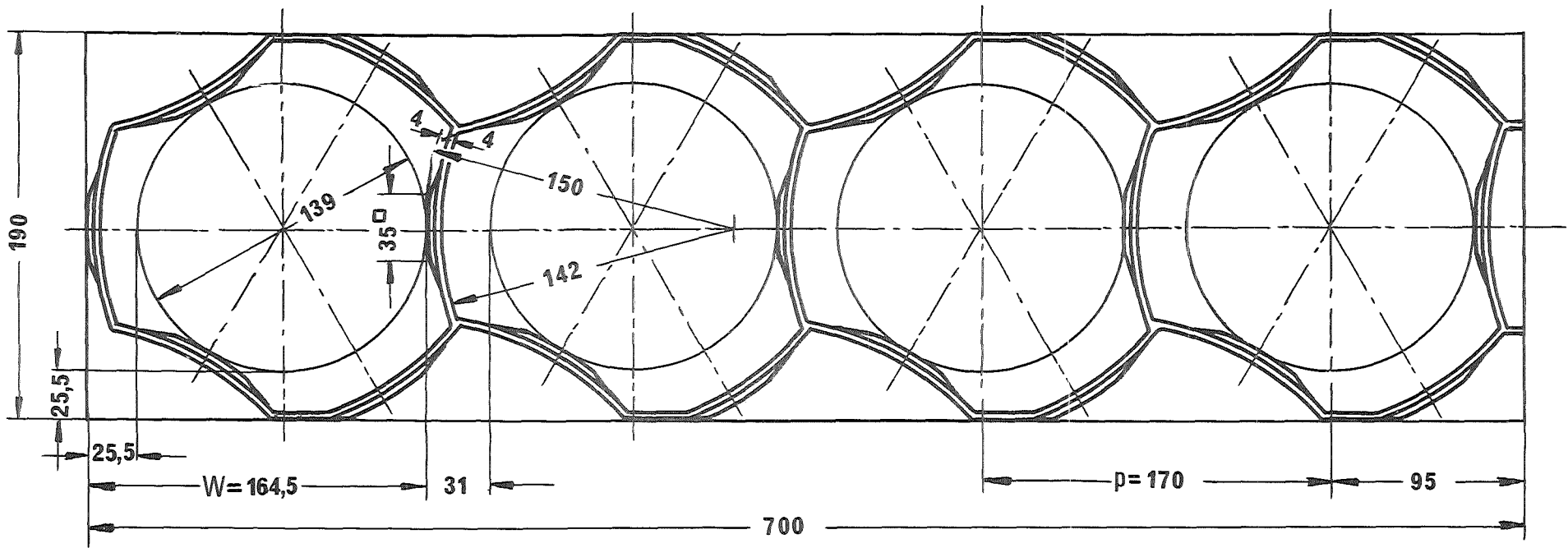


Abb. 2 Querschnitt der Abstandshaltergeometrie

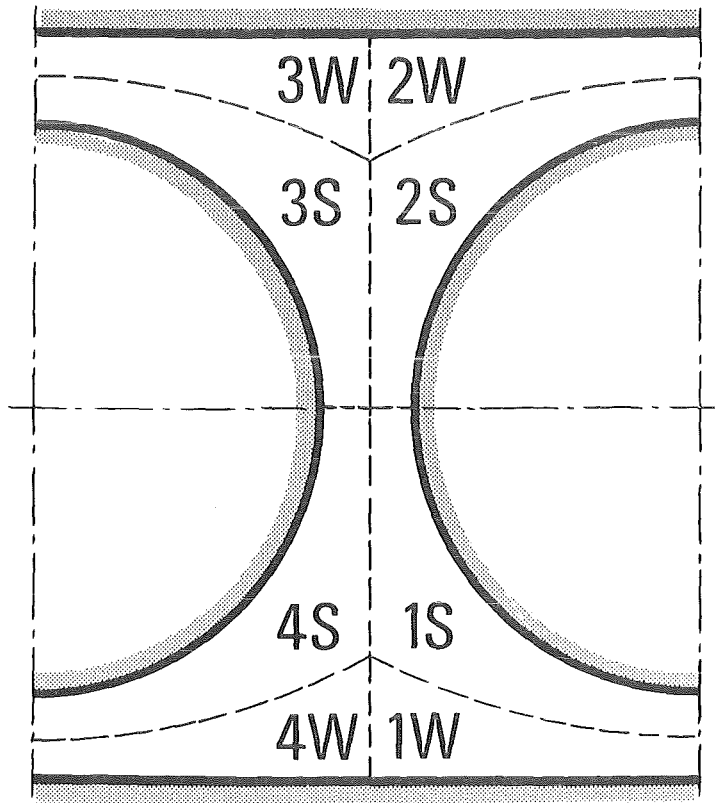


Abb. 4 Teilkanäle des untersuchten Strömungsquerschnitts

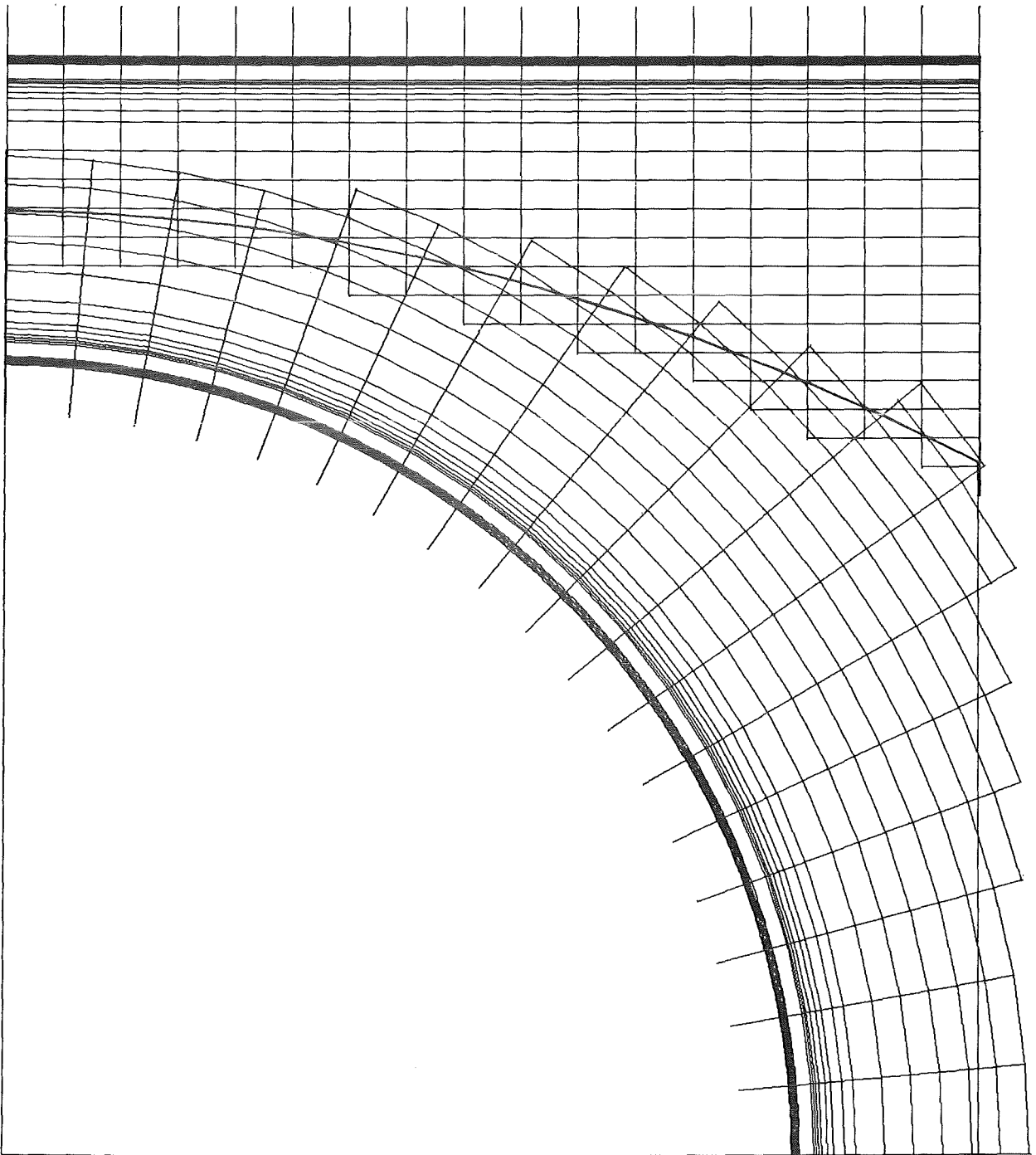


Abb. 5 Verteilung der Meßpositionen in einem Quadranten

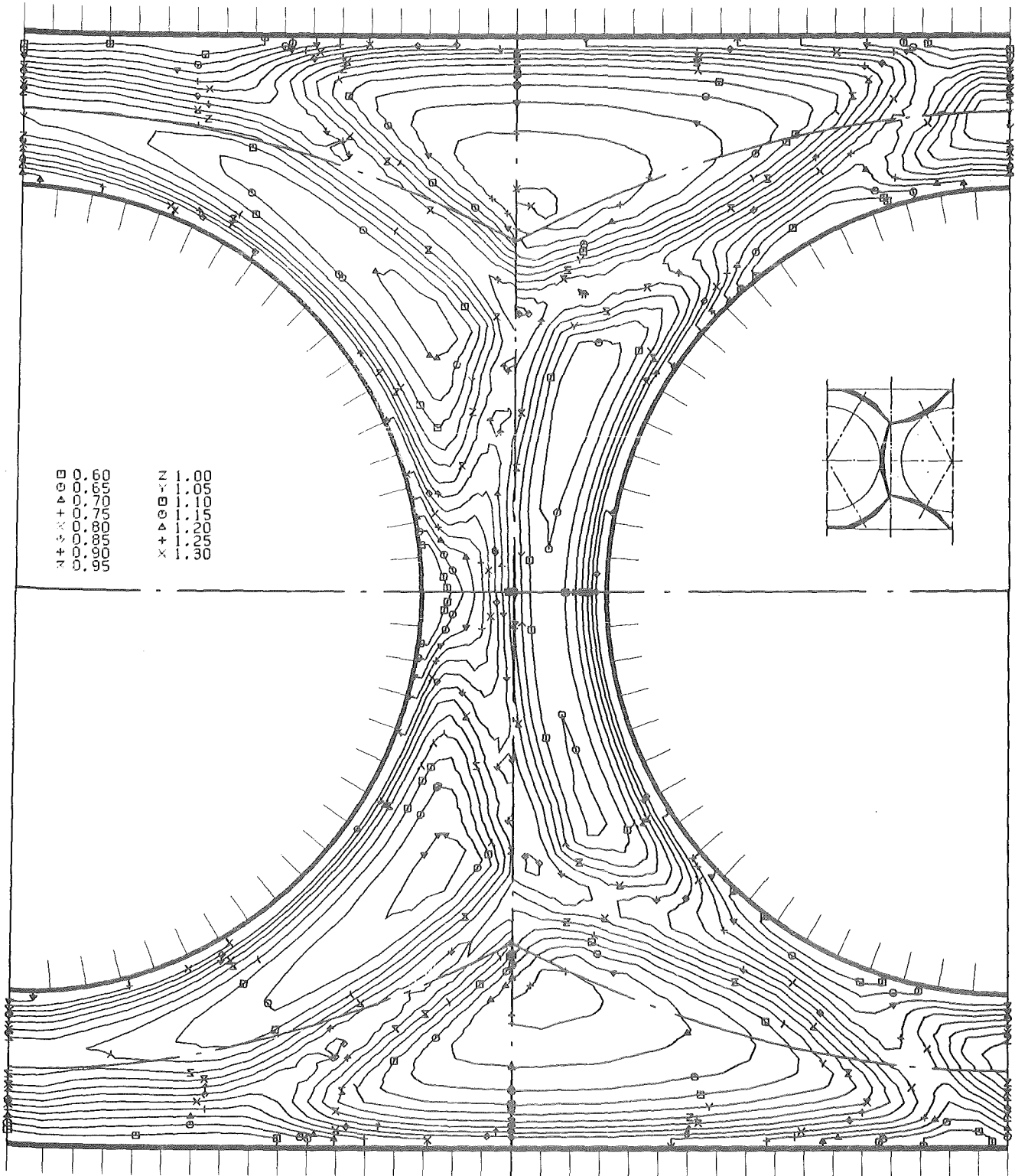


Abb. 6 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit in der Ebene E9

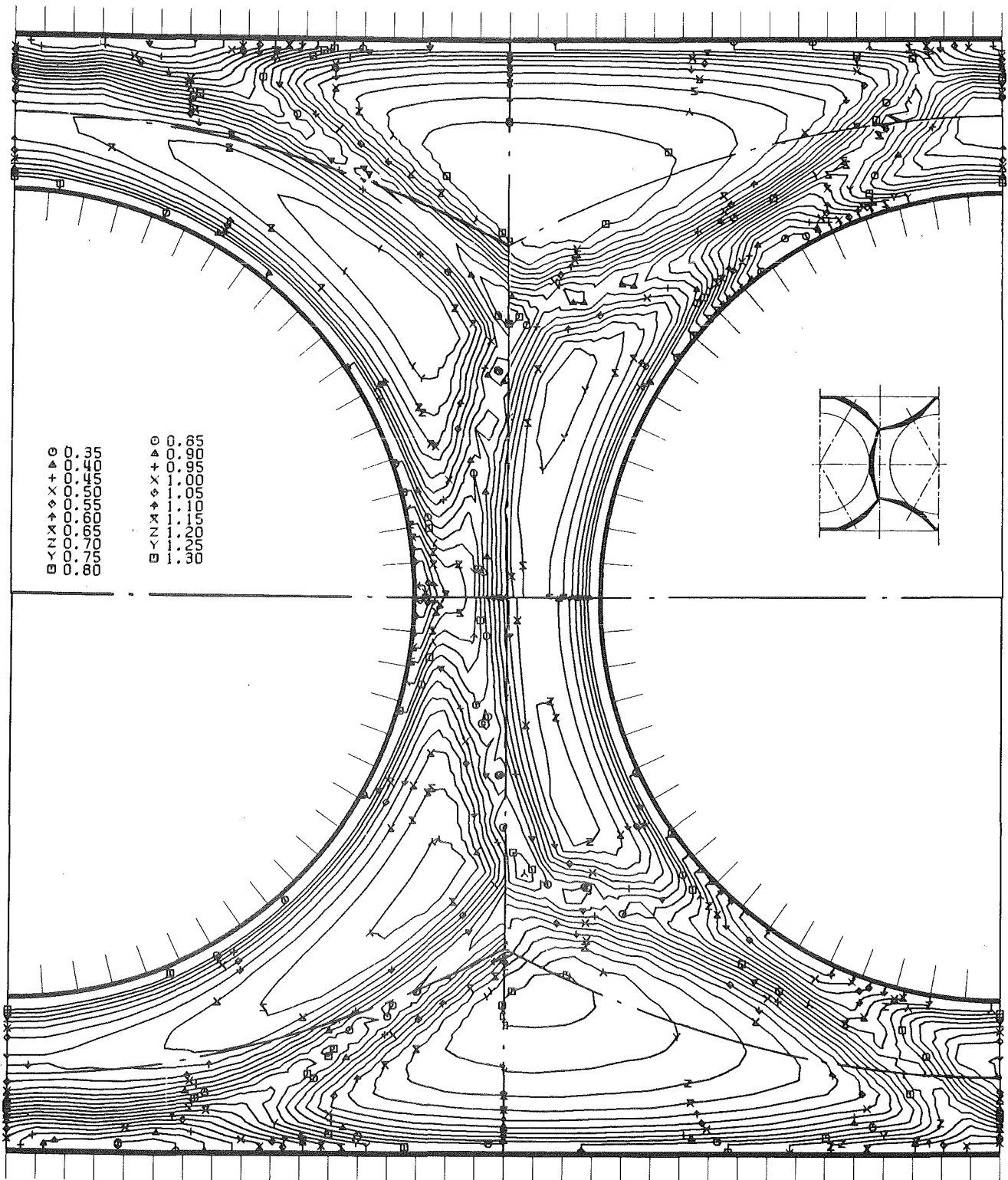
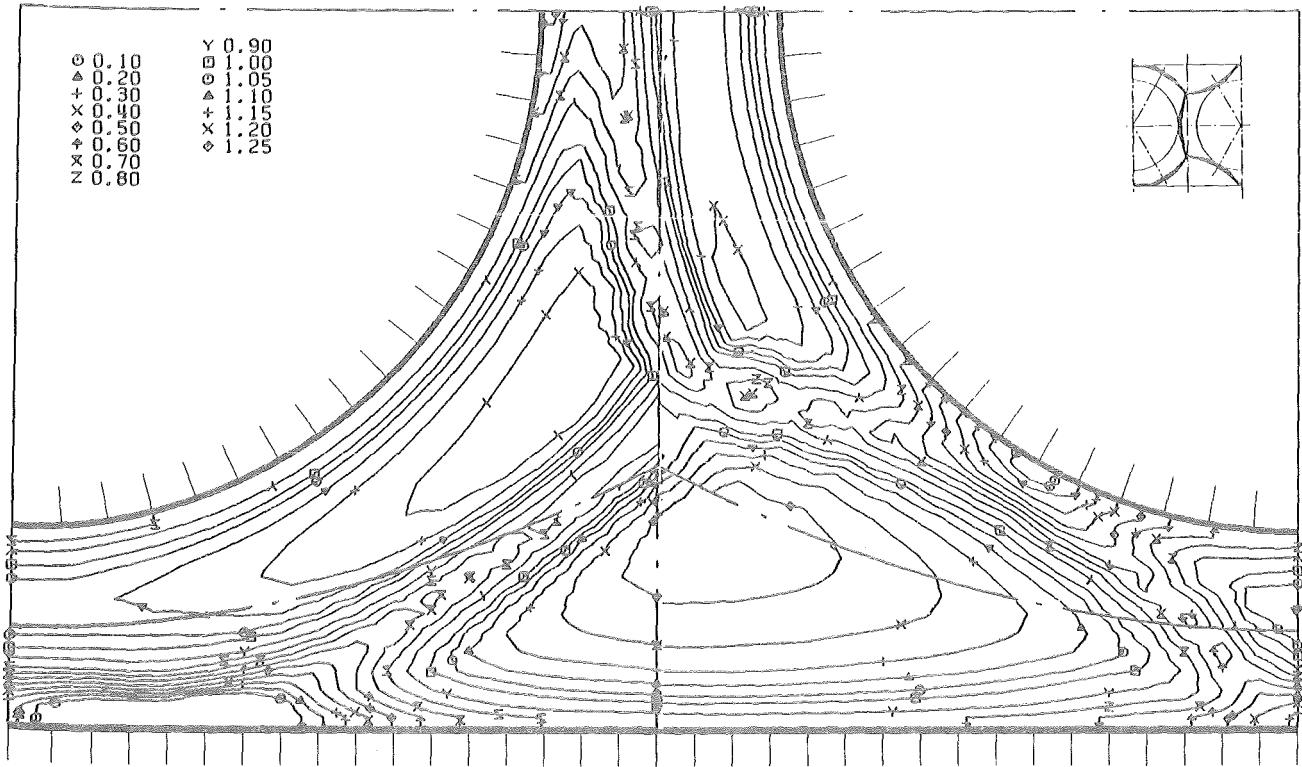


Abb. 7 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit in der Ebene E10



KfK

Abb. 8 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit in der Ebene E11

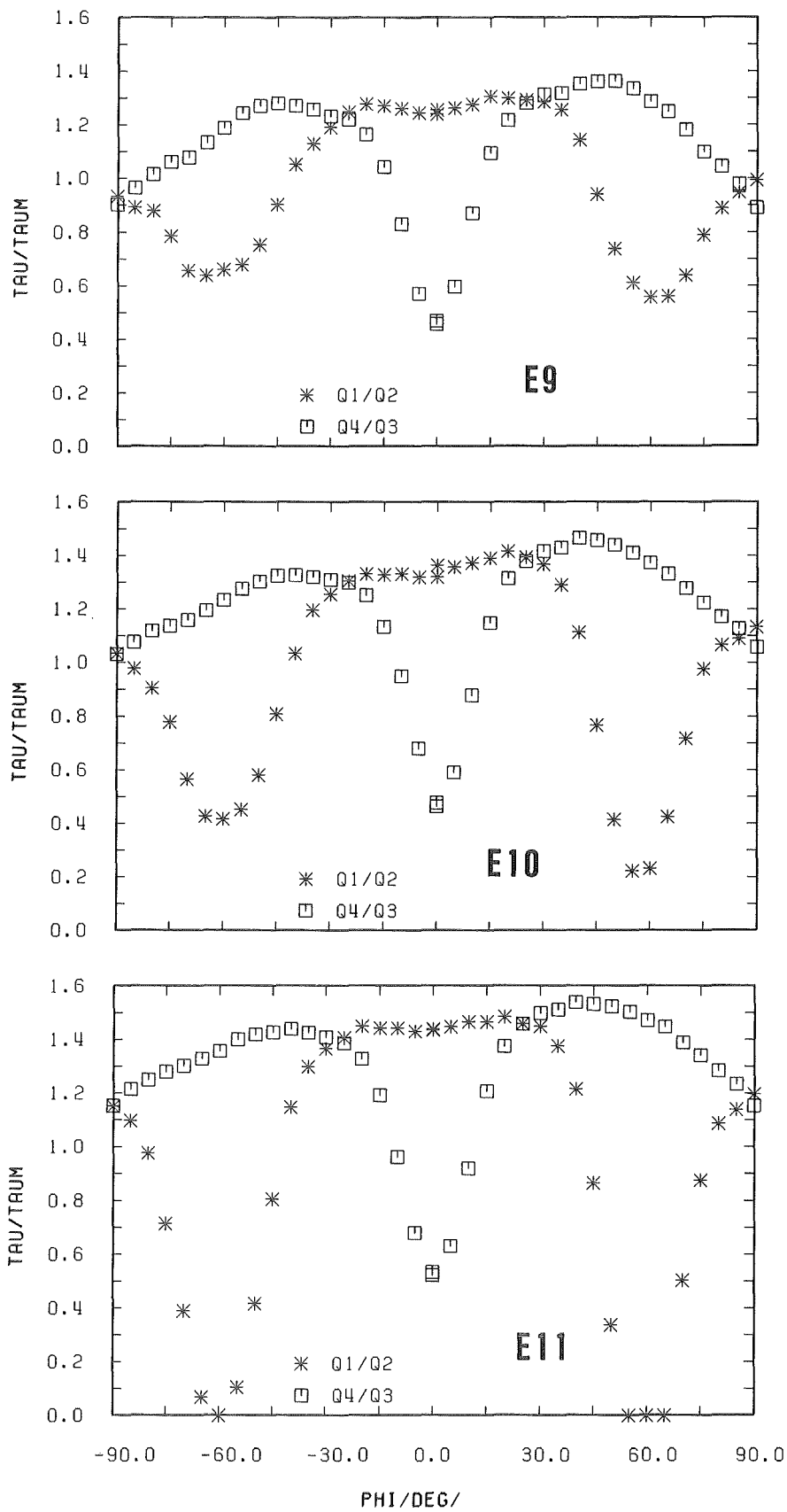


Abb. 9 Wandschubspannungsverteilungen bezogen auf den Mittelwert aus allen vier Quadranten (r/ϕ)

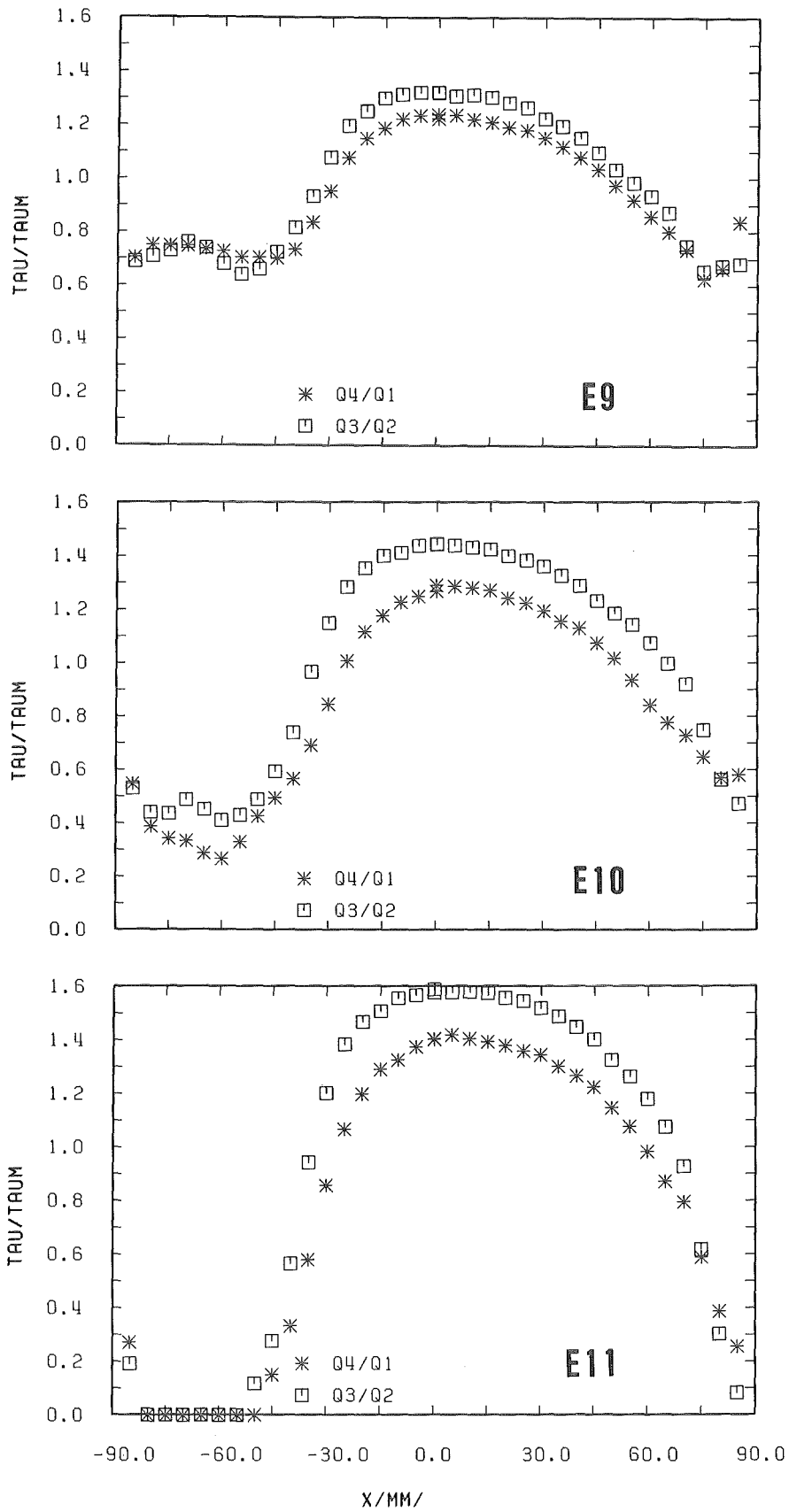


Abb.10 Wandschubspannungsverteilungen bezogen auf den Mittelwert aus allen vier Quadranten (x/y)

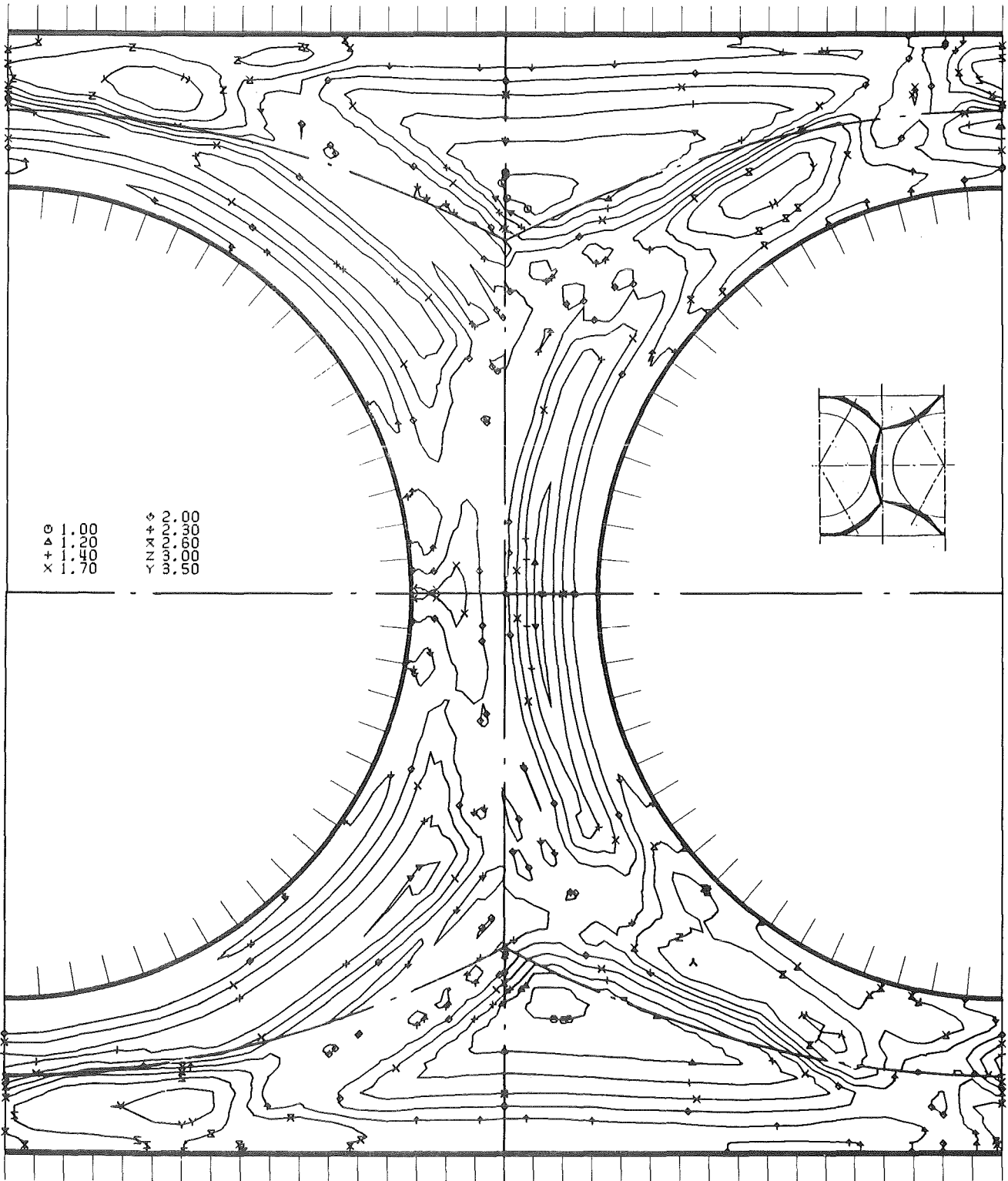


Abb.11 Axiale Turbulenzintensität bezogen auf die Referenzwand-schubspannungsgeschwindigkeit in der Ebene E9

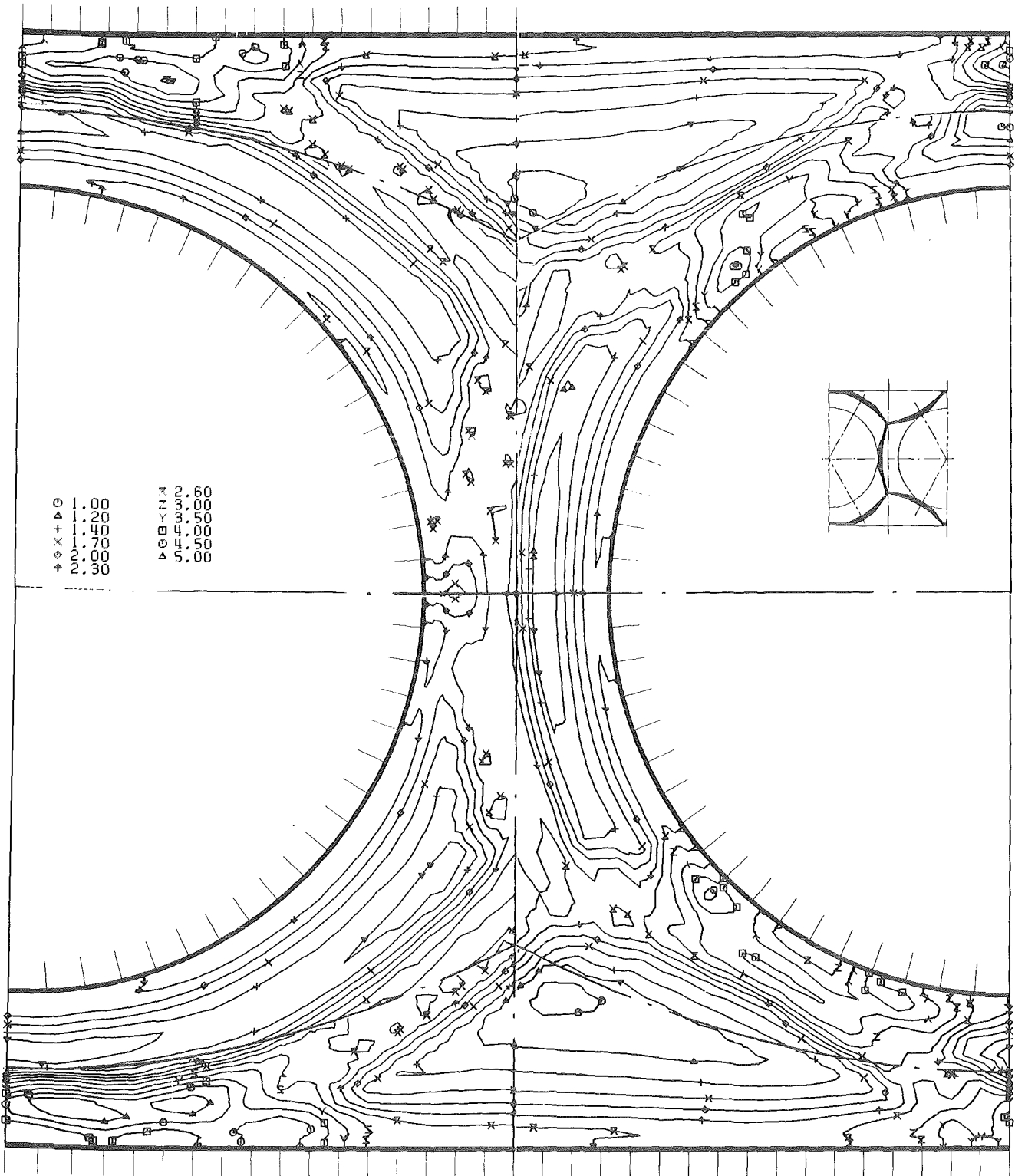


Abb.12 Axiale Turbulenzintensität bezogen auf die Referenzwand-
schubspannungsgeschwindigkeit in der Ebene E10

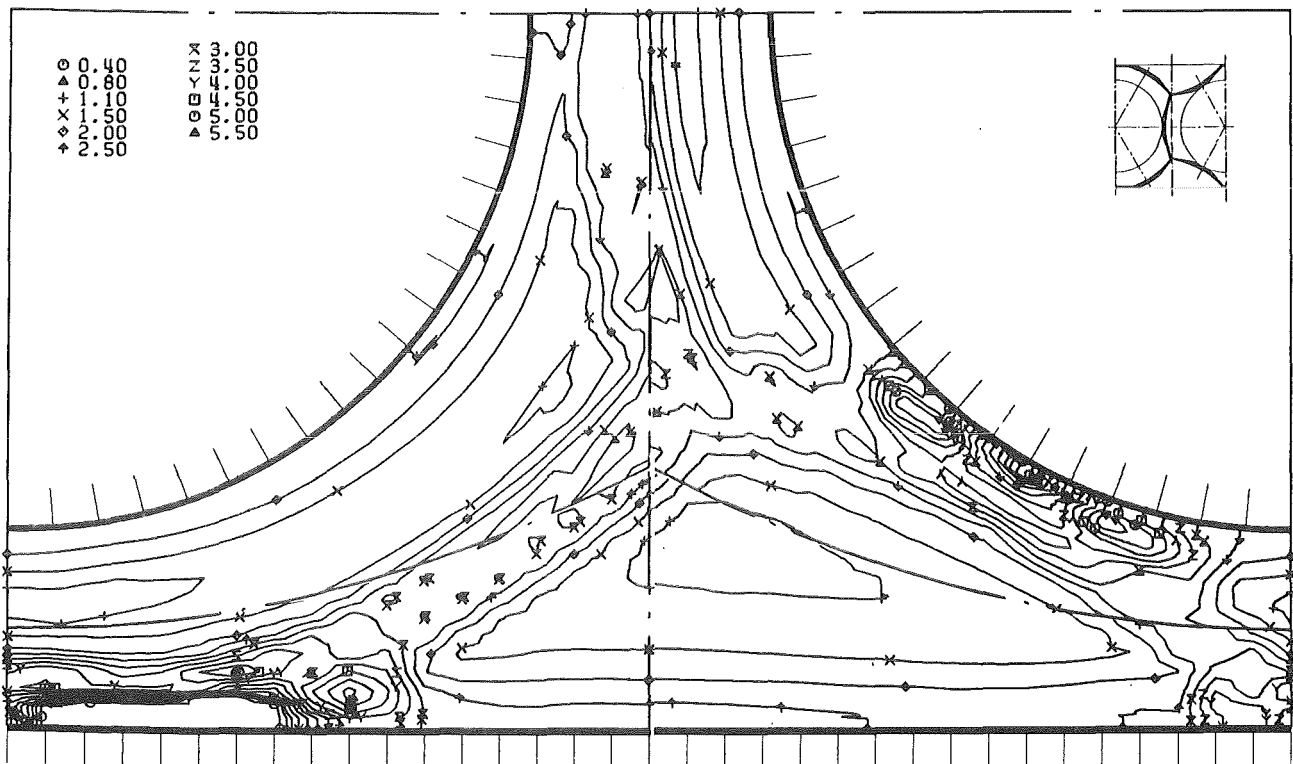


Abb.13 Axiale Turbulenzintensität bezogen auf die Referenzwand-
schubspannungsgeschwindigkeit in der Ebene E11

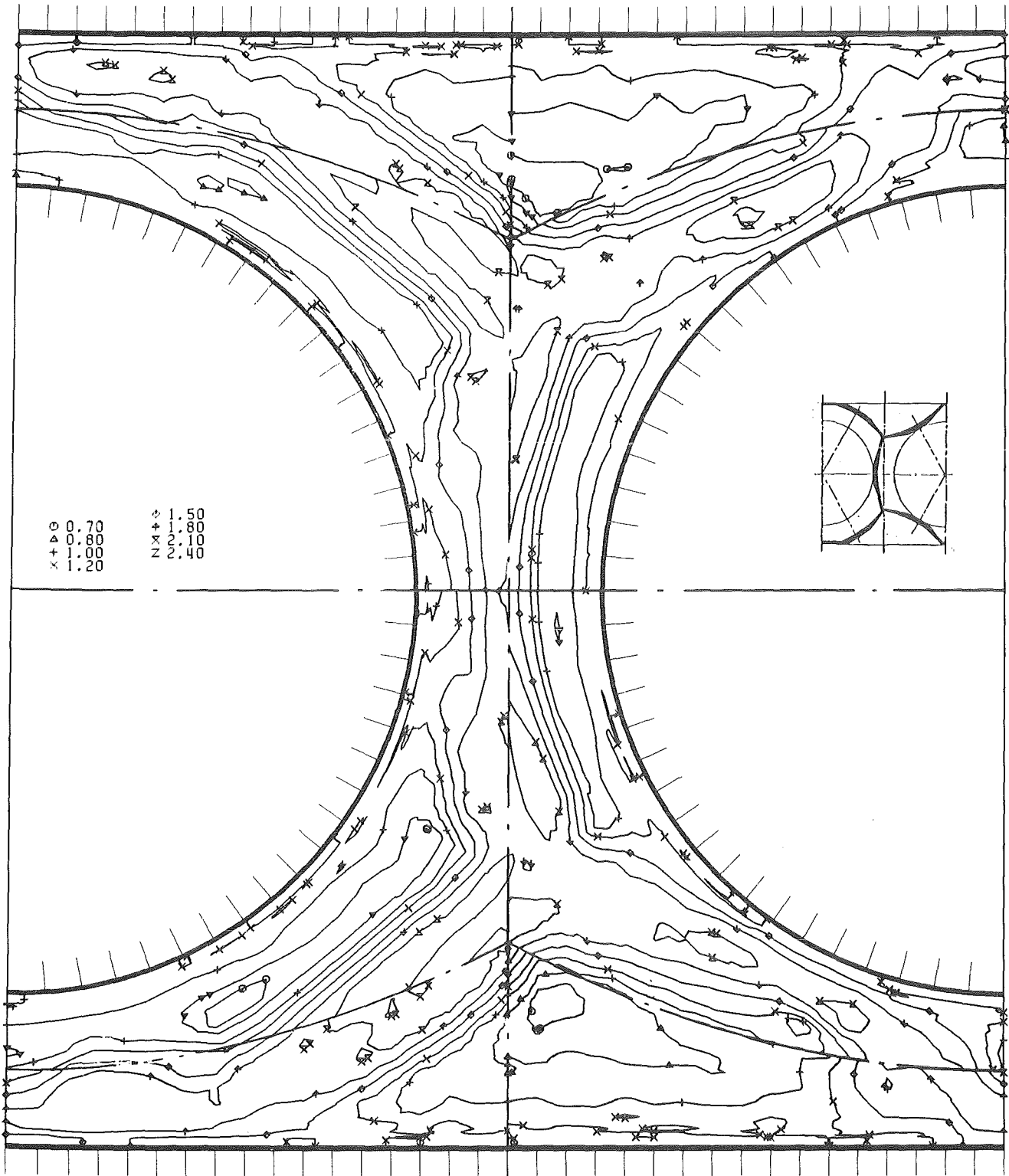


Abb.14 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit in der Ebene E9

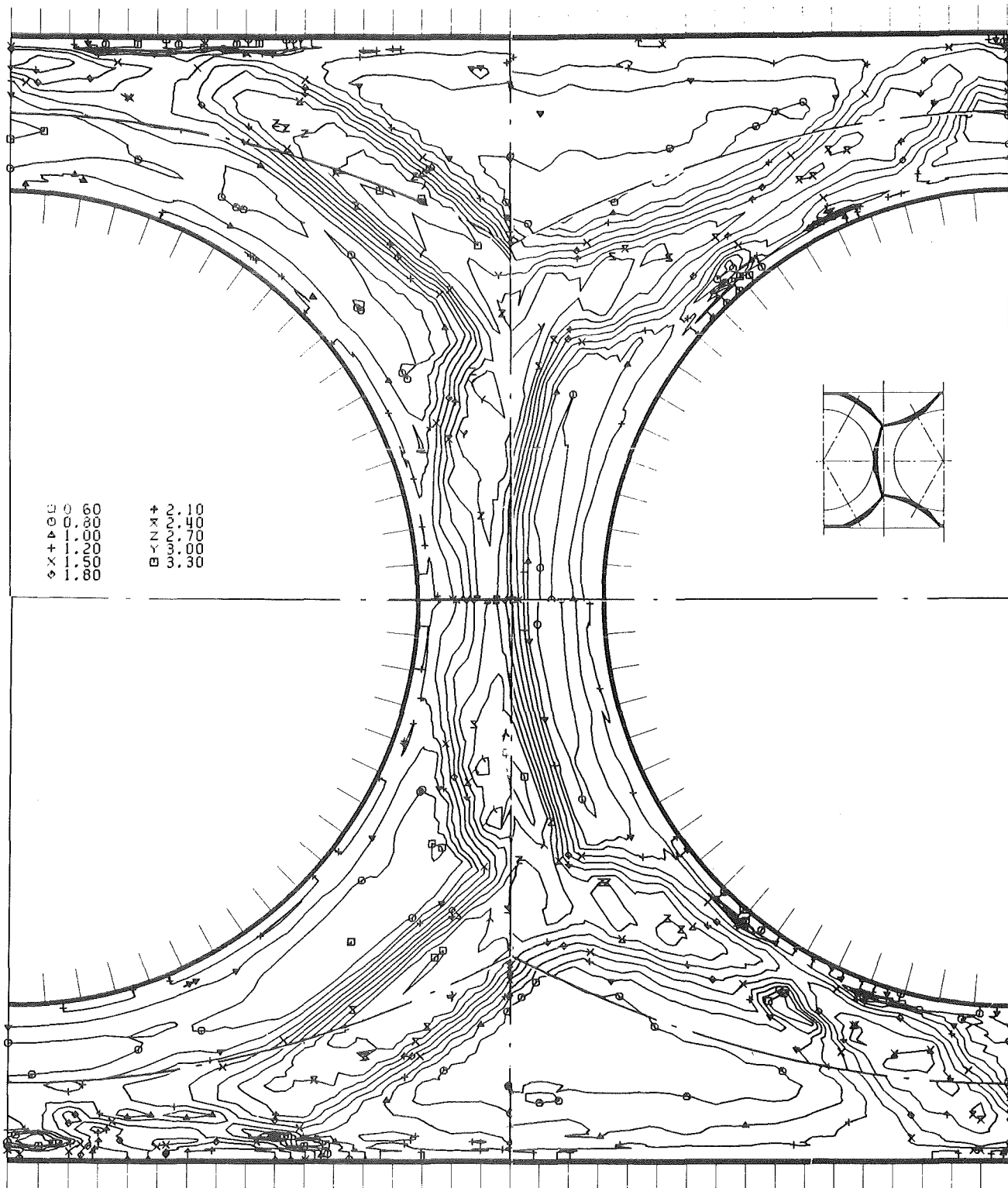


Abb.15 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit in der Ebene E10

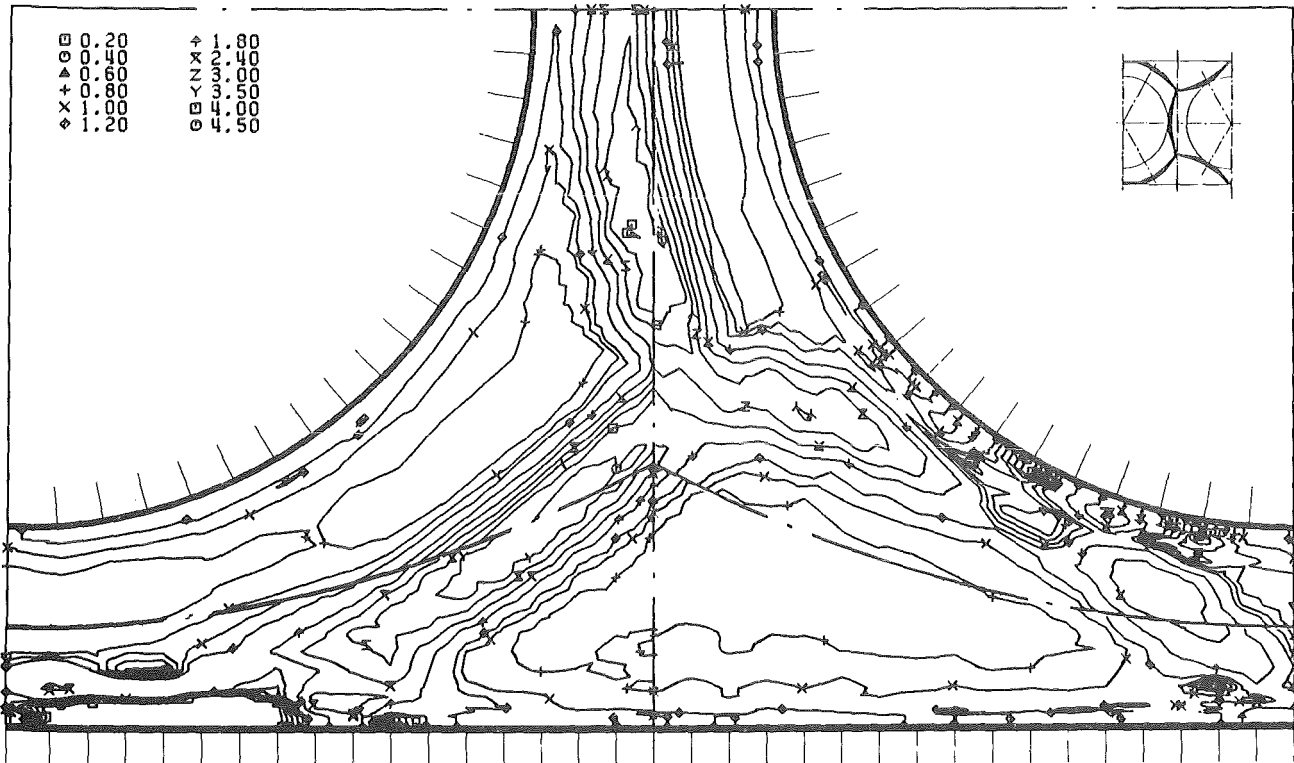
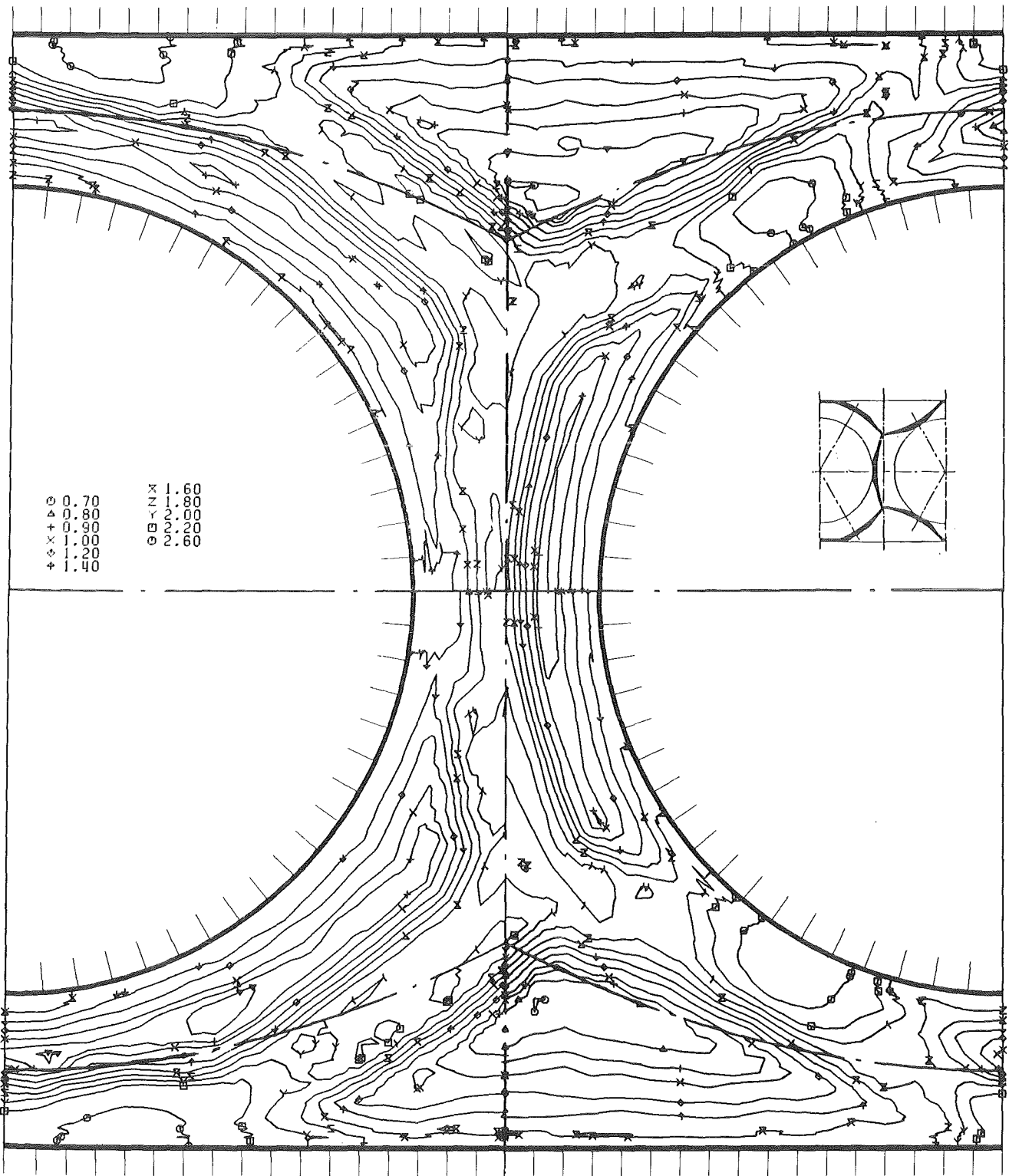


Abb.16 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit in der Ebene E11



KfK

Abb.17 Turbulenzintensität parallel zur Wand bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit in der Ebene E9

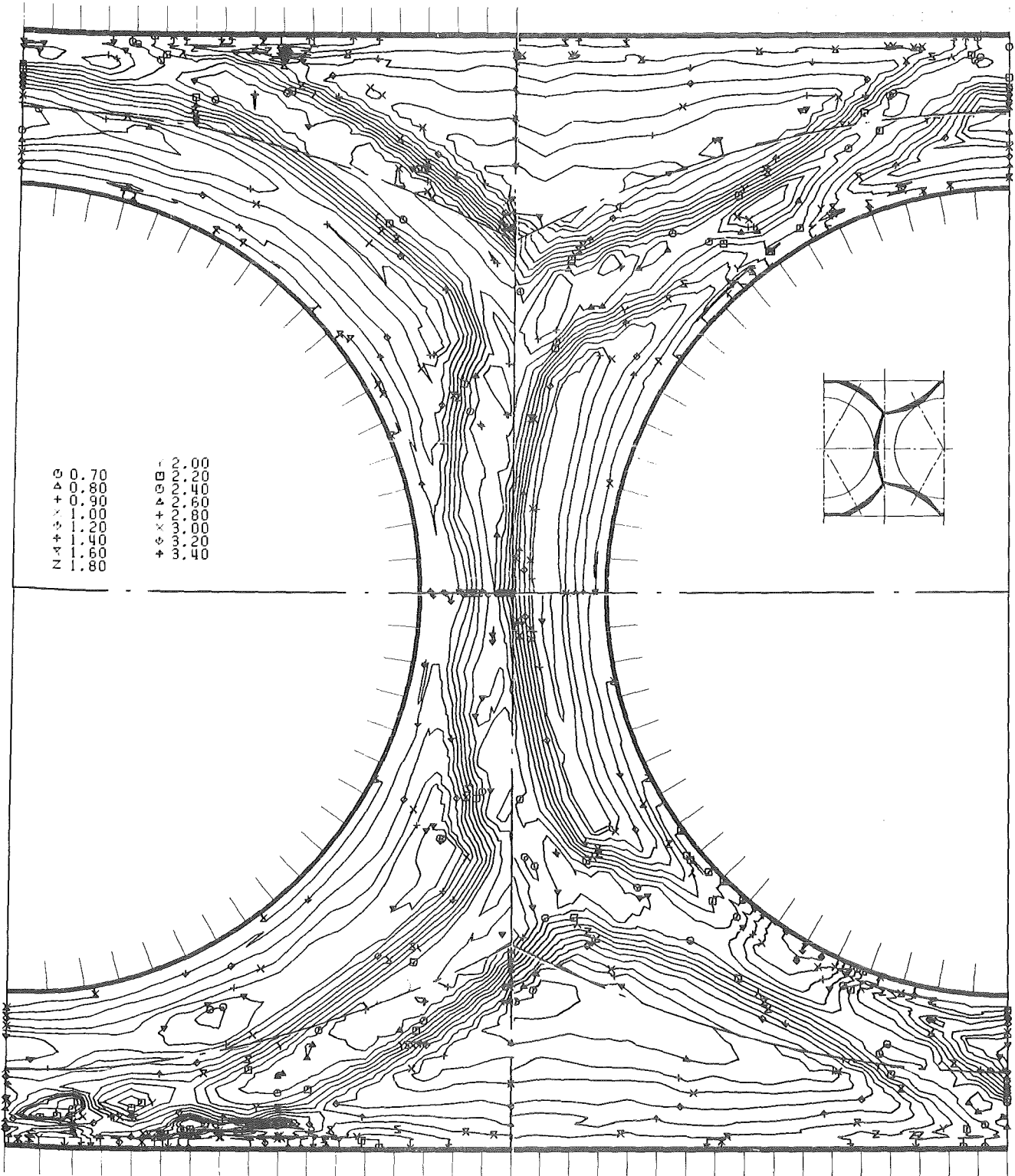
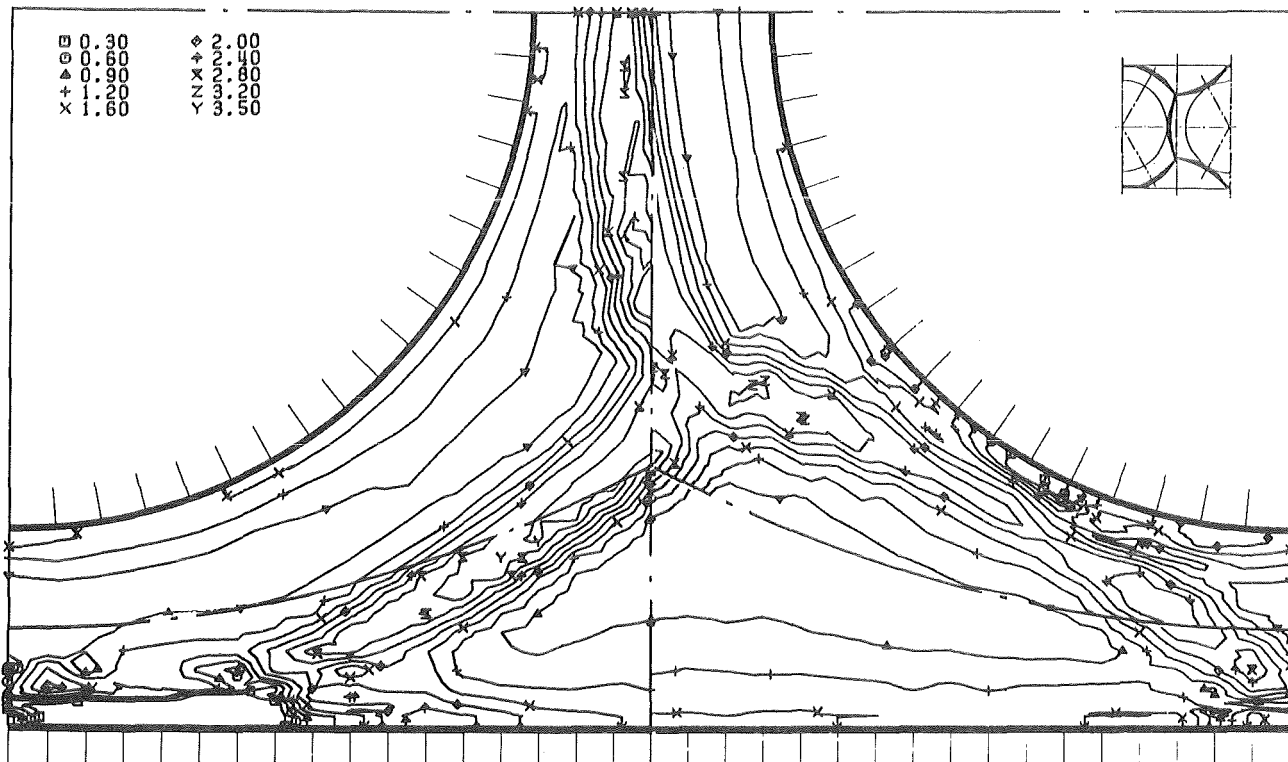
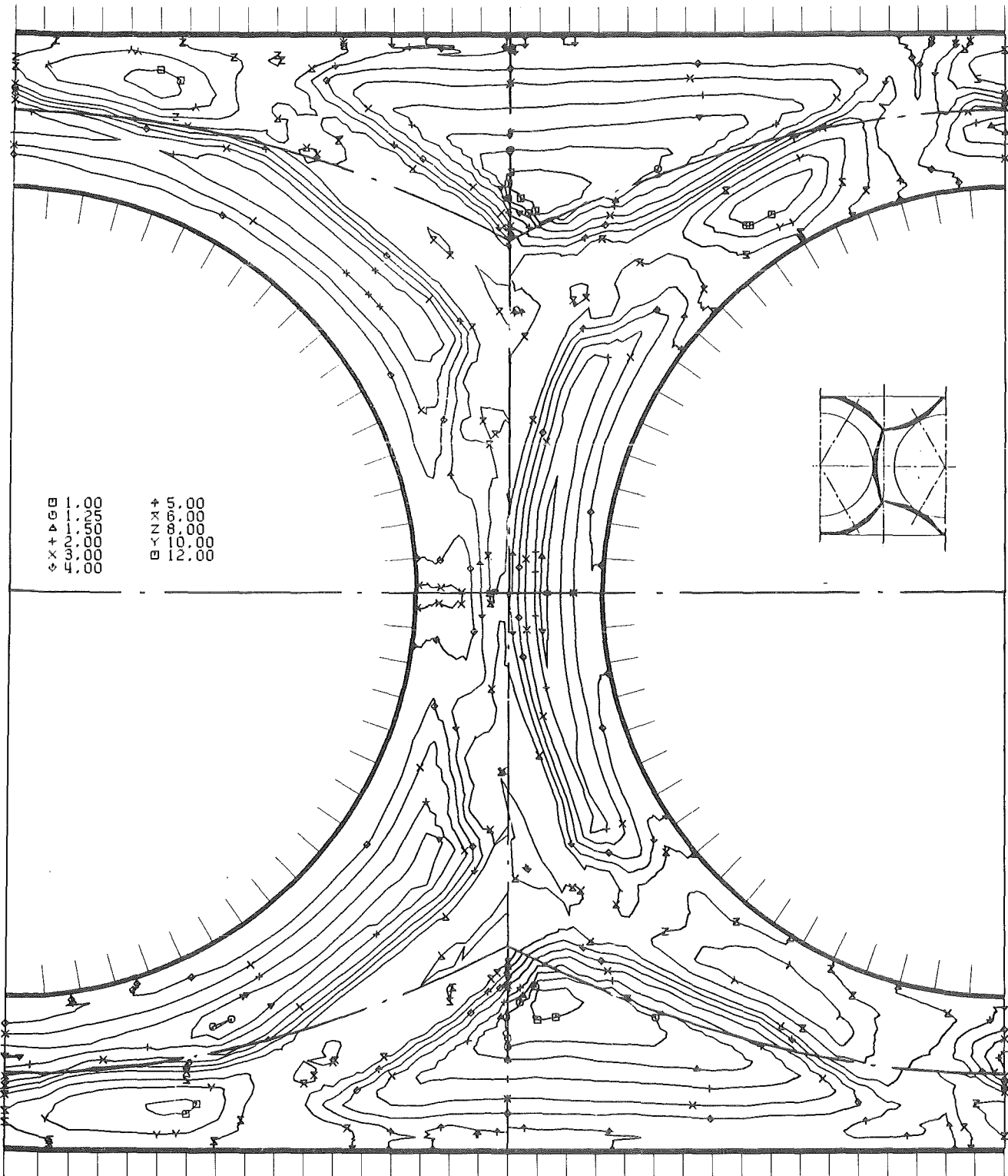


Abb. 18 Turbulenzintensität parallel zur Wand bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit in der Ebene E10



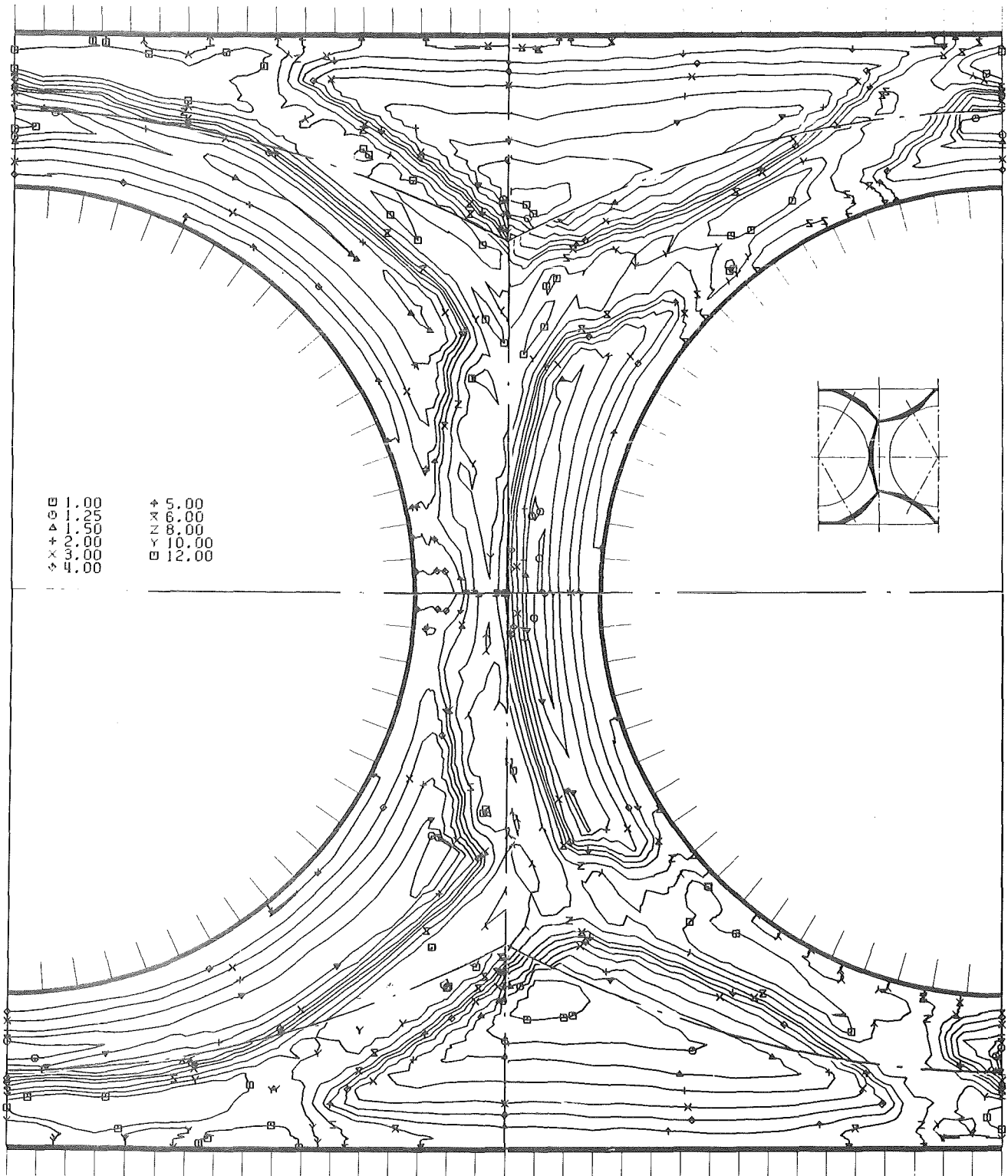
KfK

Abb.19 Turbulenzintensität parallel zur Wand bezogen auf die Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit in der Ebene E11



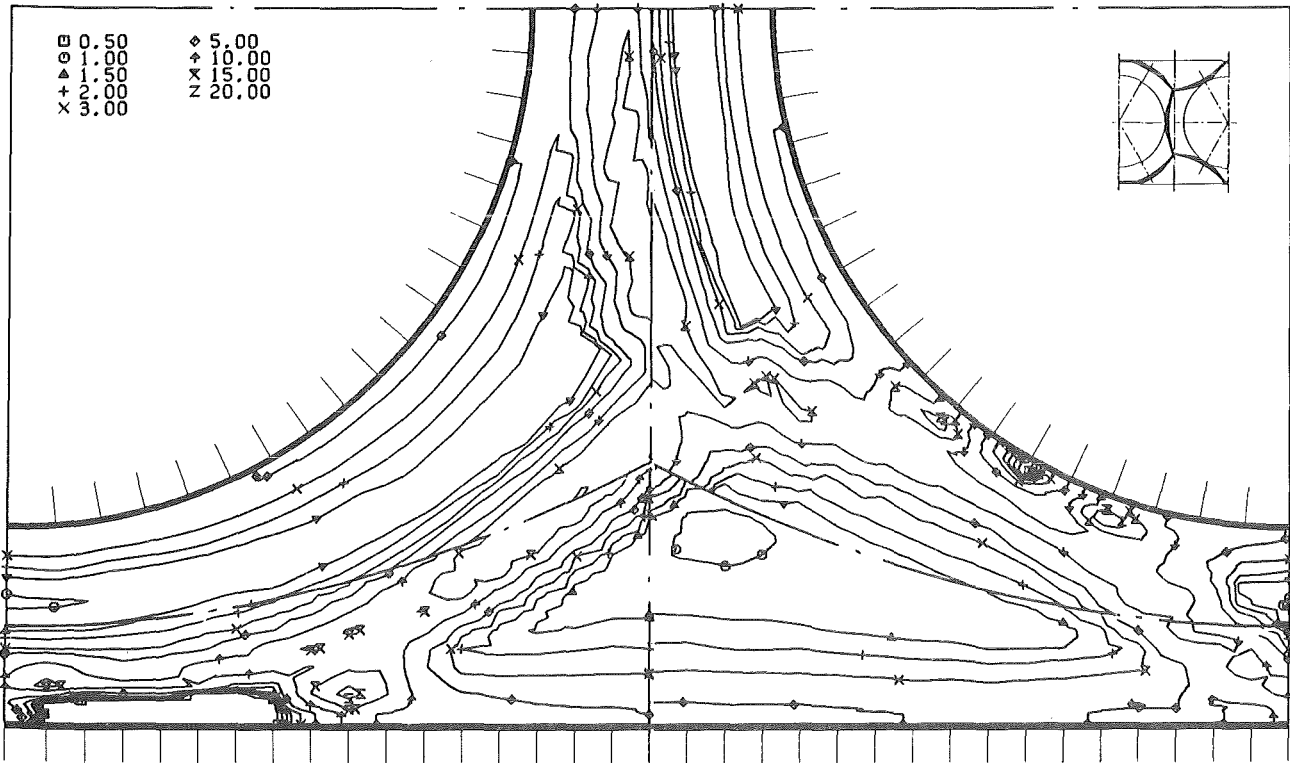
KfK

Abb.20 Kinetische Energie der Turbulenz bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit in der Ebene E9



KfK

Abb.21 Kinetische Energie der Turbulenz bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit in der Ebene E10



KfK

Abb.22 Kinetische Energie der Turbulenz bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit in der Ebene E11

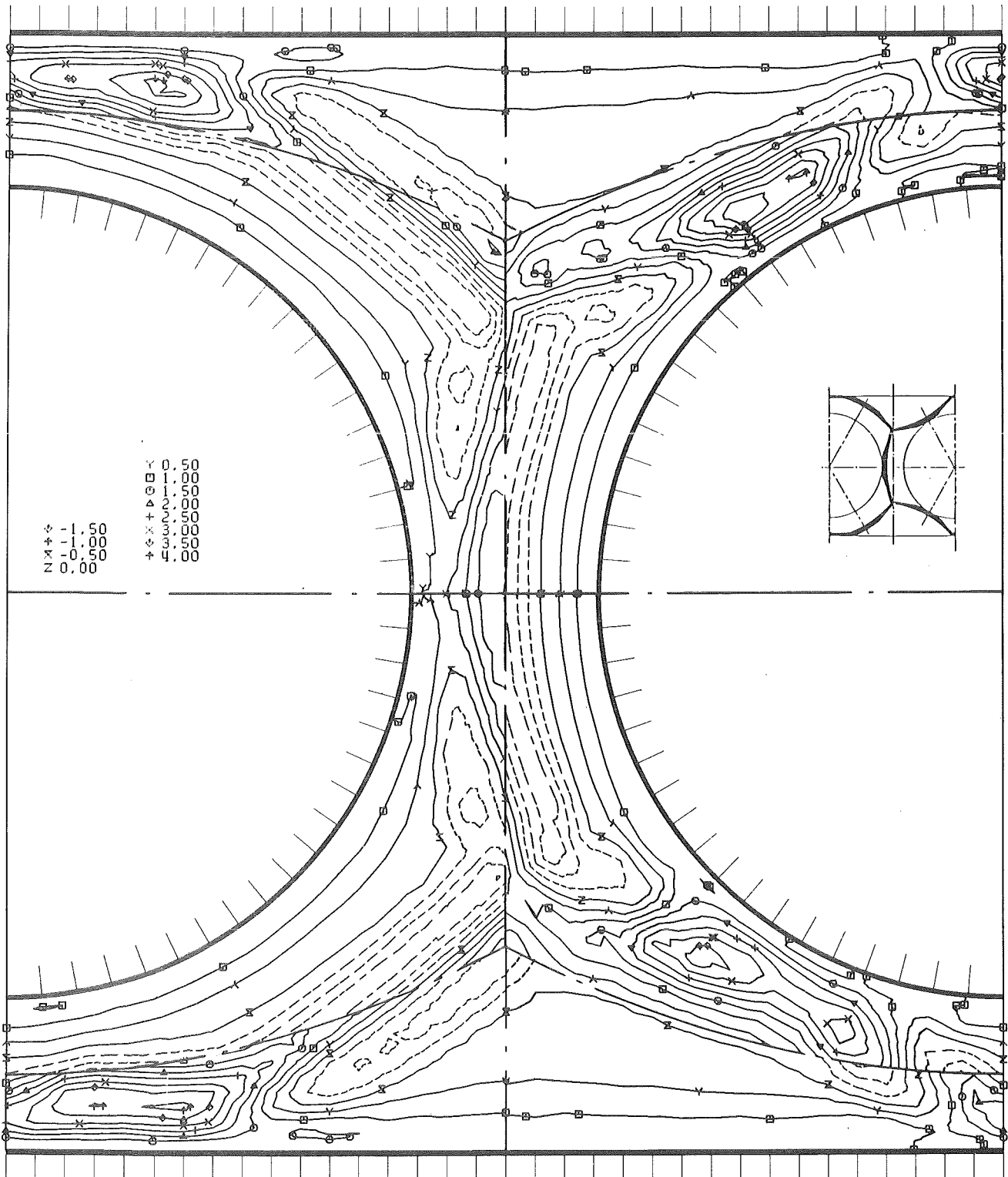


Abb.23 Schubspannung senkrecht zur Wand bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit in der Ebene E9

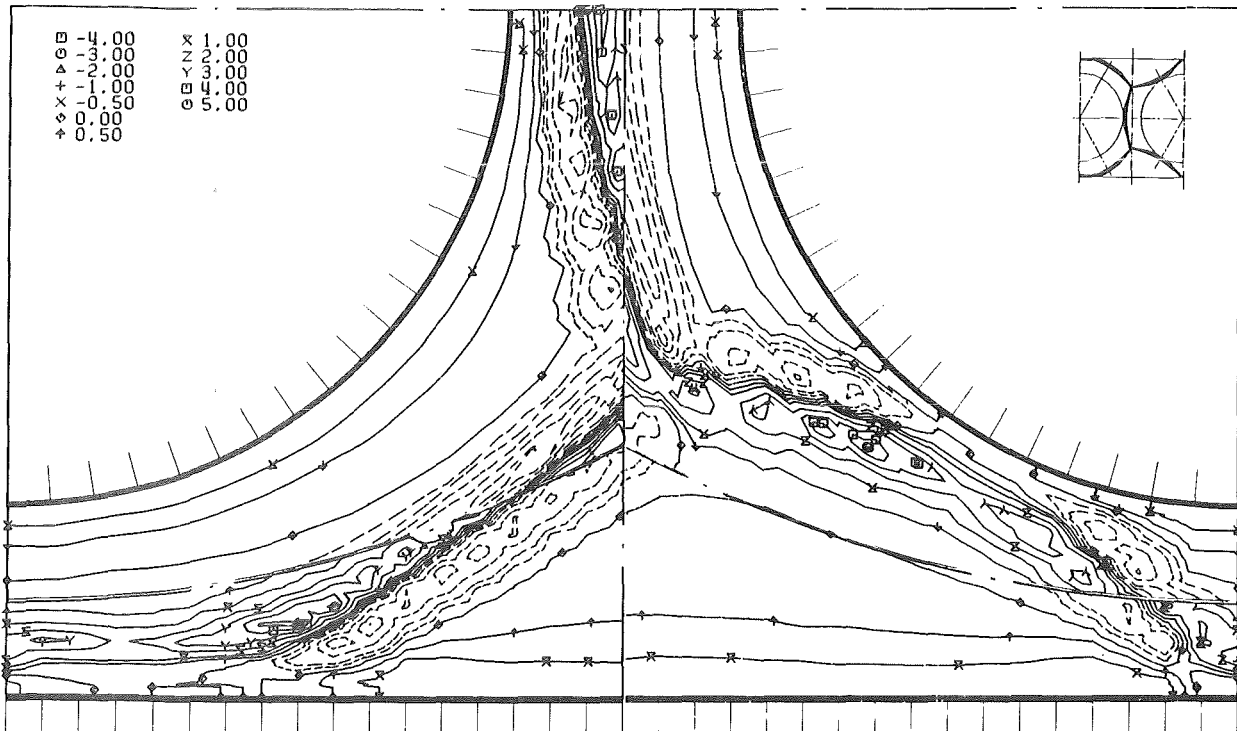


Abb.25 Schubspannung senkrecht zur Wand bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit in der Ebene E11

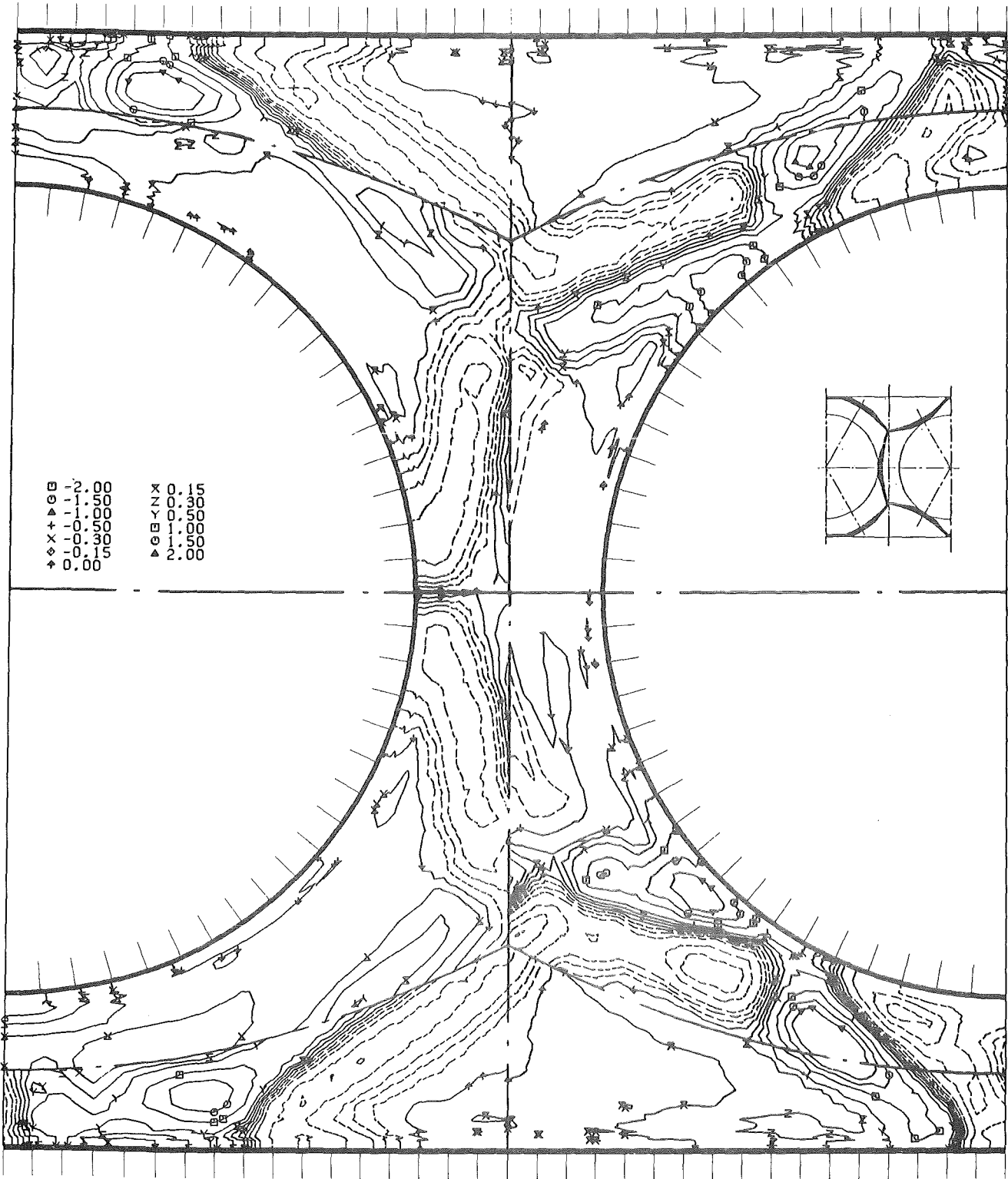


Abb. 26 Schubspannung parallel zur Wand bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit in der Ebene E9

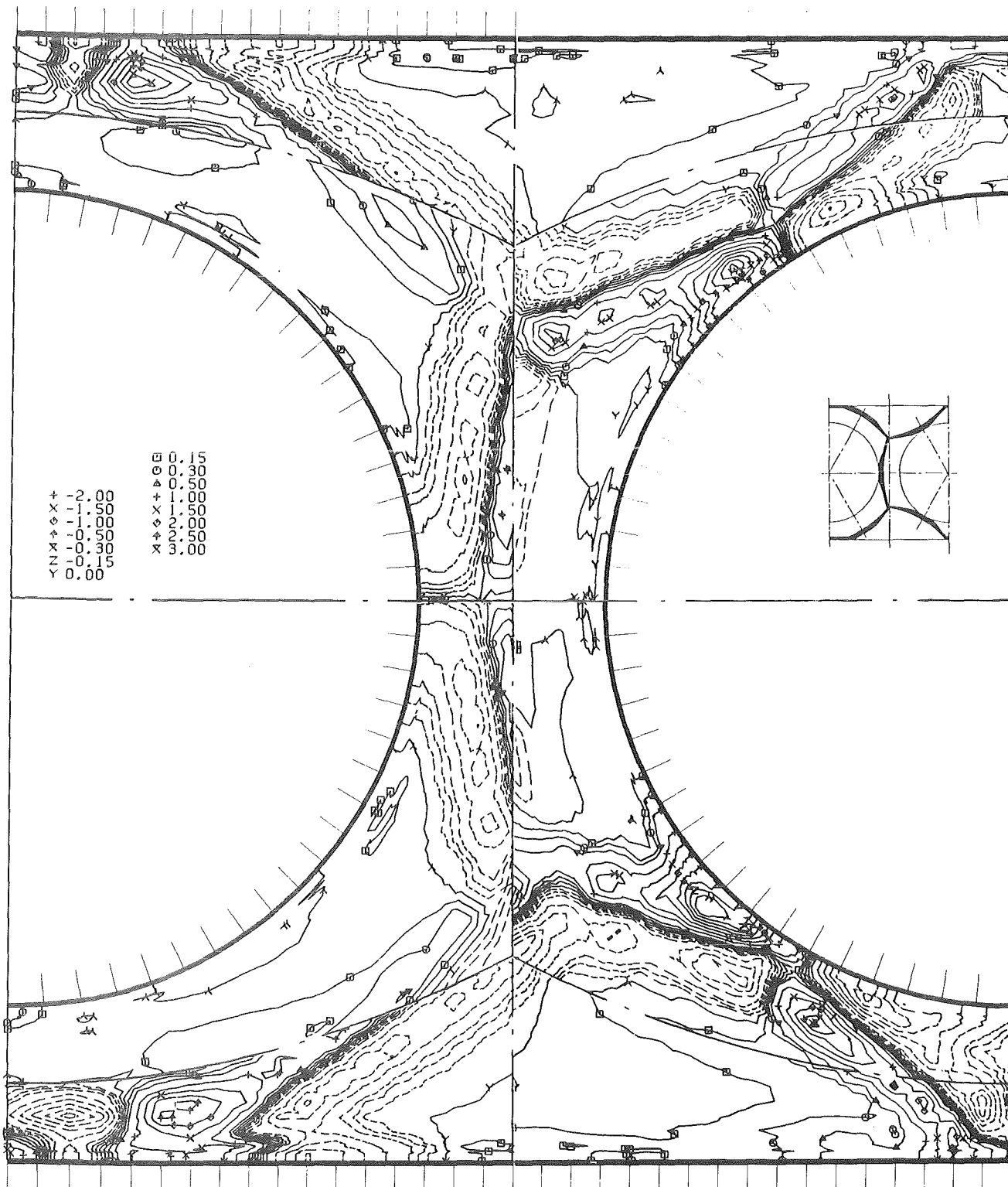


Abb.27 Schubspannung parallel zur Wand bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit in der Ebene E10

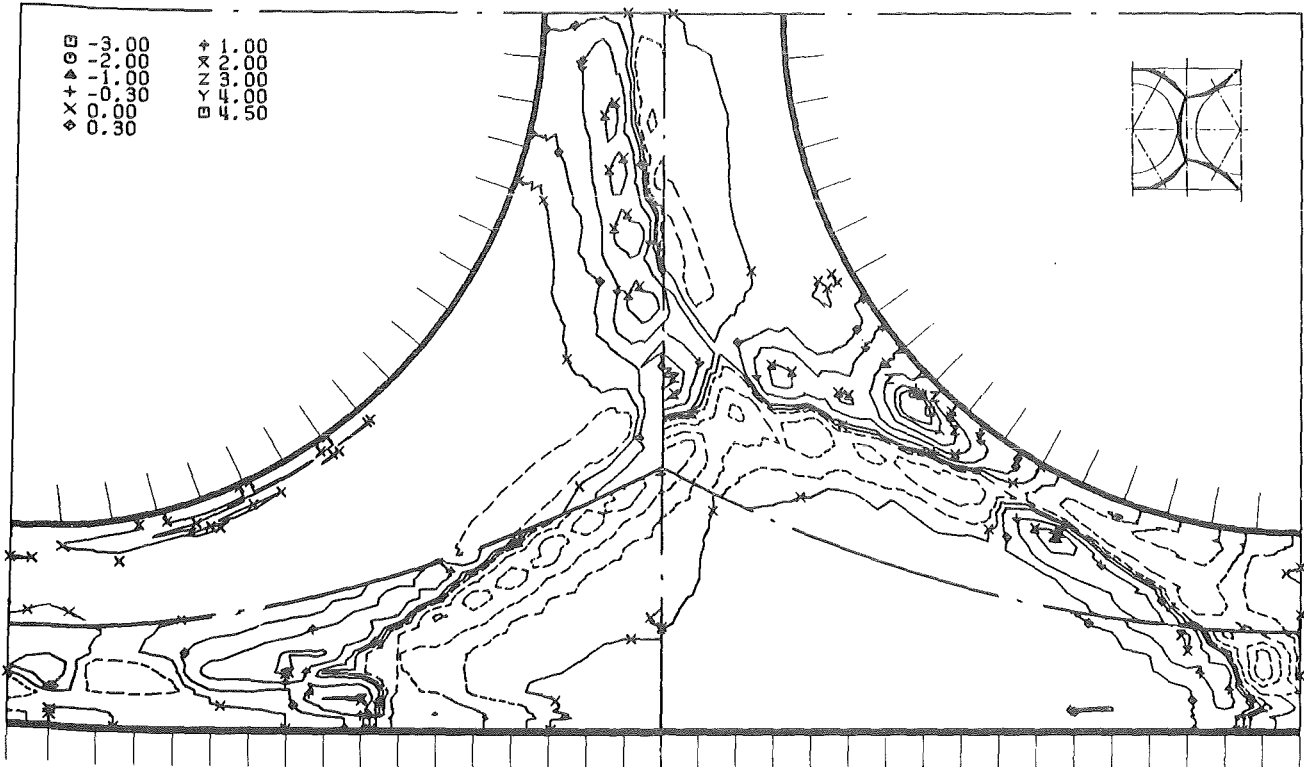


Abb.28 Schubspannung parallel zur Wand bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit in der Ebene E11

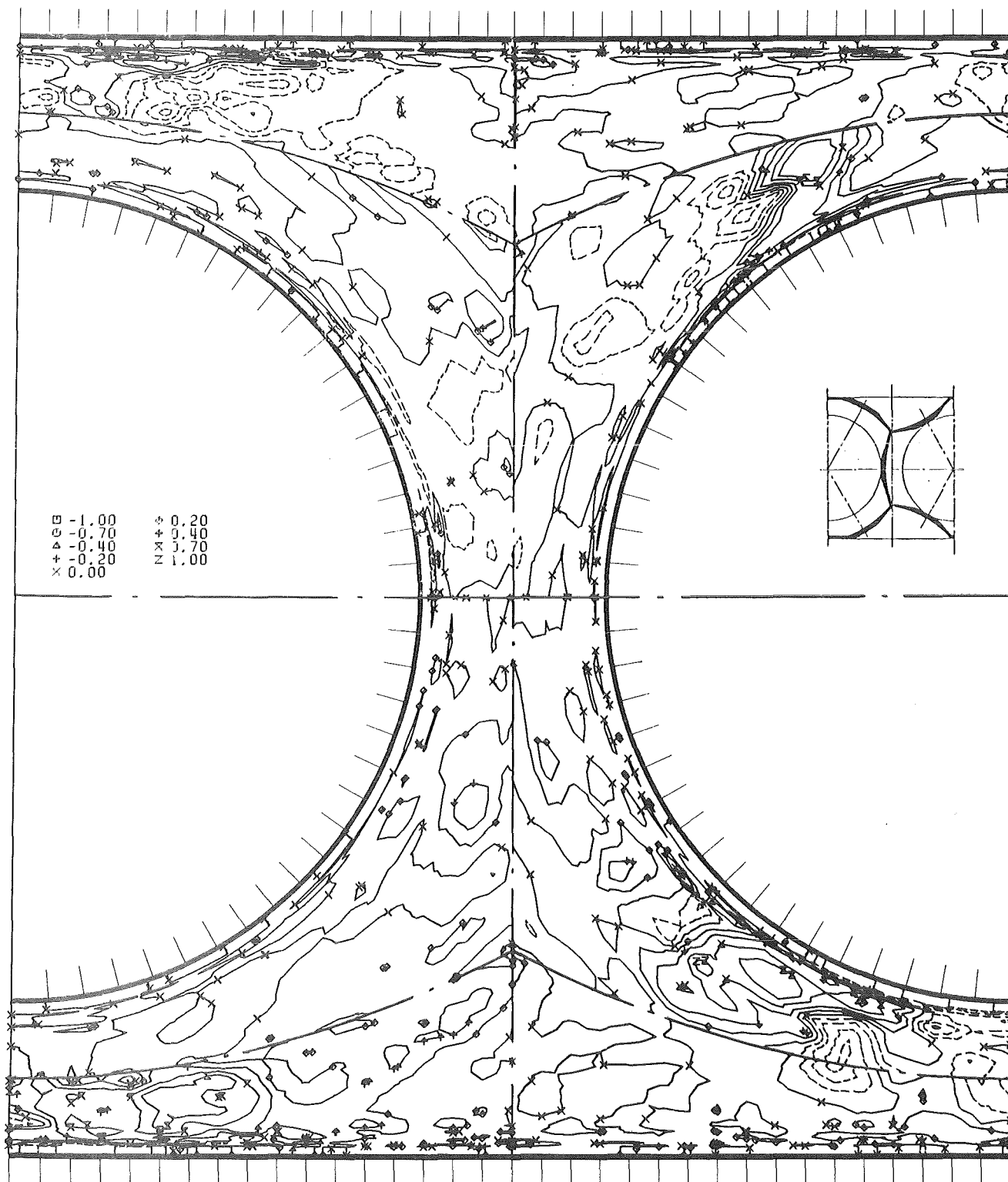
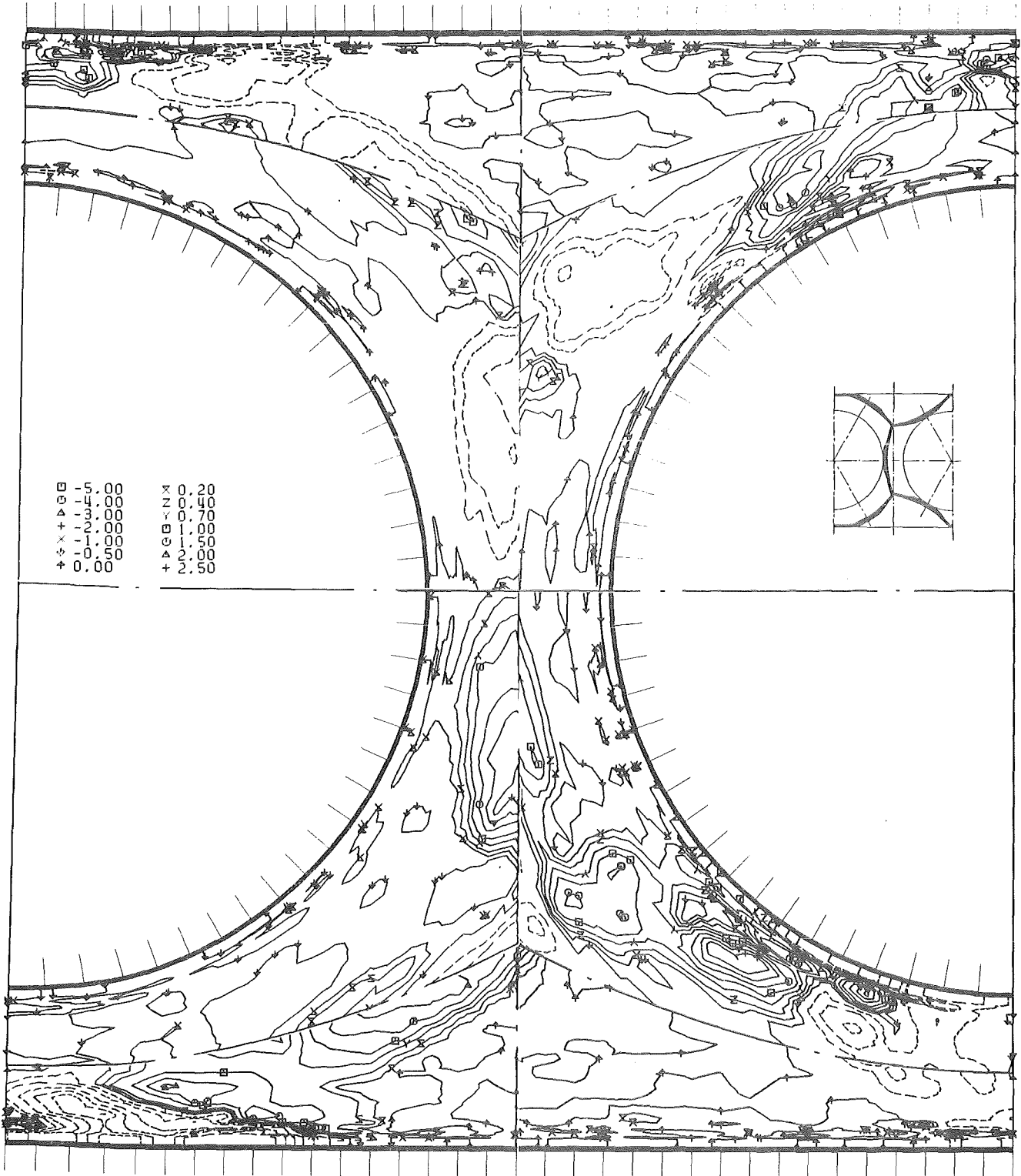


Abb. 29 Transverse Schubspannung bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit in der Ebene E9



kfk

Abb.30 Transverse Schubspannung bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit in der Ebene E10

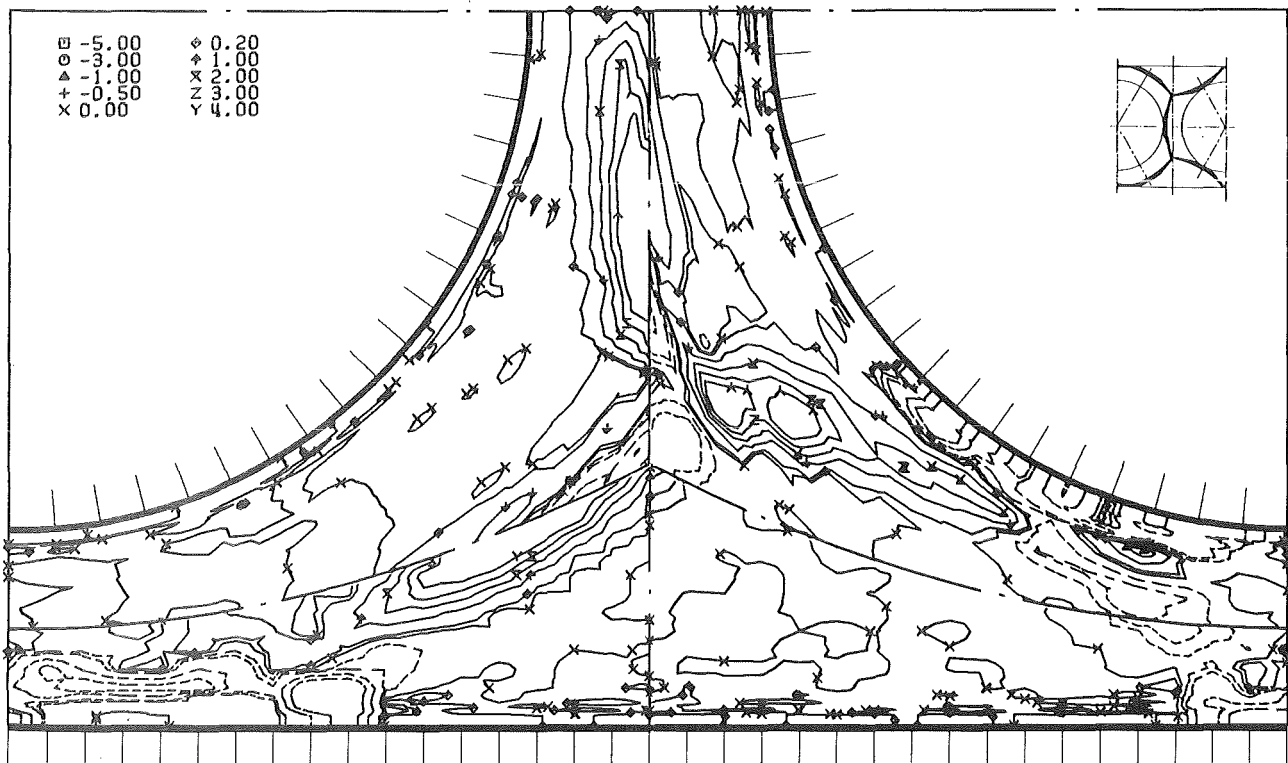


Abb.31 Transverse Schubspannung bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit in der Ebene E11

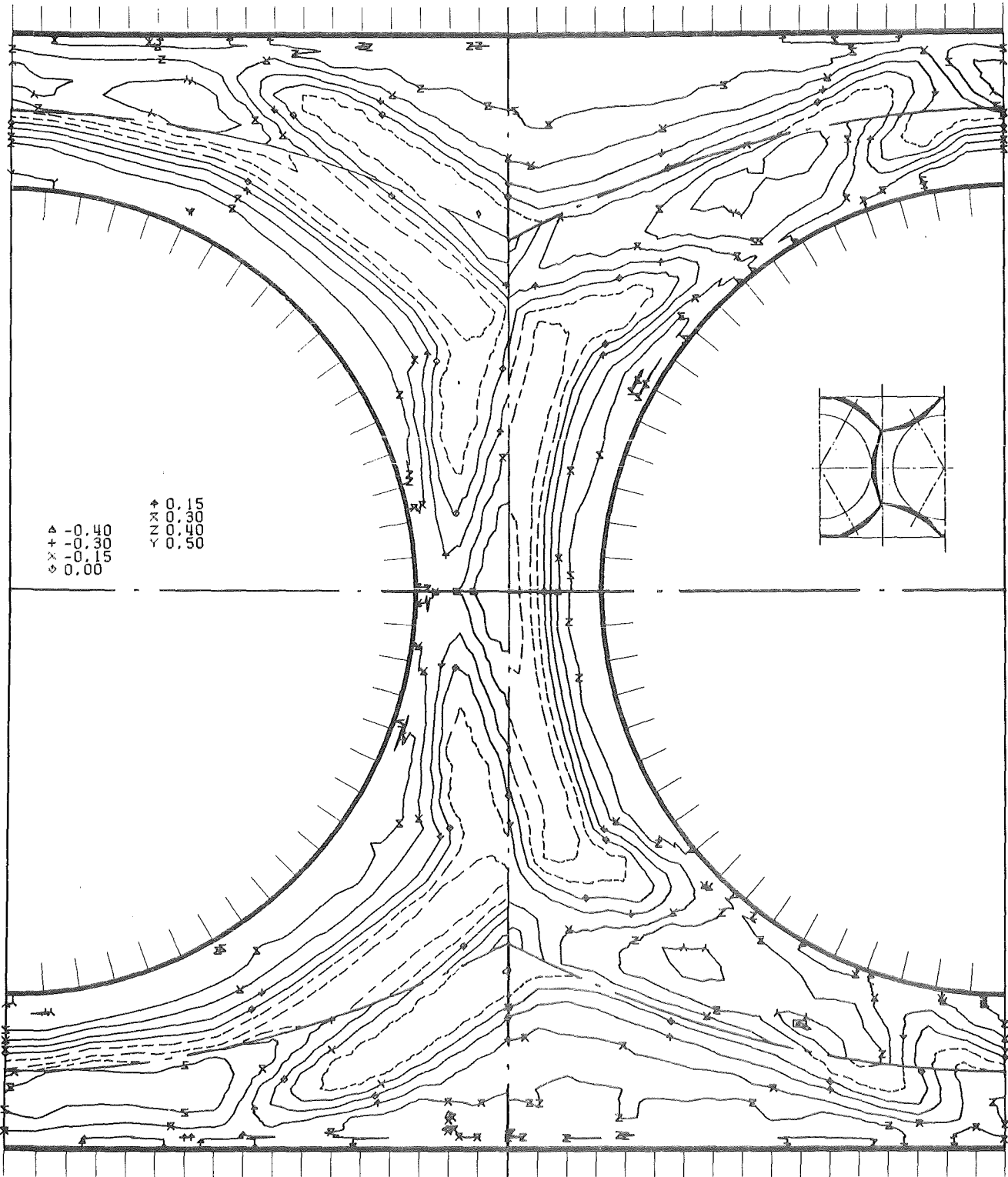
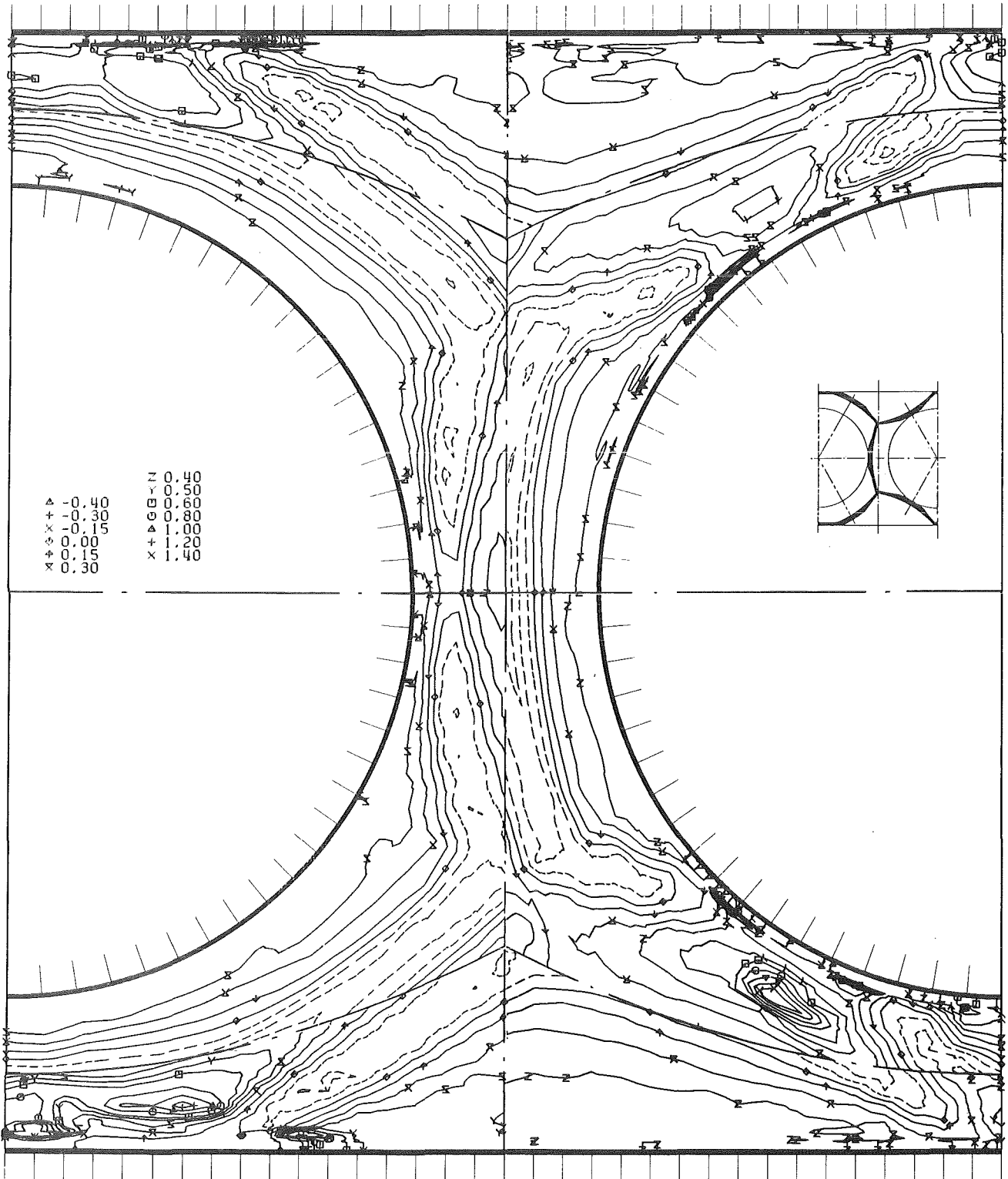
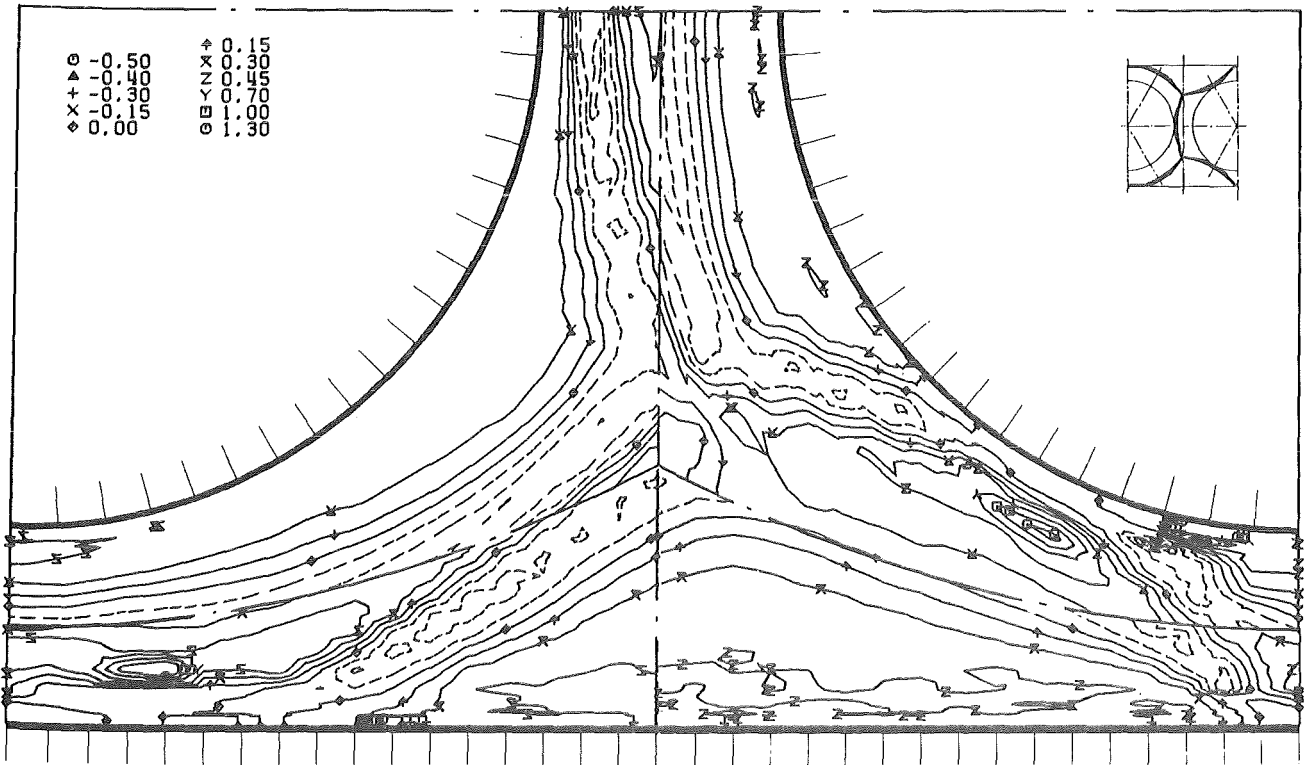


Abb.32 Korrelationskoeffizient der Schubspannung senkrecht zur Wand in der Ebene E9



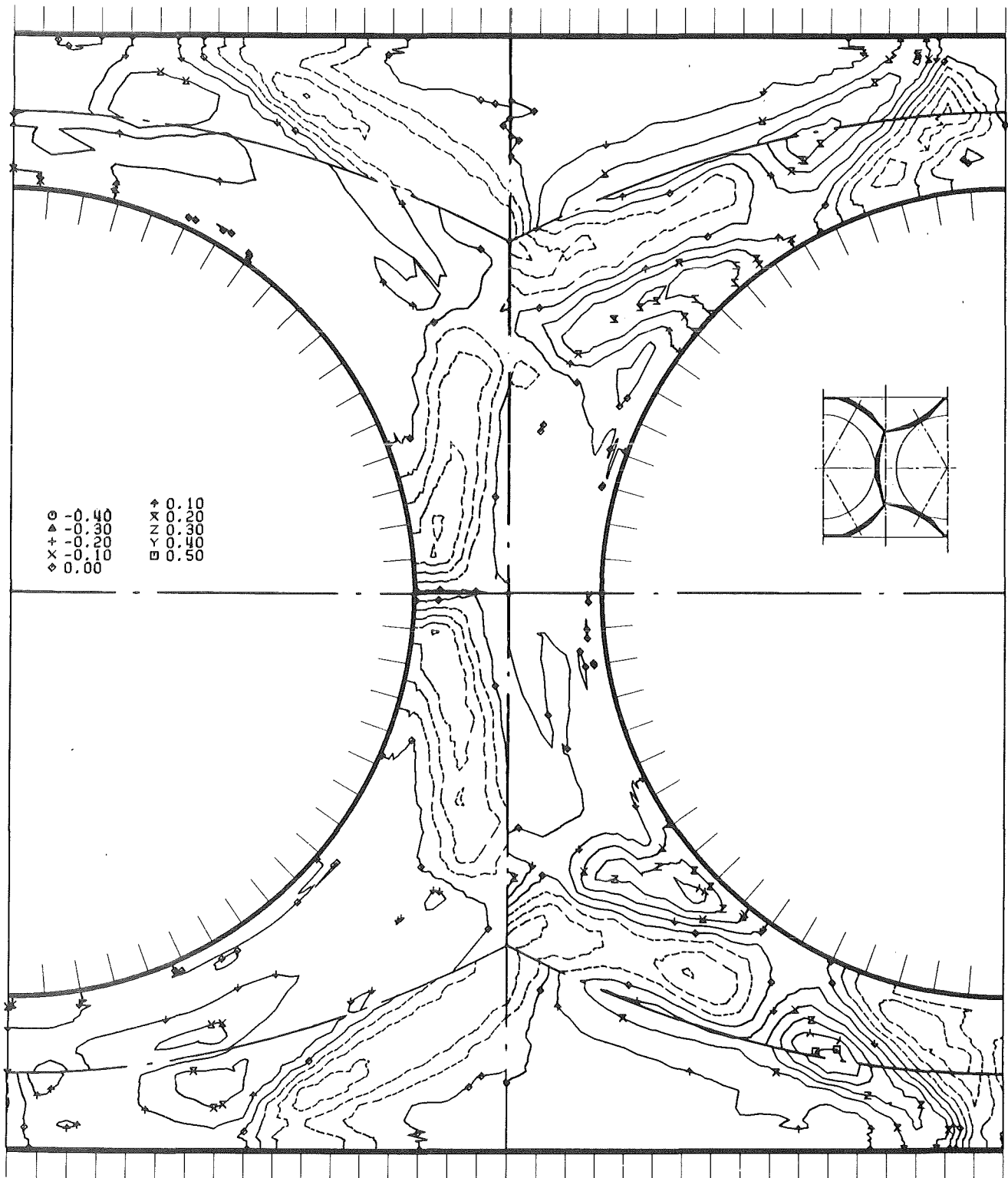
KfK

Abb.33 Korrelationskoeffizient der Schubspannung senkrecht zur Wand in der Ebene E10



kfk

Abb.34 Korrelationskoeffizient der Schubspannung senkrecht zur Wand in der Ebene E11



KfK

Abb.35 Korrelationskoeffizient der Schubspannung parallel zur Wand in der Ebene E9

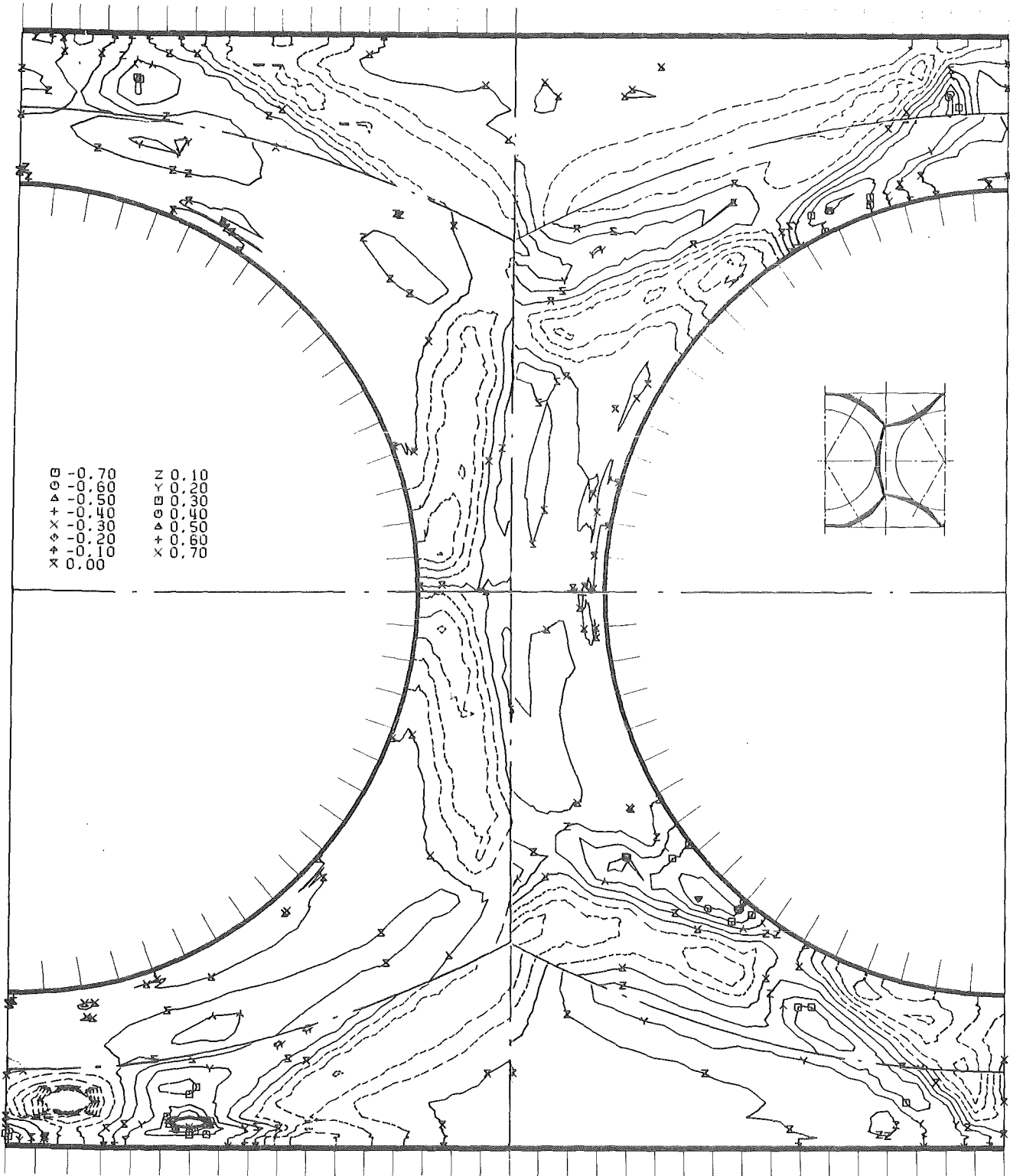


Abb.36 Korrelationskoeffizient der Schubspannung parallel zur Wand in der Ebene E10

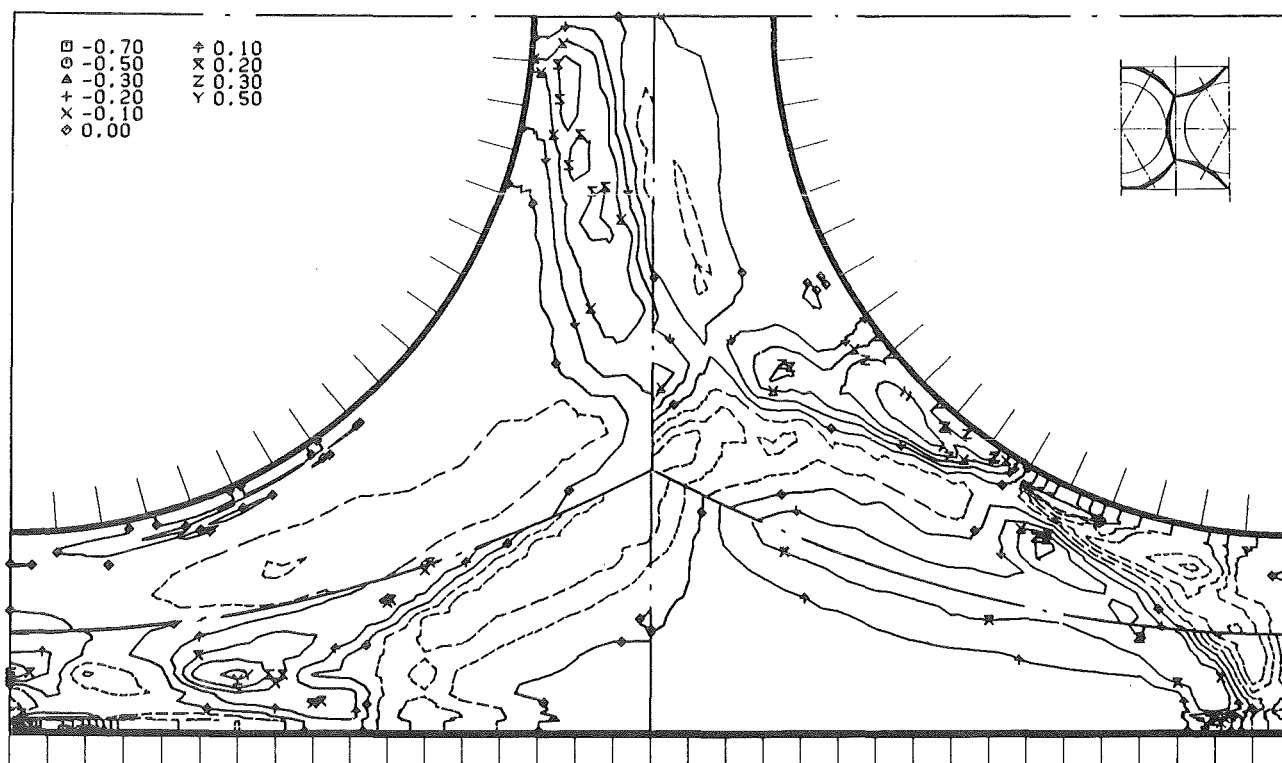
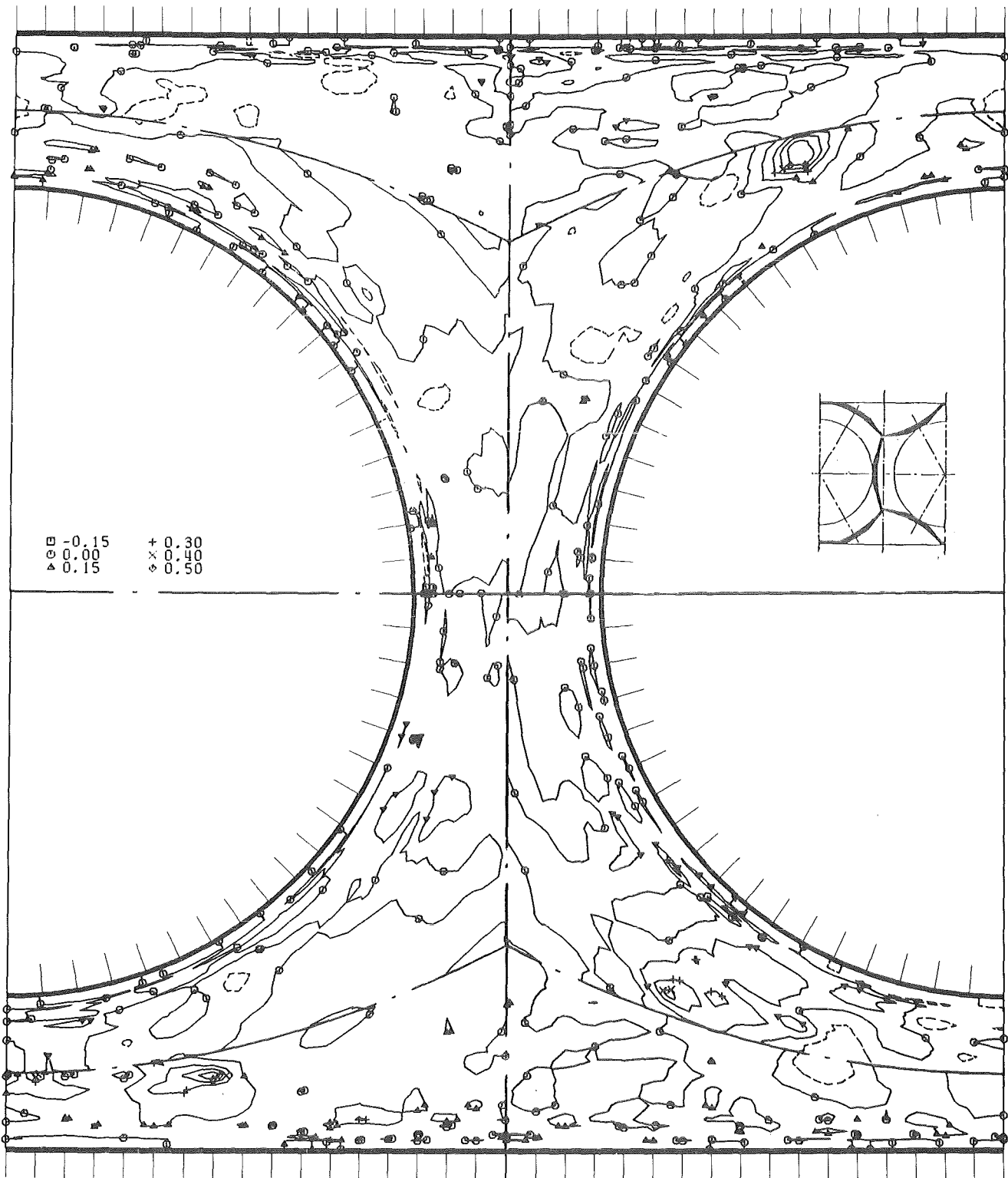


Abb.37 Korrelationskoeffizient der Schubspannung parallel zur Wand in der Ebene E11



KfK

Abb.38 Korrelationskoeffizient der transversen Schubspannung
in der Ebene E9

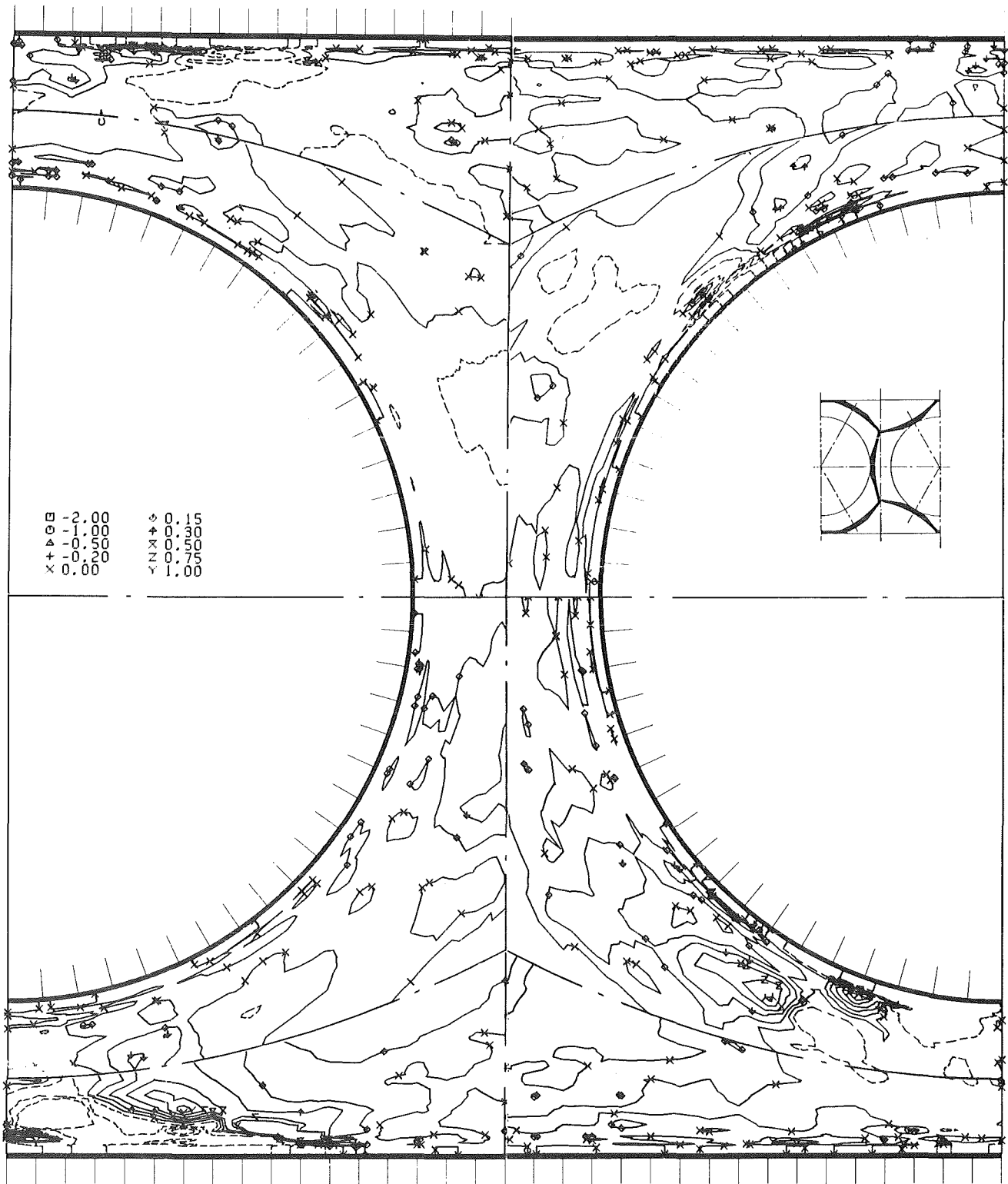
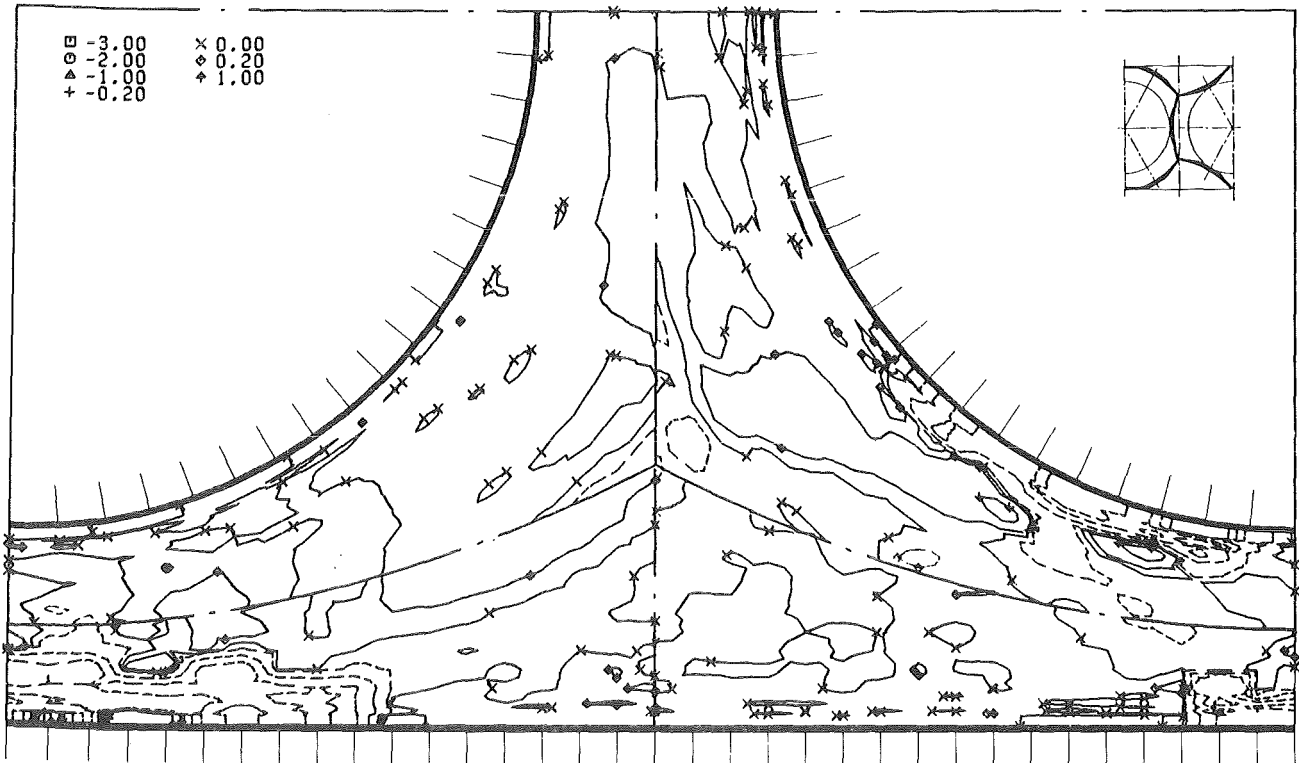


Abb.39 Korrelationskoeffizient der transversen Schubspannung in der Ebene E10



KTK

Abb.40 Korrelationskoeffizient der transversen Schubspannung
in der Ebene E11