

**KfK 4323**  
**Dezember 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 4323

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 Meßebeine zu hydraulischem Durchmesser von  $L/D_h=8.44$ ,  $4.61$  bzw.  $1.93$  vorhanden. Die Reynoldszahl der Untersuchungen betrug  $Re=1.56 \cdot 10^5$ .

Die Ergebnisse zeigen, daß Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen stark 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  $L/D_h=8.44$ ,  $4.61$ , and  $1.93$ , respectively. The Reynolds number of this investigation was  $Re=1.56 \cdot 10^5$ .

The results show that the distributions of the velocity and of the turbulence are strongly affected 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 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 Massenumverteilung 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 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 von vier parallelen Rohren von  $D = 139.0$  mm Durchmesser, durchgeführt, die symmetrisch in einem Rechteckkanal mit den Abmessungen  $700 \times 190$  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/ 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

$$L/D_h = 8.44 \text{ für Meßebe E6,}$$

$$L/D_h = 4.61 \text{ für Meßebe E7,}$$

und

$$L/D_h = 1.93 \text{ für Meßebe E8.}$$

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

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

Für die Pitotrohr-Messungen werden selbstgefertigte Staudrucksonden von  $d_p = 0.62$  mm Außendurchmesser verwendet; die gleichen Sonden werden ebenfalls für die Prestonrohr-Messungen eingesetzt.

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

Der gesamte Versuchsablauf wird von einem Rechner vollautomatisch gesteuert. Für die Messungen wurde ein IBM-PC/XT zur Steuerung eingesetzt. Der IBM-PC/XT wurde dazu mit einem A/D-Wandler, an den die 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 /9/ ausführlich dokumentiert; die Version, die z.Z. benutzt wird, enthält einige Verbesserungen gegenüber der Basisversion.

Die Geometrie der zwei Wandkanäle, in denen gemessen wird, besteht aus vier Quadranten (Q1 bis Q4), die jeweils wiederum in zwei Bereiche geteilt werden. Die Aufteilung erfolgt längs der Linie des maximalen senkrechten Wandabstandes von Stab- und Kanalwand (Abb.4). Der Bereich, der dem Stab benachbart ist, wird in zylindrischen Koordinaten ( $r/\phi$ ) ausgemessen, der Bereich nahe der Stabwand in kartesischen Koordinaten ( $x/y$ ). Die Messungen in den beiden Bereichen erfolgen zeitlich nacheinander. Die Verteilung der Meßpunkte ist dabei so gewählt, daß sich das ausgemessene Gebiet beider Bereiche überlappt, und zwar durch jeweils 2 Meßpunkte (Abb.5). Im Bereich nahe der Stabwand ist der Abstand zwischen den Traversen senkrecht zur Wand  $5^\circ$ , im Bereich nahe der Kanalwand 5 mm. Auf jeder Traverse ist die Punktdichte nahe den Wänden erhöht, weil die Gradienten der Meßgrößen dort höher sind. Für die vorliegende Geometrie wurden im Bereich nahe der Stabwand 315 und nahe der Kanalwand 300 Meßpunkte verwendet. Für das gesamte ausgemessene Gebiet (4 Quadranten) ergibt das eine Meßpunktzahl von 2460. Die Messungen mit dem

Pitotrohr, dem Prestonrohr und den Hitzdrähten erfolgen ebenfalls zeitlich nacheinander. Der gerade Hitzdraht ist bei den Messungen parallel zur Wand angeordnet, während mit dem schrägen Hitzdraht Messungen in sieben um jeweils  $45^\circ$  versetzte Positionen erfolgen /9/.

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 /9/ 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 /10/ ausgewertet. Für die Hitzdraht-Messungen wird dabei die von Hooper /11/ 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  $0,13^\circ$  vom Nominalwinkel  $45^\circ$  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 ( $r/\phi$  und  $x/y$ ). Die Korrekturen aufgrund der Änderungen der Wetterbedingungen (Luftdruck und -temperatur) sind kleiner als 5.4%.

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 1.3% und für den schrägen Hitzdraht unter 2.1%. Die Korrekturfaktoren auf die Referenzbedingungen sind in Tabelle 4 enthalten. Diese Korrekturfaktoren sind bei allen Versuchen für den geraden kleiner als 0.9% und für den schrägen Hitzdraht kleiner als 1.0%.

## 5. Ergebnisse

In diesem Bericht werden die Ergebnisse in Form von Höhenlinien dargestellt und diskutiert. Für die beiden ausgemessenen Wandkanäle wurden mithilfe eines Rechenprogramms /12/ die Höhenlinien aus den Meßergebnissen ermittelt, und zwar für jeden der zwei Bereiche ( $r/\phi$  und  $x/y$ ) in jedem Quadranten ein Höhenlinienbild. Die Höhenlinienbilder (acht) wurden dann zusammengeklebt. Die Meßergebnisse wurden nicht geglättet, sondern so verwendet, wie sie ermittelt wurden. Durch die Zusammensetzung des Gesamtbildes aus acht Einzelbildern entstehen an den Schnittstellen (Linien größten wandsenkrechten Abstandes und Symmetrielinien) zum Teil Sprünge. Für die senkrecht zur Zeichenebene liegenden Daten (Geschwindigkeit, axiale Turbulenzintensität) spiegeln die Sprünge an den Schnittstellen die Qualität der Ergebnisse wider, da die acht Teile der Bilder zu unterschiedlichen Zeiten nacheinander gemessen wurden.

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

### 5.1 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit

Die gemessenen zeitlichen Mittelwerte der Strömungsgeschwindigkeit sind in den Abb. 6,7 und 8 für die drei Meßebenen E6, E7 bzw. E8 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 mit wachsender Annäherung an den Abstandshalter stark ungleichmäßig wird. Ab der Ebene E7

( $L/D_h = 4.61$ ) ist die Struktur des Abstandshaltergitters, die in den Abbildungen angedeutet ist, deutlich zu erkennen an den geschlossenen Höhenlinien zwischen Abstandhalter und Stab- bzw. Kanalwänden. Das bedeutet, daß ab  $L/D_h = 4.61$  die Geschwindigkeitsverteilung durch das Abstandshaltergitter bestimmt wird.

Die Asymmetrie der Geschwindigkeitsverteilung bezüglich der Symmetrieachse durch die Stabzentren, die bei den vorangegangenen Messungen für  $L/D_h > 8.44$  beobachtet wurde /7,8/, ist auch in den Geschwindigkeitsverteilungen bei  $L/D_h = 8.44-1.93$  zu erkennen. Diese Asymmetrie ist auf die Strömungsbedingungen am Einlauf in den Kanal zurückzuführen. Der Massenstrom in die Quadranten Q2 und Q3 ist höher als in die Quadranten Q1 und Q4.

Durch Integration der gemessenen Geschwindigkeiten in den einzelnen Quadranten und in den beiden Teilen der Quadranten ( $r/\phi$  bzw.  $x/y$ ) werden diese Aussagen deutlicher. Die ermittelten Ergebnisse enthält Tab. 5. Dabei sind die integrierten mittleren Geschwindigkeiten auf den Mittelwert aus allen vier Quadranten für jede Ebene bezogen. Diese mittlere Gesamtgeschwindigkeit ist in der letzten Zeile der Tab. 5. angegeben.

Im Quadranten Q3 ist der Massendurchsatz in allen Ebenen am größten, das gleiche Ergebnis wurde für die früher ausgemessenen Ebenen erhalten /7,8/. Der geringste Massendurchsatz ergibt sich im Quadranten Q1 in allen Ebenen. Die Ungleichmäßigkeit in der Strömungsverteilung zwischen den einzelnen Quadranten ist in der Ebene E6 mit 6.6% am größten und damit größer als in der weiter stromabwärts liegenden Ebene E5, für die 5.8% gemessen wurden /8/. In den Ebenen E7 und E8, also bei Annäherung an den Abstandhalter, verringert sich die Ungleichmäßigkeit der Strömungsverteilung über 4.9% bei E7 auf 3.2% bei E8. Diese Änderung ist vor allem darauf zurückzuführen, daß die Asymmetrie der Abstandhalter-Geometrie die Strömungsverteilung im Bereich des Abstandhalters so beeinflusst, daß die Quadranten Q1 und Q2 einen größeren Massendurchsatz erhalten als die Quadranten Q3 und Q4.

Betrachtet man die Strömungsverteilungen in den beiden Gebieten ( $r/\phi$  und  $x/y$ ) der einzelnen Quadranten, so wird insbesondere in den Gebieten nahe den Kanalwänden deutlich, daß bei Annäherung an den Abstandhalter der Massenstrom in den Quadranten Q1 und Q2 von Ebene E6 nach E8 von 0.99 auf 1.023 für Q1 bzw. 0.997 auf 1.043 für Q2 stark zunimmt. Dagegen sinkt der Massenstrom in den Quadranten Q3 und Q4 von 1.041 in Ebene E6 auf 1.011 in Ebene E8 im Quadranten Q3 bzw. von 0.988 auf 0.964 im Quadranten Q4 stark

ab. Der Grund liegt in dem größeren Wandanteil des Abstandshalters in den Quadranten Q3 und Q4 gegenüber den Quadranten Q1 und Q2.

Während die dimensional Geschwindigkeitsprofile bis zur Ebene E5 mit geringer Streuung dem Wandgesetz in Kreisrohren folgen /8/, ist das ab  $L/D_h=8.44$  (Ebene E6) nicht mehr der Fall. Die Abbildungen 9-12 zeigen die dimensionslosen Geschwindigkeitsprofile, normiert auf die gemessene lokale Wandschubspannung, in den Quadranten Q1 bis Q4, jeweils für die ausgemessenen drei Ebenen und sowohl für die Stab- wie für die Kanalwände. Es zeigt sich, daß in der Ebene E6 ( $L/D_h=8.44$ ) die Profile für  $y^+ > 600$  auffächern und stärker vom Wandgesetz abweichen. Für Ebenen, die näher am Abstandshalter liegen, verschiebt sich dieser Punkt mit steigender Annäherung an den Abstandshalter zu kleineren  $y^+$ : Bei Ebene E7 ( $L/D_h=4.61$ ) zu etwa  $y^+ = 400$  und für Ebene E8 ( $L/D_h=1.93$ ) zu etwa  $y^+ = 200$ .

## 5.2 Wandschubspannung

Die gemessenen Wandschubspannungen zeigen die gleichen Trends wie die Geschwindigkeitsverteilungen. Abbildung 13 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.14 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.

Der Einfluß des Abstandshalters auf die Wandschubspannungsverteilung ist gut zu erkennen. Für die Verteilung an den Stabwänden in den Quadranten Q1 und Q2 sind relative Minima der Wandschubspannung bei  $\pm 40-60^\circ$  zu sehen, die durch die Kontaktstellen zwischen Abstandshalter und Stabwand verursacht werden. Mit wachsender Annäherung an den Abstandshalter prägen sich die relativen Minima (Einbuchtungen) weiter aus. Am Stab in den Quadranten Q3 und Q4 sind entsprechende Minima nicht vorhanden, da an diesen Positionen keine Kontaktstelle zwischen Stab und Abstandshalter besteht. An diesem Stab liegt die Kontaktstelle bei  $\phi = 0^\circ$ . Hier ergibt sich ein ausgeprägtes Minimum in

der Wandschubspannungsverteilung, das bei Annäherung an den Abstandshalter deutlich sinkt.

Die Wandschubspannungen an beiden Kanalwänden (Abb.14) verlaufen sehr ähnlich. Die geringen Unterschiede sind verursacht einerseits durch die bereits diskutierten unterschiedlichen Massendurchsätze in den einzelnen Quadranten, bedingt durch den Einlauf. Andererseits spielen Toleranzen der Abmessungen der Abstandshalterstruktur eine Rolle.

Relative Minima sind zu erkennen bei  $x = \sim 50$  mm in den Quadranten Q3 und Q4, die durch die Kontaktstelle zwischen Abstandshalter und Kanalwand hervorgerufen werden. Ähnliche Minima ergeben sich in der Wandschubspannungsverteilung für die Quadranten Q1 und Q2 bei  $x = \sim 70$  mm, wo ebenfalls ein Kontaktpunkt zwischen Abstandshalter und Kanalwand vorliegt.

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.

Durchweg 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 Unterschiede zwischen den mittleren Wandschubspannungen in den einzelnen Quadranten sind größer als die Unterschiede in den mittleren Geschwindigkeiten. Die Tendenz abnehmender Unterschiede zwischen den einzelnen Quadranten bei Annäherung an den Abstandshalter ist für beide Größen gleich.

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

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

und deshalb sind die Unterschiede für die Wandschubspannung größer als für die mittlere Geschwindigkeit. Potenziert man die relativen mittleren Geschwindigkeiten der einzelnen Quadranten aus Tab. 5 mit 1.8, dann stimmen die Ergebnisse für die Quadranten besser als 3% mit den Werten der relativen mittleren Wandschubspannungen aus Tab. 6 überein. Die Übereinstimmung ist schlechter als bei den früher ausgemessenen Ebenen, die weiter stromabwärts vom Abstandshalter lagen /7,8/. Dies kann nur durch die Auswirkung des Abstandshalters auf die Geschwindigkeits- und Wandschubspannungsverteilungen verursacht sein.

### 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.7 enthalten. Wenn man berücksichtigt, daß die Reynoldszahlen in den einzelnen Quadranten leicht voneinander abweichen, liegen die Reibungsbeiwerte aller Quadranten innerhalb  $\pm 3.1\%$ . Der Mittelwert ergibt sich zu  $\lambda = 0.01745$  durch eine Korrektur mit  $Re^{-0.2}$  auf  $Re = 1.451 \cdot 10^5$ , die Reynoldszahl, auf die die Reibungsbeiwerte bei den Messungen in den Ebenen E0 bis E5 ebenfalls bezogen wurden.

Für das Experiment in der Ebene E1 wurde die axiale Verteilung des statischen Druckes gemessen. Daraus errechnete 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) betrug nur 1.2%. Beide Werte stimmen damit innerhalb der Meßunsicherheiten überein. Der Mittelwert für die neu ausgemessenen Ebenen ist jedoch um 5.8% höher als in den Ebenen E3-E5, bedingt 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 3.4% über 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.15-17 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 sind die gemessenen Turbulenzintensitäten in axialer Richtung weitgehend symmetrisch zur Linie durch die Stabzentren. In der Ebene E6 ( $L/D_h=8.44$ ) zeigt sich der gegenüber der Ebene E5 ( $L/D_h=16.91$ ) /8/ verstärkte Einfluß des Abstandshalters durch die stärkere Asymmetrie der Höhenlinien bezüglich der Symmetrielinie zwischen den Stäben. Dies ist besonders deutlich erkennbar in dem in Richtung der Quadranten Q1 und Q2 verschobenen Gebiet minimaler Turbulenzintensität im Spalt zwischen den Stäben. Für die Ebene E7 ( $L/D_h=4.61$ ) sind dagegen erstmalig geschlossene Höhenlinien niedriger Turbulenzintensität erkennbar, und zwar etwa auf der Symmetrielinie zwischen den Stäben im Gebiet nahe den Kanalwänden. Hier ist die Strömung durch die Abstandhalterstruktur weitgehend ungestört. Auf der anderen Seite zeigen sich für die Ebene E7 Gebiete hoher Turbulenzintensität unterhalb der Kontaktstellen zwischen Abstandhalter und Stab- bzw. Kanalwand: In den Quadranten Q3 und Q4 nahe dem Spalt zwischen Stäben ( $\phi \sim 5 \div 10^\circ$ ) und an den Kanalwänden

bei etwa 25-30 mm vom Spalt zwischen Stab- und Kanalwand entfernt. Außerdem sind in den Quadranten Q1 und Q2 für  $\phi = 60^\circ$  vom Spalt zwischen den Stäben, sowie an den Kanalwänden bei etwa 10 mm vom Spalt zwischen Stab- und Kanalwand. Gebiete hoher Turbulenzintensität erkennbar.

In der Ebene E8 ( $L/D_h = 1.93$ ) ergeben sich geschlossene Höhenlinien der axialen Turbulenzintensität in allen offenen Bereichen zwischen der Abstandshalterstruktur und den Stab- bzw. Kanalwänden. Die in der Ebene E7 erkennbaren Bereiche hoher Turbulenzintensität nahe den Kontaktstellen zwischen Abstandshalter und Stab- bzw. Kanalwänden sind in der Ebene E8 stärker ausgeprägt. Die Maximalwerte sind von den Stab- bzw. Kanalwänden in richtung des offenen Querschnitts verschoben.

Deutlich ist auch, daß das Niveau der axialen Turbulenzintensität mit wachsender Annäherung an den Abstandshalter steigt. Man beachte dazu die Werte für die Höhenlinien, die in der Ebene E8 deutlich höher sind als für die übrigen Ebenen. Um die Unterschiede in den einzelnen Ebenen und in den einzelnen Quadranten quantitativ angeben zu können, wurden die Turbulenzintensitäten integriert, um den Mittelwerte 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 von Tab. 8 ausweist, steigt der Gesamtmittelwert der axialen Turbulenzintensität von Ebene E6, der etwa gleich groß ist wie in den vorangegangenen Messungen in den Ebenen E1-E5 /7,8/, um 12% für die Ebene E7 und um 30% für die Ebene E8 an. In Tab. 8 sind ebenso wie in den Tab. 9-11 die Mittelwerte für die Ebene E5 angegeben. Die in /8/ angegebenen Werte für die Ebene E5 sind falsch wegen eines Normierungsfehlers für das Gebiet x/y. Die hier angegebenen Werte sind korrigiert.

#### 5.4.2 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand

Die gemessenen Turbulenzintensitäten senkrecht zur Wand sind in den Abb.18-20 für die drei Ebenen als Höhenlinien dargestellt. Wenn man berücksichtigt, daß die Turbulenzintensitäten senkrecht zur Wand mit einer größeren Meßunsicherheit als die axiale Turbulenzintensität behaftet sind, ergeben sich relativ gleichmäßige Verteilungen. Die Struktur der Höhenlinien ist deutlich durch den Abstandshalter geprägt. Es bilden sich bei Annäherung an den Abstandshalter von Ebene E6 nach E8 geschlossene Höhenlinien aus, und zwar in den offenen Gebieten zwischen Abstandshalter und Stab- bzw. Kanalwänden

als auch in der Nähe der Kontaktpunkte zwischen Abstandshalter und Stab- und Kanalwand.

Die integrierten Mittelwerte der Turbulenzintensität senkrecht zur Wand sind in Tab. 9 angegeben. Auch hier steigen die Mittelwerte (letzte Zeile in Tab. 9) von Ebene E6 nach E8 an, und zwar von E6 nach E7 um 20% und von E7 nach E8 um weitere 23%. Wie für die axiale Turbulenzintensität ergeben sich die höchsten Mittelwerte in den Quadranten Q3 und Q4 nahe den Kanalwänden.

#### 5.4.3 Turbulenzintensität parallel zur Wand

Die Meßergebnisse der Turbulenzintensität parallel zur Wand, die in den Abb. 21-23 für die drei Ebenen gezeigt sind, lassen eine sehr gleichmäßige Struktur erkennen. Deutlich sind die Höhenlinien mit wachsender Annäherung an den Abstandshalter durch die Abstandshalterstruktur geprägt. Wie für die beiden anderen Intensitäten ergeben sich geschlossene Höhenlinien in den offenen Gebieten zwischen Abstandshalter und Stab- bzw. Kanalwand. In der Nähe der Kontaktstellen zwischen Abstandshalter und den Wänden ist die Turbulenzintensität parallel zur Wand erhöht.

Die Mittelwerte der Turbulenzintensität parallel zur Wand (Tab. 10) zeigen einen Anstieg von Ebene E6 nach E7 um 16% und einen weiteren Anstieg um 19% von E7 nach E8. Wie für die übrigen Intensitäten ergeben sich die höchsten Mittelwerte nahe den Kanalwänden in den Quadranten Q3 und Q4 sowie nahe den Stabwänden in den Quadranten Q1 und Q2, also in den Bereichen, in denen ein hoher Anteil der Abstandshalterstruktur liegt.

#### 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.24-26, bezogen auf das Quadrat der Referenzwandschubspannungsgeschwindigkeit, dargestellt.

Natürlich sind die Höhenlinien der kinetischen Turbulenzenergie durch den Abstandshalter geprägt. Die kinetische Energie ist besonders hoch in den Gebieten nahe den Kontaktstellen zwischen Abstandshalter und Stab- bzw. Kanalwänden. Die kinetische Energie steigt von Ebene E6 nach E7 um 28% und von E7 nach E8 um weitere 42%, wie aus den Mittelwerten der kinetischen Energie in Tab. 11 erkennbar ist. Weil die kinetische Energie die Summe der quadrierten Turbulenzintensitäten darstellt, ergeben sich natürlich die gleichen Verhältnisse, wie sie für die Turbulenzintensitäten beobachtet wurden. Geschlossene Höhenlinien in den offenen Querschnitten zwischen Abstandshalter und Stab- bzw. Kanalwänden finden sich bereits für  $L/D_h = 4.61$  (E7) und sind stark ausgeprägt für Ebene E8 ( $L/D_h = 1.93$ ). In den Gebieten sehr hoher kinetischer Energie, an den Kontaktstellen zwischen Abstandshalter und Stab- bzw. Kanalwänden, sieht man ebenfalls geschlossene Höhenlinien bereits für die Ebene E7.

### 5.5 Schubspannungen und Korrelationskoeffizienten

Die Höhenlinien der gemessenen Schubspannung senkrecht zur Wand sind in den Abb. 27-29 für die drei Ebenen dargestellt. Die Schubspannungen sind dabei auf das Quadrat der Schubspannungsgeschwindigkeit im Quadranten Q1 für die Position zwischen den Stäben bezogen. Es zeigt sich, daß der bereits in den Ebenen E3 bis E5 /8/ beobachtete Einfluß des Abstandshalter auf den Höhenlinienverlauf in den näher am Abstandshalter liegenden Ebenen viel stärker ist. Während sich in der Ebene E6 ( $L/D_h = 8.44$ ) das Ausbeulen der Höhenlinien an den Kontaktstellen zwischen Abstandshalter und den Wänden von den Wänden weg verstärkt gegenüber der Ebene E5, ergeben sich in den Ebenen E7 ( $L/D_h = 4.61$ ) und E8 ( $L/D_h = 1.93$ ) qualitativ andere Höhenlinienverläufe. Sie sind durch die Abstandshalter-Struktur geprägt. Am deutlichsten erkennt man den Verlauf, wenn man den Linien der Nullschubspannung folgt. Ab der Ebene E7 werden auch Gebiete negativer Schubspannung senkrecht zur Wand sichtbar. Der Grund hierfür ist, daß für die vorausgegangenen Messungen bei den weiter vom Abstandshalter entfernt liegenden Ebenen stets die Schubspannung senkrecht zur Wand an der Wand positiv gesetzt wurde, um einheitliche Höhenlinienbilder zu erzeugen. Dies wurde für die Ebene E7

beibehalten. Deshalb passen auch die positiven und negativen Schubspannungen an der Trennlinie der Quadranten nicht zusammen.

Für die Ebene E8 wurde versucht, die Vorzeichen der Schubspannung so zu verändern, daß die Höhenlinien zwischen den verschiedenen Quadranten einheitlich werden. Das kann jedoch nur teilweise gelingen, da die Richtungen senkrecht zu den Wänden bei allen Wänden (Stab- und Kanalwänden) unterschiedlich sind. Wenn man von diesem Mangel absieht, erkennt man, daß die Höhenlinien in den verschiedenen Teilgebieten ( $r/\phi$  und  $x/y$ ) und den verschiedenen Quadranten sehr gut zusammen passen.

Deutlich erkennbar sind die sehr hohen Schubspannungen senkrecht zur Wand nahe den Kontaktstellen zwischen Abstandshalter und Wänden.

Die Höhenlinien der gemessenen Schubspannungen parallel zu den Wänden zeigen ebenfalls den starken Einfluß des Abstandshalters (Abb. 30-32). Beiderseits der Kontaktstellen zwischen Abstandshalter und Kanalwänden ergeben sich geschlossene Höhenlinien, und zwar für alle Kontaktstellen.

Die Höhenliniendarstellungen für die Korrelationskoeffizienten der Schubspannung senkrecht zur Wand:

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

zeigen daß die Korrelationskoeffizienten durchweg kleiner als 0.5 sind (Abb. 33-35).

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:

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

die in den Abb. 36-38 dargestellt sind, zeigen einen ganz ähnlichen Verlauf wie die Schubspannung selbst. Die Korrelationskoeffizienten sind fast überall kleiner als 0.4.

Die ebenfalls gemessenen transversen Schubspannungen,  $-\rho\overline{v'w'}$ , 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. 39-41) 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. Hierbei muß man die Wand des Abstandshalter berücksichtigen. An den Kontaktstellen zwischen Abstandshalter und Kanal- bzw. Stabwänden ergeben sich die größten Werte. Dabei wachsen die Maximalwerte mit steigender Annäherung an den Abstandshalter stark an.

## 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  $L/D_h=8.44$  hinter dem Abstandshalter deutliche Auswirkungen auf die Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen sichtbar sind. Die Auswirkungen werden mit zunehmender Annäherung an den Abstandshalter für  $L/D_h=4.61$  bzw.  $1.93$  stärker ausgeprägt und der Abstandshalter prägt die Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen für  $L/D_h < 5$ .

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.

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

## Nomenklatur

D	m	Stabdurchmesser
d	m	Durchmesser
D <sub>h</sub>	m	hydraulischer Durchmesser
d <sub>p</sub>	m	Pitotrohr Außendurchmesser
F	m <sup>2</sup>	Fläche
H	m	Kanalhöhe
h	m	Höhe
k'	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	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 <sup>-1</sup>	Geschwindigkeit
u <sub>m</sub>	ms <sup>-1</sup>	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
u'	ms <sup>-1</sup>	Schwankungsgeschwindigkeit in axialer Richtung
u*	ms <sup>-1</sup>	Wandschubspannungsgeschwindigkeit
v'	ms <sup>-1</sup>	Schwankungsgeschwindigkeit senkrecht zur Wand
W	m	Wandabstand
w'	ms <sup>-1</sup>	Schwankungsgeschwindigkeit parallel zur Wand
x	m	Koordinate parallel zur Kanalwand
y	m	Koordinate senkrecht zur Kanalwand
λ	-	Reibungsbeiwert
φ	grd	Umfangskoordinate
ν	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	kinematische Viskosität
ρ	Kgm <sup>-3</sup>	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, Rechnergesteuerte Versuchsanlage zur Messung von Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen mit Hitzdrähten, KfK-Bericht Nr. 3744 (1984).

- /10/ L. Vosáhlo, Computer programs for evaluation of turbulence characteristics from hot-wire measurements, KfK-Bericht Nr. 3743 (1984).
- /11/ J.D. Hooper, Fully developed turbulent flow through a rod cluster, Ph.D. Thesis, University of New South Wales, Sydney (Australia), (1980).
- /12/ 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).
- /13/ K. Maubach, Reibungsgesetze turbulenter Strömungen, Chemie-Ing.-Technik 42 (15), pp.995-1004 (1970).
- /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
E6	R/P	45.13	44.99	45.07	45.05
	X/Y	45.09	45.07	44.95	44.92
E7	R/P	44.98	44.94	44.98	44.89
	X/Y	44.92	44.94	44.90	44.87
E8	R/P	45.05	45.05	45.11	44.99
	X/Y	45.12	44.94	44.98	45.13

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

E6		MAX	MIN
Q1	R/P	1.019	1.006
	X/Y	0.992	0.961
Q2	R/P	1.024	1.013
	X/Y	1.009	0.994
Q3	R/P	1.043	1.012
	X/Y	1.032	1.029
Q4	R/P	1.015	0.997
	X/Y	1.013	1.000
E7		MAX	MIN
Q1	R/P	1.037	1.008
	X/Y	1.023	1.011
Q2	R/P	1.025	1.005
	X/Y	1.026	1.011
Q3	R/P	1.030	1.009
	X/Y	1.022	1.008
Q4	R/P	1.047	1.043
	X/Y	1.054	1.047
E8		MAX	MIN
Q1	R/P	1.013	1.003
	X/Y	1.011	1.000
Q2	R/P	1.033	1.027
	X/Y	1.037	1.030
Q3	R/P	1.002	0.995
	X/Y	1.026	1.016
Q4	R/P	1.003	0.993
	X/Y	1.033	1.015

Tabelle 3: Maximale Korrekturfaktoren (Referenztraverse)

		Gerader Draht	Schräger Draht		
E6		MAX	MIN	MAX	MIN
Q1	R/P	1.002	0.987	1.010	0.991
	X/Y	1.001	0.991	1.013	0.999
Q2	R/P	1.006	0.993	1.009	0.997
	X/Y	1.002	0.992	1.002	0.989
Q3	R/P	1.005	0.999	1.009	0.995
	X/Y	0.999	0.991	1.007	0.998
Q4	R/P	1.004	0.994	1.009	0.993
	X/Y	1.005	0.994	1.004	0.993
E7		MAX	MIN	MAX	MIN
Q1	R/P	1.008	1.002	1.016	1.000
	X/Y	1.004	0.999	1.005	0.997
Q2	R/P	1.003	0.996	1.013	0.992
	X/Y	1.003	0.997	1.008	0.999
Q3	R/P	1.006	1.001	1.010	0.999
	X/Y	1.005	1.000	1.007	0.995
Q4	R/P	1.006	0.998	1.021	1.001
	X/Y	1.005	0.997	1.021	1.004
E8		MAX	MIN	MAX	MIN
Q1	R/P	1.011	1.004	1.019	1.001
	X/Y	1.003	0.998	1.006	0.998
Q2	R/P	1.009	0.995	1.015	1.000
	X/Y	1.005	0.995	1.005	1.001
Q3	R/P	1.006	1.000	1.014	1.003
	X/Y	1.008	0.998	1.009	0.997
Q4	R/P	1.005	0.999	1.009	1.001
	X/Y	1.006	1.001	1.009	1.000

Tabelle 4: Maximale Korrekturfaktoren (Referenzbedingungen)

		Gerader Draht		Schräger Draht	
E6		MAX	MIN	MAX	MIN
Q1	R/P	1.002	0.998	1.004	0.997
	X/Y	1.005	1.001	1.007	0.997
Q2	R/P	1.002	0.998	1.003	0.996
	X/Y	1.006	1.003	1.006	0.999
Q3	R/P	1.005	1.004	1.009	1.000
	X/Y	1.009	1.004	1.007	1.002
Q4	R/P	1.003	1.000	1.005	1.000
	X/Y	1.002	0.998	1.003	0.998
E7		MAX	MIN	MAX	MIN
Q1	R/P	1.004	1.002	1.004	0.999
	X/Y	1.002	1.001	1.009	1.006
Q2	R/P	1.009	1.007	1.010	1.002
	X/Y	1.008	1.006	1.005	0.997
Q3	R/P	1.007	1.005	1.007	1.003
	X/Y	1.006	1.004	1.010	1.002
Q4	R/P	1.004	1.002	1.008	1.001
	X/Y	1.007	1.004	1.007	1.000
E8		MAX	MIN	MAX	MIN
Q1	R/P	1.005	1.004	1.005	0.998
	X/Y	1.002	1.000	1.006	1.002
Q2	R/P	1.006	1.003	1.005	0.999
	X/Y	1.007	1.004	1.005	1.003
Q3	R/P	0.999	0.996	1.004	0.997
	X/Y	1.000	0.997	1.004	0.999
Q4	R/P	1.004	1.002	1.005	1.000
	X/Y	1.002	1.000	1.004	0.999

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

Kanal		Meßebene		
		E6	E7	E8
Q1	R/P	0.968	0.965	0.962
	X/Y	0.990	1.004	1.023
Q1		0.977	0.980	0.986
Q2	R/P	0.987	0.985	0.984
	X/Y	0.997	1.022	1.043
Q2		0.991	1.000	1.008
Q3	R/P	1.041	1.025	1.023
	X/Y	1.041	1.032	1.011
Q3		1.041	1.028	1.018
Q4	R/P	0.993	1.000	1.004
	X/Y	0.988	0.980	0.964
Q4		0.991	0.992	0.988
$U_{av} / \text{ms}^{-1} /$		27.36	28.46	27.56

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

Kanal		Meßebeene		
		E6	E7	E8
Q1	R/P	0.964	0.980	0.996
	X/Y	0.953	0.924	0.937
Q1		0.959	0.956	0.970
Q2	R/P	0.982	1.010	1.011
	X/Y	0.965	0.958	0.966
Q2		0.974	0.987	0.991
Q3	R/P	1.096	1.098	1.110
	X/Y	1.047	1.007	0.971
Q3		1.075	1.058	1.049
Q4	R/P	1.018	1.045	1.050
	X/Y	0.958	0.939	0.912
Q4		0.992	0.999	0.989
$\tau_{av}$ /Pa/		1.843	2.087	1.885

Tabelle 7: Reibungsbeiwerte in den einzelnen Quadranten

Kanal		Meßebene		
		E6	E7	E8
Q1	$\lambda$	0.01694	0.01754	0.01696
	Re	149900	156500	152400
Q2	$\lambda$	0.01672	0.01741	0.01672
	Re	152100	159700	155800
Q3	$\lambda$	0.01670	0.01768	0.01751
	Re	159800	164100	157400
Q4	$\lambda$	0.01703	0.01790	0.01723
	Re	152100	158400	152700
Ges.	$\lambda$	0.01685	0.01764	0.01711
	Re	153500	159700	154600

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

Kanal		Meßebene			
		E5	E6	E7	E8
Q1	R/P	0.947	0.940	0.979	1.041
	X/Y	1.000	1.108	1.069	0.950
Q1		0.968	1.007	1.014	1.005
Q2	R/P	1.028	0.964	0.983	1.002
	X/Y	1.055	1.123	1.087	0.930
Q2		1.039	1.027	1.024	0.973
Q3	R/P	0.980	0.905	0.935	0.968
	X/Y	1.106	1.128	1.065	1.075
Q3		1.030	0.994	0.987	1.011
Q4	R/P	0.929	0.901	0.940	0.956
	X/Y	1.014	1.079	1.026	1.094
Q4		0.963	0.972	0.974	1.011
$u'_{av}/u^*_{Ref}$		1.456	1.422	1.588	1.845

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

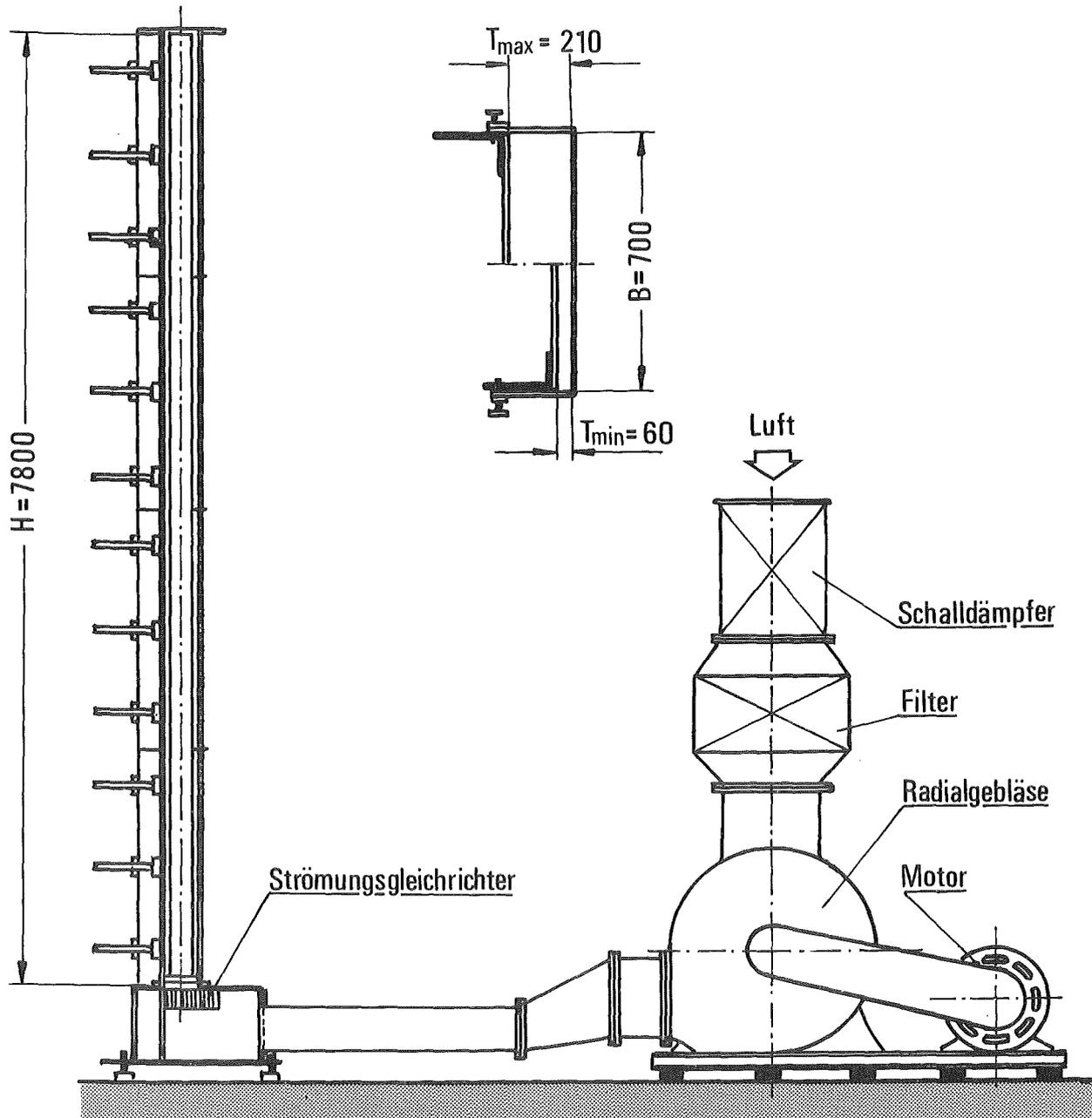
Kanal		Meßebene			
		E5	E6	E7	E8
Q1	R/P	0.933	0.943	1.017	1.074
	X/Y	0.981	1.093	0.981	0.830
Q1		0.952	1.002	1.003	0.977
Q2	R/P	1.035	1.019	1.057	1.080
	X/Y	1.107	1.196	1.104	0.892
Q2		1.064	1.089	1.076	1.005
Q3	R/P	1.019	0.920	0.961	0.979
	X/Y	1.102	1.016	0.991	1.029
Q3		1.052	0.958	0.973	0.999
Q4	R/P	0.883	0.874	0.921	0.977
	X/Y	1.006	1.065	0.988	1.084
Q4		0.932	0.950	0.948	1.020
$v'_{av}/u^*_{Ref}$		0.844	0.834	0.998	1.226

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

Kanal		Meßebeene			
		E5	E6	E7	E8
Q1	R/P	0.951	0.945	1.036	1.092
	X/Y	0.952	1.045	0.969	0.866
Q1		0.952	0.985	1.020	1.002
Q2	R/P	1.051	1.058	1.076	1.063
	X/Y	1.101	1.215	1.110	0.901
Q2		1.071	1.121	1.089	0.999
Q3	R/P	1.008	0.894	0.927	0.943
	X/Y	1.112	1.038	1.006	1.064
Q3		1.050	0.952	0.959	0.991
Q4	R/P	0.882	0.868	0.896	0.939
	X/Y	0.997	1.057	0.988	1.114
Q4		0.928	0.943	0.932	1.009
$w'_{av}/u^*_{Ref}$		1.022	0.992	1.150	1.373

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

Kanal		Meßebeene			
		E5	E6	E7	E8
Q1	R/P	0.887	0.888	1.014	1.124
	X/Y	0.970	1.166	1.057	0.827
Q1		0.920	0.998	1.031	1.006
Q2	R/P	1.054	0.989	1.053	1.069
	X/Y	1.149	1.324	1.194	0.846
Q2		1.092	1.122	1.109	0.980
Q3	R/P	0.990	0.815	0.875	0.908
	X/Y	1.214	1.164	1.064	1.130
Q3		1.079	0.954	0.950	0.996
Q4	R/P	0.831	0.788	0.846	0.897
	X/Y	1.025	1.133	1.006	1.200
Q4		0.908	0.926	0.910	1.018
$k'_{av}/u^{*2}_{Ref}$		2.053	1.965	2.518	3.570



KfK

Abb. 1 Versuchsanlage (schematisch)

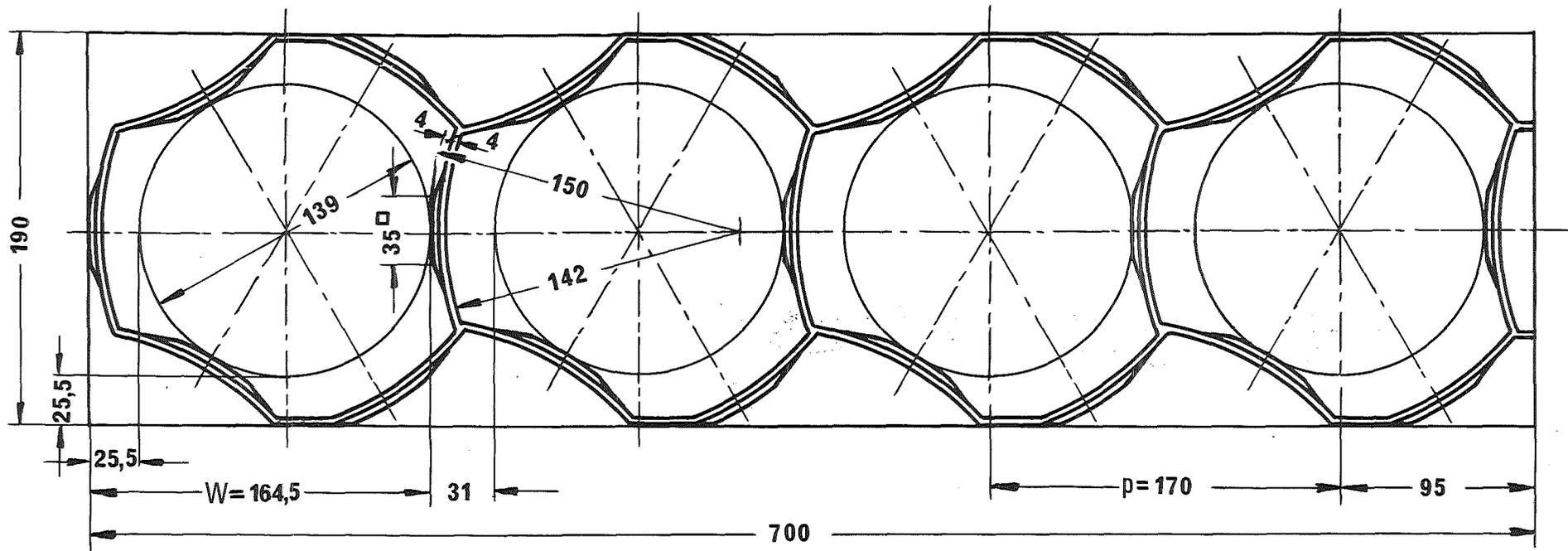


Abb. 2 Querschnitt der Abstandshaltergeometrie

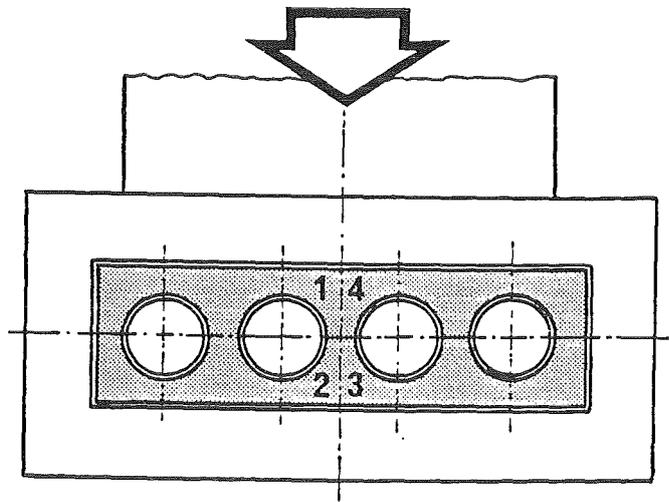
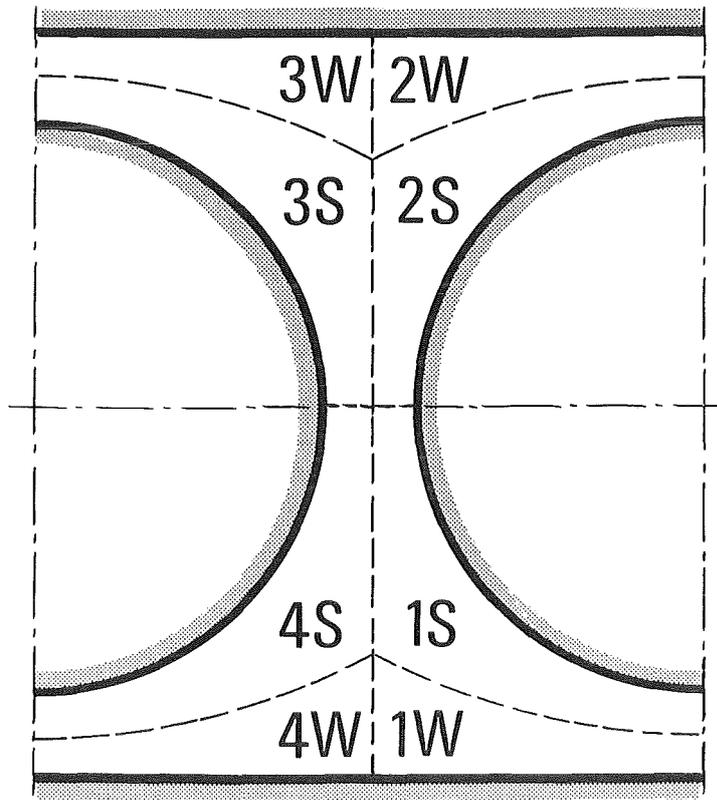
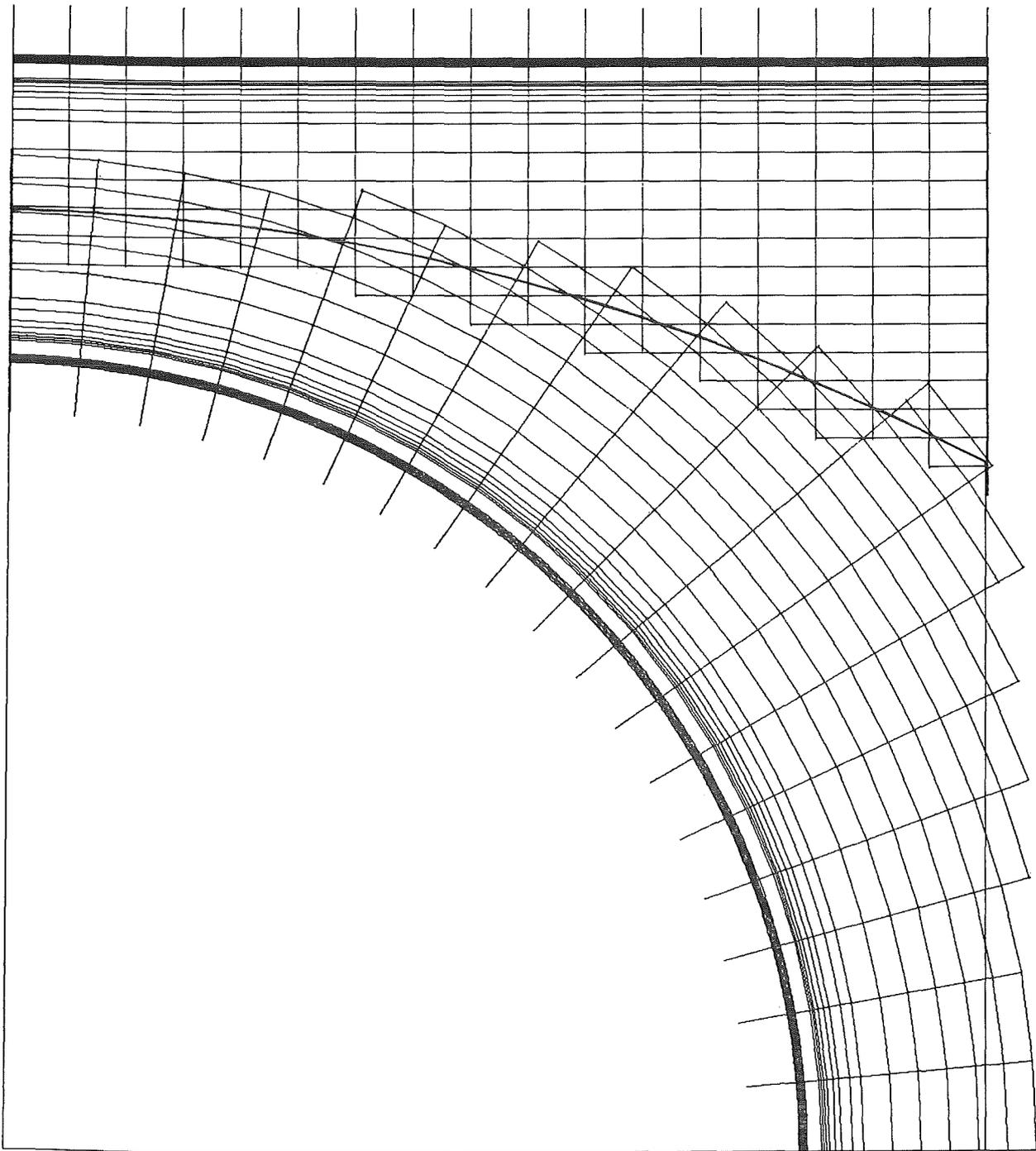


Abb. 3 Aufsicht auf den Strömungskanal mit den Eintrittsbedingungen



KfK

Abb. 4 Teilkanäle des untersuchten Strömungsquerschnitts



kfk

Abb. 5 Verteilung der Meßpositionen in einem Quadranten

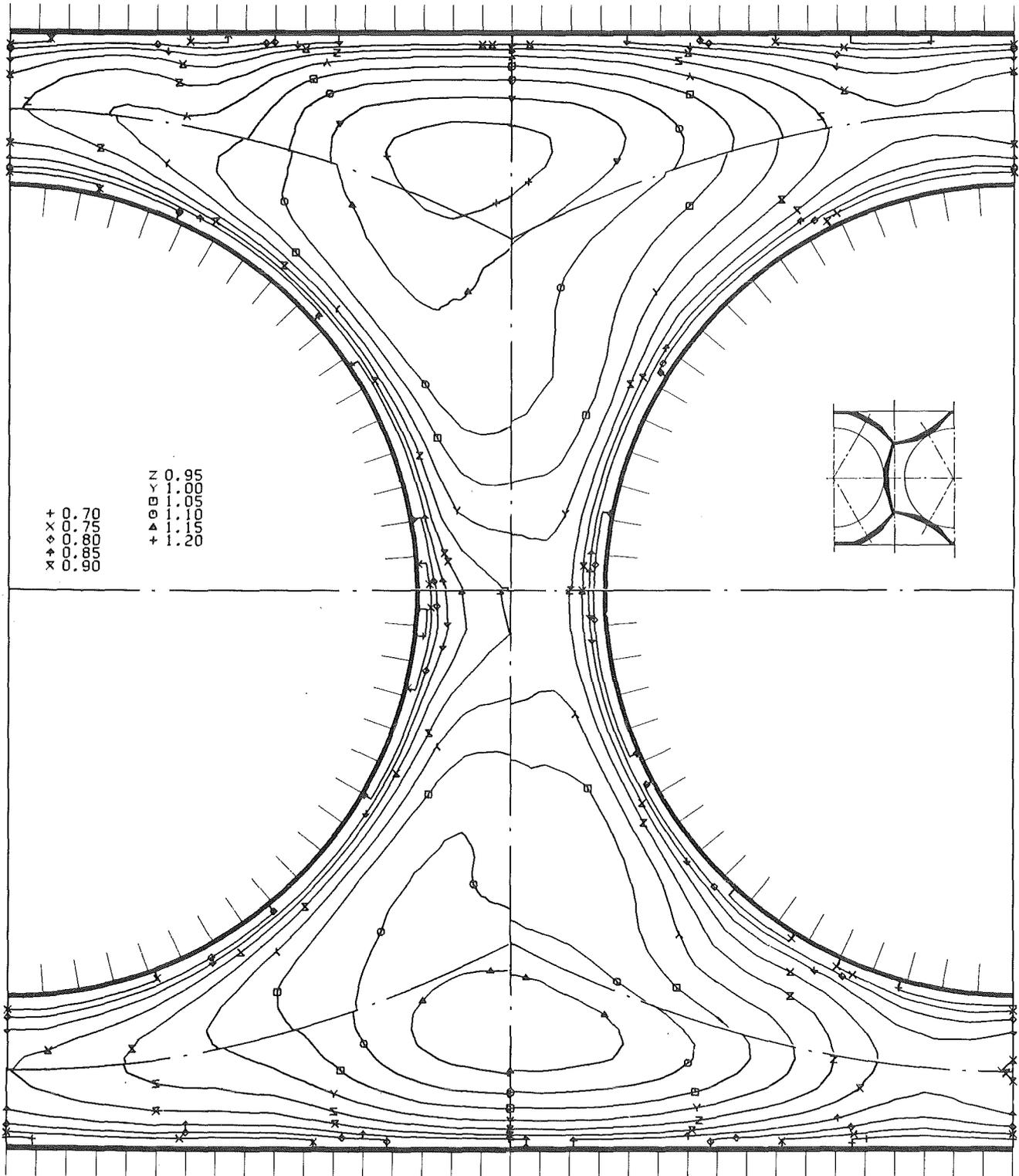


Abb. 6 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit  
in der Ebene E6

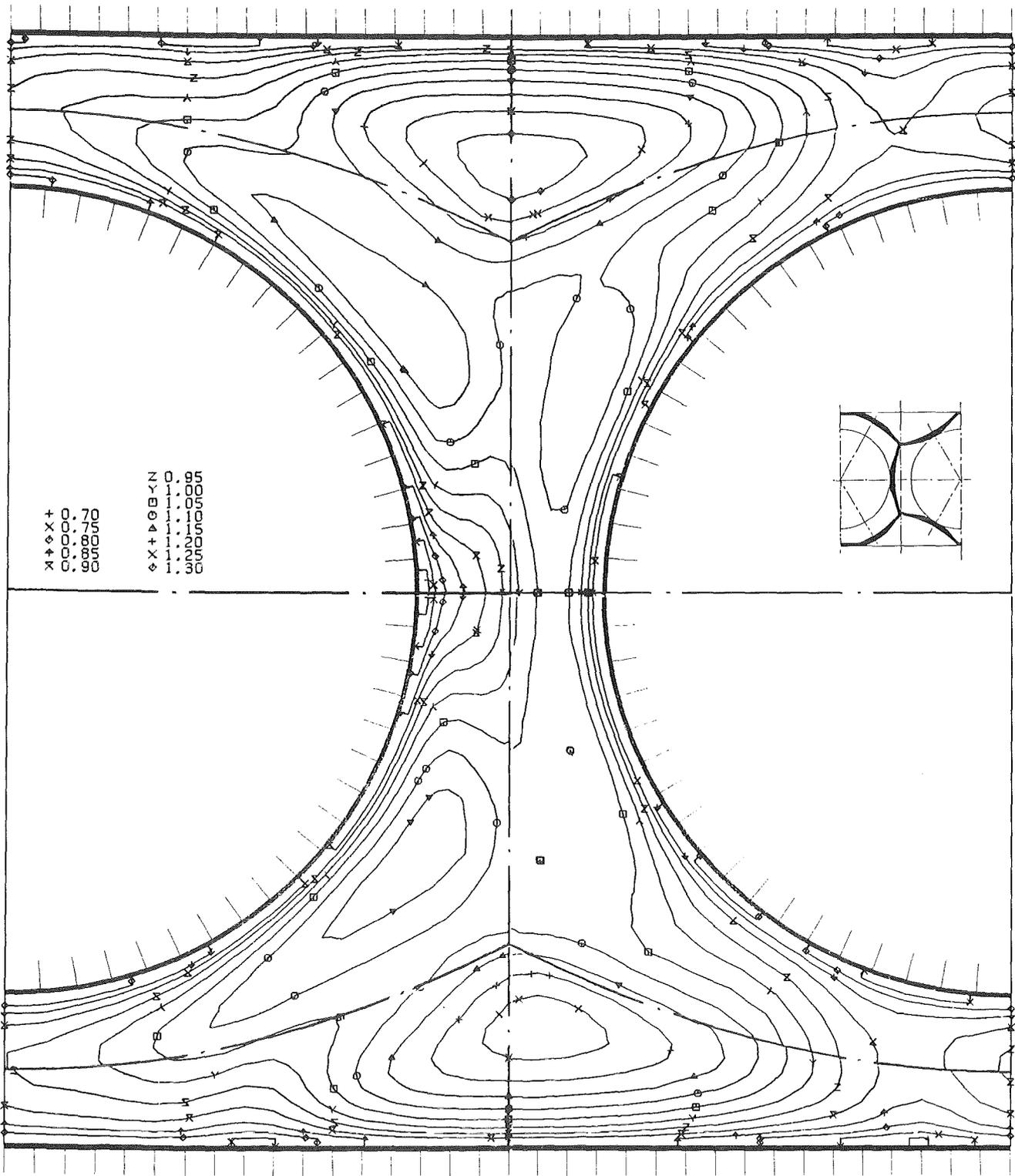


Abb. 7 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit in der Ebene E7

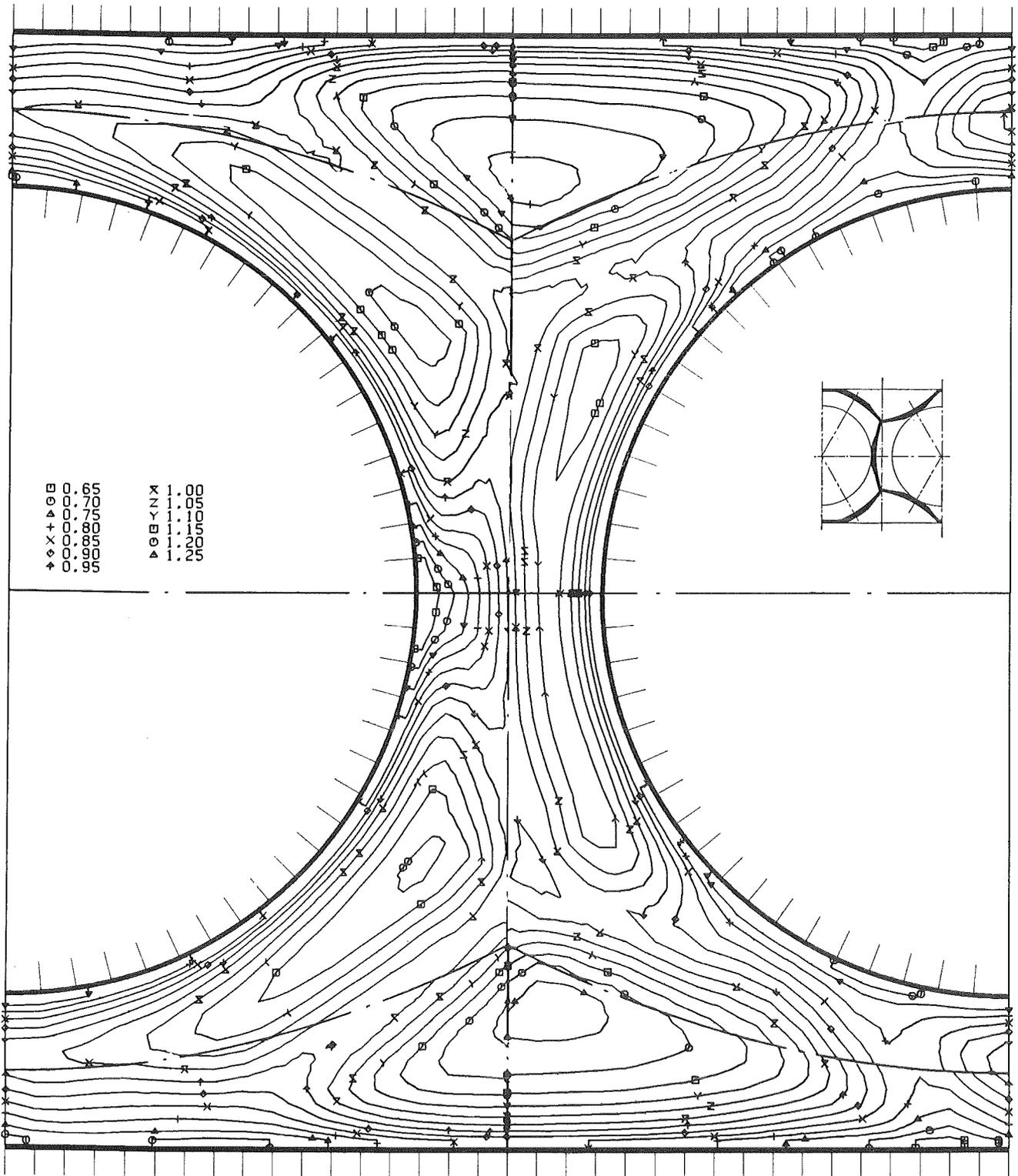


Abb. 8 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit in der Ebene E8

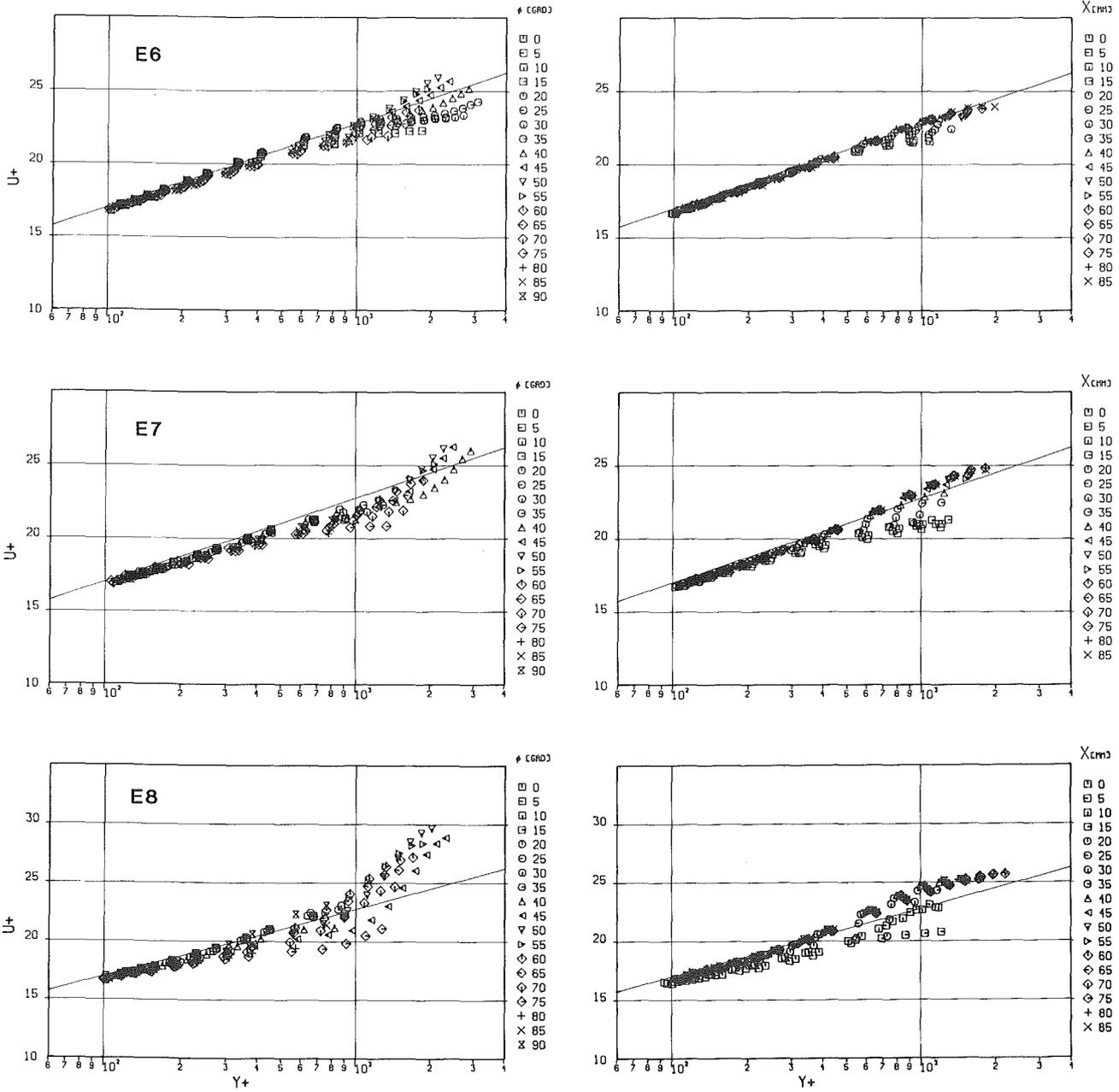


Abb. 9 Dimensionslose Geschwindigkeitsverteilung im Quadranten Q1 für die drei Ebenen

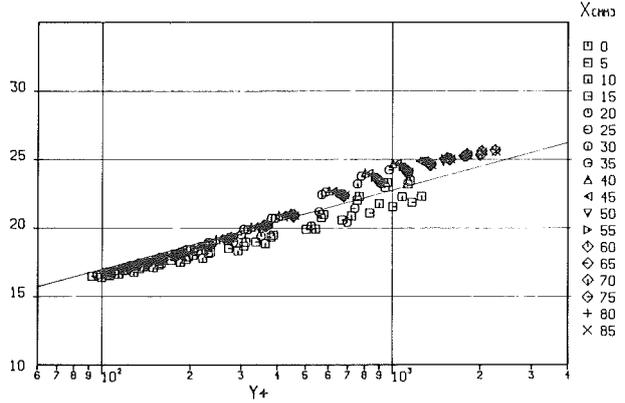
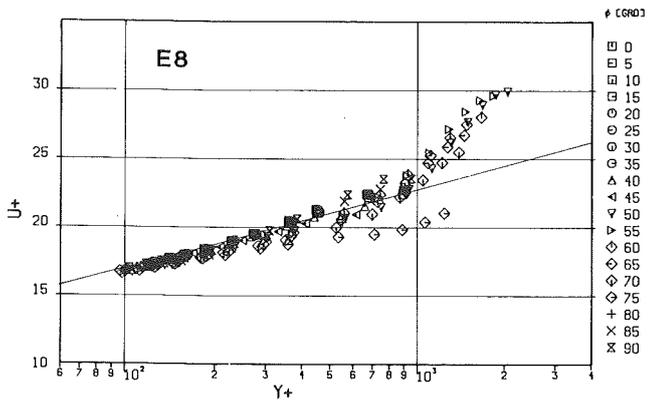
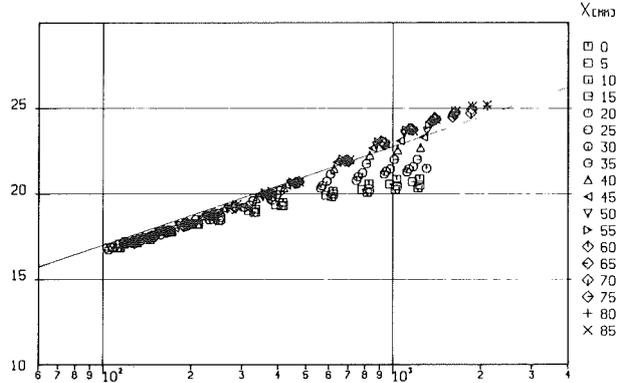
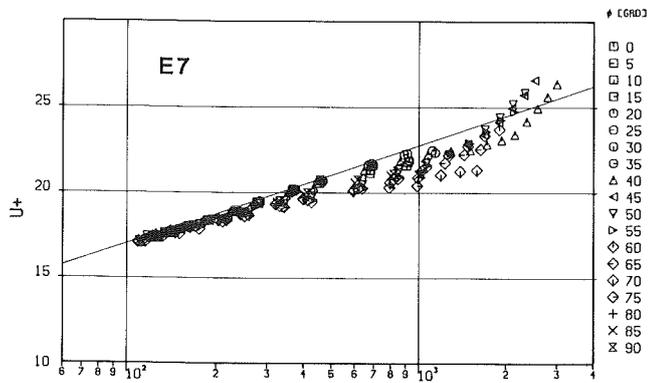
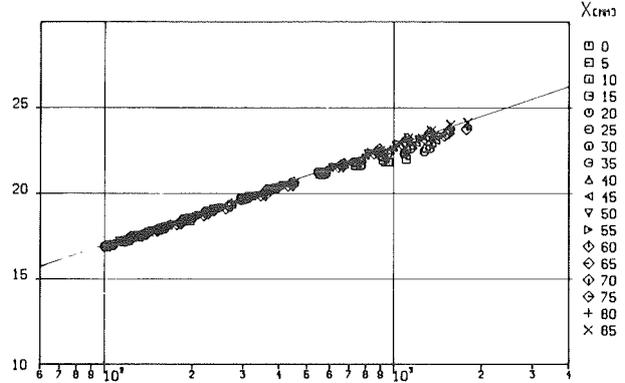
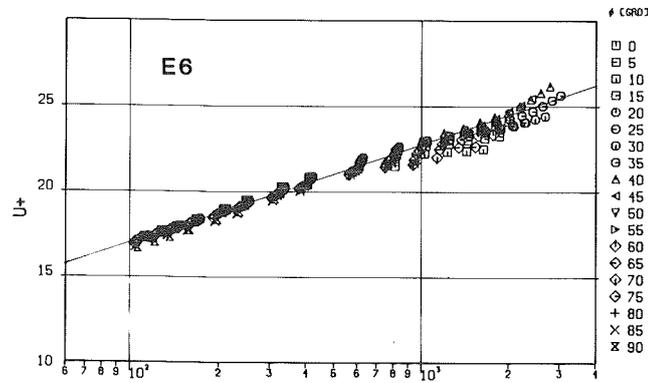


Abb.10 Dimensionslose Geschwindigkeitsverteilung im Quadranten Q2 für die drei Ebenen

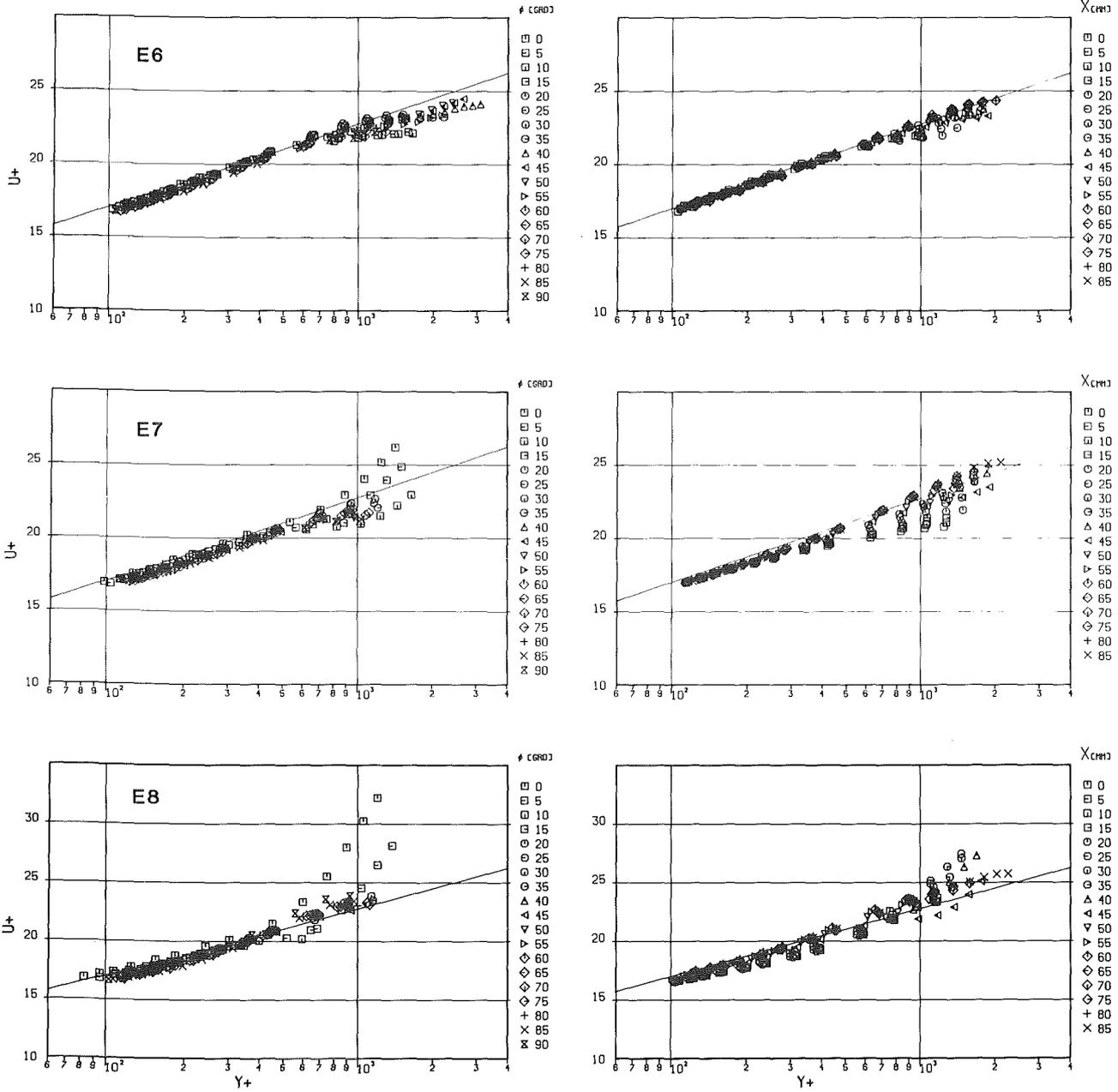


Abb.11 Dimensionslose Geschwindigkeitsverteilung im Quadranten Q3 für die drei Ebenen

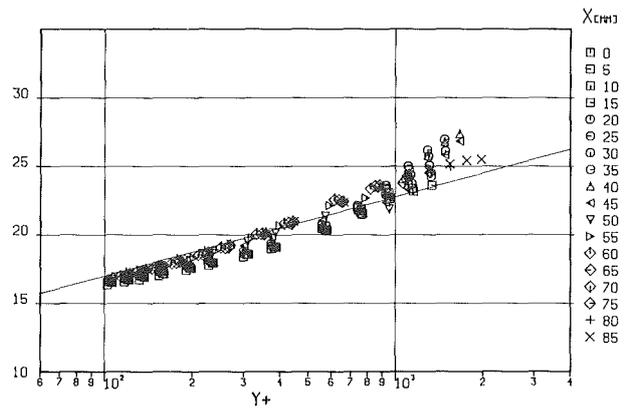
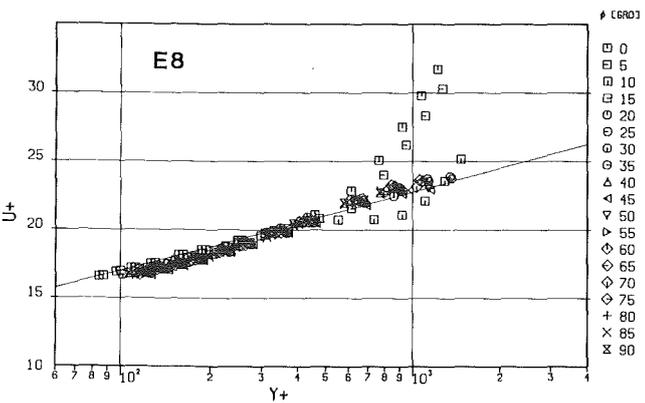
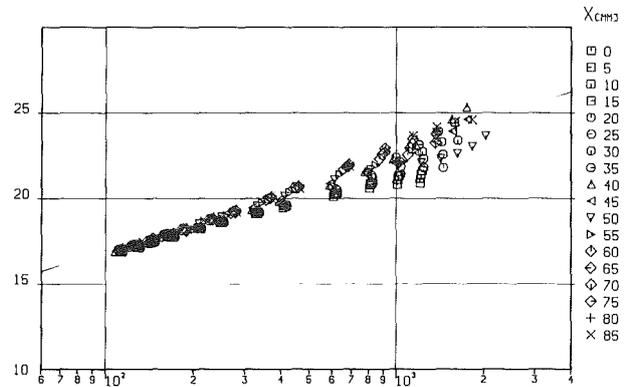
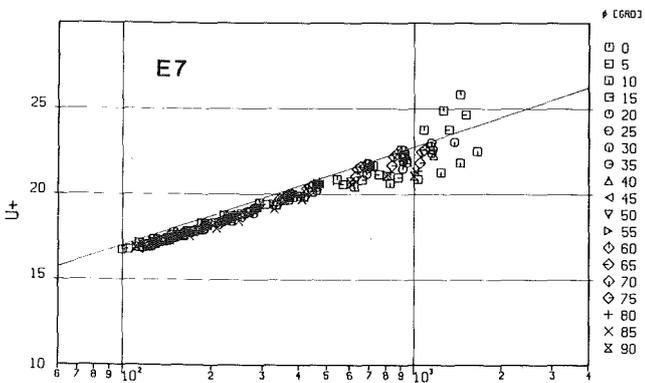
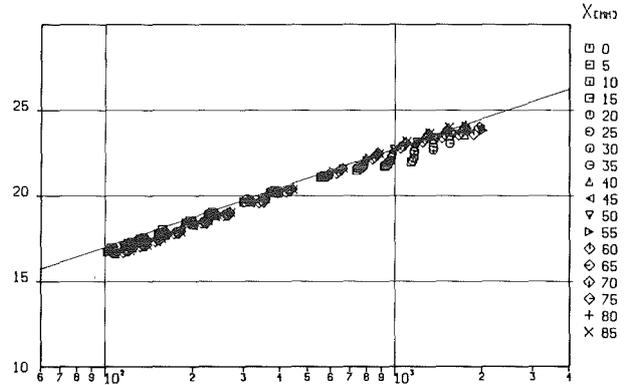
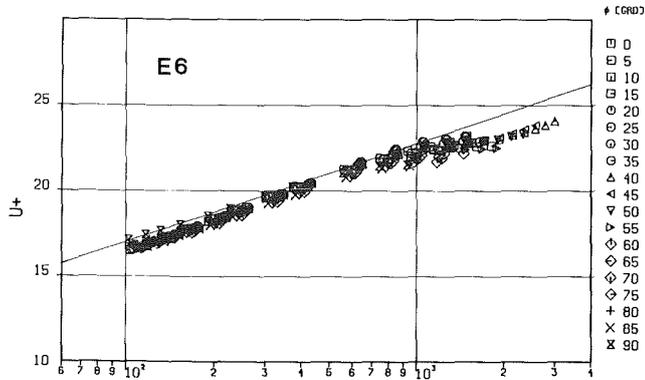


Abb.12 Dimensionslose Geschwindigkeitsverteilung im Quadranten Q4 für die drei Ebenen

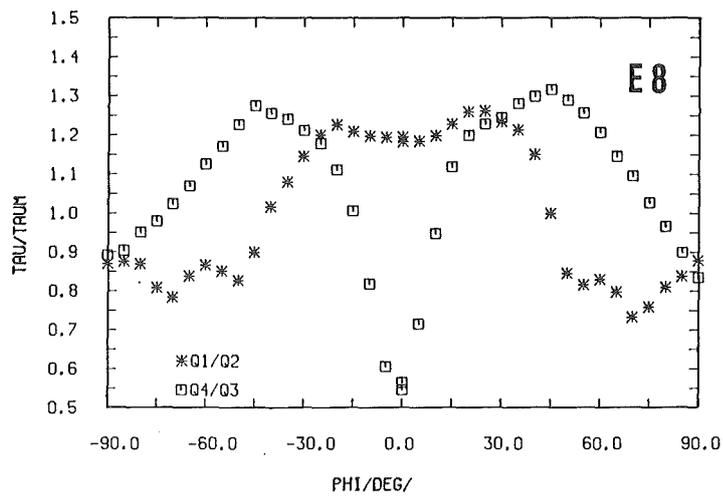
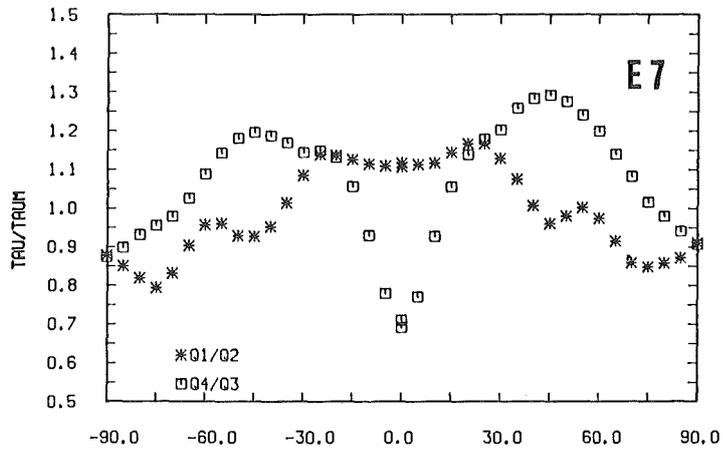
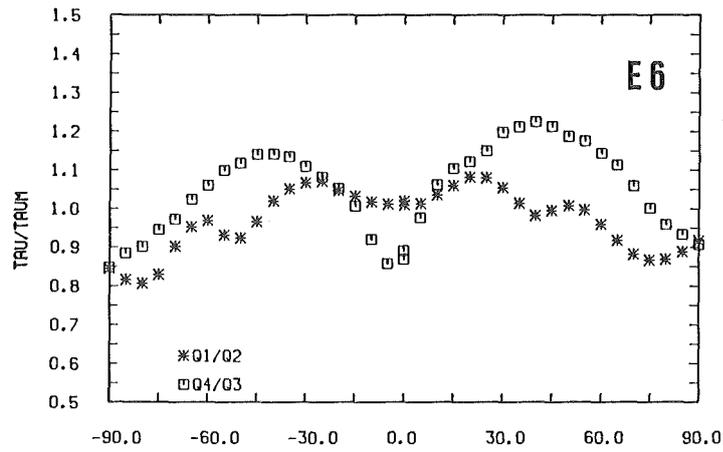


Abb.13 Wandschubspannungsverteilungen bezogen auf den Mittelwert aus allen vier Quadranten ( $r/\phi$ )

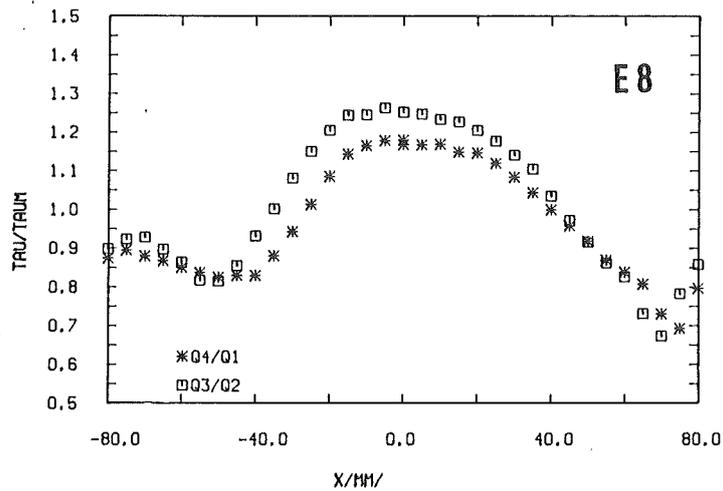
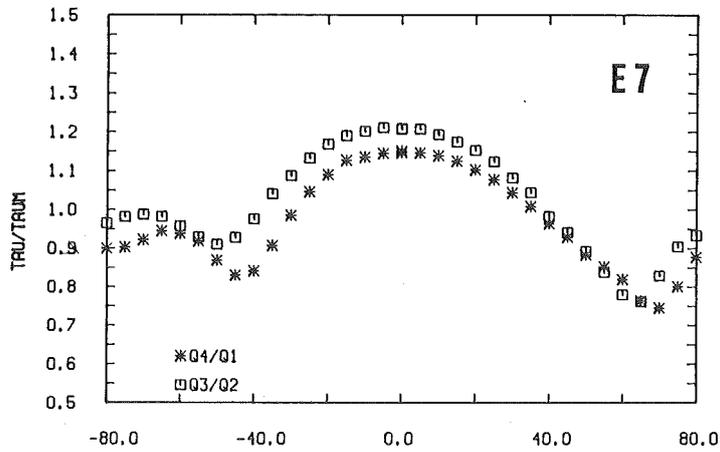
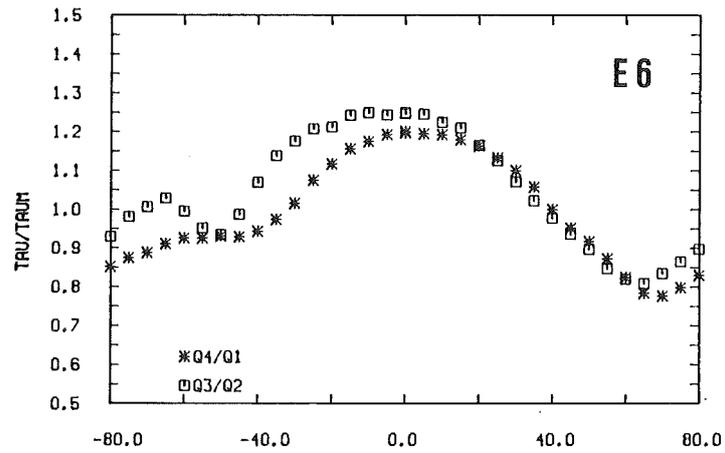


Abb.14 Wandschubspannungsverteilungen bezogen auf den Mittelwert aus allen vier Quadranten ( x/y )

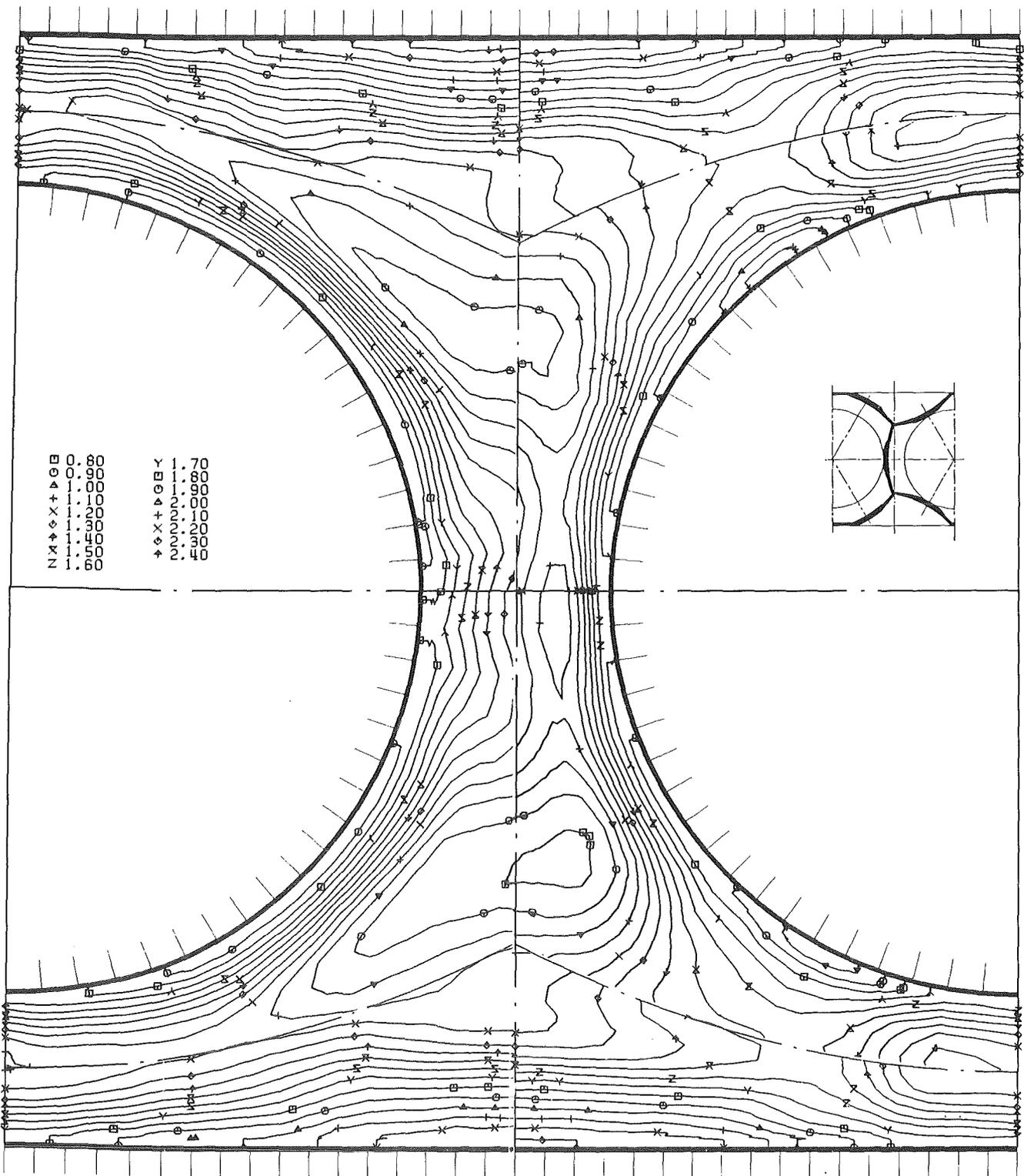
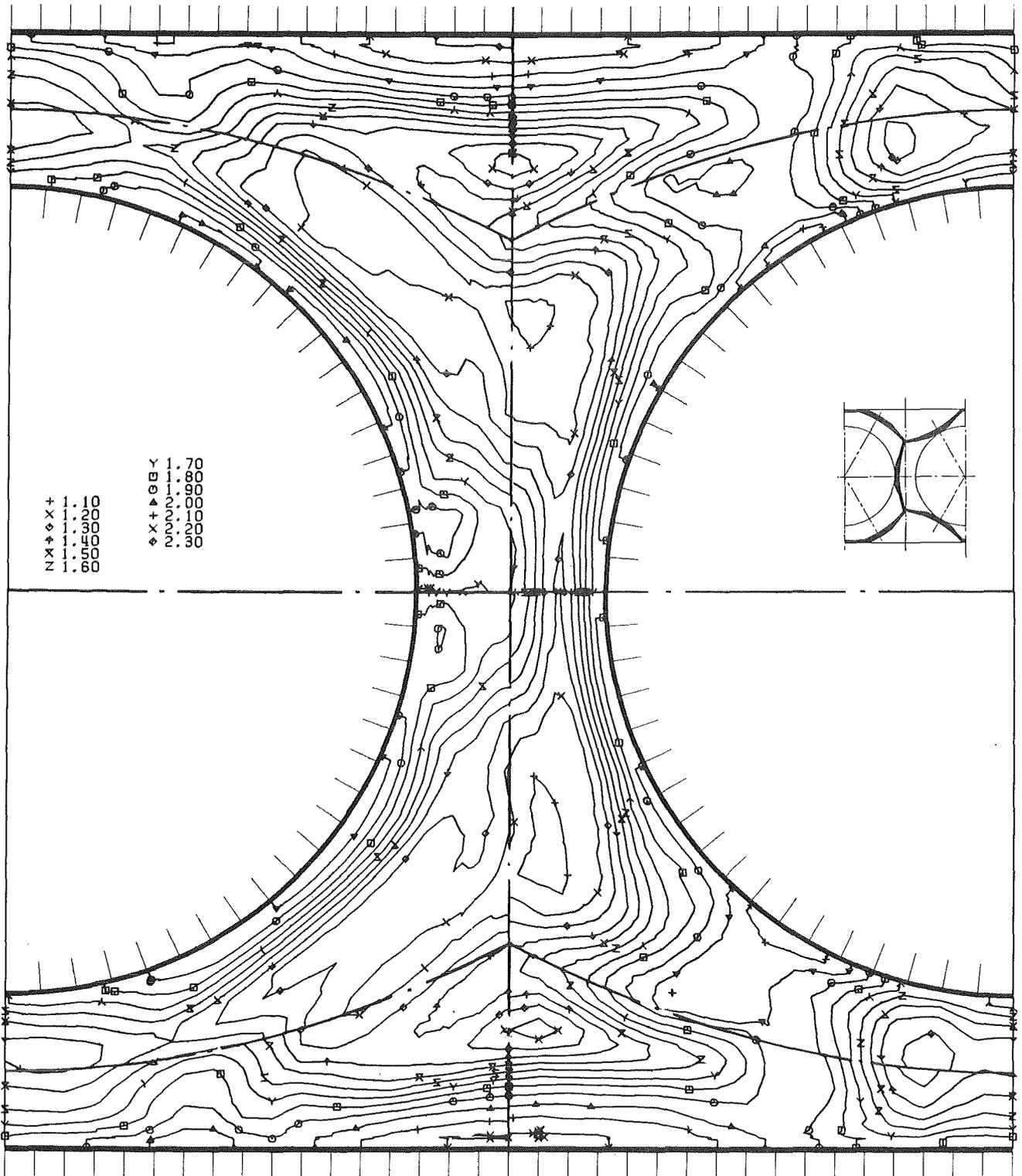


Abb.15 Axiale Turbulenzintensität in der Ebene E6



KfK

Abb.16 Axiale Turbulenzintensität in der Ebene E7

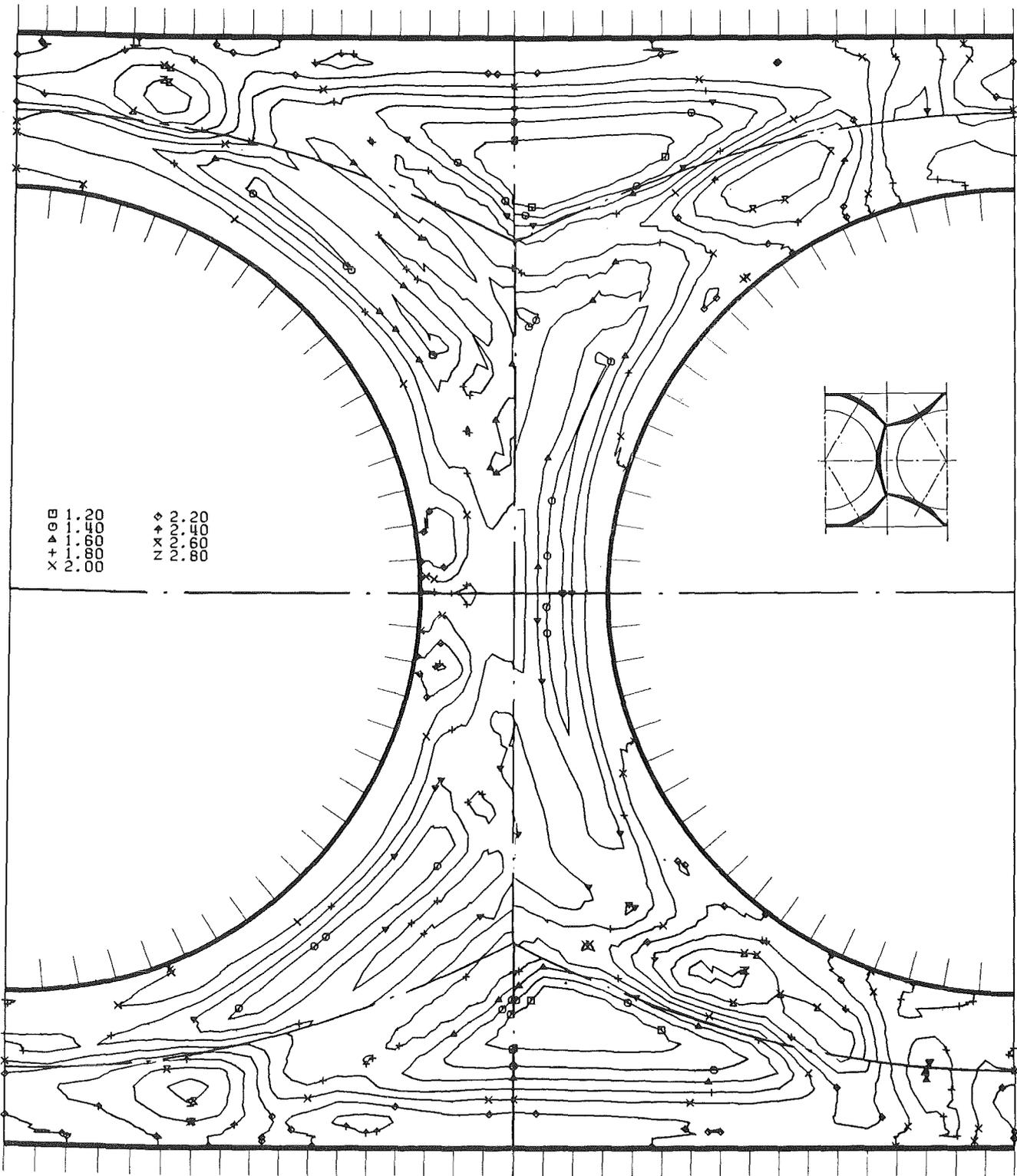
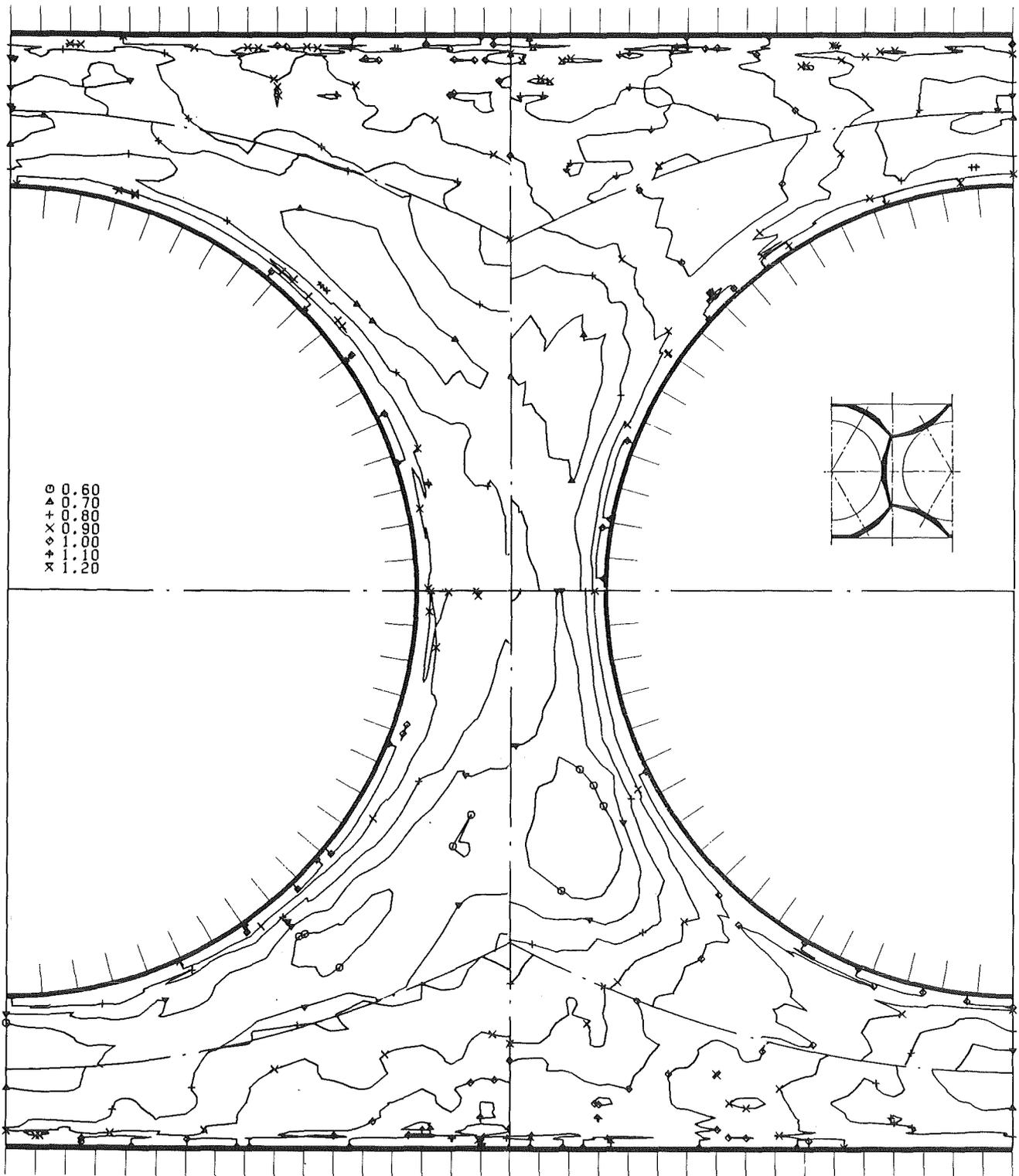


Abb.17 Axiale Turbulenzintensität in der Ebene E8



KfK

Abb.18 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand in der Ebene E6

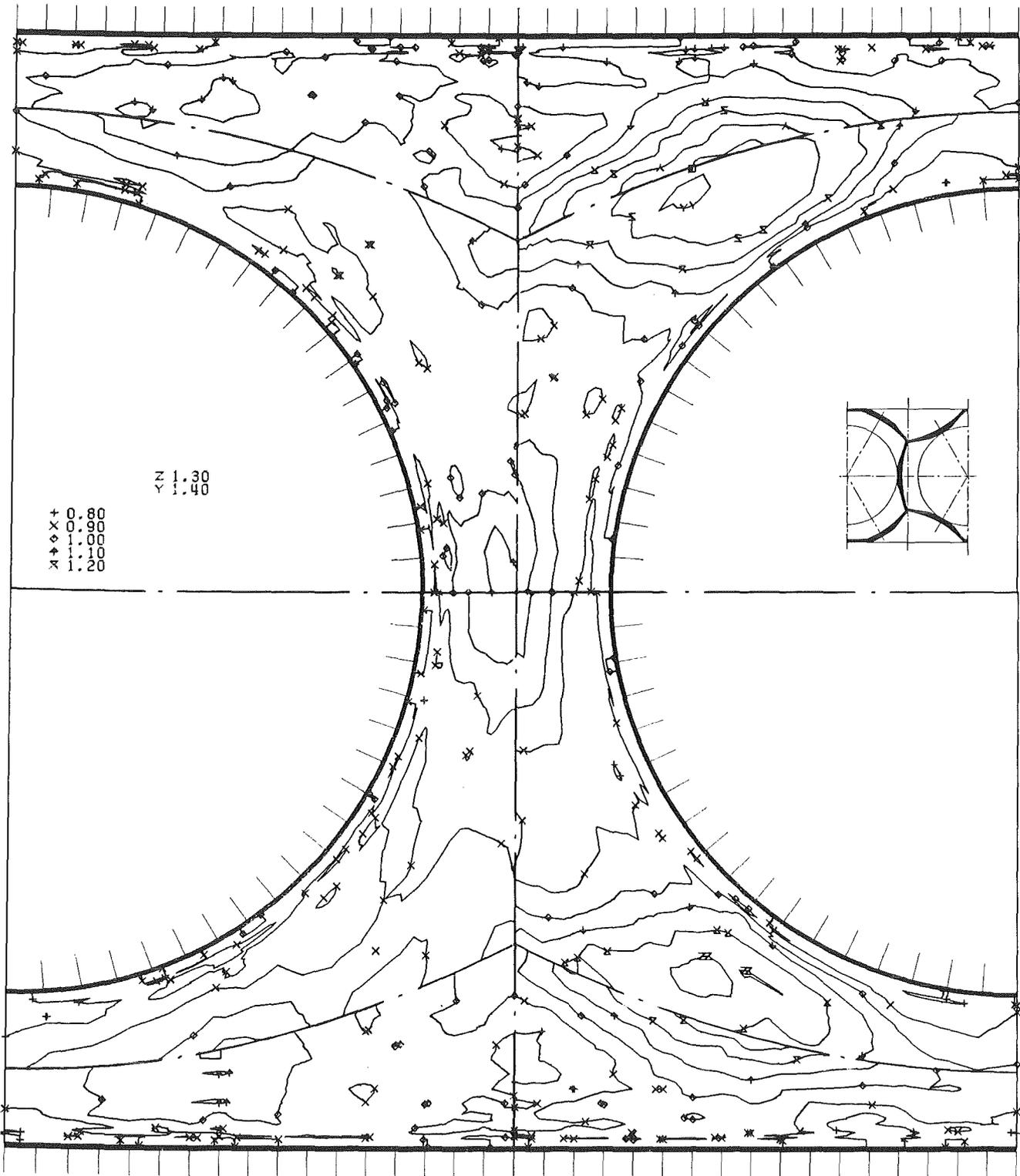
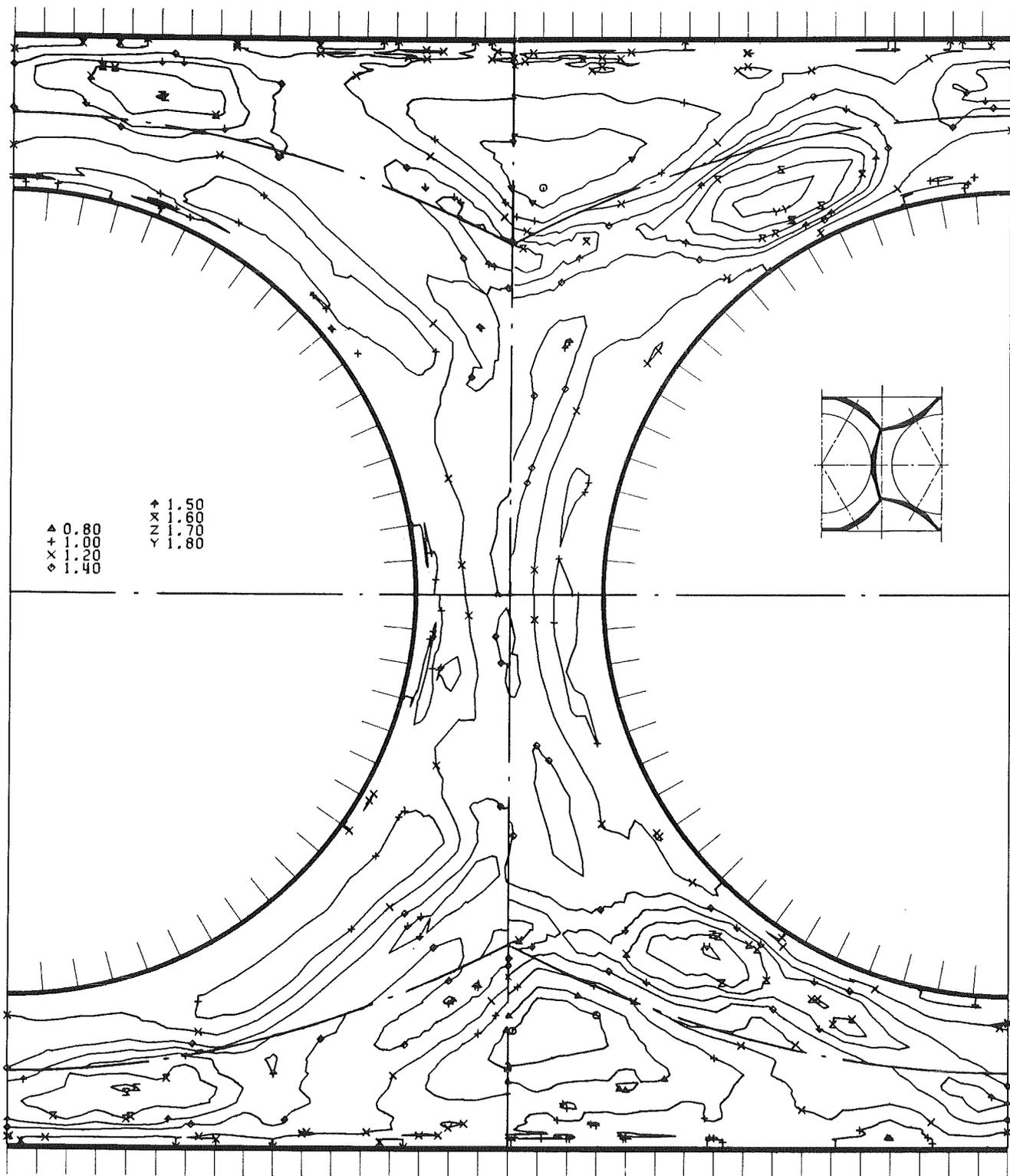


Abb.19 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand in der Ebene E7



KfK

Abb.20 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand in der Ebene E8

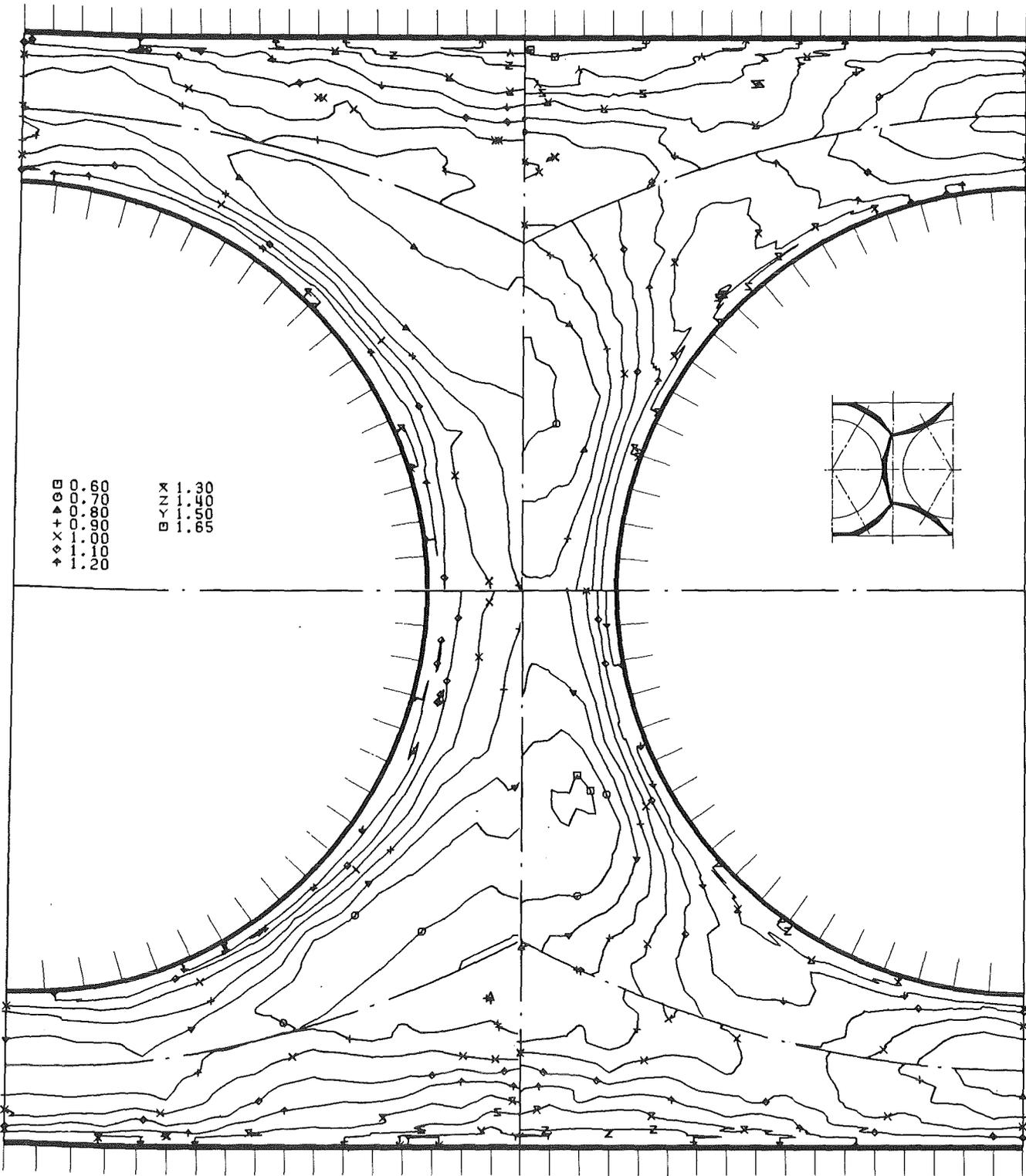
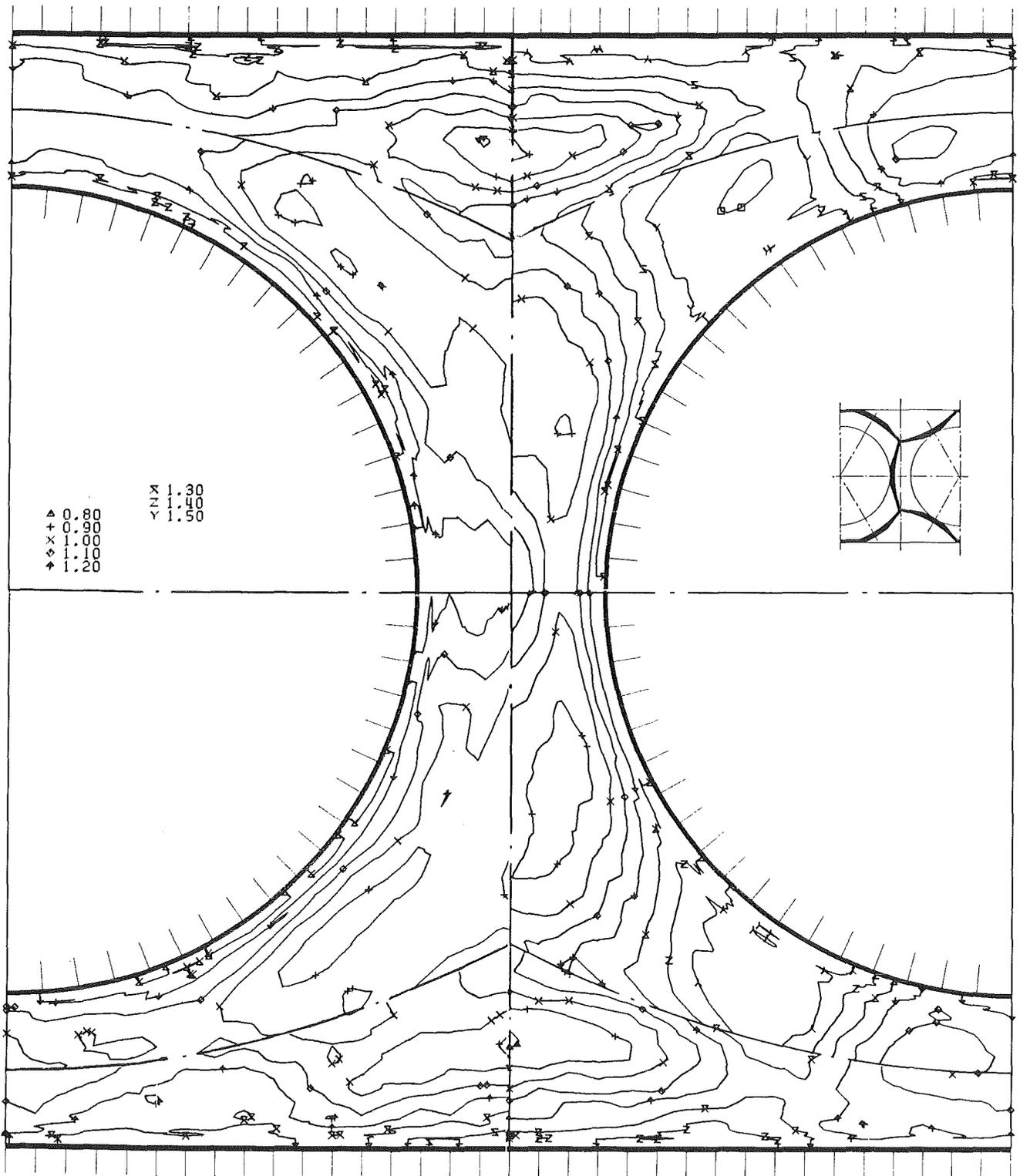


Abb.21 Turbulenzintensität parallel zur Wand in der Ebene E6



KfK

Abb.22 Turbulenzintensität parallel zur Wand in der Ebene E7

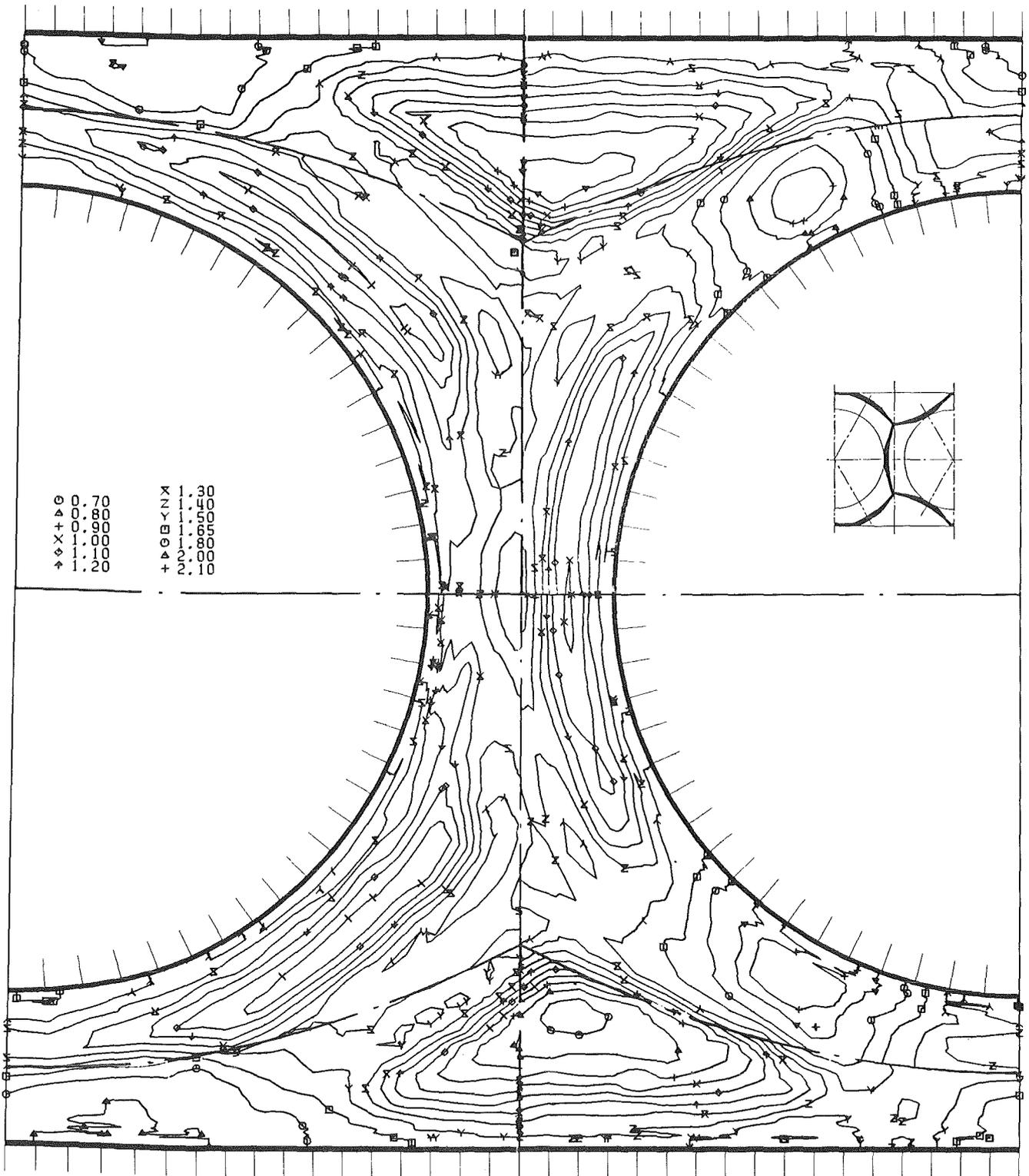
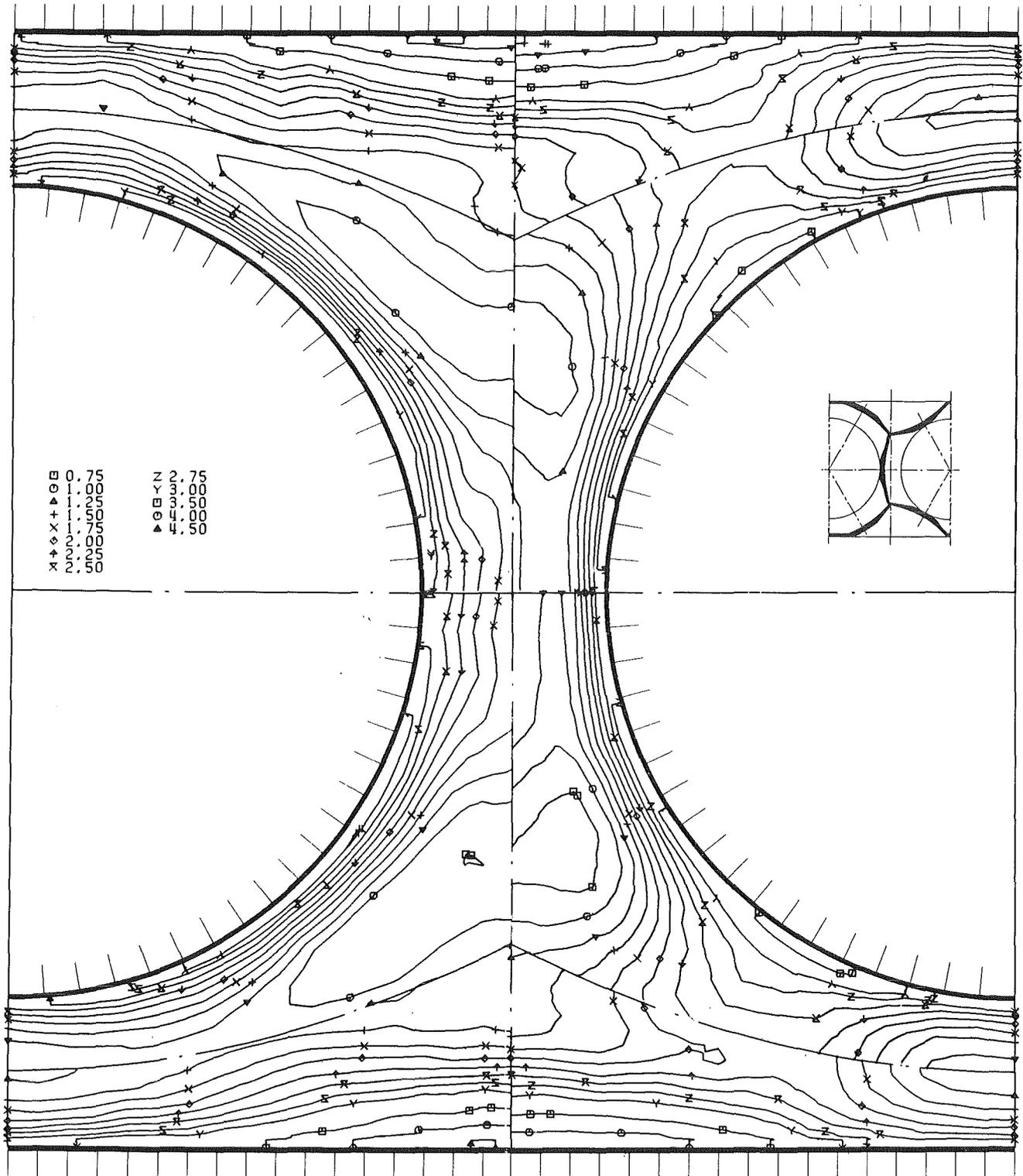


Abb.23 Turbulenzintensität parallel zur Wand in der Ebene E8



KfK

Abb.24 Kinetische Energie der Turbulenz in der Ebene E6

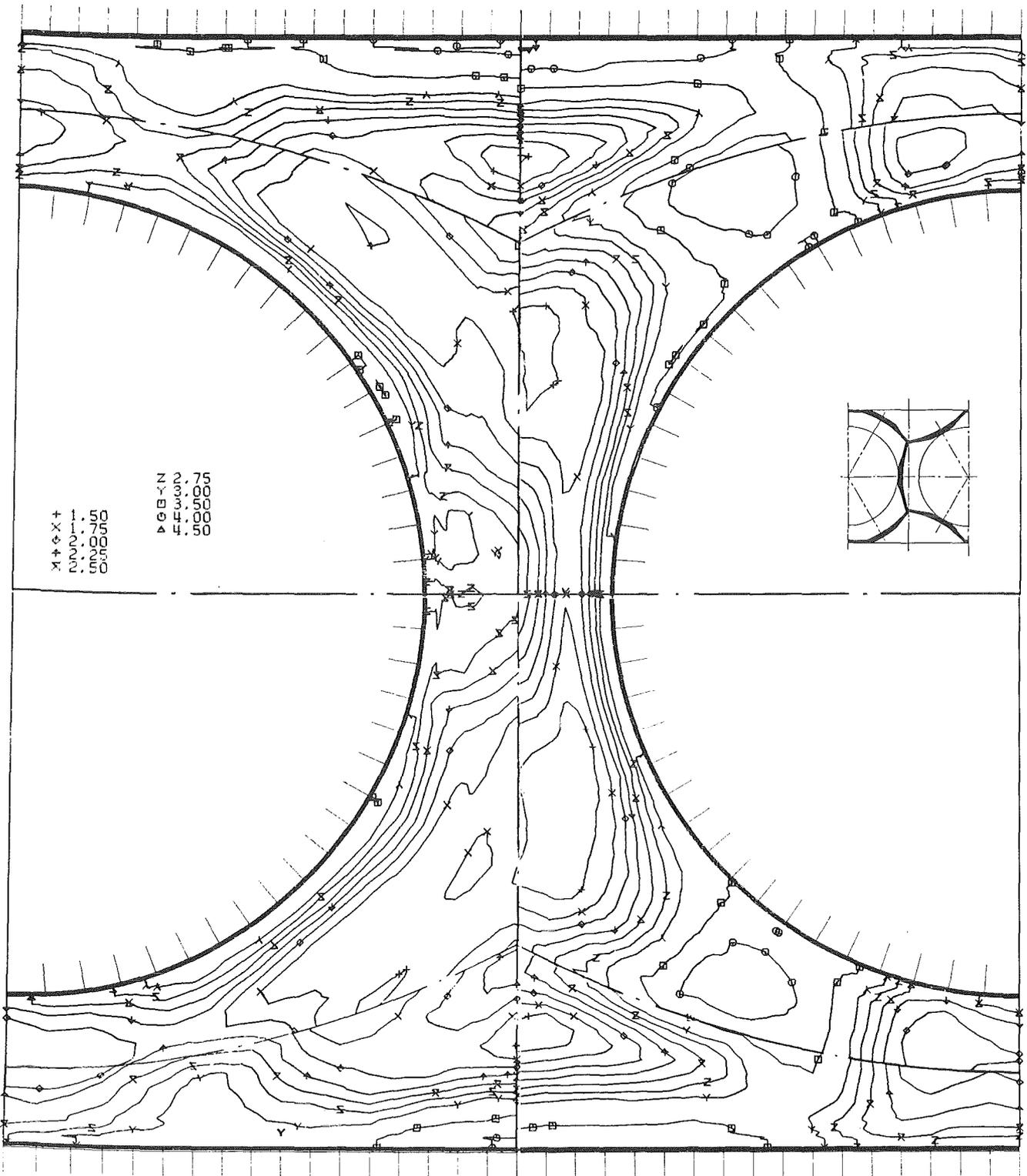


Abb.25 Kinetische Energie der Turbulenz in der Ebene E7

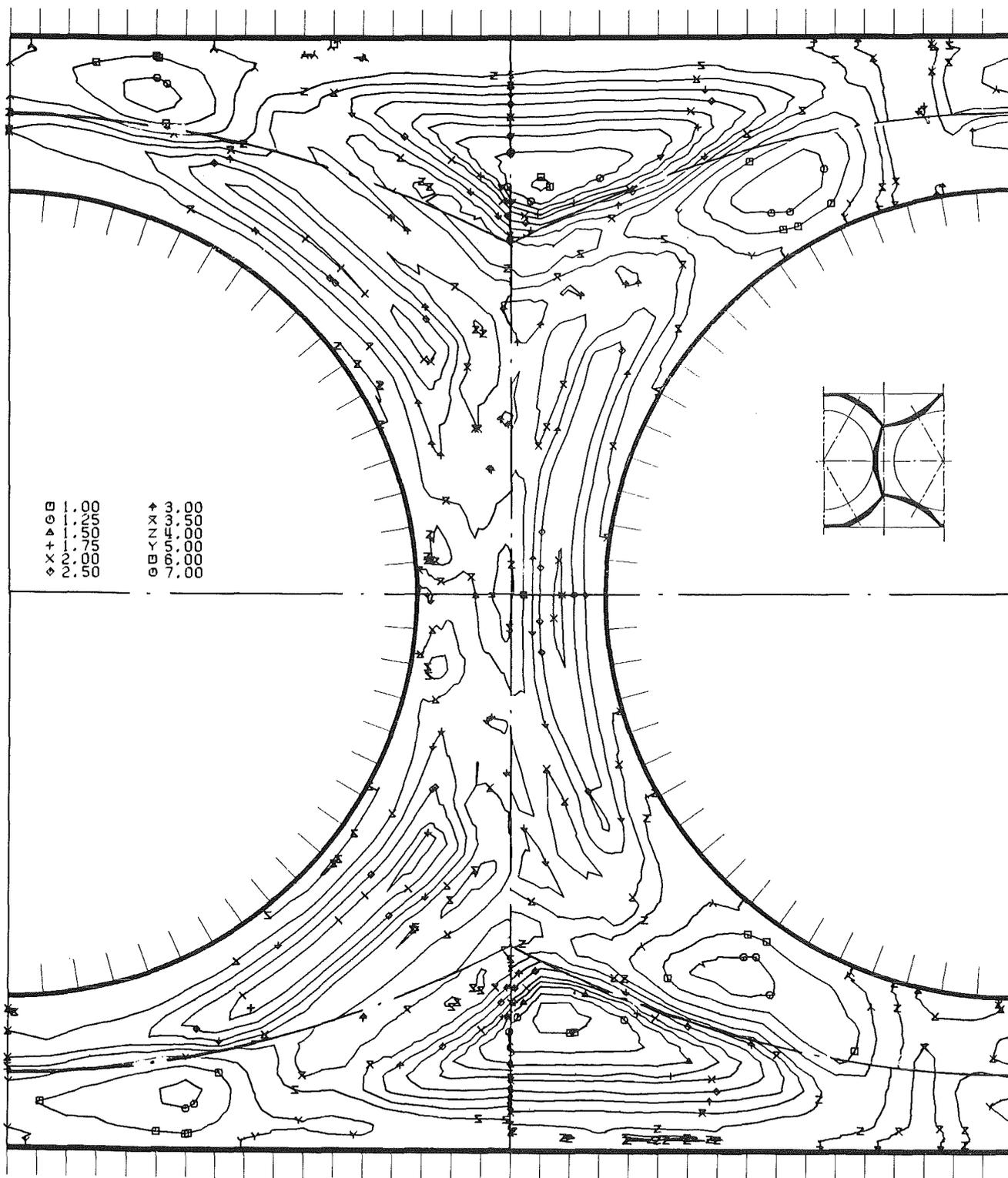
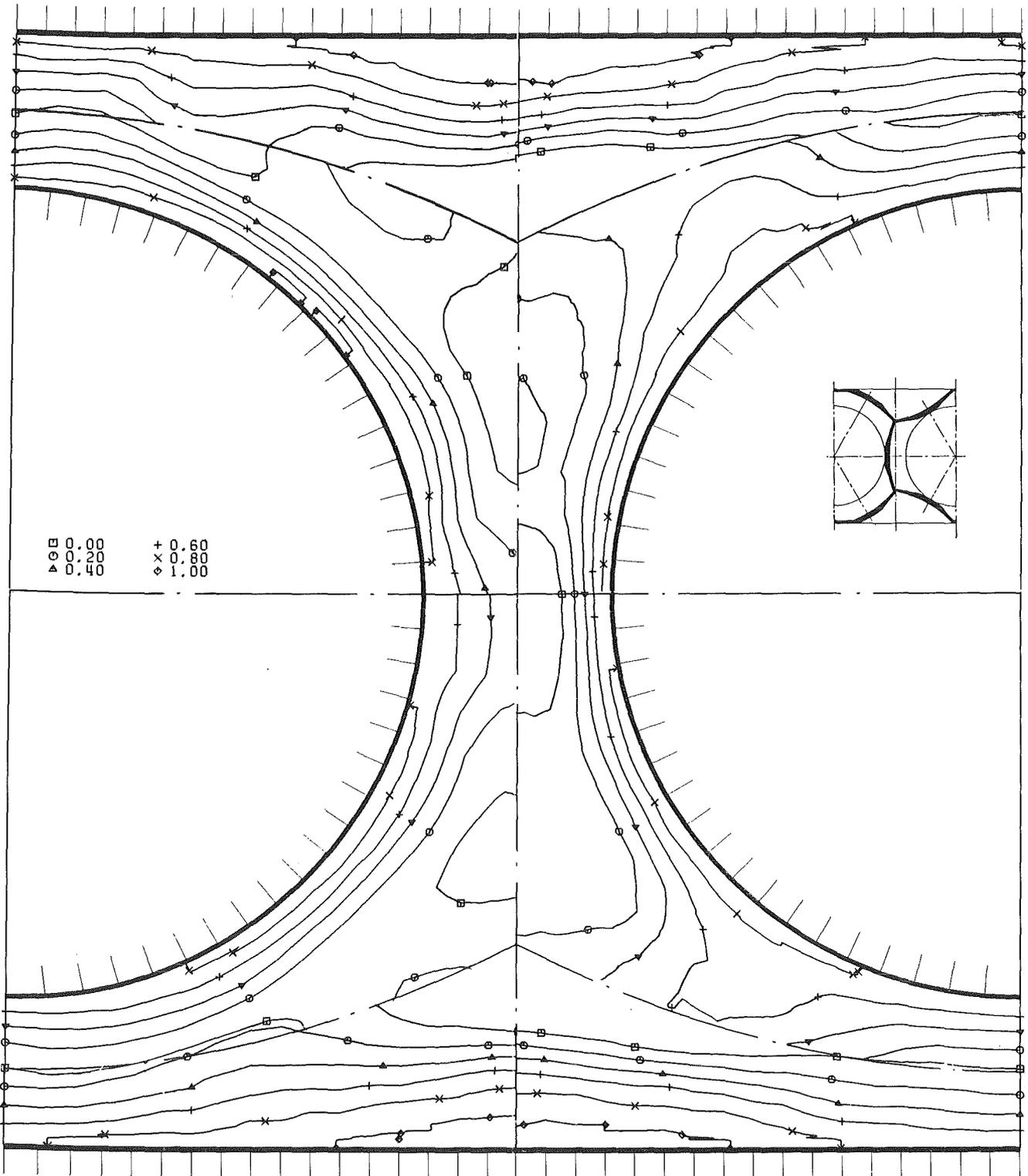
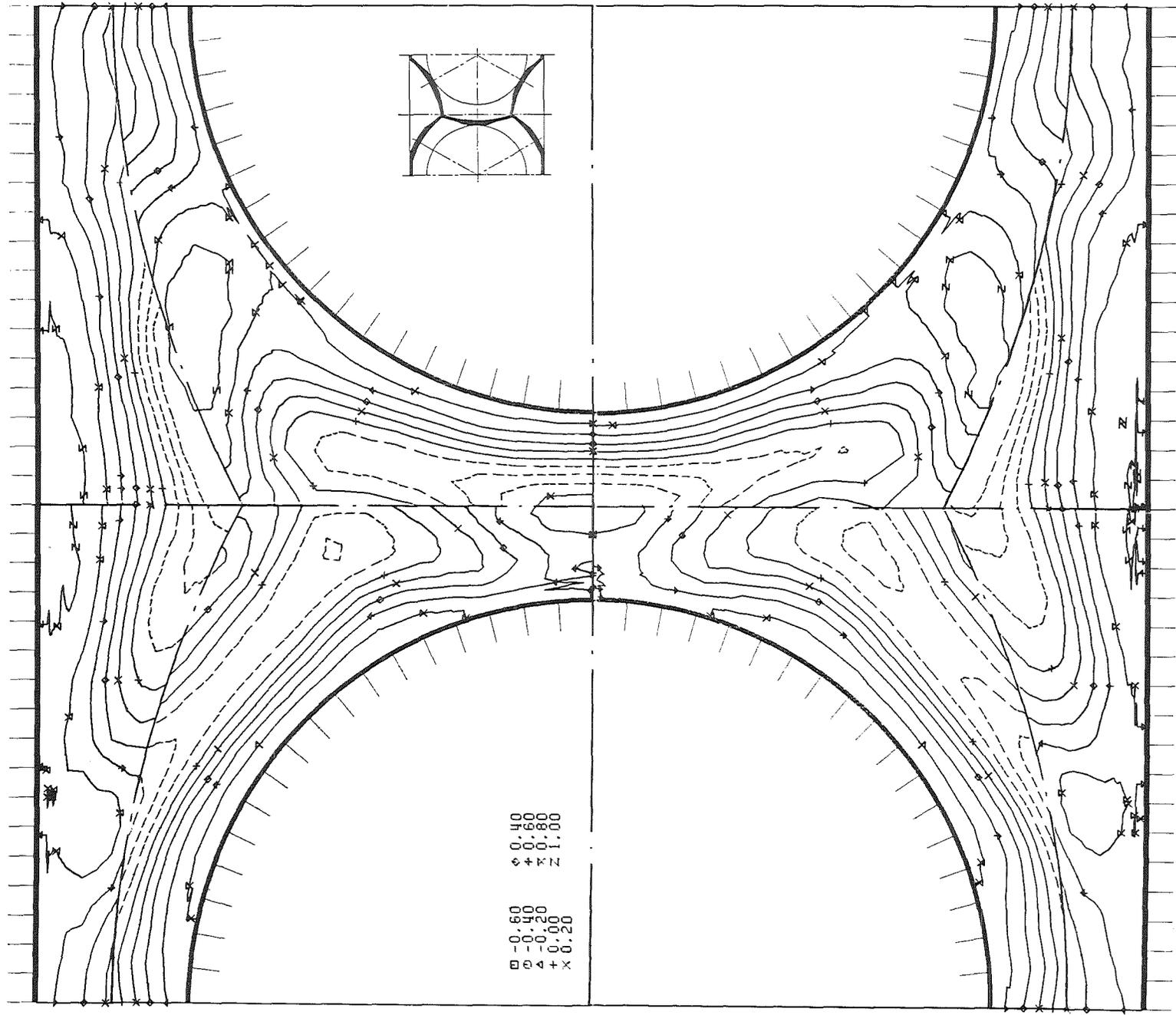


Abb.26 Kinetische Energie der Turbulenz in der Ebene E8



KfK

Abb.27 Turbulente Schubspannung senkrecht zur Wand in der Ebene E6



KfK

Abb. 28 Turbulente Schubspannung senkrecht zur Wand in der Ebene E7

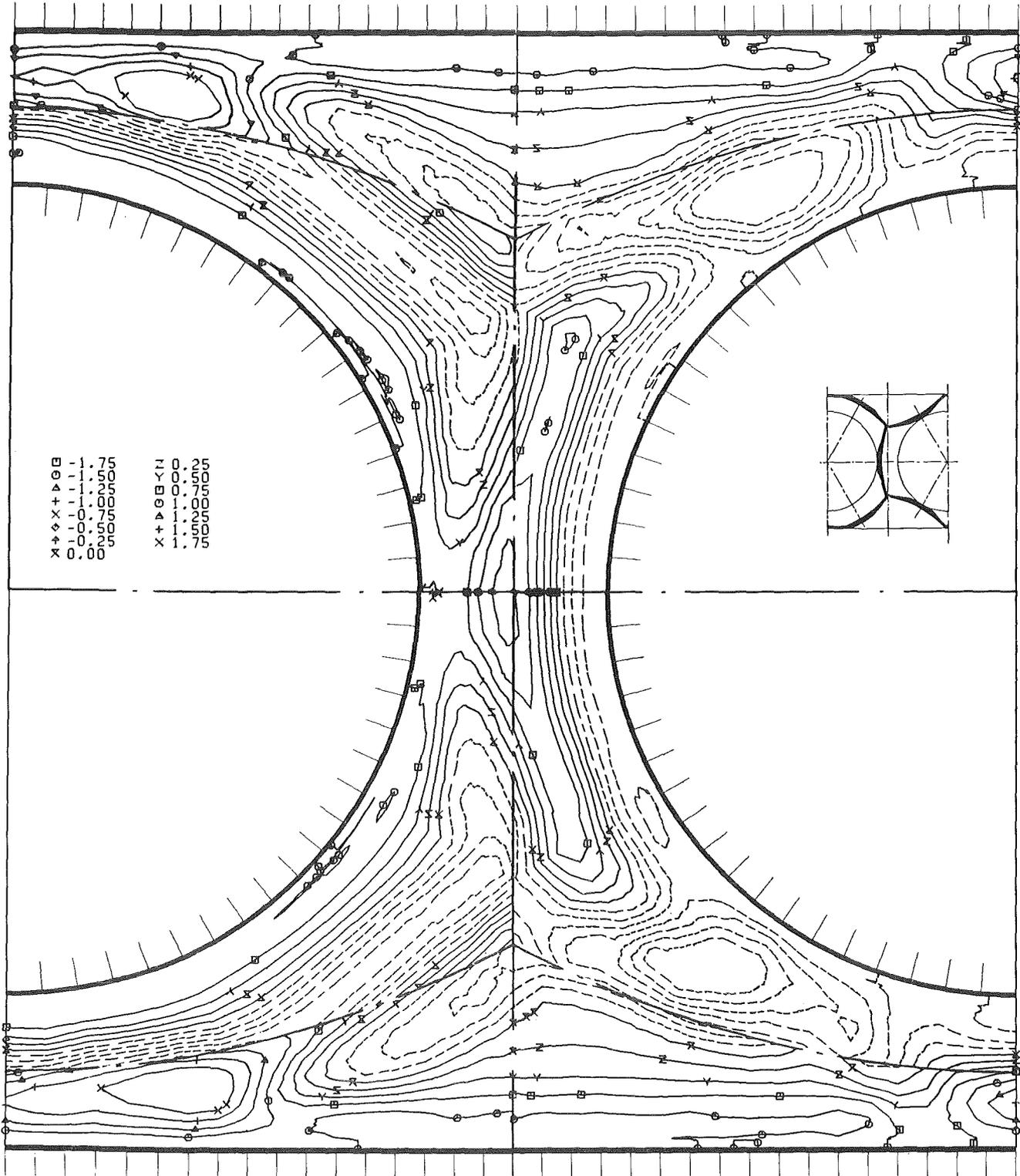


Abb.29 Turbulente Schubspannung senkrecht zur Wand in der Ebene E8



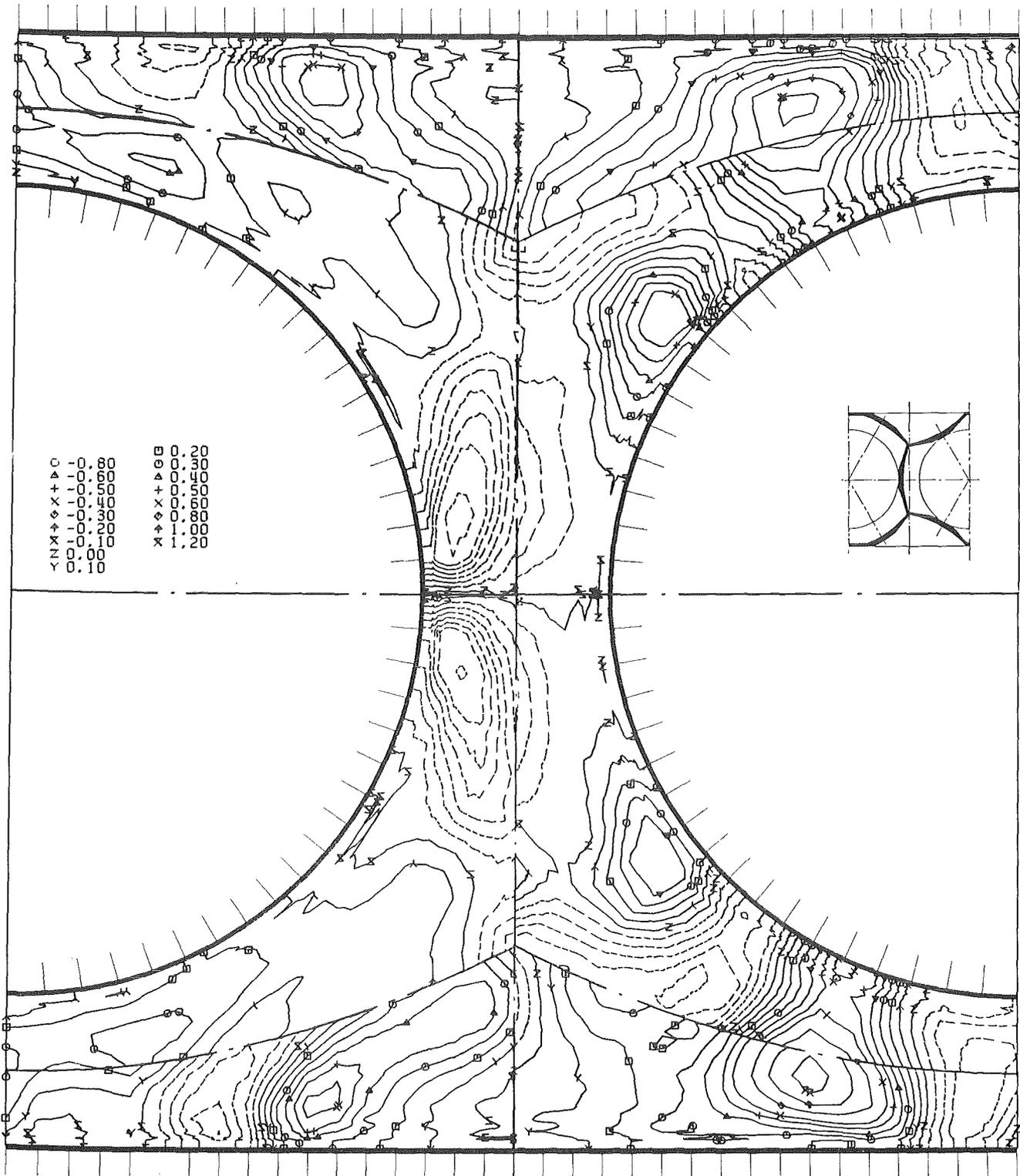
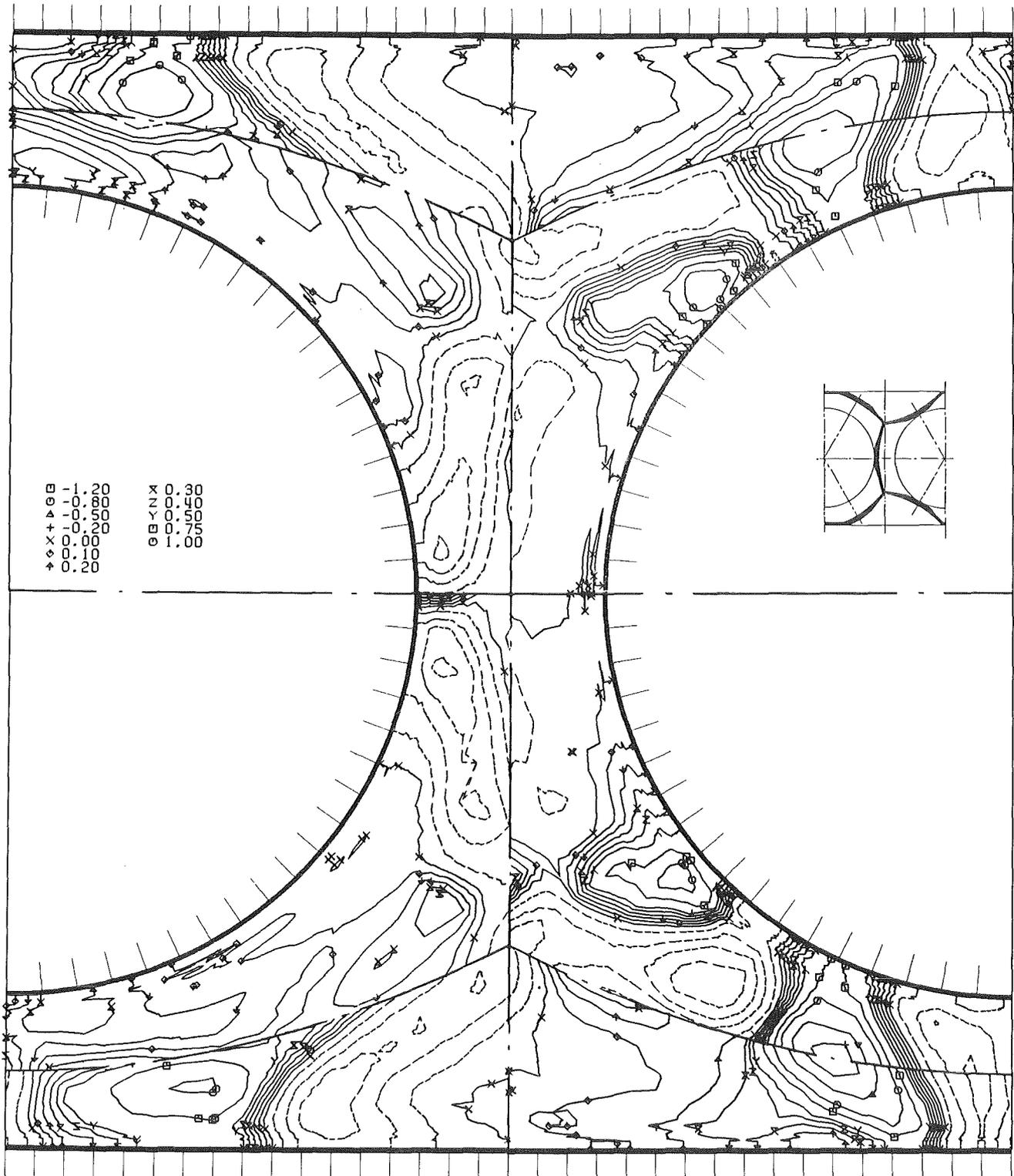


Abb.31 Turbulente Schubspannung parallel zur Wand in der Ebene E7



KfK

Abb.32 Turbulente Schubspannung parallel zur Wand in der Ebene E8

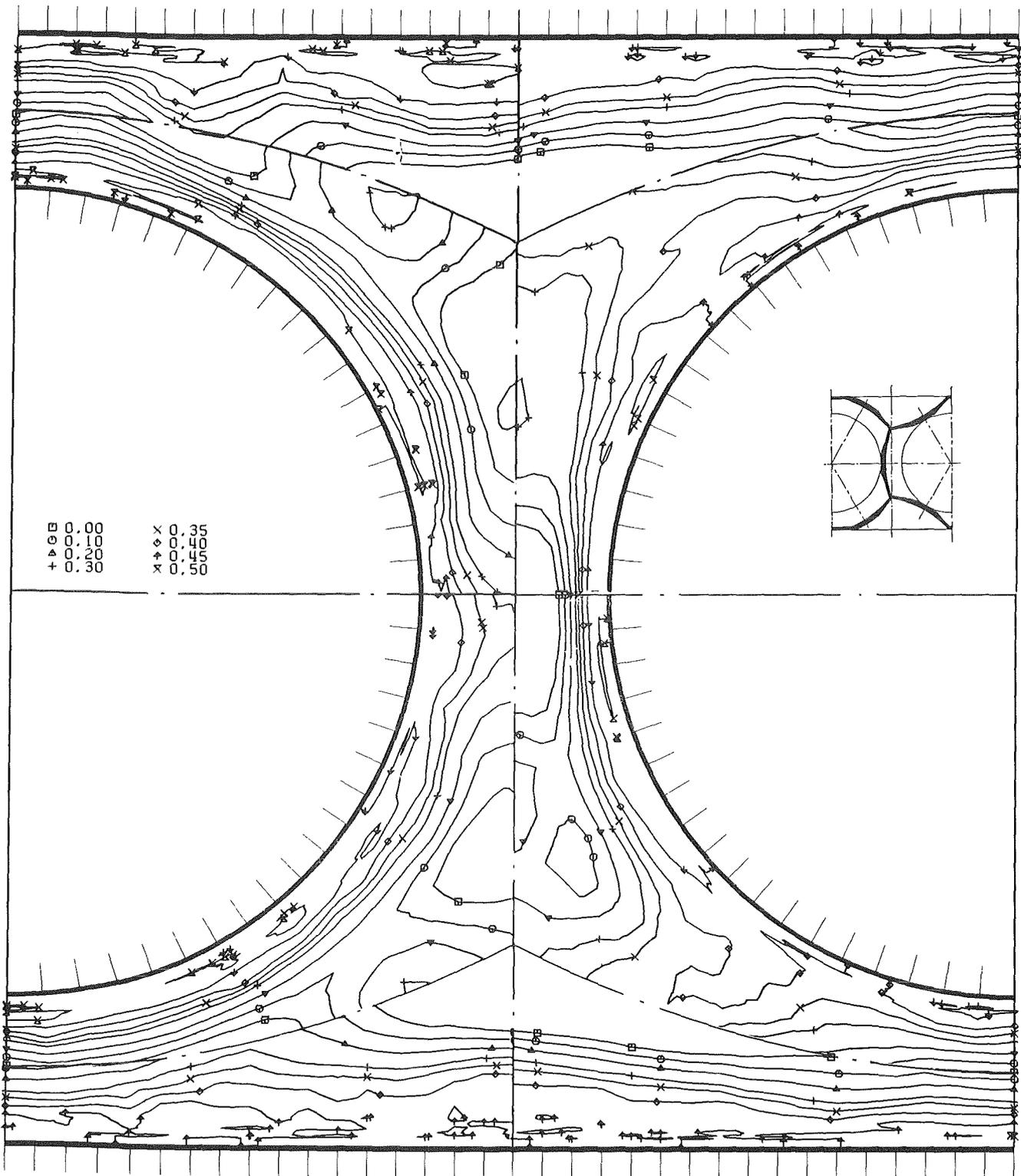
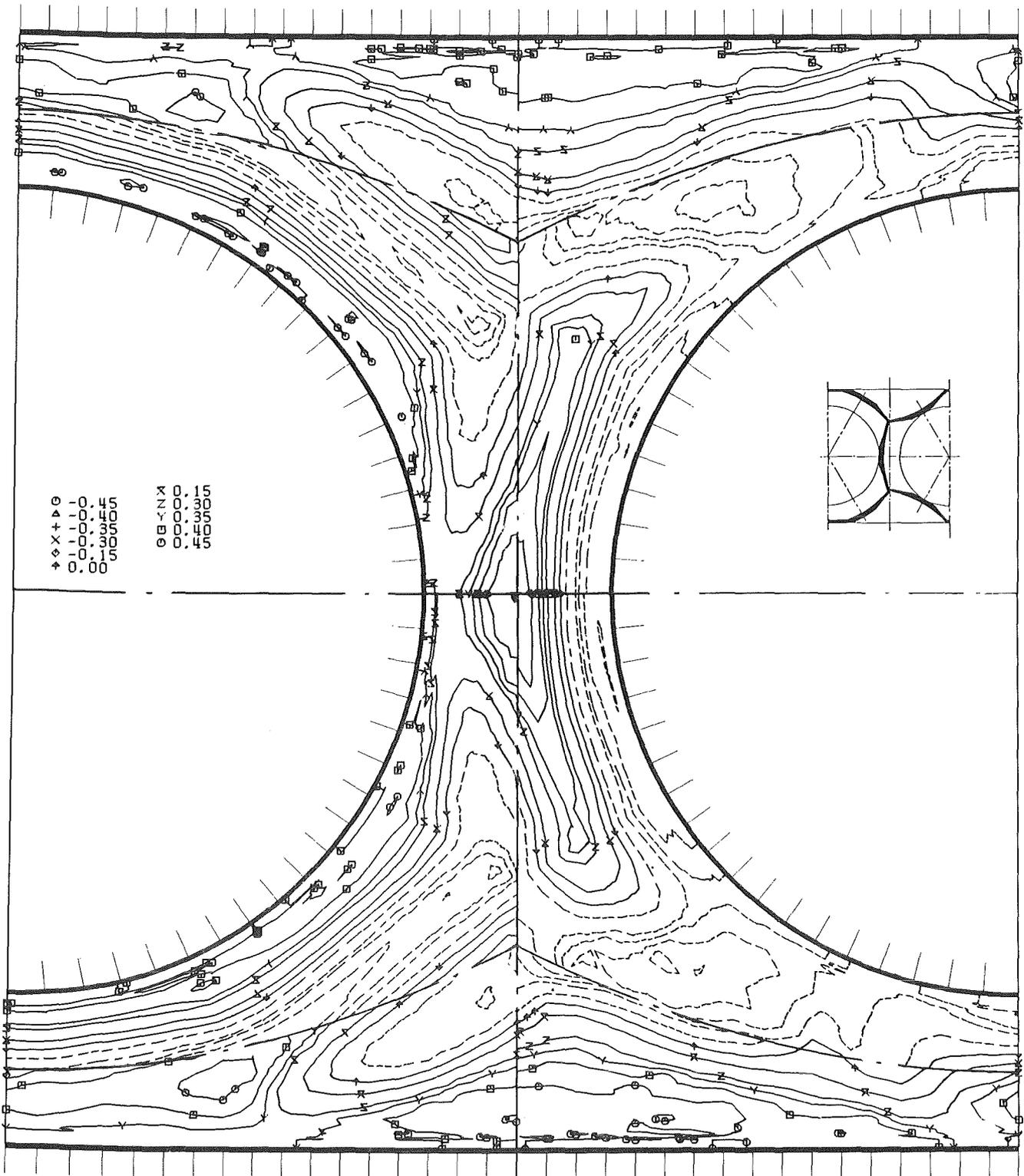


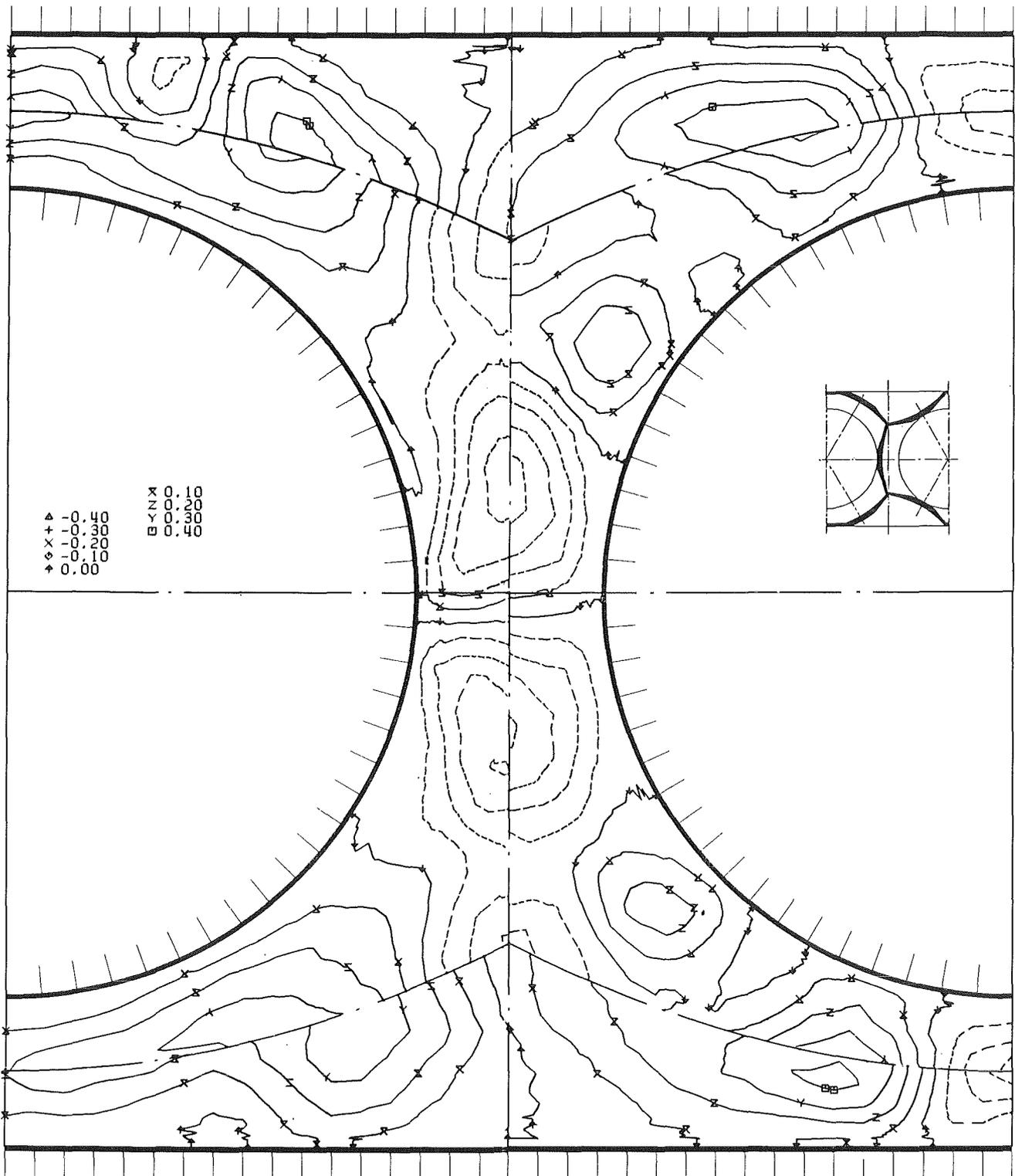
Abb.33 Korrelationskoeffizient der Schubspannung senkrecht zur Wand in der Ebene E6





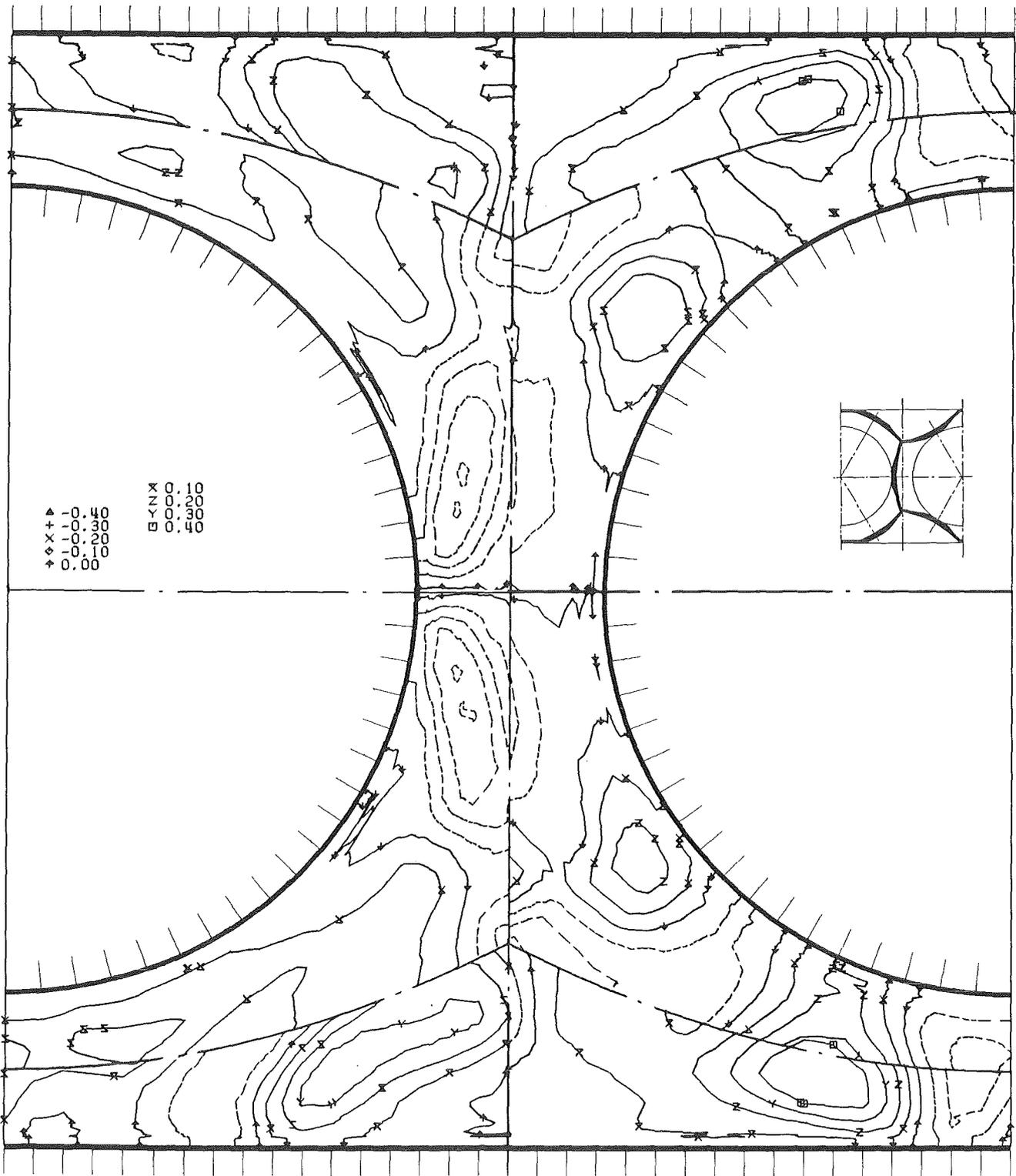
KfK

Abb.35 Korrelationskoeffizient der Schubspannung senkrecht zur Wand in der Ebene E8



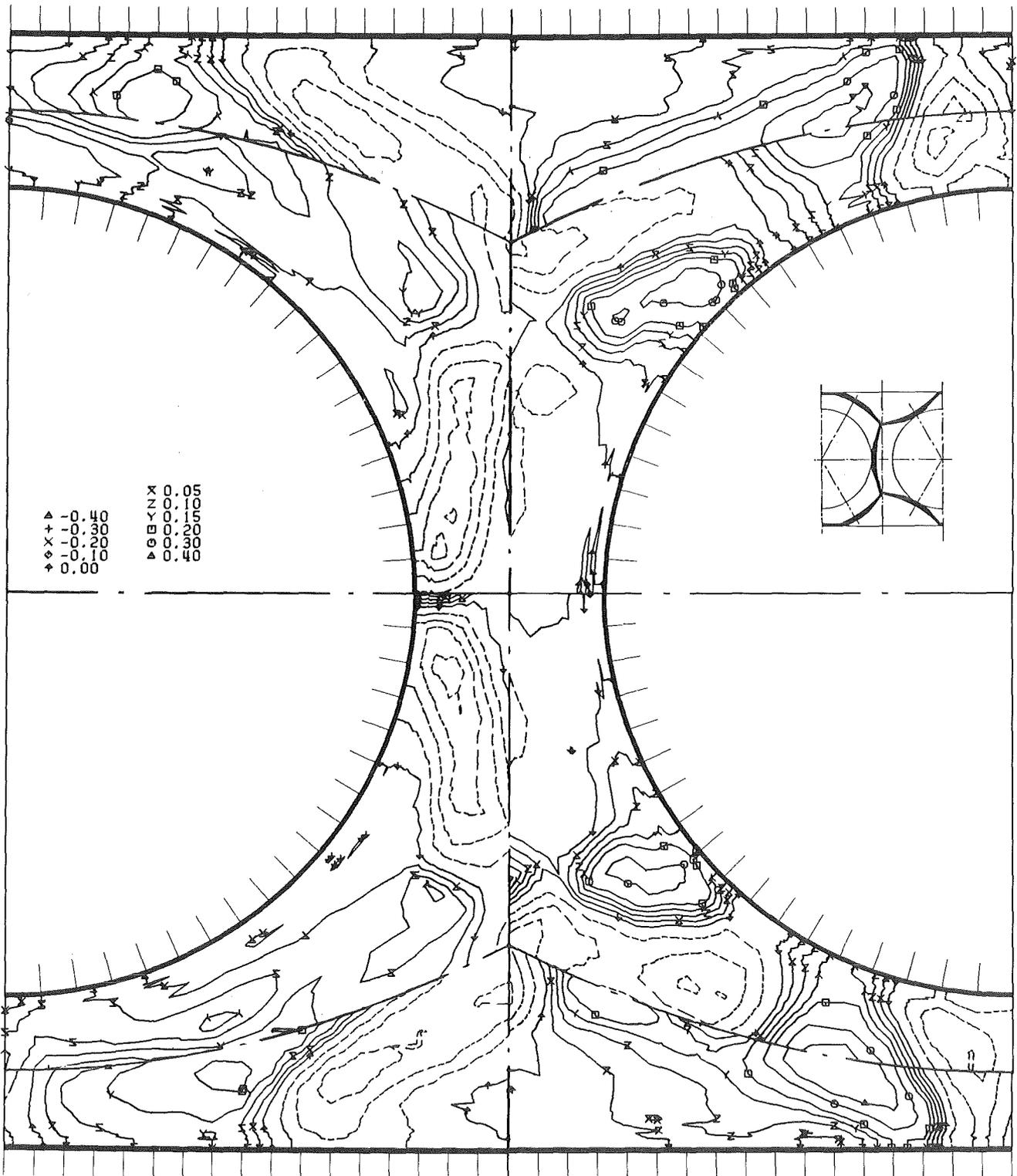
KfK

Abb.36 Korrelationskoeffizient der Schubspannung parallel zur Wand  
in der Ebene E6



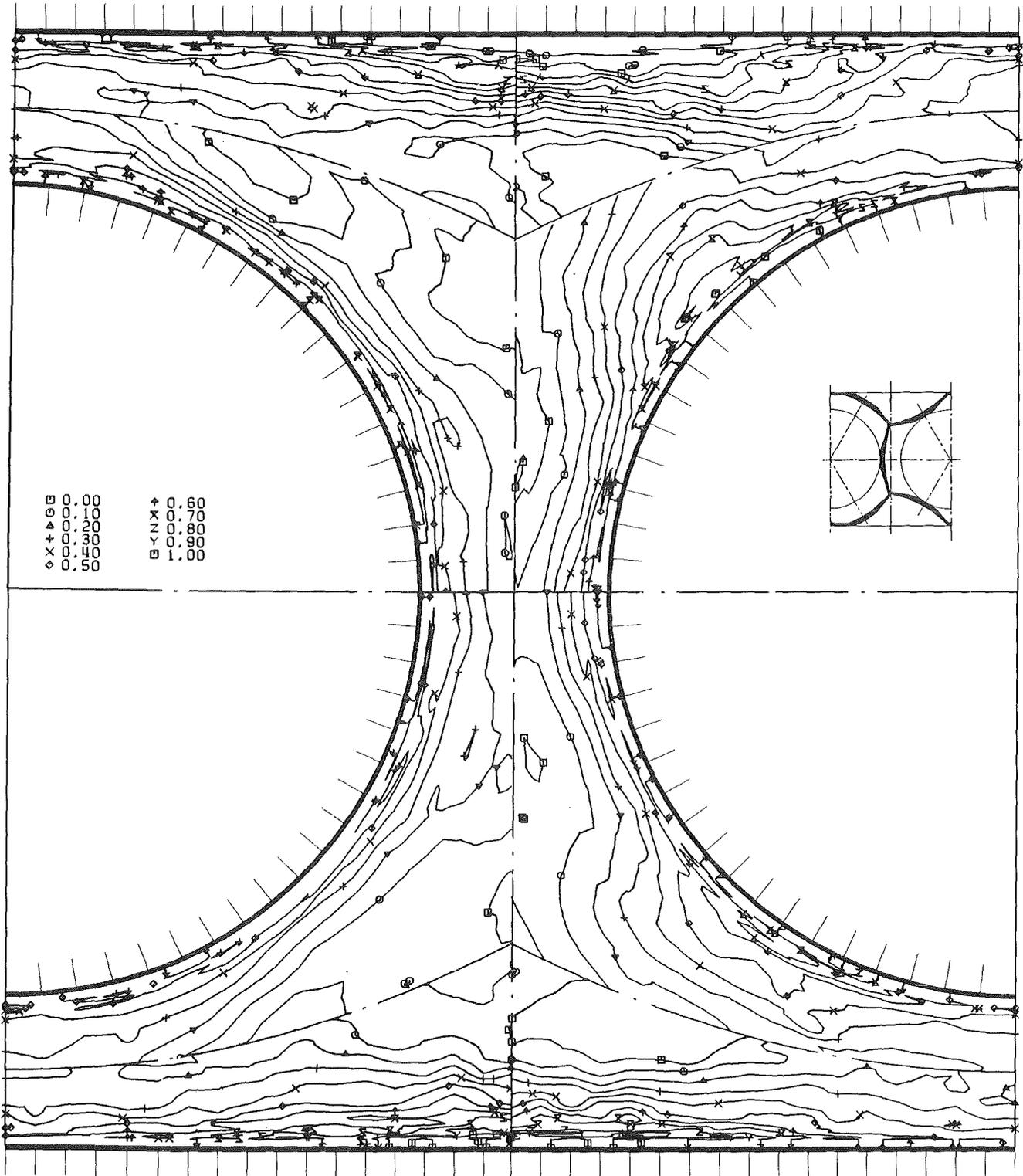
KfK

Abb.37 Korrelationskoeffizient der Schubspannung parallel zur Wand  
in der Ebene E7



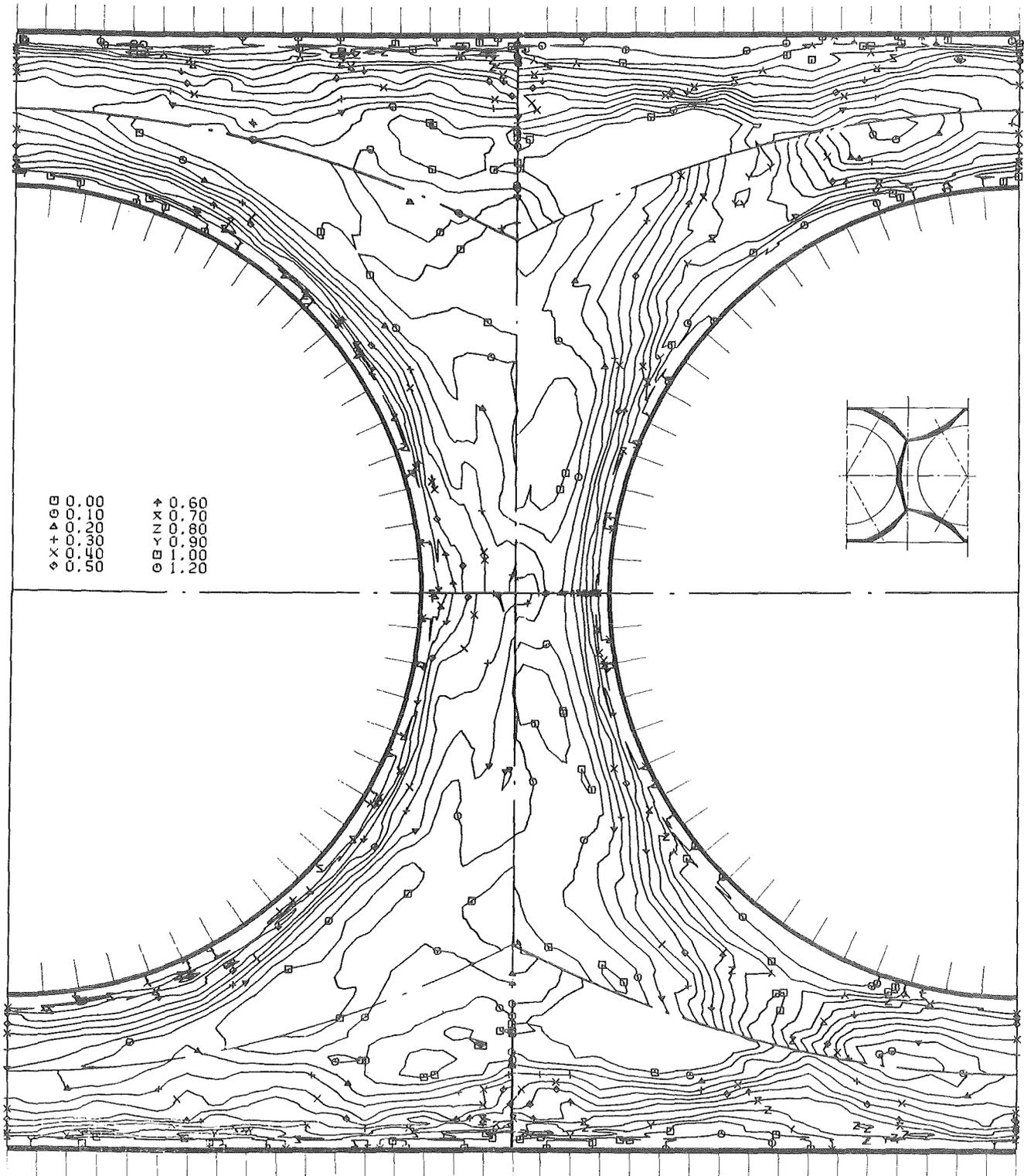
KfK

Abb.38 Korrelationskoeffizient der Schubspannung parallel zur Wand in der Ebene E8



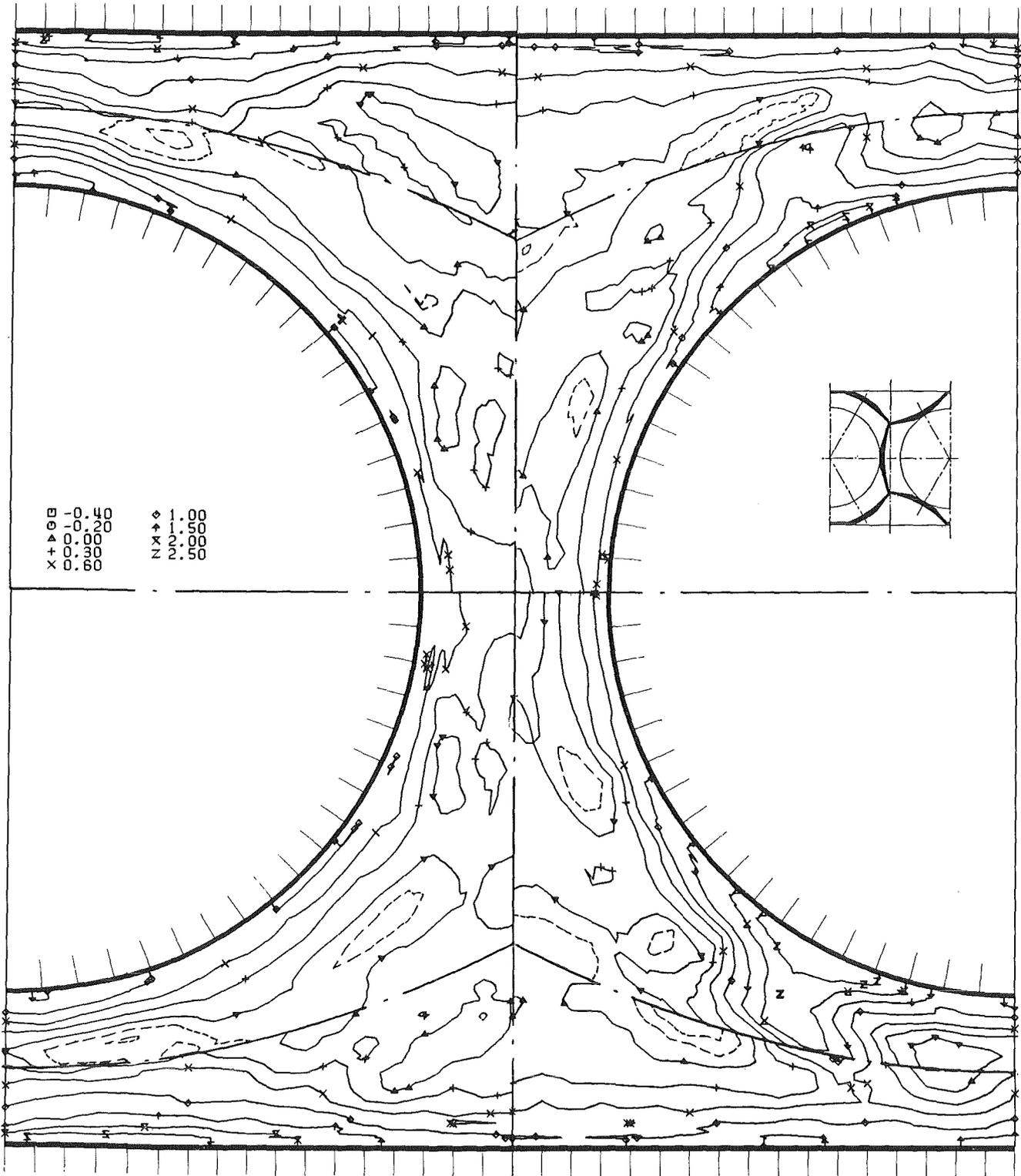
kfk

Abb.39 Quellterm für die axiale Wirbelstärke in der Ebene E6



KTK

Abb.40 Quellterm für die axiale Wirbelstärke in der Ebene E7



KfK

Abb.41 Quellterm für die axiale Wirbelstärke in der Ebene E8