

KfK 3818
Dezember 1984

**Strömungsuntersuchungen
an einem
asymmetrischen Stabbündel
($P/D = 1.148$, $W/D = 1.074$)**

K. Rehme
Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Schneller Brüter

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Schneller Brüter

KfK 3818

Strömungsuntersuchungen an einem asymmetrischen
Stabbündel ($P/D = 1.148$, $W/D = 1.074$)

K. Rehme

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Strömungsuntersuchungen an einem asymmetrischen Stabbündel

(P/D = 1.148, W/D = 1.074)

Zusammenfassung

An einem Stabbündel aus vier parallelen Stäben, das asymmetrisch in einem Rechteckkanal angeordnet war, wurden im Wandkanal (P/D = 1.148, W/D = 1.074) die Geschwindigkeits-, Wandschubspannungs- und Turbulenzverteilungen gemessen. Die Reynoldszahl der Untersuchung betrug $Re = 7.89 \times 10^4$. Die mit einer vollautomatischen Anlage gewonnenen Ergebnisse werden mit Ergebnissen verglichen, die mit manueller Bedienung ermittelt wurden.

Die Meßergebnisse zeigen, daß der Impulstransport besonders in den engsten Stellen des Kanals stark anisotrop ist. Einflüsse von Sekundärströmungen sind in der Verteilung des zeitlichen Mittelwertes der Strömungsgeschwindigkeit nicht zu erkennen.

Ein Vergleich der gemessenen Wandschubspannungsverteilungen mit dem VELASCO-Rechenprogramm zeigt sowohl starke Abweichungen im Bereich zwischen Stab- und Kanalwand als auch zwischen den Stäben aufgrund des starken Impulstransports zwischen den benachbarten Unterkanälen.

Experimental Investigations on the Fluid Flow Through an
Asymmetric Rod Bundle ($P/D = 1.148$, $W/D = 1.074$)

Abstract

Measurements of the distributions of the mean velocity, the wall shear stresses and the turbulence were performed in a wall subchannel of a rod bundle of four parallel rods arranged asymmetrically in a rectangular channel ($P/D = 1.148$, $W/D = 1.074$). The Reynolds number of this investigations was $Re = 7.89 \times 10^4$. The results obtained by a fully automated rig are compared with those from manual operation.

The experimental results show that the momentum transport is highly anisotropic especially in the gaps of the rod bundle. Influences of secondary flow cannot be detected in the distribution of the time-mean velocity.

The comparison between experimental wall shear stress distributions and those calculated with the VELASCO-code shows discrepancies both in the gap between the rod and channel walls and in the gap between the rods caused by the high momentum transport between the two subchannels.

1. Problemstellung

Bei der Entwicklung von Rechenprogrammen, die eine detaillierte Berechnung von Geschwindigkeits- und Temperaturverteilungen bei turbulenter Strömung durch Stabbündel ermöglichen, ist es unumgänglich, die Turbulenzbewegung der Strömung durch sog. Turbulenzmodelle zu beschreiben. Die Ergebnisse, die mit den Rechenprogrammen erzielt werden, sind dann immer nur so genau und abgesichert, wie die darin enthaltenen Turbulenzmodelle durch experimentelle Ergebnisse abgesichert sind.

Die für die Berechnung von Strömungs- und Temperaturverteilungen in Stabbündeln zur Verfügung stehenden bzw. sich in der Entwicklung befindlichen Programme VELASCO /1/ (nur Geschwindigkeitsverteilung) und VITESSE /2/ modellieren die Anisotropie des Impulsaustausches durch Wirbelviskositäten senkrecht und parallel zu den Wänden. In VITESSE ist außerdem die kinetische Energie der turbulenten Schwankungsbewegung modelliert. Zur Absicherung und zur Verbesserung der verwendeten Modelle wurden eine Reihe von Strömungsuntersuchungen in Unterkanälen von Stabbündeln durchgeführt /3/. Bei allen Versuchen wurde ein Stabbündel aus vier parallelen Rohren in einem Rechteckkanal verwendet. Die Rohre waren symmetrisch im Kanal angeordnet.

Beim Betrieb von Stabbündelbrennelementen in Kernreaktoren wird jedoch im allgemeinen keine ideale Geometrie der Unterkanäle vorliegen. Abweichungen von der Idealgeometrie ergeben sich aufgrund der vorhandenen Toleranzen, durch Verbiegen der Brennstäbe unter Temperaturgradienten und Spannungen sowie durch das Brennstabschwellen im Strahlenfeld. Diese Abweichungen von der idealen Geometrie, sog. gestörte Geometrien, sind außerdem abhängig von der Lebensdauer der Brennstäbe.

Damit die Geschwindigkeits- und Temperaturverteilungen auch in gestörten Geometrien sicher berechenbar sind, sind hierfür ebenfalls experimentelle Untersuchungen zum turbulenten Impulstransport nötig, um die Rechenprogramme mit experimentellen Daten zu verifizieren. Deshalb werden Messungen der Geschwindigkeits-, Wandschubspannungs- und Turbulenzverteilungen an asymmetrischen Stabbündeln durchgeführt. Die ersten Experimente erfolgten an einem Stabbündel mit dem Stababstandsverhältnis $P/D = 1.071$ und vier verschiedenen Wandabstandsverhältnissen /4/. Es zeigte sich, daß ein starker Impulstransport, der zeitlich periodisch zwischen den Unterkanälen vorgeht, die Struktur der turbulenten Strömung stark beeinflusst /5/. Dieser Impulstransport ist besonders stark für enge Stab- bzw. Wandabstandsverhältnisse. Die weiteren Untersuchungen für ein größeres Stababstandsverhältnis sollten die Frage beantworten, ob ein derartiger Impulstransport auch in diesen Anordnungen auftritt.

2. Teststrecke

Für diese Untersuchungen wurde ein Stabbündel mit einem Stababstandsverhältnis von $P/D = 1.148$ ausgewählt. Die vier parallelen Rohre wurden jedoch nicht wie in den Versuchen /6/ symmetrisch angeordnet, so daß das Wandabstandsverhältnis ebenfalls $W/D = 1.148$ betrug, sondern die Rohre wurden asymmetrisch angeordnet, wobei der Abstand zwischen den Rohren und der Kanalwand auf der einen Seite etwa das 3-fache des Abstands zwischen Rohren und Kanalwand auf der anderen Seite (Abb. 1) betrug.

Die eingestellten Abstände waren $a_1 = 30.90$ mm und $a_2 = 10.30$ mm. Mit dem Rohrdurchmesser von $D = 139.0$ mm ergeben sich die Wandabstandsverhältnisse zu

$$\left(\frac{W}{D}\right)_{\text{weit}} = 1.222$$

$$\left(\frac{W}{D}\right)_{\text{eng}} = 1.074$$

Die Messungen wurden genau so durchgeführt, wie bei den voraus-
gegangenen Untersuchungen /6/. Gemessen wurden:

- die Verteilung der zeitlich gemittelten Geschwindigkeiten
- die Wandschubspannungsverteilung
- die Verteilung der Turbulenzintensitäten und
- die Verteilung der turbulenten Schubspannungen senkrecht und
parallel zu den Wänden.

In diesem Bericht werden die Ergebnisse der Untersuchungen im
engen Wandkanal ($W/D = 1.074$) dargestellt und diskutiert.

3. Ergebnisse

Die Ergebnisse aller Messungen liegen in Form von Tabellen vor.

3.1 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit

Die mit Pitotrohren gemessenen zeitlichen Mittelwerte der Strö-
mungsgeschwindigkeit sind als Funktion des relativen Wandabstandes
 y/L ($L =$ Länge des Geschwindigkeitsprofils zwischen Wand und
Position des größten Wandabstandes) in Abb. 2 für den Teil des
Strömungskanals, der dem Stab benachbart ist (r/\varnothing) und in Abb. 3
für den der Kanalwand benachbarten Teil (x/y) dargestellt. Als
Bezugswert wurde die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Wand-
kanal verwendet. Die gemessenen Geschwindigkeitsverteilungen zeigen,
daß das relative Minimum der Strömungsgeschwindigkeit im engen Spalt
zwischen Stab und Kanalwand ($\varnothing = 90$ grd bzw. $x = 0$ mm) auftritt, wie
es zu erwarten ist. Dagegen ergibt sich das relative Maximum der
Strömungsgeschwindigkeit für $\varnothing = 35$ grd, jedoch auch zwischen den
Stäben ($\varnothing = 0$ grd) ist die Geschwindigkeit relativ hoch, verursacht
durch den Impulstransport aus dem benachbarten weiten Wandkanal
($W/D = 1.222$). Ein Isotachenbild der gemessenen Geschwindigkeitsver-
teilung, bezogen auf die Geschwindigkeit am fest eingebauten Pitot-
rohr, zeigt Abb. 4. Einflüsse von Sekundärströmungen sind nicht zu
bemerken.

Zum Vergleich zeigt Abb. 5 die Isotachen für die Untersuchung mit manueller Bedienung der Sondenverstellung und Meßwerterfassung. Die Isotachen zeigen das gleiche Bild, dabei ist zu beachten, daß der Referenzwert am fest eingebauten Pitotrohr und die Reynoldszahl der beiden Untersuchungen leicht unterschiedlich war.

Mit einem Rechenprogramm wurde aus den Meßwerten die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Wandkanal durch Integration ermittelt. Diese Geschwindigkeit ergab sich zu

$$u_m = 22.77 \text{ ms}^{-1},$$

während am fest eingebauten Pitotrohr eine Geschwindigkeit von

$$u_{REF} = 29.25 \text{ ms}^{-1}$$

während der Messungen konstant gehalten wurde.

Mit dem hydraulischen Durchmesser des Wandkanals von

$$D_h = 54.493 \text{ mm}$$

ergibt sich die mittlere Reynoldszahl der Untersuchung zu

$$Re = 7.89 \times 10^4.$$

Die entsprechenden Werte für die Untersuchung mit manueller Bedienung sind : $u_m = 20.86 \text{ ms}^{-1}$, $u_{REF} = 27.73 \text{ ms}^{-1}$ und $Re = 7.63 \times 10^4$.

3.2 Wandschubspannung

Abb. 6 zeigt die mit Prestonrohren gemessenen Wandschubspannungsverteilungen an Stab- und Kanalwand. Die dargestellten Wandschubspannungen sind auf den Mittelwert der Wandschubspannung im ausgemessenen Teil des Wandkanals bezogen. Dieser Mittelwert ergab sich aus den Einzelmessungen durch Integration zu

$$W_{av} = 1.377 \text{ Nm}^{-2}$$

Die Wandschubspannung an der Stabwand hat ein Maximum im Spalt zwischen den Stäben ($\varnothing = 0 \text{ grd}$), während im offenen Kanal ($\varnothing = 35 \text{ grd}$) nur ein schwaches relatives Maximum auftritt. Dieser Verlauf deutet auf einen starken Impulstransport aus dem benachbarten weiten Wandkanal hin.

3.3 Reibungsbeiwert und dimensionslose Geschwindigkeitsprofile

Aus der gemessenen mittleren Wandschubspannung errechnet sich der Reibungsbeiwert nach

$$\lambda_{\tau} = \frac{8 \tau_{\text{wav}}}{\rho u_m^2} \quad (1)$$

zu $\lambda_{\tau} = 0.01818$

für $Re = 7.89 \times 10^4$.

Für das Kreisrohr ergibt sich für diese Reynoldszahl nach der Beziehung von Maubach /7/:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.035 \lg Re\sqrt{\lambda} - 0.989 \quad (2)$$

der Reibungsbeiwert zu: $\lambda = 0.01914$.

Der im Wandkanal gemessene Reibungsbeiwert, berechnet aus der Wandschubspannungsverteilung, liegt also etwa 5.0 % niedriger als der Kreisrohrwert.

Aus dem gemessenen axialen Druckgradienten kann der Reibungsbeiwert des Wandkanals ebenfalls ermittelt werden. Der über eine Länge $L = 1.183 \text{ m}$ gemessene Druckgradient ergab sich zu:

$$\frac{\Delta p}{\Delta L} = 90.96 \text{ Nm}^{-2}$$

Daraus errechnet sich der Reibungsbeiwert zu:

$$\lambda_{\Delta p} = \frac{\Delta p / \Delta L}{\frac{\rho}{2} u_m^2 \frac{1}{D_h}}$$

$$\lambda_{\Delta p} = 0.01636$$

Dieser aus dem gemessenen axialen Druckgradienten berechnete Reibungsbeiwert ist 10 % niedriger als der aus der Wandschubspannung berechnete Wert und liegt damit 14.5 % unter dem Rohrreibungsbeiwert bei gleicher Reynoldszahl. Das ist ein weiterer Hinweis auf einen starken Impulstransport zwischen den beiden Unterkanälen.

Die gemessenen Werte kann man mit dem theoretischen Wert vergleichen, der sich nach der Laminarmethode /8/ ergibt. Dazu wird für den Wandkanal der Geometrieparameter der Laminarströmung für $P/D = 1.148$ und $W/D = 1.074$ nach /9/ zu:

$$K = 61.1$$

bestimmt. Für die Geometrieparameter bei turbulenter Strömung ergibt sich nach /8/

$$A = 1.01$$

$$G = 5.67$$

Das Reibungsgesetz für den Wandkanal lautet damit:

$$\sqrt{\frac{8}{\lambda}} = 1.01 \left[2.5 \ln \text{Re} \sqrt{\frac{\lambda}{8}} + 5.5 \right] - 5.67 \quad (3)$$

Man erhält für $Re = 7.89 \times 10^4$ einen Reibungsbeiwert von $\lambda = 0.01866$, der um 2,6% von dem berechneten Wert aus der Wand-schubspannungsverteilung abweicht und damit eine gute Bestätigung der theoretischen Methode für einen Wandkanal liefert.

Die gemessenen Geschwindigkeitsprofile sind in dimensionsloser Darstellung in Abb. 7 für die dem Stab benachbarte Strömungszone und in Abb. 8 für die der Kanalwand benachbarte Strömungszone aufgetragen. Die Geschwindigkeit u wurde mit der örtlichen Wand-schubspannungsgeschwindigkeit

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (4)$$

zu

$$u^+ = \frac{u}{u^*} \quad (5)$$

und der Wandabstand y zu

$$y^+ = \frac{y \cdot u^*}{\nu} \quad (6)$$

dimensionslos gemacht.

Zum Vergleich ist das bekannte Wandgesetz der Geschwindigkeitsverteilung in Kreisrohren von Nikuradse /10/

$$u^+ = 2,5 \ln y^+ + 5.5 \quad (8)$$

als durchgezogene Linie in die Abbildungen eingetragen. Die Meßergebnisse liegen sehr nahe beim Wandgesetz von Nikuradse im wand-nahen Bereich. Auffällig ist die geringe Streuung der Meßwerte.

3.4 Turbulenzintensitäten und kinetische Energie der Turbulenz

Die Meßergebnisse der Turbulenzintensitäten in den drei Strömungsrichtungen, sowie der kinetischen Energie der turbulenten Bewegung sind auf zweifache Weise dargestellt. Zunächst werden die Daten für die Bereiche zwischen Wand und Maximalgeschwindigkeit von beiden Wänden aus gesehen ($r/\phi =$ Stabwand, $x/y =$ Kanalwand) gezeigt. Dabei werden die Intensitäten auf die lokale Wandschubspannungsgeschwindigkeit bezogen. In einer weiteren Darstellung werden die Linien gleicher Intensität (Höhenlinien) dargestellt. Diese Bilder wurden mit Hilfe eines Rechenprogramms /11/ auf einem Zeichengerät erzeugt. Wegen der komplizierten Geometrie (r/ϕ und x/y) wurden aus den Meßdaten je zwei Bilder erzeugt, die anschließend an der Linie größten Wandabstandes zusammengesetzt wurden. Daher und auch wegen der z. T. unterschiedlichen Richtungen bei der Messung der Daten an der Trennlinie ergeben sich nicht immer glatte Verläufe der Höhenlinien, sondern es treten Sprünge auf. Dies ist besonders deutlich bei den in der Zeichenebene liegenden Komponenten w' und v' zu sehen. Bei der Erzeugung der Höhenlinienbilder wurden alle Daten auf einen Referenz-Wert der Wandschubspannungsgeschwindigkeit normiert. Als Normierungsgröße wurde die Wandschubspannung bei $\phi = 0$ grad (r/ϕ) gewählt. Die Meßwerte sind nach der Hooper Methode /13, 14/ ausgewertet worden.

3.4.1 Axiale Turbulenzintensität

Die gemessenen Verläufe der axialen Turbulenzintensität sind in Abb. 9 für den Bereich nahe der Stabwand und in Abb.10 für den Bereich nahe der Kanalwand dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, daß i.a. die axiale Turbulenzintensität - wie erwartet - in Wandnähe am größten ist. Dabei ergeben sich die auf die lokale Wandschubspannungsgeschwindigkeit bezogenen Werte des Maximums zu etwa

$$\sqrt{\frac{u'^2}{u_*^2}} = 2.1 \div 2.8$$

Diese Werte sind z. T. deutlich höher als die Ergebnisse von Messungen an Kreisrohren. Auffallend ist, daß die Werte in Richtung auf die Maximalgeschwindigkeit ($y/L = 1$) wesentlich schwächer abfallen als beim Kreisrohr, für das sich in Rohrmitte ein Wert von ca. 0.8 ergibt. Auch zeigt sich, daß der Abfall stark von der Position an der Stab- und bzw. Kanalwand abhängt. Während die axiale Turbulenzintensität in den weitesten Querschnitten $\varnothing = 30$ und 35 grad bzw. $x = 75$ und 79.8 mm mit dem Wandabstand stark abfällt, ist z.B. für $\varnothing \geq 50$ grad (Abb. 9) bzw. $x = 0 - 55$ mm (Abb.10), also im Spalt zwischen Stab und Kanalwand, die axiale Turbulenzintensität nahezu konstant über den Querschnitt, ja sie steigt in einigen Fällen mit der Entfernung von der Wand leicht an. Das Maximum der axialen Turbulenzintensität wird für $\varnothing = 65 \div 70$ grad bzw. $x = 25-30$ mm gefunden (Abb. 9 und 10). Diese hohen axialen Turbulenzintensitäten können wohl nur durch den Impulsaustausch zwischen den Unterkanälen, der in /5/ diskutiert wird, und der sich in engen Spalten bemerkbar macht, erklärt werden. Die Höhenliniendarstellung (Abb. 11) zeigt deutlich die Gebiete hoher axialer Turbulenzintensität. Zum Vergleich ist in Abb. 12 die Höhenliniendarstellung der Untersuchung mit manuellem Betrieb gezeigt. Die Struktur der Turbulenzintensität ist sehr ähnlich, jedoch sind die Ergebnisse bei automatischem Betrieb etwas höher. Die Ursache dafür ist in der neuen Auswertemethode nach Hooper /3/ zu sehen, die in /14, 15/ ausführlich diskutiert wird. Die Versuchsergebnisse bei manuellem Betrieb wurden mit der Methode nach Kjellström /16/ (Originalmethode) ausgewertet.

3.4.2 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand

Die Turbulenzintensitäten senkrecht zur Wand (Abb. 13 und 14) fallen generell mit wachsendem Wandabstand ab. In Wandnähe liegen die Werte zwischen 1.0 und 1.2 an der Linie der Maximalgeschwindigkeit zwischen 0.8 und 1.0. Die Meßwerte der radialen Turbulenzintensität sind mit einer relativ großen Meßunsicherheit behaftet, daher ergibt auch das Höhenlinienbild (Abb. 15) eine etwas uneinheitliche Darstellung.

Auffällig ist der starke Abfall der Meßwerte für $\varnothing > 45$ grd, also im Spalt zwischen Stab und Kanalwand. Da ein entsprechender Effekt für $X < 45$ mm nicht auftritt, wird das abweichende Verhalten auf Drift im Hitzdraht - also Meßfehler - zurückgeführt. Das Höhenlinienbild zeigt eine gleichmäßigere Struktur als bei manuellem Betrieb.

3.4.3 Turbulenzintensität parallel zur Wand

Die Daten für die Turbulenzintensität parallel zur Wand (Abb. 16 und 17) zeigen mit wachsendem Wandabstand nur in Teilen des Strömungsquerschnitts, wie erwartet, einen leichten Abfall, wobei die Werte in Wandnähe von gleicher Größe sind wie bei Kreisrohren. Dies gilt besonders für $\varnothing = 25 - 40$ grd bzw. $x = 70-79.8$ mm, also in den Teilen des Kanals mit der größten Ausdehnung. Auffällig ist, daß die azimutale Turbulenzintensität im engen Spalt zwischen den Stäben ($\varnothing = 0 - 10$ grd) im wandfernen Gebiet relativ hohe Werte aufweist und weitgehend unabhängig vom Wandabstand ist. Besonders in Richtung zum engen Spalt zwischen Stab- und Kanalwand ($\varnothing > 65$ grd bzw. $x < 30$ mm) steigt die azimutale Turbulenzintensität stark an. Im Spalt ($\varnothing = 90$ grd bzw. $x = 0$ mm) werden sehr hohe Werte von $\sqrt{w'^2}/u^* = 2.0$ erreicht (Maximalwert). Dieses Verhalten wird durch den Impulstransport zwischen den benachbarten Unterkanälen /5/ hervorgerufen. Deutlich wird dieses Ergebnis auch in der Höhenliniendarstellung (Abb. 18). Die Ergebnisse nach der manuellen Methode liegen insgesamt etwas niedriger, zeigen jedoch weitgehend die gleiche Struktur (Abb.19)

3.4.4 Kinetische Energie der Turbulenz

Die gemessene kinetische Energie der Turbulenz

$$\overline{k'} = \frac{1}{2} [u'^2 + v'^2 + w'^2]$$

(8)

fällt mit wachsendem Wandabstand nur in Gebieten großen Wandabstandes ($\varnothing = 15 - 35$ grd bzw. $x \geq 70$ mm) mehr oder weniger stark ab (Abb. 20 und 21). Die Werte in Wandnähe liegen etwas höher als beim Kreisrohr. Sehr hohe Werte ergeben sich für die kinetische Energie der Turbulenz im engen Spalt zwischen Stab und Kanalwand ($\varnothing \geq 55$ grd bzw. $x \leq 45$ mm). In diesen Bereichen ist die kinetische Energie der Turbulenz relativ unabhängig vom Wandabstand, wie auch das Höhenlinienbild zeigt (Abb.22).

Diese Bereiche zeigen die größten Gradienten der zeitlich gemittelten Strömungsgeschwindigkeit in Umfangsrichtung ($\partial u / \partial \varphi$) (s. Abb. 2 und 3). Der Abfall der kinetischen Energie der Turbulenz zur Linie der Maximalgeschwindigkeit ist überhaupt wesentlich schwächer als beim Kreisrohr und ist dort am stärksten ausgeprägt, wo der Kanalquerschnitt die größte Ausdehnung hat ($x \geq 70$ mm bzw. $\varphi = 15 - 35$ grad). Insgesamt gesehen ist die kinetische Energie im wandfernen Bereich deutlich höher als beim Kreisrohr.

Das Höhenlinienbild der kinetischen Energie der Turbulenz, das sich aus den Meßergebnissen mit manuellem Betrieb ergab, zeigt im wesentlichen die gleichen Verteilungen (Abb. 23), jedoch sind durch die neue Auswertemethode die Werte etwas höher beim automatischen Betrieb.

3.5 Schubspannungen und Korrelationskoeffizienten

3.5.1 Schubspannung senkrecht zur Wand

Die gemessenen turbulenten Schubspannungen senkrecht zu den Wänden sind in Abb. 24 und 25 dargestellt. In Wandnähe folgen die Werte recht gut einer linearen Schubspannungsverteilung. Die größten Abweichungen ergeben sich dort, wo die Koordinaten im wandfernen Bereich am stärksten von Orthogonalen zur Geschwindigkeitsverteilung abweichen. Besonders für $x = 15 - 60$ mm ergeben sich relativ hohe Werte für die Schubspannung senkrecht zur Kanalwand. Die Streuung der Meßwerte ist erheblich geringer als für die Untersuchung mit manuellem Betrieb (Abb. 26 und 27).

3.5.2 Schubspannung parallel zur Wand

Die gemessene Schubspannung zeigt in Wandnähe Werte, die gegen Null gehen. Im wandfernen Bereich steigt die azimutale Schubspannung mehr oder weniger stark an (Abb. 28 und 29). Es ergibt sich in vernünftiger Weise, daß das Vorzeichen der azimutalen Schubspannung praktisch nicht wechselt, denn der Gradient der mittleren axialen Geschwindigkeit in Umfangsrichtung geht nur für $\varnothing \approx 30$ grd bzw. $x = 79.8$ mm gegen Null. Die Gradienten der mittleren axialen Strömungsgeschwindigkeit in Umfangsrichtung sind klein für $\varnothing = 80 - 90$ grd und $x \leq 10$ mm. Trotzdem ist die azimutale Schubspannung im Bereich $\varnothing \geq 80$ grd bzw. $x \leq 10$ mm relativ groß. Dies ist auf den zyklischen zeitlich periodischen Impulstransport zwischen den Unterkanälen zurückzuführen, der in engen Spalten auftritt /5/. Für $x = 70 - 79.8$ mm ist der Gradient der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in Umfangsrichtung ebenfalls klein (Symmetrielinie). Hier geht die azimutale Schubspannung gegen Null.

Die größten Gradienten der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in Umfangsrichtung treten auf für $\varnothing = 50 - 80$ grd bzw. $x = 20 - 55$ mm. Hier ergeben sich ebenfalls hohe azimutale Schubspannungen, die Maximalwerte für $\varnothing = 70-75$ grd und $x = 20-25$ mm erreichen.

Im Gebiet zwischen den Stäben $\varnothing = 20 - 40$ grd sind die Gradienten der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in Umfangsrichtung ebenfalls sehr klein, und sie ändern sich kaum. Die Schubspannungen parallel zur Wand sind ebenfalls klein. Dagegen ist die azimutale Schubspannung für $\varnothing = 0-5$ grd relativ hoch, verursacht durch den starken Impulstransport aus dem benachbarten Wandkanal mit $W/D = 1.222$.

Die Höhenliniendarstellung der azimutalen Schubspannung (Abb. 30) verdeutlicht die Meßwerte. Es ergeben sich die Maximalwerte der azimutalen Schubspannung in den Gebieten des maximalen Gradienten der Strömungsgeschwindigkeit in Umfangsrichtung. Die Meßwerte sind kleiner als bei der Untersuchung mit manuellem Betrieb, die nach der Kjellström-Methode ausgewertet wurden (Abb. 31). Dabei sind die Ergebnisse

im wandfernen Bereich etwas zu hoch, wie aus den ermittelten Korrelationskoeffizienten R_{uw} (s. 3.5.5) deutlich wird. Dies wird vor allem auf zwei Ursachen zurückgeführt: Einerseits spielt die schon erwähnte nicht orthogonale Richtung der Koordinaten in diesem Bereich sicherlich eine Rolle, andererseits wird sich hier vermutlich die Vernachlässigung der Korrelation $v'w'$ bei der Lösung des Gleichungssystems auswirken. Insgesamt verlaufen die gemessenen Werte ähnlich zu früheren Ergebnissen.

3.5.3 Transverse Schubspannung

Die transverse Schubspannung ist sehr klein, wie die Abb. 32 und 33 zeigen. Die Werte sind mit einem relativ großen Fehler behaftet und zeigen keine eindeutige Tendenz.

3.5.4 Korrelationskoeffizient R_{uv}

Die gemessenen Korrelationskoeffizienten der Schubspannung in Richtung senkrecht zur Wand (Abb. 34 und 35)

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

zeigen für große Gebiete einen ähnlichen Verlauf wie bei Kreisrohren. Über einem großen Bereich des Strömungsquerschnitts liegt dieser Korrelationskoeffizient bei etwa 0.4-0.5. Im wandfernen Bereich liegen die Korrelationskoeffizienten z. T. höher als beim Kreisrohr, was auf die gewählten Koordinaten zurückgeführt werden muß, wodurch die gemessene Position der Nullschubspannung relativ weit vom Ort der Maximalgeschwindigkeit entfernt liegt. Für $\varnothing = 50-80$ grad sind einige Werte des Korrelationskoeffizienten relativ hoch, vermutlich durch Meßfehler. Bei den Untersuchungen mit manuellem Betrieb (Kjellström-Methode) (Abb. 36 und 37) treten für r/\varnothing derartige Abweichungen nicht auf, jedoch ist die Streuung der Korrelationskoeffizienten wesentlich größer.

3.5.5 Korrelationskoeffizient R_{uw}

Die ermittelten Korrelationskoeffizienten der Schubspannung parallel zu den Wänden (Abb. 38 und 39)

$$R_{uw} = \frac{\overline{-u'w'}}{\sqrt{u'^2} \cdot \sqrt{w'^2}} \quad (10)$$

zeigen praktisch den gleichen Verlauf wie die Schubspannung parallel zu den Wänden. Alle Werte sind kleiner als 0.65, wie auch das Höhenlinienbild deutlich zeigt (Abb. 40). Dagegen steigen die Werte nach der Kjellström-Methode im wandfernen Bereich sehr stark an. Dieses Verhalten ist vermutlich auf die Vernachlässigung der Schubspannung $\overline{v'w'}$ zurückzuführen, sowie auf die nicht-orthogonalen Koordinaten. Korrelationskoeffizienten größer als 1, die physikalisch nicht sinnvoll sind, ergeben sich für den wandfernen Bereich im engen Spalt ($\varnothing = 60 - 85$ grd und $x \leq 35$ mm), wie das Höhenlinienbild deutlich zeigt (Abb. 41).

3.6 Differenz der Turbulenzintensitäten parallel und normal zur Wand

Die Differenz zwischen den Turbulenzintensitäten parallel und normal zur Wand wird als Maß für die die Sekundärströmungen treibende Kraft angesehen. Abb. 42 und 43 zeigen die ermittelten Werte. Ein Verhalten ähnlich wie bei Kreisrohren zeigt sich nur für $\varnothing < 45$ grd. bzw. $x > 55$ mm. Dagegen ergeben sich im Spalt zwischen Stab und Kanalwand sehr hohe Werte, die mit wachsendem Wandabstand ansteigen. Der Grund hierfür liegt im Impulstransport zwischen den Wandkanälen im engen Spalt. Dabei stieg $\overline{w'^2}$ stark an, während $\overline{v'^2}$ diesen Anstieg nicht zeigt, im Gegenteil eher kleiner wird. Abb. 44 zeigt die Höhenliniendarstellung. Dabei sind die Werte auf die Wandschubspannung bei $\varnothing = 0$ grd bezogen.

Die Werte fallen vom Spalt zwischen den Stäben stetig in Richtung auf das Gebiet größten Wandabstandes ($\phi \approx 35$ grad bzw. $x = 79.8$ mm) ab. Außerdem fallen die Werte normalerweise mit steigendem Wandabstand. In dem engen Spalt zwischen Stab und Kanalwand kehrt sich diese Tendenz durch den Impulstransport zwischen benachbarten Kanälen um, der sich im wandfernen Bereich stärker auswirkt. Die Höhenliniendarstellung der Ergebnisse bei manuellem Betrieb sieht sehr ähnlich aus (Abb. 45).

3.7 Wirbelviskositäten

Aus den Daten für die turbulenten Schubspannungen und aus der Verteilung des zeitlichen Mittelwerts der Strömungsgeschwindigkeit in Richtung senkrecht (ϵ_r bzw. ϵ_y) und parallel (ϵ_ϕ und ϵ_x) zur Wand gemäß den Definitionsgleichungen ermittelt. Dazu wurde das Rechenprogramm EPSI /12/ verwendet, in dem die zur Berechnung erforderlichen Geschwindigkeitsgradienten berechnet werden. Es wird durch jeweils drei Meßwerte für die mittlere Geschwindigkeit eine Parabel 2. Ordnung gelegt und die Ableitung am betrachteten Ort ermittelt. Dabei werden Geschwindigkeits- und Schubspannungsverteilungen verwendet, wie sie gemessen wurden, es wird also keinerlei Glättung der Meßdaten vorgenommen.

3.7.1 Wirbelviskosität senkrecht zur Wand

Die Wirbelviskosität senkrecht zur Wand ergibt sich in dimensionsloser Form zu:

$$\epsilon_r^+ = \frac{\epsilon_r}{Lu^*} = \frac{\overline{-\rho u'v'}/\tau_w}{\frac{\partial (u/u_{REF})}{\partial (r/L)}} \frac{u^*}{u_{REF}} \quad (11)$$

Hierin ist $u^* = \sqrt{\tau_w/\rho}$ die Wandschubspannungsgeschwindigkeit an der betrachteten Umfangsposition und L ist die Länge des Geschwindigkeitsprofils zwischen der Wand und dem Ort größten Wandabstandes. Die ermittelten Wirbelviskositäten sind in Abb. 46 und 47 dargestellt. Zum Vergleich wurde der Verlauf der Wirbelviskosität im Kreisrohr nach Reichardt /17/ miteingetragen. Die gemessenen Wirbelviskositäten sind durchweg höher als beim Kreisrohr. Im wandfernen Bereich wirken sich dabei die wegen der gewählten Koordinaten relativ zu hoch gemessenen Schubspannungen aus. Die größere Streuung wird dort natürlich auch durch die z. T. kleinen Geschwindigkeitsgradienten bewirkt. Die neuen Daten stimmen mit Ergebnissen in Unterkanälen anderer Geometrie /4/ sowohl qualitativ als auch quantitativ gut überein. Auch die Höhenliniendarstellung (Abb. 48) zeigt eine relativ gleichmäßige Verteilung der Wirbelviskositäten senkrecht zur Wand.

3.7.2 Wirbelviskosität parallel zur Wand

Die Wirbelviskosität parallel zur Wand ergibt sich in dimensionsloser Form zu:

$$\epsilon_r^+ = \frac{\epsilon_r}{Lu^*} = \frac{-\overline{\rho u'w'}/\tau_w}{\frac{r}{L} \frac{\partial (u/u_{REF})}{\partial \phi}} \cdot \frac{u^*}{u_{REF}} \quad (12)$$

Wie bei den früheren Messungen /4/ unterscheiden sich die Ergebnisse für die Wirbelviskosität parallel zur Wand ganz erheblich von denen senkrecht zur Wand. Die ermittelten Werte sind in Abb. 49 und 50 dargestellt. Die Wirbelviskositäten parallel zur Wand sind sehr stark ortsabhängig und zwar sowohl in zur Wand senkrechter Richtung als auch besonders in Umfangsrichtung. So ergeben

sich Maximalwerte der Wirbelviskosität parallel zur Wand nahe dem engsten Querschnitt zwischen Stab und Wand ($\varnothing = 75 - 85$ grd bzw. $x = 5 - 15$ mm). In den Spalten selbst ($\varnothing = 0$ und 90 grd bzw. $x = 0$ mm) sind die Wirbelviskositäten nicht definiert, da der Geschwindigkeitsgradient in Umfangsrichtung gegen Null geht. Das gleiche gilt für die Symmetrielinie bei $x = 79.8$ mm.

Betrachtet man den Verlauf der Wirbelviskosität parallel zur Wand im Strömungsbereich um den Stab, so erkennt man, daß die Wirbelviskositäten zunächst vom Wert $\varepsilon_{\varnothing}^+ \approx 1,5$ (etwa um den Faktor 3) bis $\varnothing = 30$ grd. Im Bereich $\varnothing = 30 - 45$ grd verschwindet der Geschwindigkeitsgradient in Umfangsrichtung. Hier ist die Wirbelviskosität nicht definiert.

Anschließend steigen die Wirbelviskositäten wieder an zu einem Höchstwert nahe dem Spalt zwischen Stab und Wand. ($\varepsilon_{\varnothing}^+ \approx 7$ für $\varnothing = 85$ grd, hervorgerufen durch den Impulstransport zwischen den benachbarten Kanälen. Entsprechend fallen die Werte entlang der Kanalwand vom Höchstwert $\varepsilon_{\varnothing}^+ = 9$ im Spalt zwischen Stab und Wand stetig ab auf Werte, die vergleichbar mit Kreisrohrdaten sind, für $x > 70$ mm.

Zum Verlauf in radialer Richtung läßt sich generell sagen, daß die Wirbelviskositäten mit größerer Entfernung von der Wand zunächst leicht ansteigen, dann jedoch wieder leicht abfallen, nachdem ein Maximalwert durchlaufen wurde.

Abb. 51 zeigt eine Höhenliniendarstellung der Meßwerte. Die Meßwerte ergeben ein recht einheitliches Bild, abgesehen von den Gebieten, wo der Gradient der Geschwindigkeit in Umfangsrichtung gegen Null geht. Dies ist besonders auffällig um $\varnothing = 35$ grd.

4. Vergleich der Meßergebnisse mit Berechnungen mit VELASCO

Mit dem Rechenprogramm VELASCO /1/ wurden die Geschwindigkeits- und Wandschubspannungsverteilungen im untersuchten Wandkanal ($P/D = 1.148$, $W/D = 1.074$) berechnet. In Abb. 52 sind die berechneten Wandschubspannungsverteilungen am Stab zusammen mit den Meßwerten dargestellt. Dabei wurden die Werte auf die mittlere Wandschubspannung bezogen.

Die Ergebnisse mit der Standard-Version von VELASCO ($\epsilon_{\phi}^+ = 0.154$, $C_{sec} = -0.573$) zeigen eine deutlich stärkere Variation der Wandschubspannung am Umfang des Stabes (durchgezogene Linie) als die Meßwerte. Dieses Ergebnis wurde auch bei früheren Vergleichen für kleinere Stababstandsverhältnisse beobachtet /4/. Insbesondere im engen Spalt zwischen Stab und Kanalwand sind die berechneten Wandschubspannungen an der Kanalwand (x/y) bei $x = 0$ mm 17 % niedriger und an der Stabwand (r/ϕ) bei $\phi = 90$ grd 18 % niedriger als die jeweiligen Meßwerte.

An der Stabwand zwischen den Stäben ($\phi \leq 20$ grd) werden die Wandschubspannungen durch den Impulstransport aus dem benachbarten Wandkanal ($W/D = 1.222$) deutlich angehoben. VELASCO unterschätzt den Impulstransport. Eine Anhebung der Wandschubspannung ist in der Rechnung nur für $\phi \leq 5$ grd zu erkennen. Die Abweichung zwischen Messung und Rechnung beträgt hier ca. 28 %, während bei $\phi = 45$ grd die Rechnungen eine Überschätzung der Wandschubspannung von etwa 12 % ergeben. Da sich die berechnete Geschwindigkeitsverteilung entsprechend den berechneten Wandschubspannungen ergibt, ist deutlich, daß VELASCO zur Ermittlung von Geschwindigkeits- und Wandschubspannungsverteilungen für Geometrien wie die vorliegende ungeeignet ist.

5. Schlußfolgerungen

Die Meßergebnisse mit einem asymmetrischen Stabbündel aus vier parallelen Stäben im Rechteckkanal zeigen, daß für den Fall eines Wandabstandsverhältnisses ($W/D = 1.074$) kleiner als das Stababstandsverhältnis ($P/D = 1.148$) der Impulsaustausch hochgradig anisotrop ist. Das gilt besonders für den engen Spalt zwischen den Stab und Kanalwand. Die zeitlichen Mittelwerte der Strömungsgeschwindigkeit lassen keine Einflüsse von Sekundärströmungen erkennen. Der Vergleich der Ergebnisse, die mit einer automatischen Anlage gewonnen wurden, mit denen bei manuellem Betrieb zeigt, daß durch die Automatisierung die Ergebnisse gleichmäßiger und genauer geworden sind. Außerdem wird die Genauigkeit erhöht durch die Auswertung der Meßdaten nach der Hooper Methode.

Die Vergleichsrechnungen mit VELASCO zeigen starke Abweichungen in der Wandschubspannungsverteilung im engen Spalt zwischen den Stäben (bis 28 %).

Der Autor dankt den Herren E. Mensinger und G. Wörner für ihre Mitarbeit bei der Vorbereitung und Durchführung der Versuche.

Nomenklatur:

a	m	Abstand
A	-	Geometrieparameter
C_{sec}	-	Sekundärströmungsamplitude in VELASCO
D	m	Stabdurchmesser
D_h	m	hydraulischer Durchmesser
G^*	-	Geometrieparameter
K	-	Geometrieparameter
\overline{k}^r	m^2s^{-2}	kinetische Energie der Turbulenz
L	m	Länge des Profils zwischen Wand und Maximalgeschwindigkeit
n	-	Anisotropiefaktor
P	m	Stababstand
r	m	Radius
R_{uv}	-	Korrelationskoeffizient uv
R_{uw}	-	Korrelationskoeffizient uw
Re	-	Reynolds-Zahl
\bar{u}	ms^{-1}	Geschwindigkeitskomponente in axialer Richtung
u'	ms^{-1}	Schwankungsgeschwindigkeit in axialer Richtung
u_{REF}	ms^{-1}	Referenzgeschwindigkeit
u_m	ms^{-1}	mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Kanal
u^*	ms^{-1}	Schubspannungsgeschwindigkeit
u^+	-	dimensionslose Geschwindigkeit
v'	ms^{-1}	Schwankungsgeschwindigkeit senkrecht zur Wand
w'	ms^{-1}	Schwankungsgeschwindigkeit parallel zur Wand
W	m	Wandabstand
x	m	Position entlang der Kanalwand
y	m	Abstand von der Wand
y^+	-	dimensionsloser Wandabstand
ϵ	m^2s^{-1}	Wirbelviskosität
ϵ^+	-	dimensionslose Wirbelviskosität
λ	-	Druckverlustbeiwert
\emptyset	grd	Umfangskoordinate

ρ	kg m^{-3}	Dichte
ν	m^2s^{-1}	kinematische Viskosität
τ_w	Nm^{-2}	Wandschubspannung
$\tau_{w\text{av}}$	Nm^{-2}	mittlere Wandschubspannung

Indizes

r	radial
\emptyset	in Umfangsrichtung

Literatur

- /1/ W. Eifler and R. Nijsing:
VELASCO Velocity field in asymmetric rod configurations
Report EUR-4550e (1973)
- /2/ W. Slagter:
Finite element analysis for turbulent flows of incompressible
fluids in fuel rod bundles
Nucl. Sci. Engng., Vol. 66, pp. 84 (1978)
- /3/ K. Rehme:
Turbulent momentum transport in rod bundles
Nucl. Engng. Design 62, (1 - 3), 137 - 146 (1980)
- /4/ K. Rehme
Experimental investigations of turbulent flow in gaps of
rod bundles
IHAR 2nd International Specialists Meeting on thermal-hydrau-
lics in LMFBR rod bundles, Rome (1982)
- /5/ J. D. Hooper, K. Rehme
Large-scale structural effects in developed turbulent flow through
closely-spaced rod arrays
J.Fluid Mech. 145, 305-337 (1984).
- /6/ K. Rehme
Turbulente Strömung in einem Wandkanal eines Stabbündels
KfK-Bericht 2617 (1978)
- /7/ K. Maubach:
Reibungsgesetze turbulenter Strömungen
Chemie-Ing.-Technik 42 (15), 995 - 1004 (1970)

- /8/ K. Rehme
Simple method of predicting friction factors of turbulent
flow in noncircular channels
Int. J. Heat Mass Transfer 16, 993 - 950 (1973)
- /9/ K. Rehme
Laminarströmung in Stabbündeln
Chemie-Ing.-Technik 43, (17), 962 - 966 (1971)
- /10/ J. Nikuradse
Gesetzmäßigkeiten der turbulenten Strömung in glatten
Rohren
VDI Forsch. Heft No. 356 (1932)
- /11/ U. Schumann
- PLOTHL - Ein Fortran IV Unterprogramm zur Darstellung
von Funktionen von zwei unabhängigen Variablen durch ihre
Höhenlinien auf einem Plotter
KfK-Bericht 1486 (1971)
- /12/ Ch. Hausmann und M. Mangelmann
persönliche Mitteilung (1972)
- /13/ J. D. Hooper
Fully developed turbulent flow through a rod cluster,
Ph. D. Thesis, New South Wales Univ., Kensington, Australia
November 1980.
- /14/ L. Vosáhlo
Computer programs for evaluation of turbulence characteristics
from hot-wire measurements,
KfK-Bericht Nr. 3743 (1984)

/15/ K. Rehme

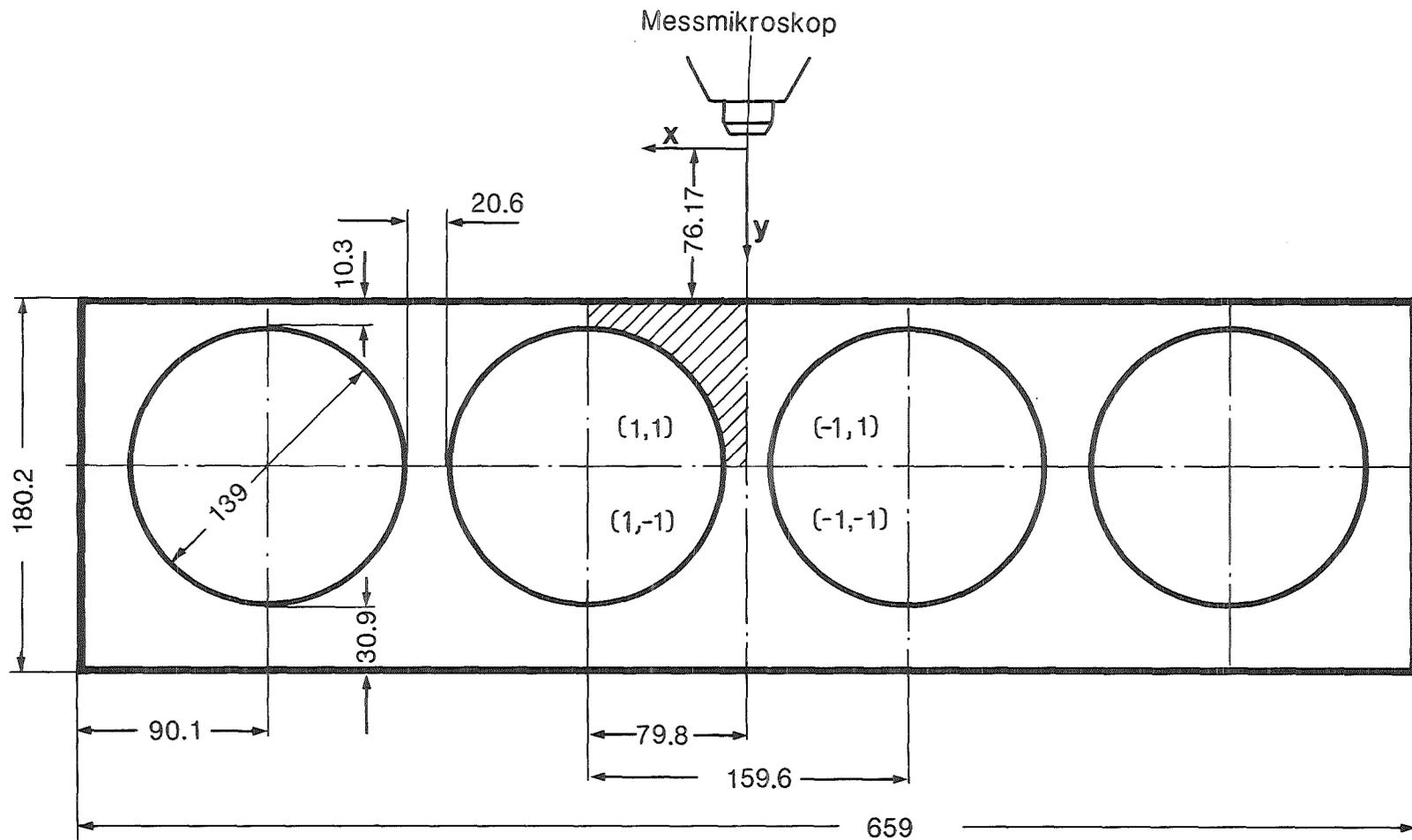
Vergleich von Ergebnissen verschiedener Hitzdraht-Meßverfahren
KfK-Bericht Nr. 3813 (1984)

/16/ B. Kjellström

Studies of turbulent flow parallel to a rod bundle of triangular
array
Report AE-487, Studsvik, Schweden (1984)

/17/ H. Reichardt

Vollständige Darstellung der turbulenten Geschwindigkeits-
verteilung in glatten Leitungen
Z angew. Math. Mech. 31, 208 - 219 (1951)



P/D= 1.148

W/D= 1.074 (eng)

W/D= 1.222 (weit)

(ix,iy) Kennzeichnung der auszumessenden Quadranten



Abb. 1 Kanalquerschnitt

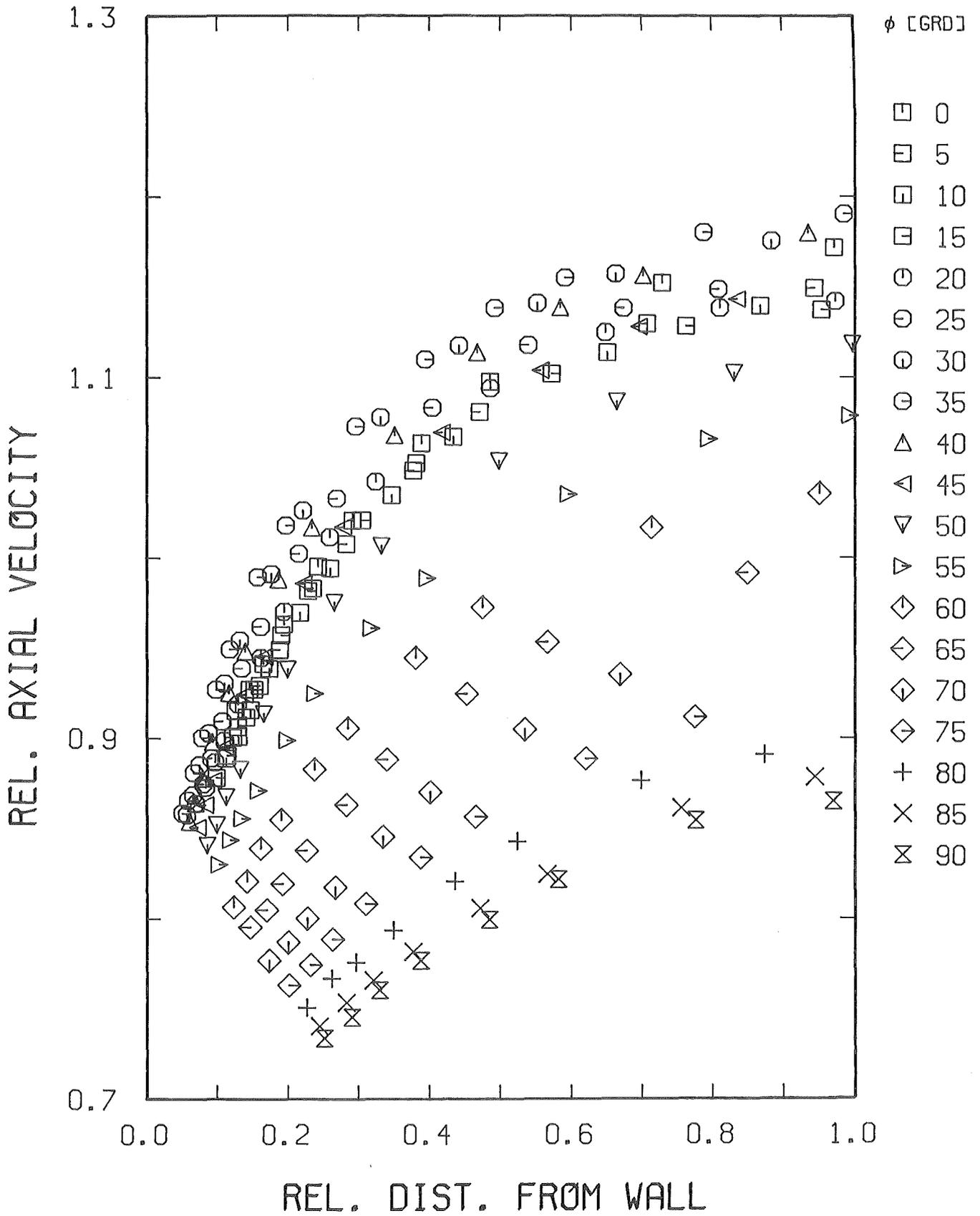


Abb. 2 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit (r/ϕ)

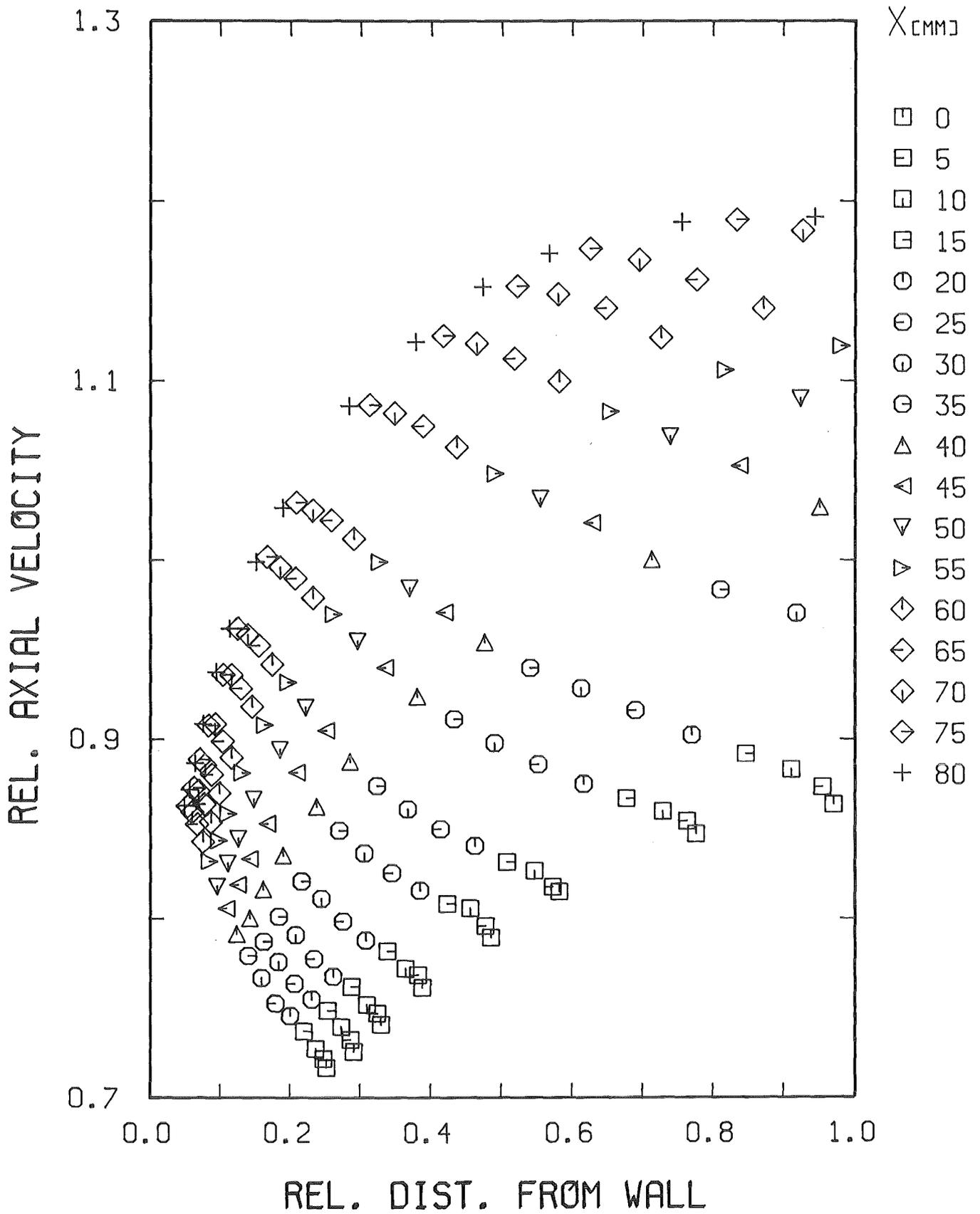
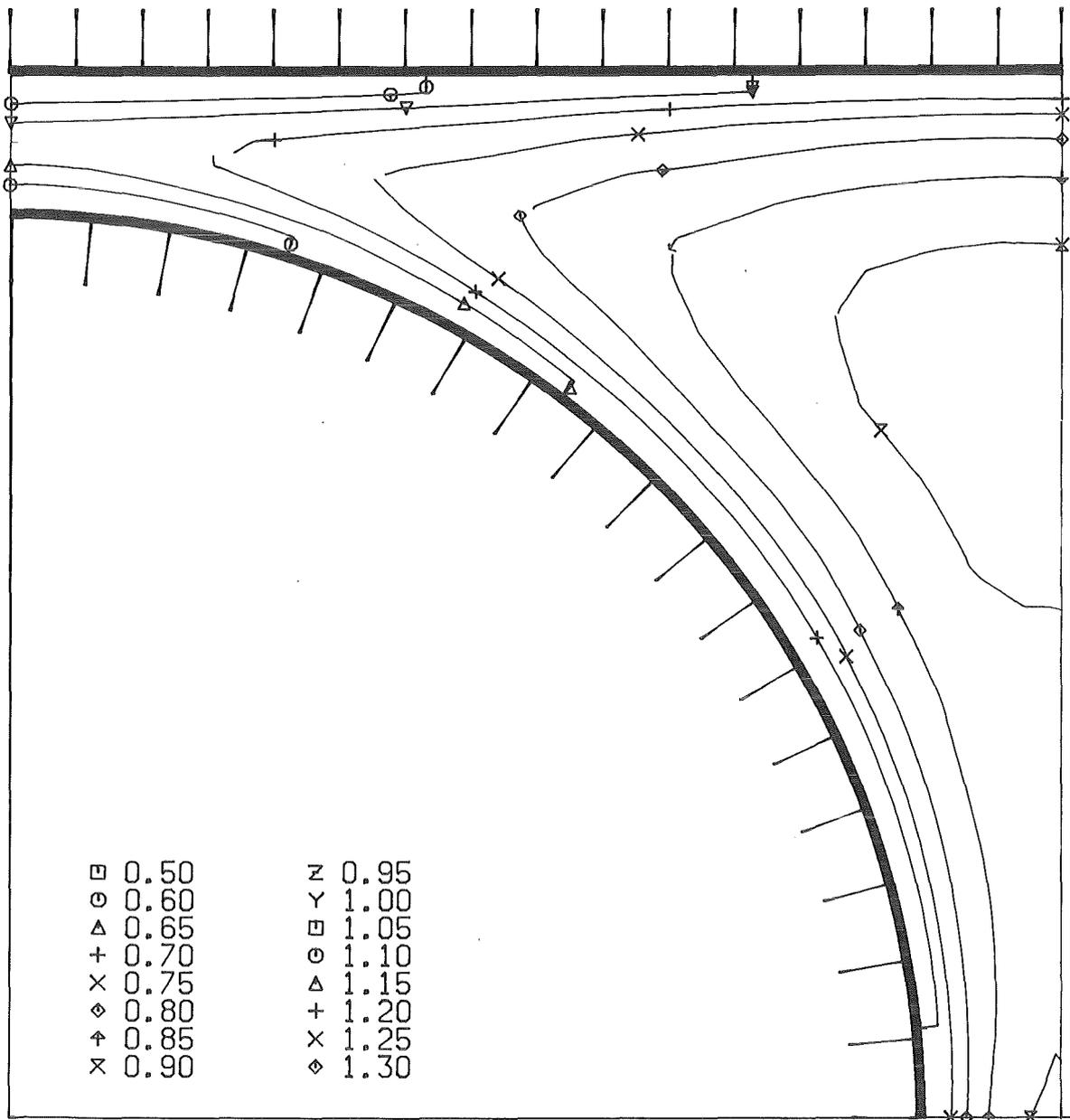


Abb. 3 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit (x/y)



KfK

Abb. 4 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit
(Höhenlinien)

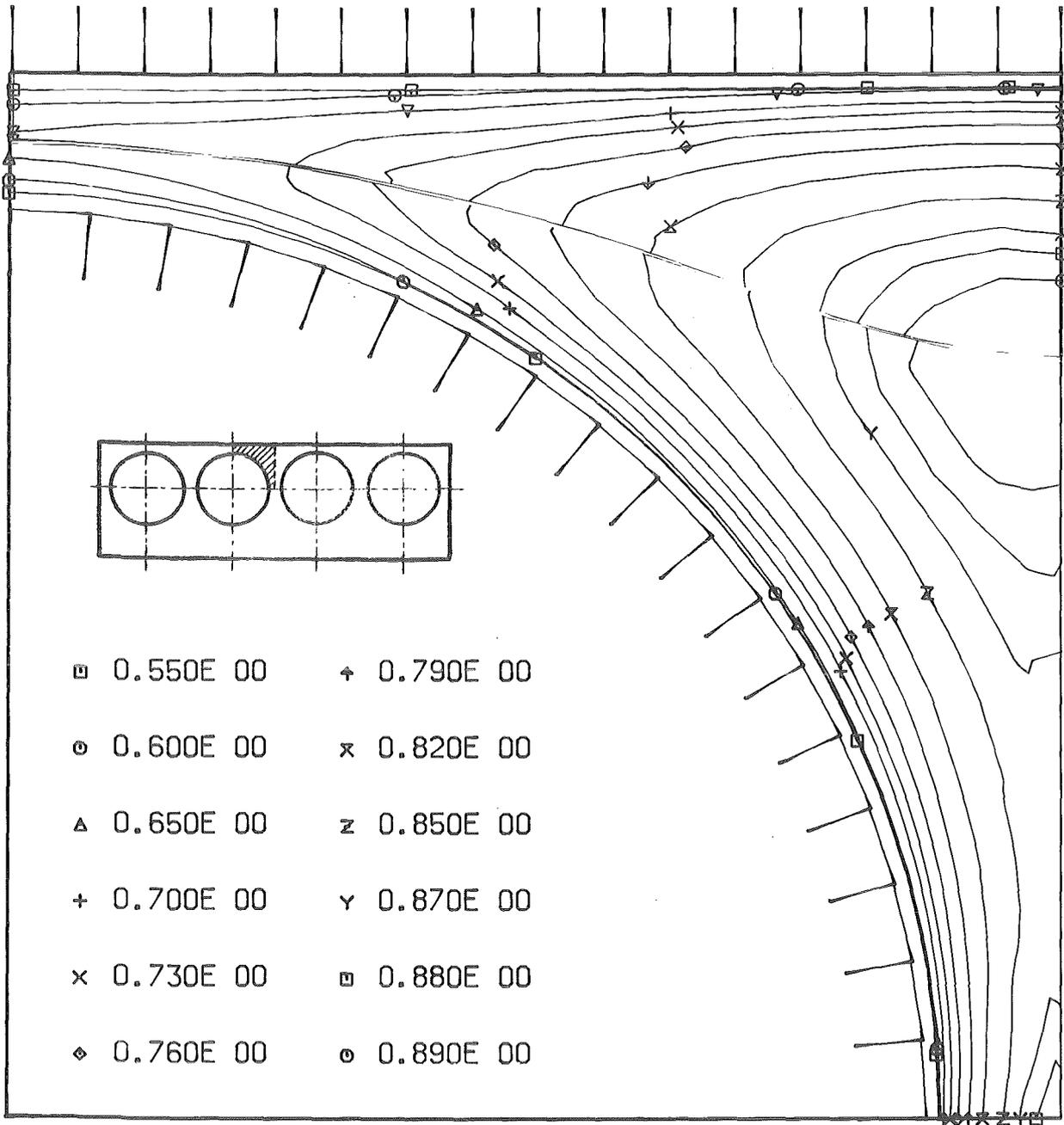


Abb. 5 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit (Höhenlinien) (manuell)

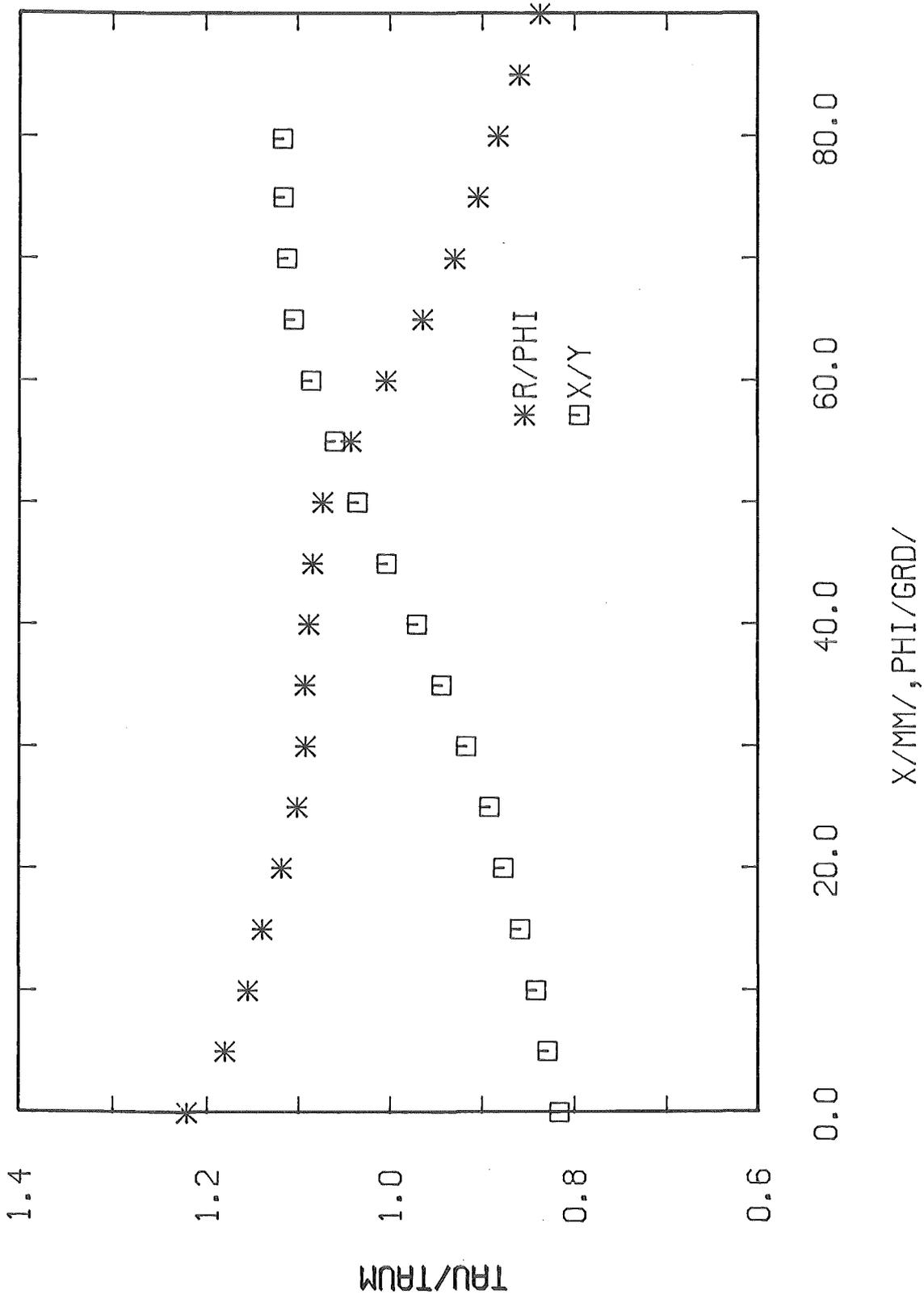


Abb. 6 Wandschubspannungsverteilungen

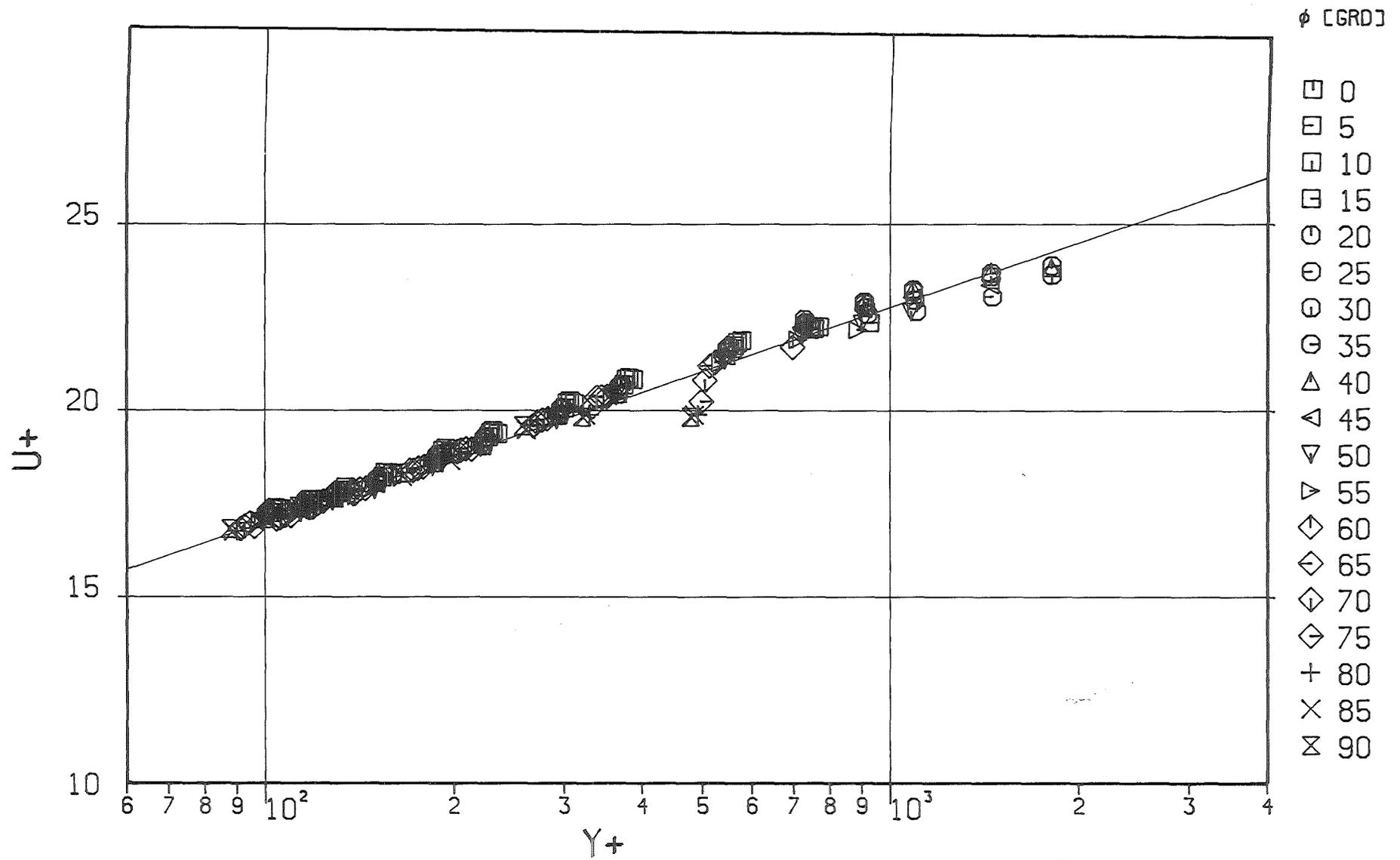


Abb. 7 Dimensionsloses Geschwindigkeitsprofil (r/ϕ)

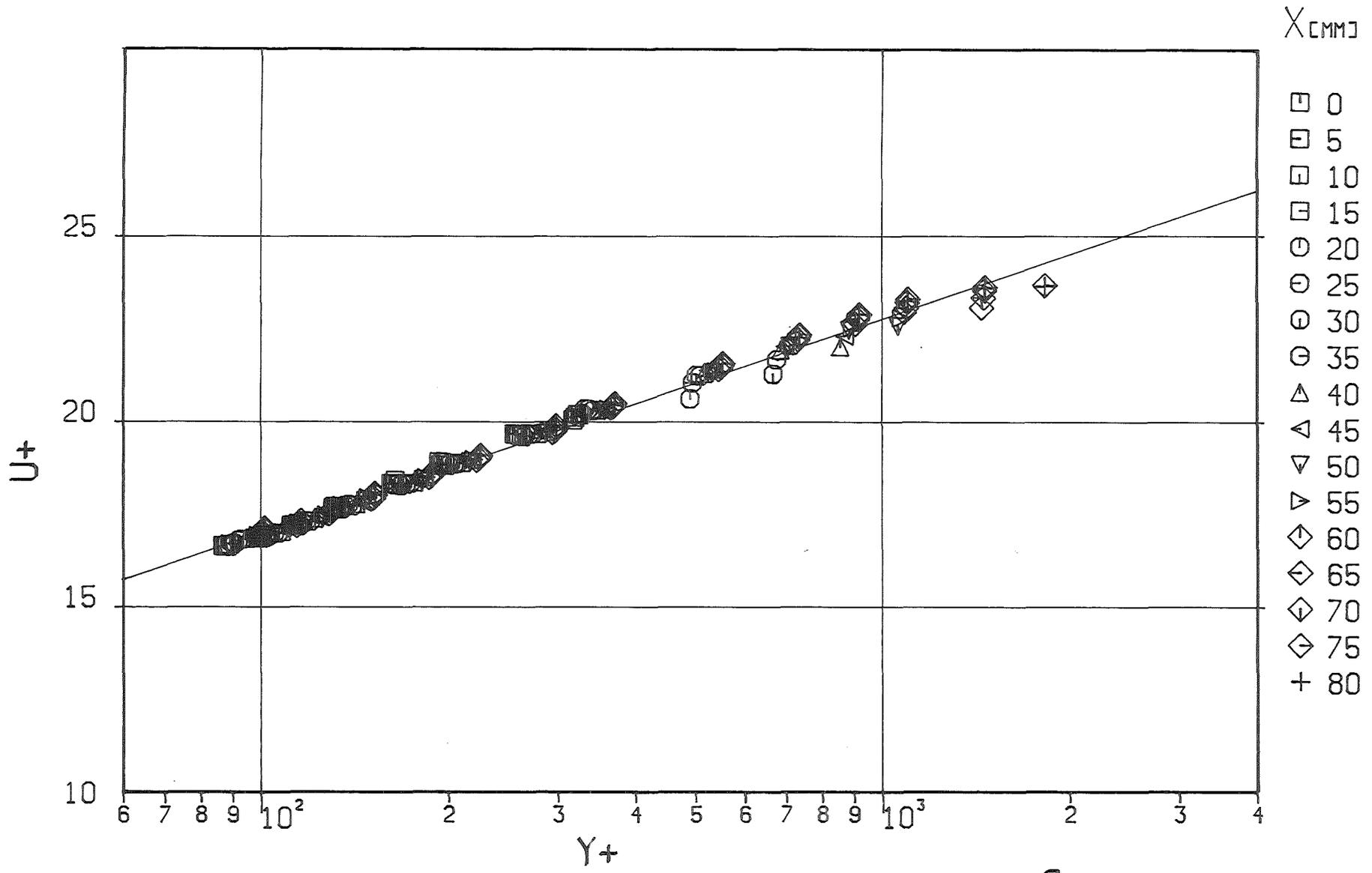


Abb. 8 Dimensionsloses Geschwindigkeitsprofil (x/y)

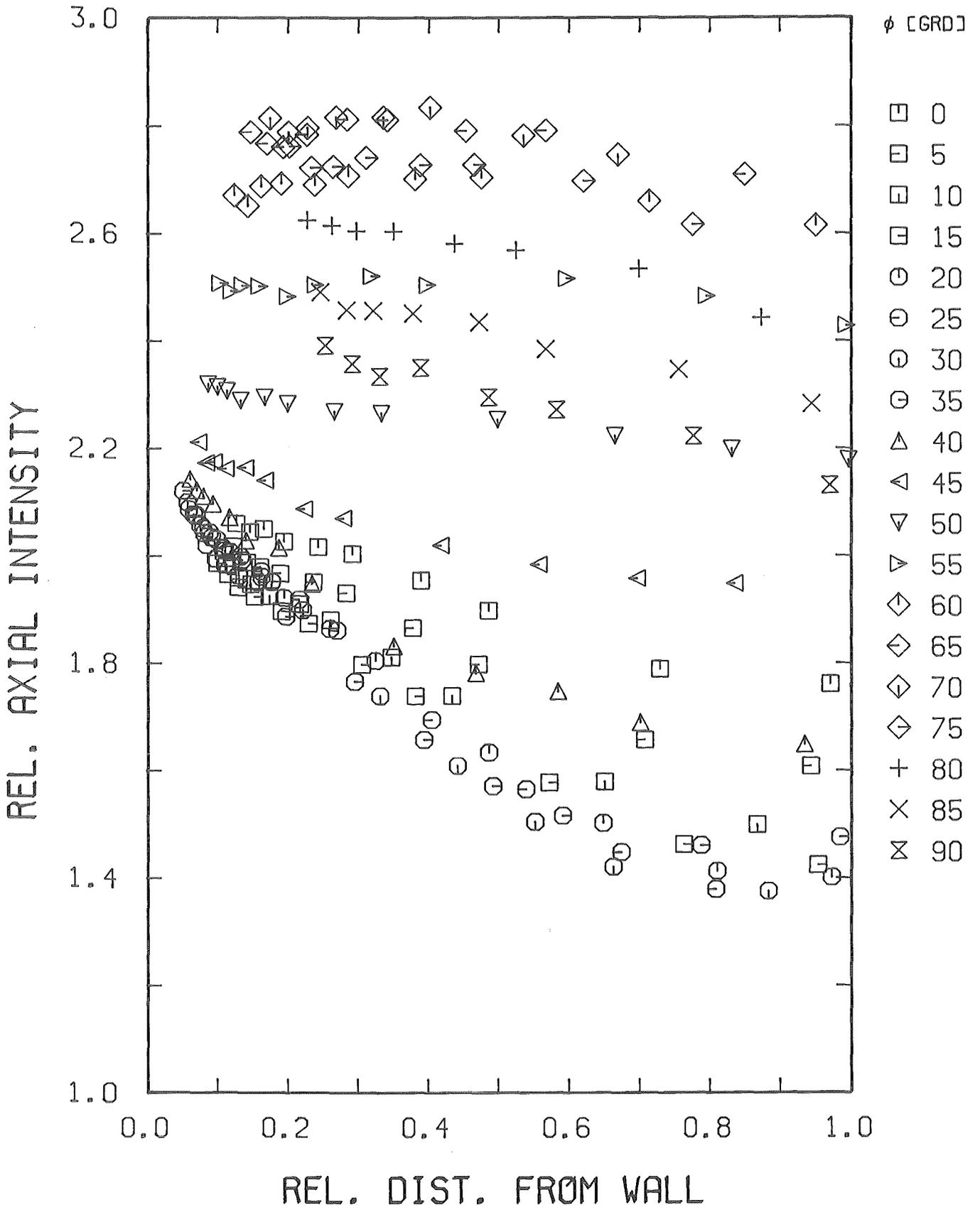


Abb. 9 Axiale Turbulenzintensität (r/ϕ)

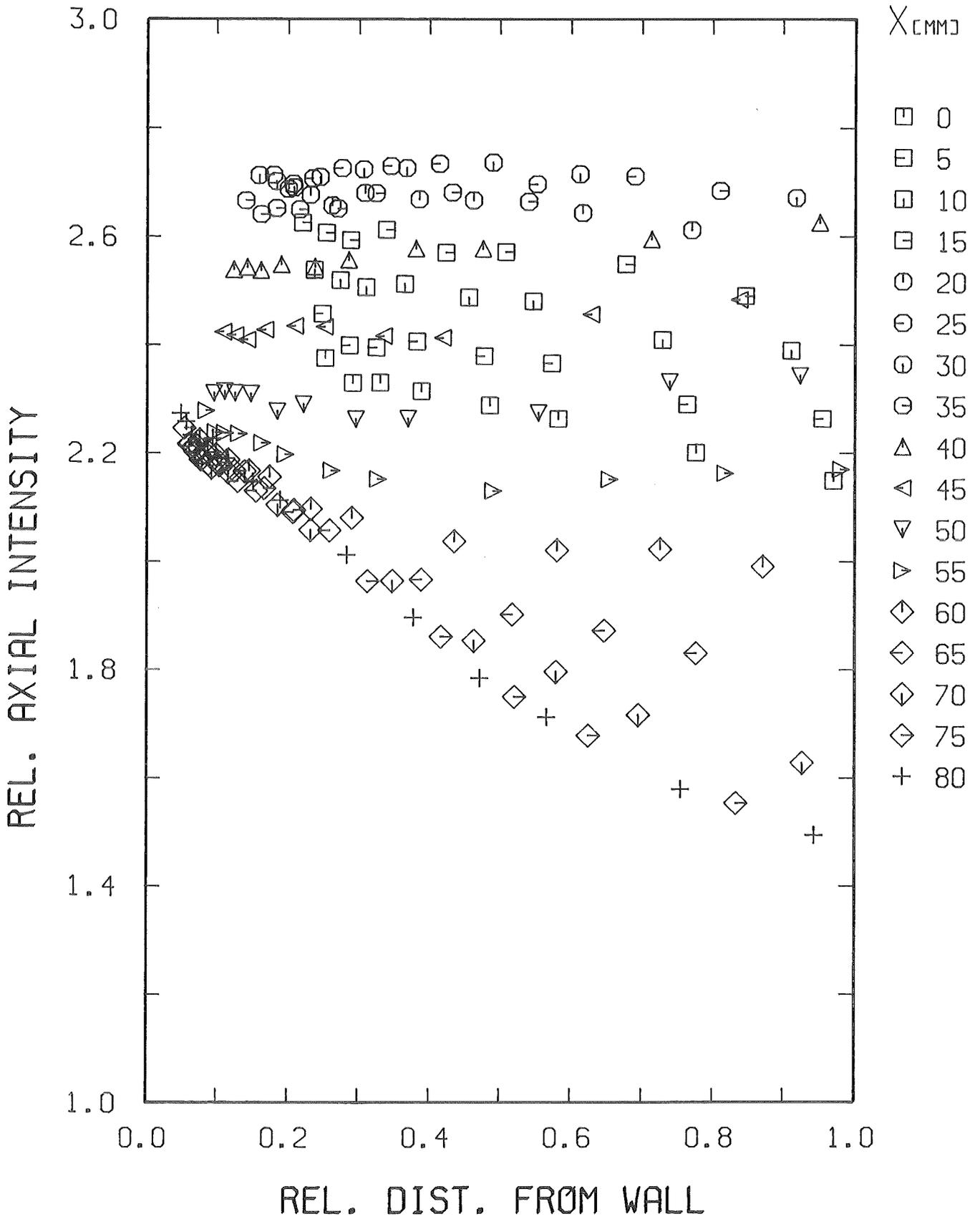


Abb.10 Axiale Turbulenzintensität (x/y)

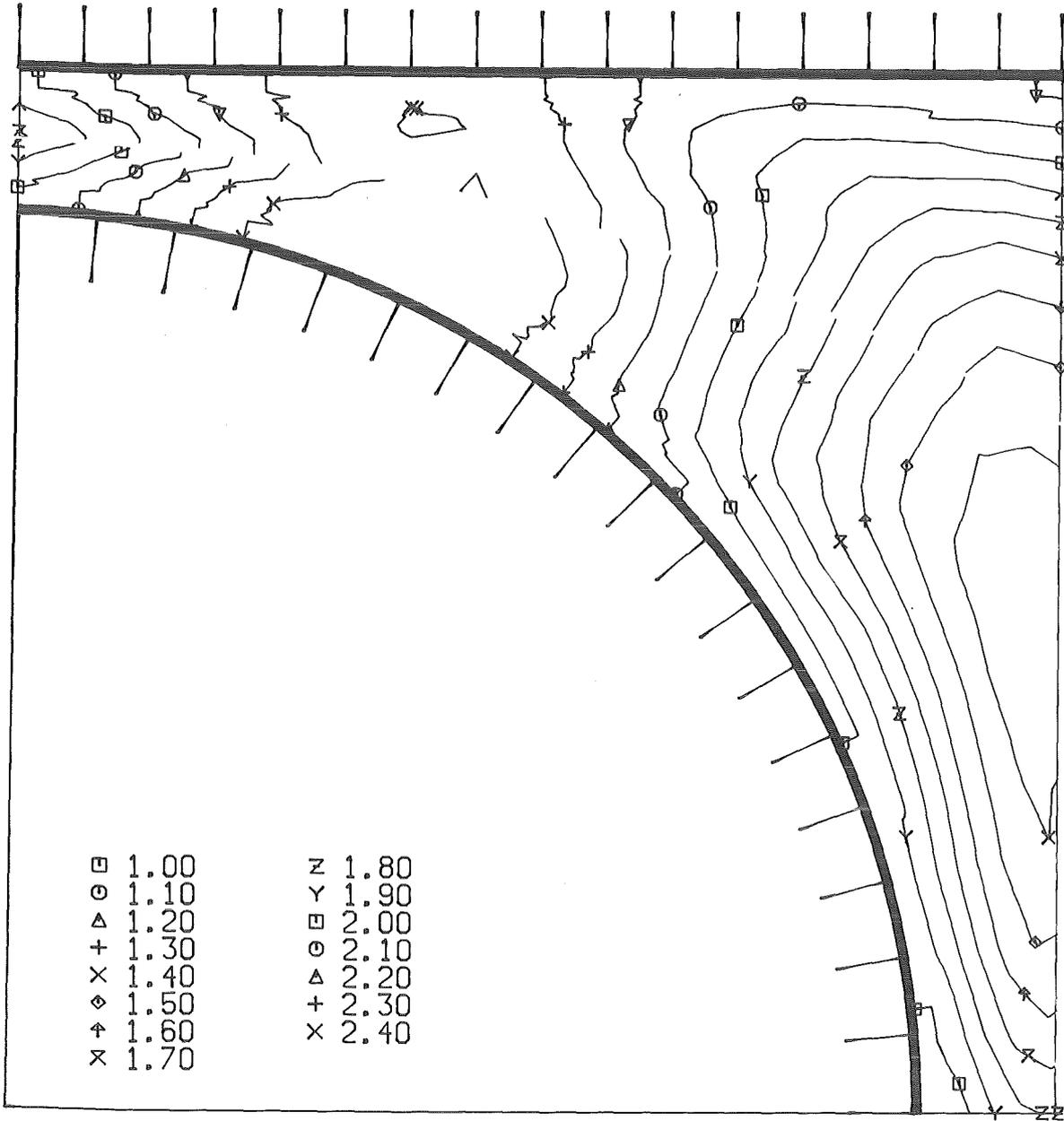


Abb.11 Axiale Turbulenzintensität (Höhenlinien)

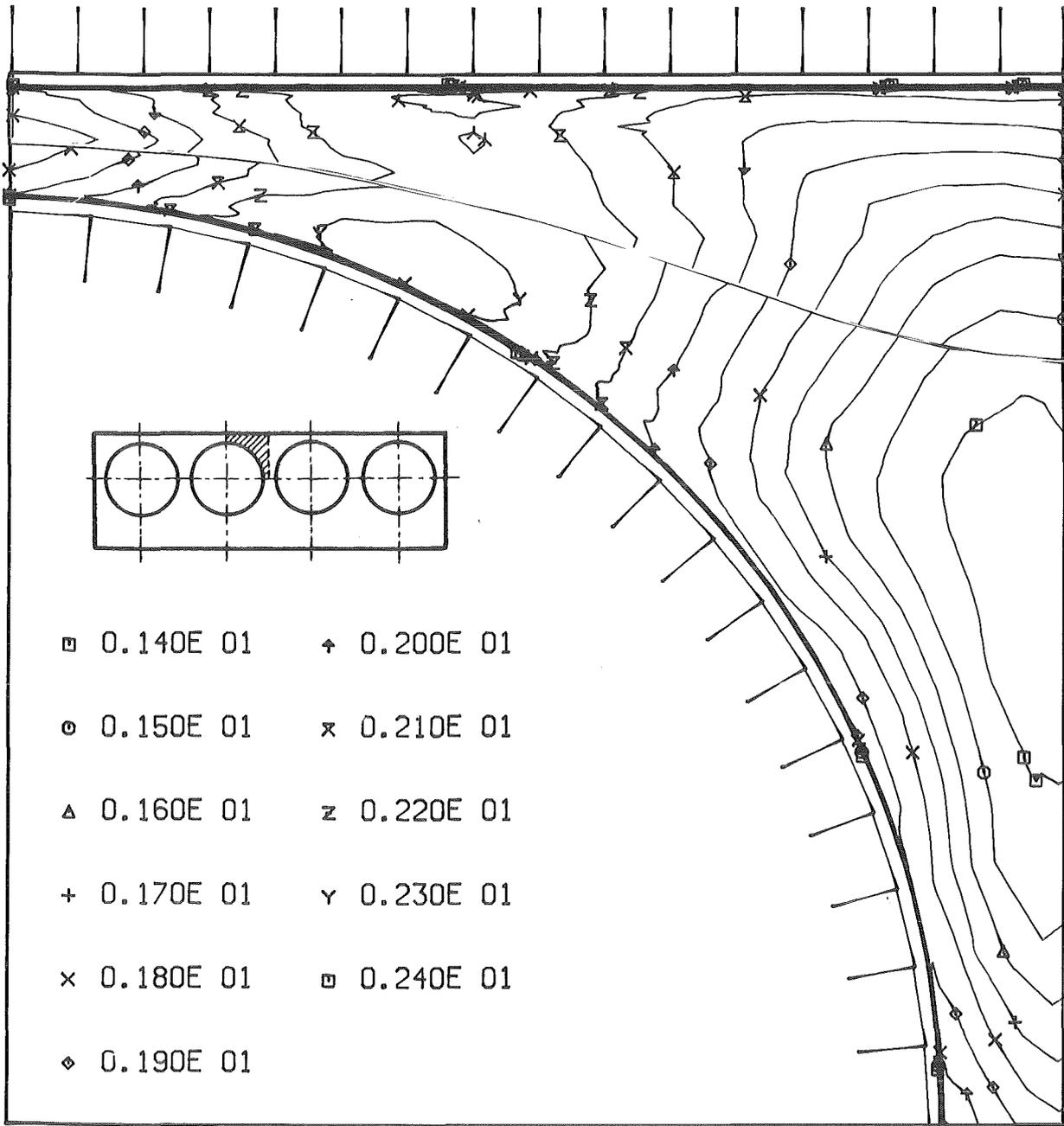


Abb.12 Axiale Turbulenzintensität (Höhenlinien) (manuell)

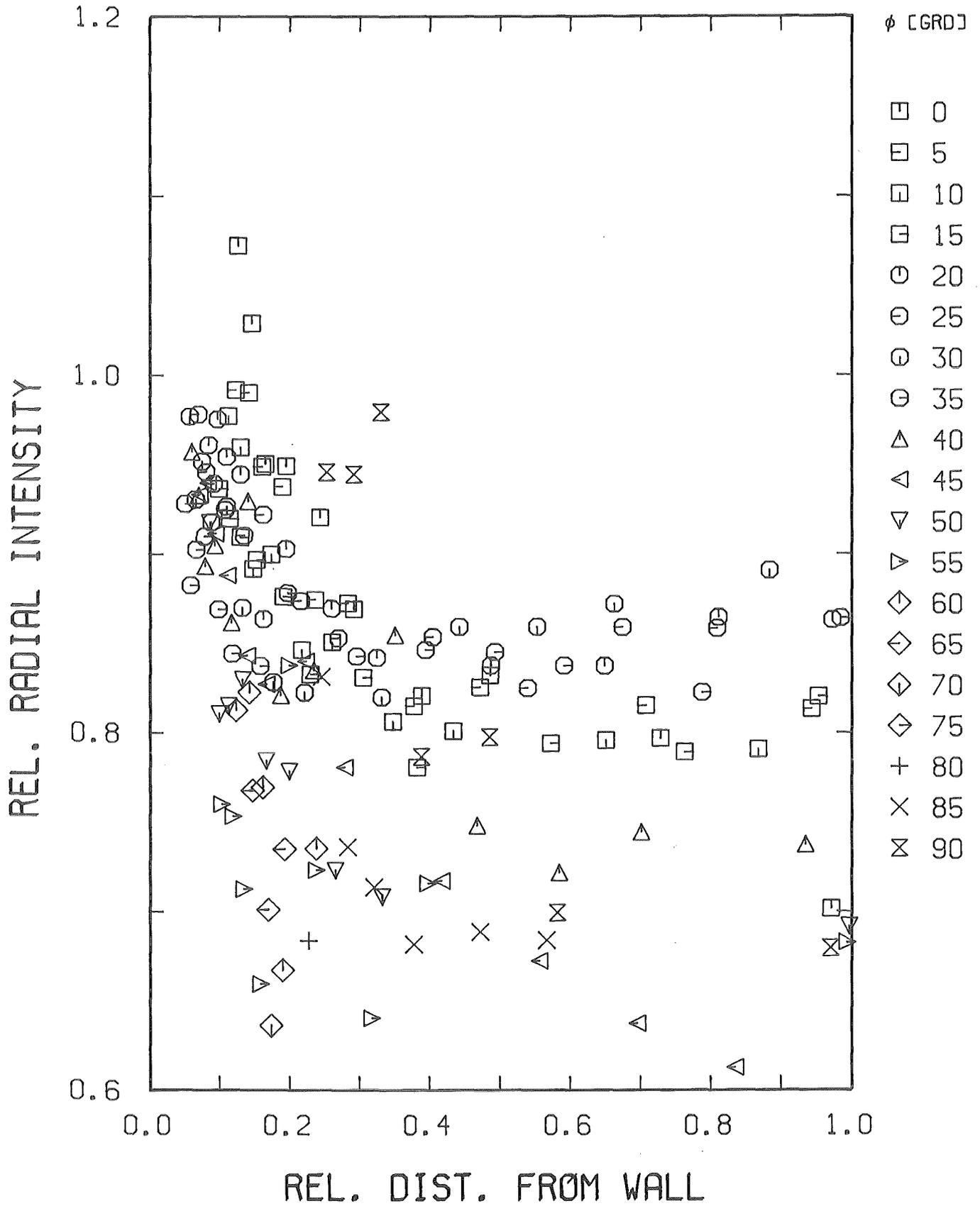


Abb.13 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand (r/ϕ)

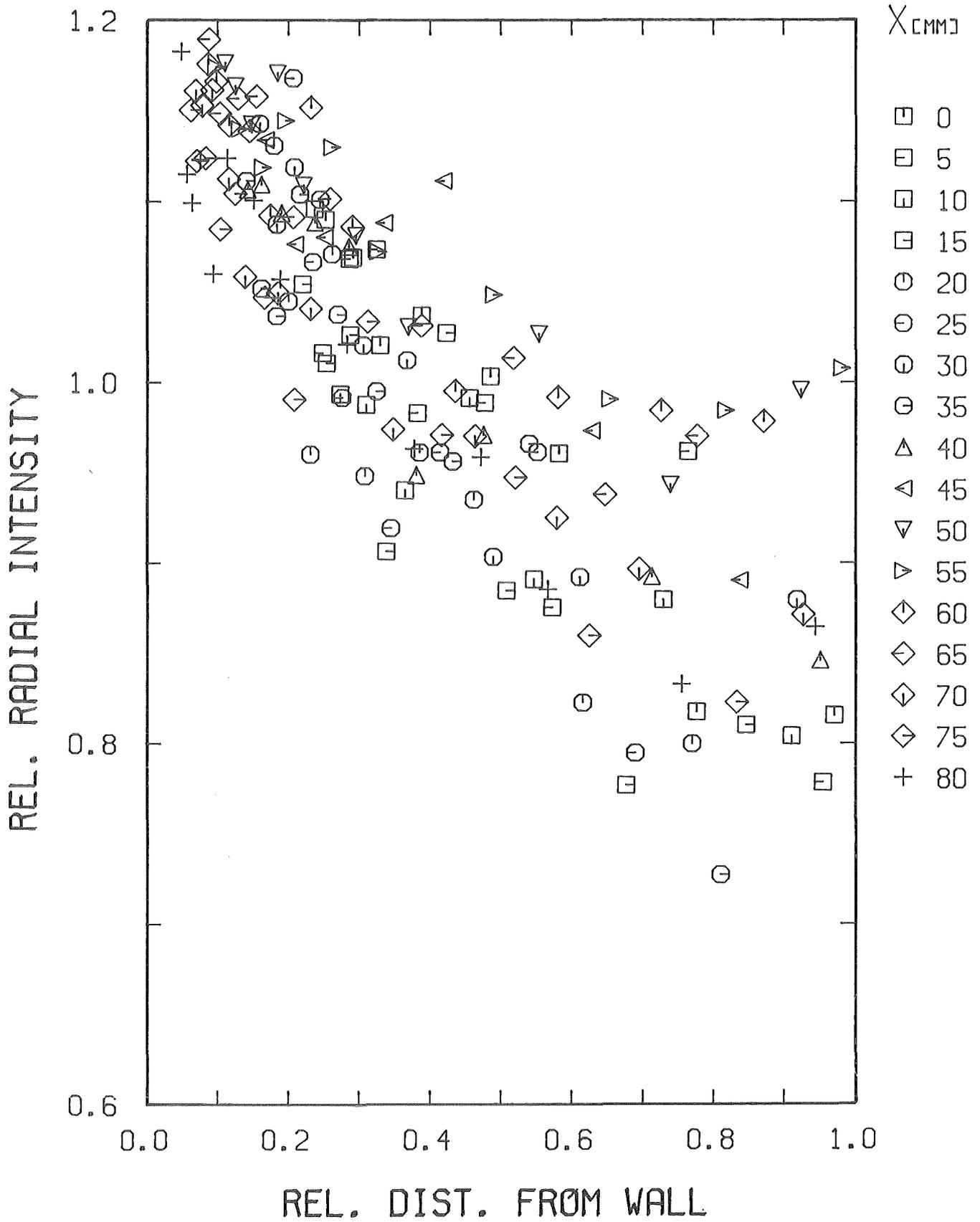
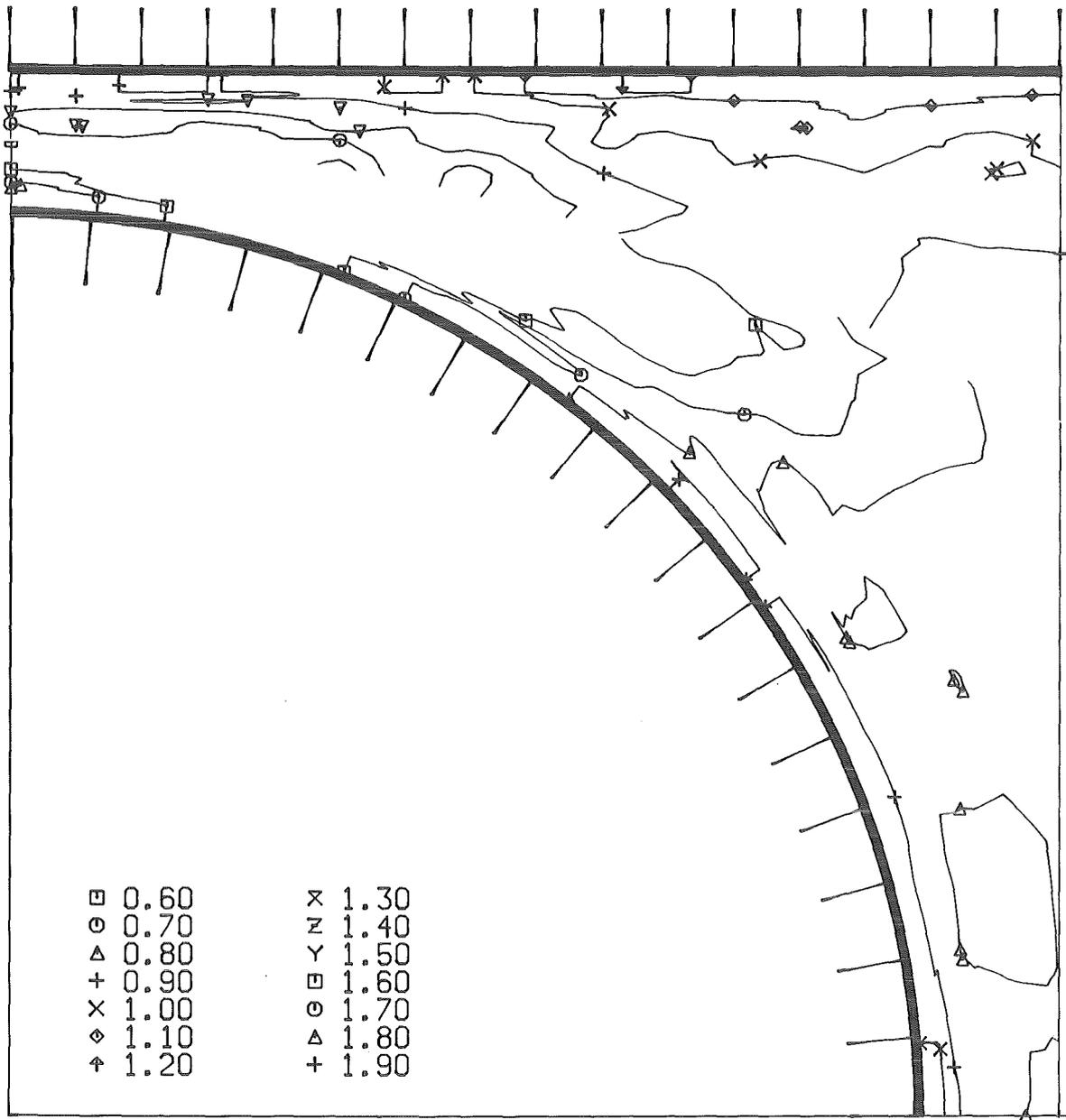


Abb.14 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand (x/y)



KfK

Abb.15 Turbulenzintensität senkrecht zur Wand (Höhenlinien)

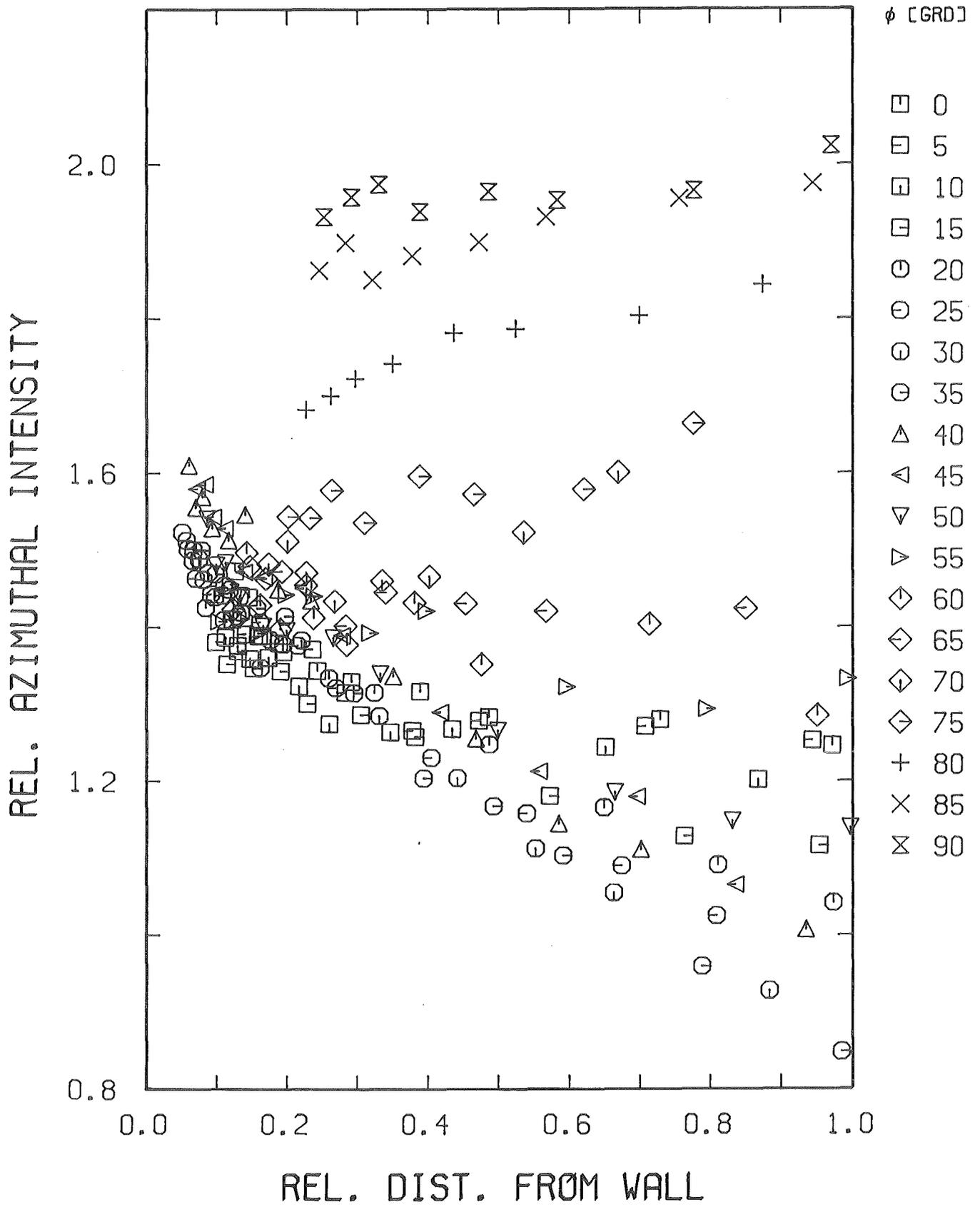


Abb.16 Turbulenzintensität parallel zur Wand (r/ϕ)

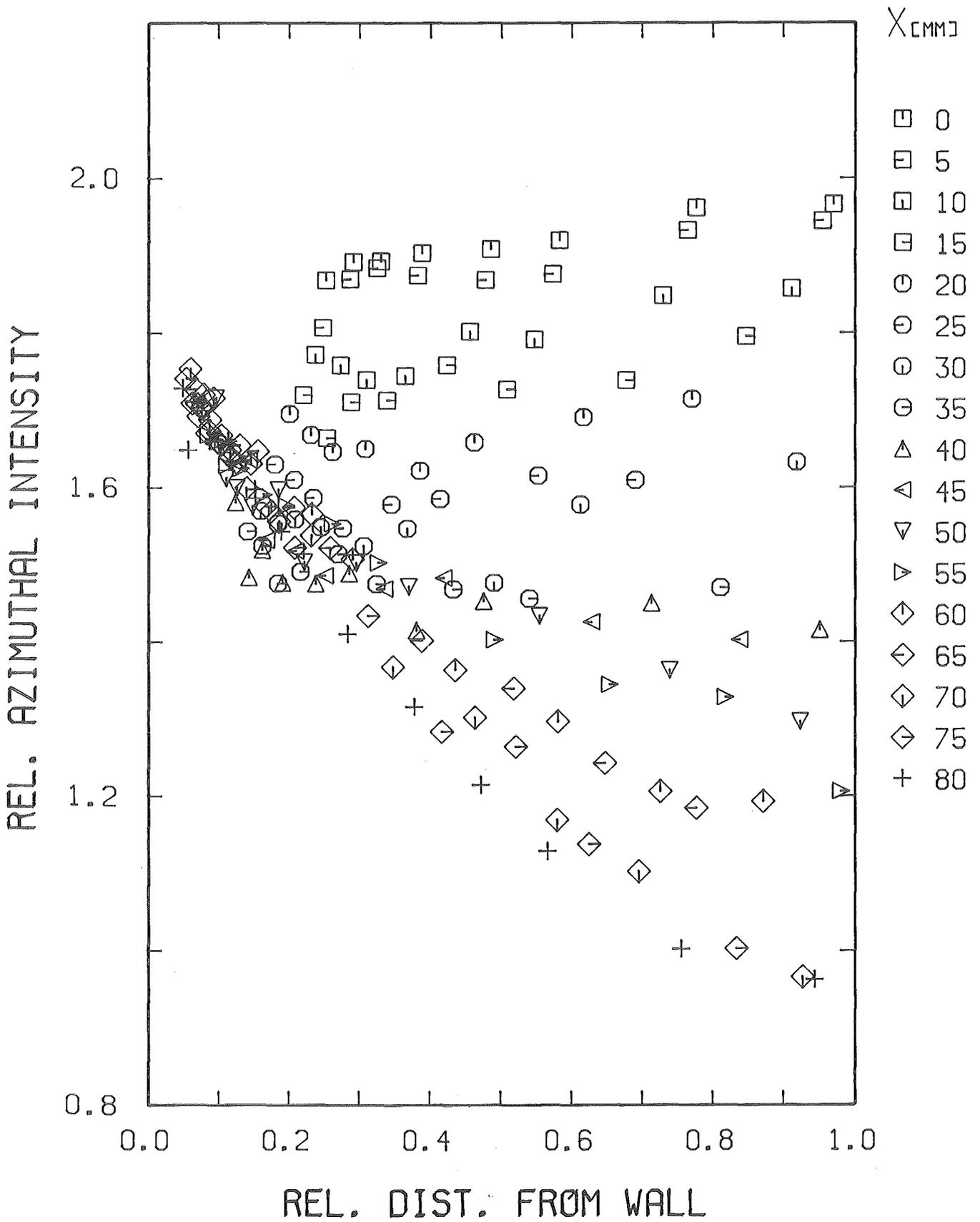


Abb.17 Turbulenzintensität parallel zur Wand (x/y)

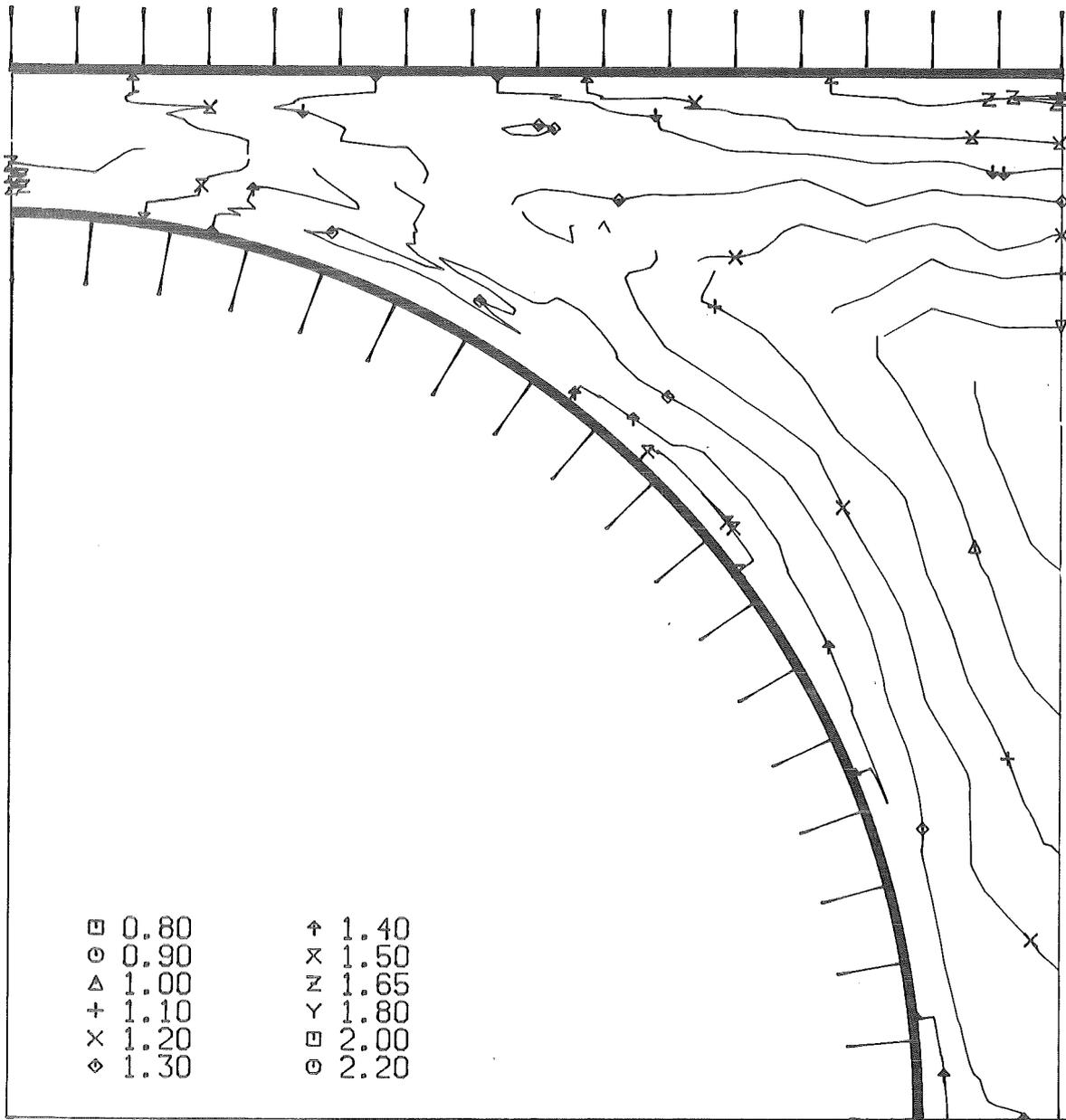


Abb.18 Turbulenzintensität parallel zur Wand (Höhenlinien)

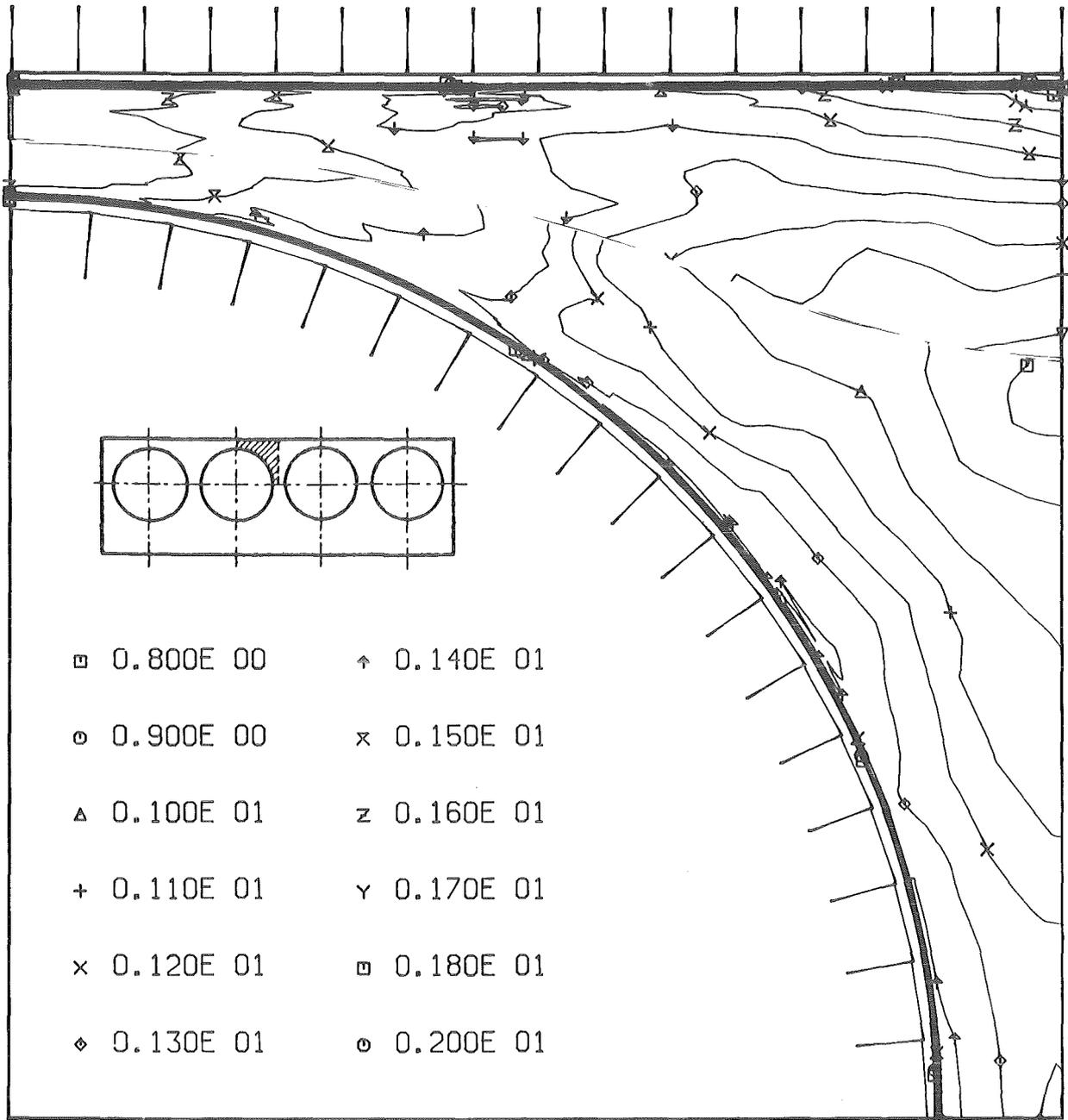


Abb.19 Turbulenzintensität parallel zur Wand (Höhenlinien) (manuell)

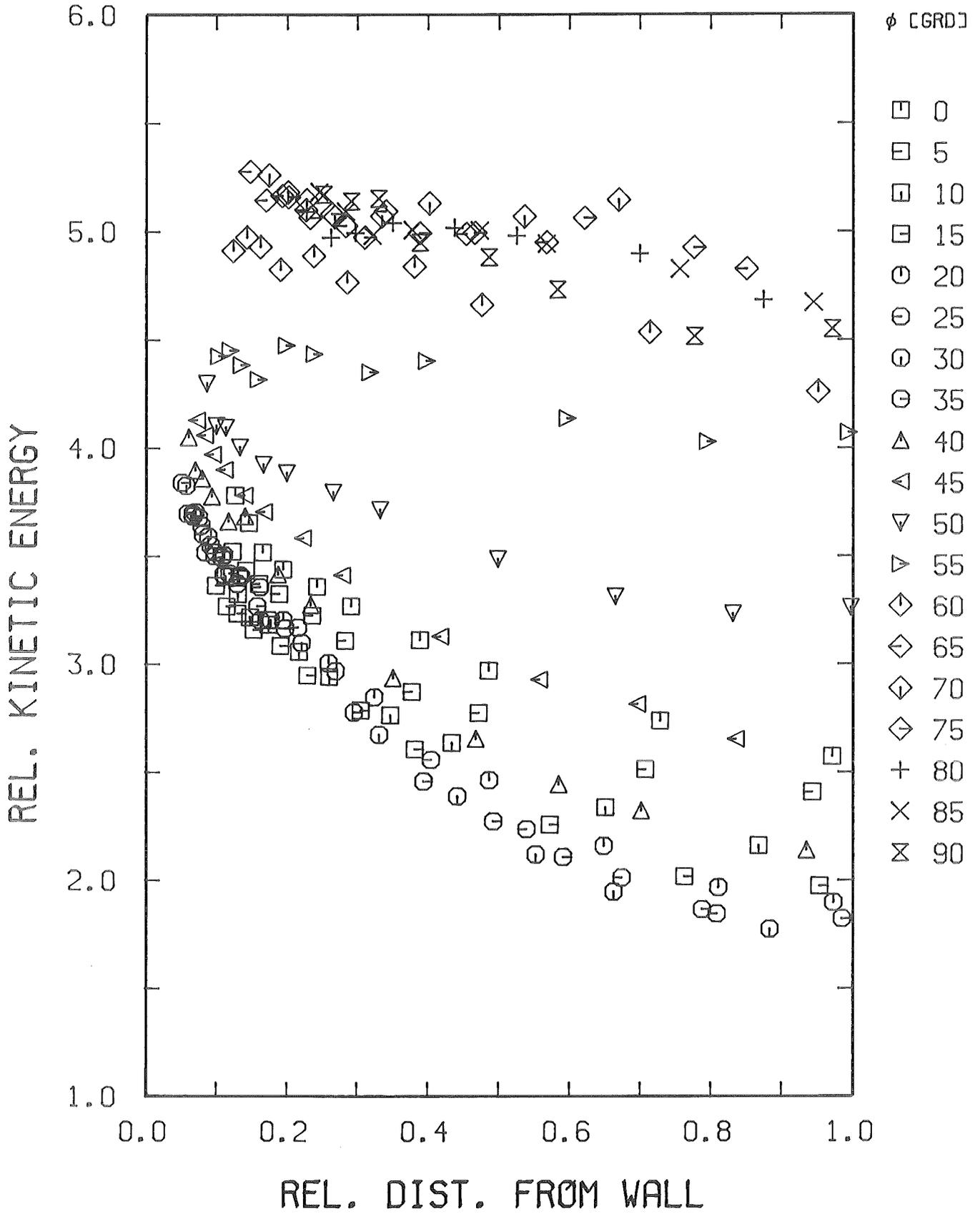


Abb.20 Kinetische Energie der Turbulenz (r/ϕ)

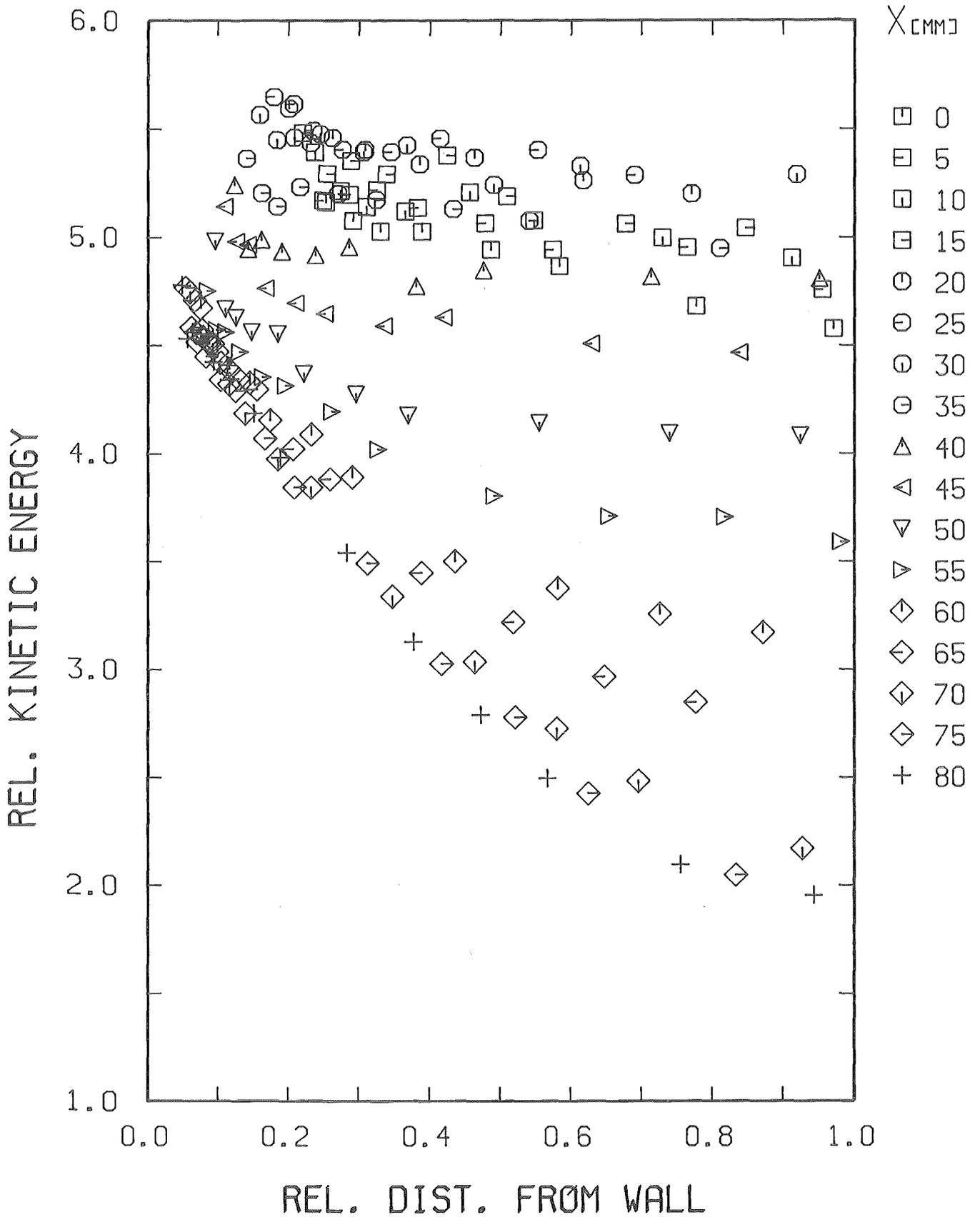


Abb.21 Kinetische Energie der Turbulenz (x/y)

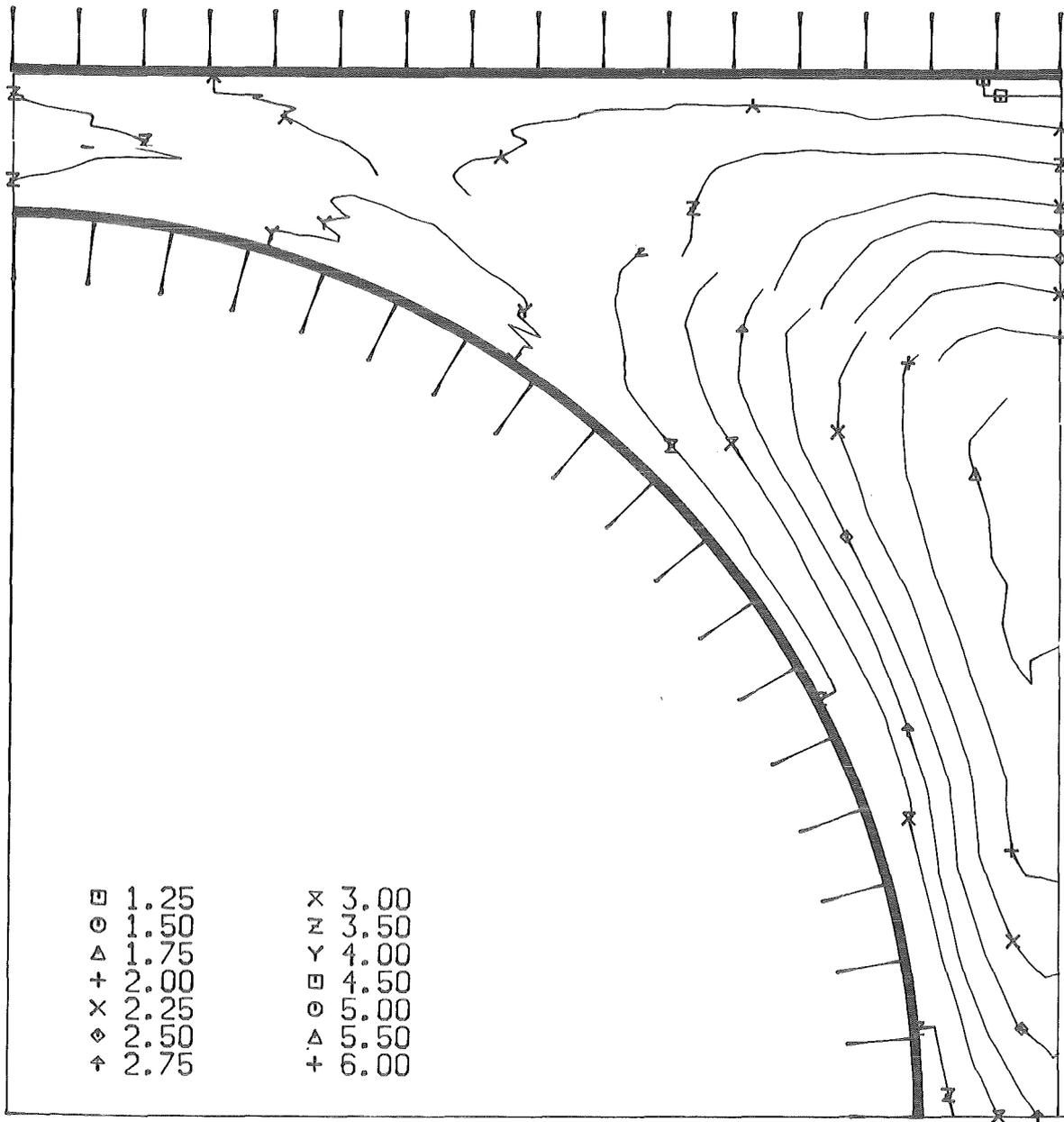


Abb.22 Kinetische Energie der Turbulenz (Höhenlinien)

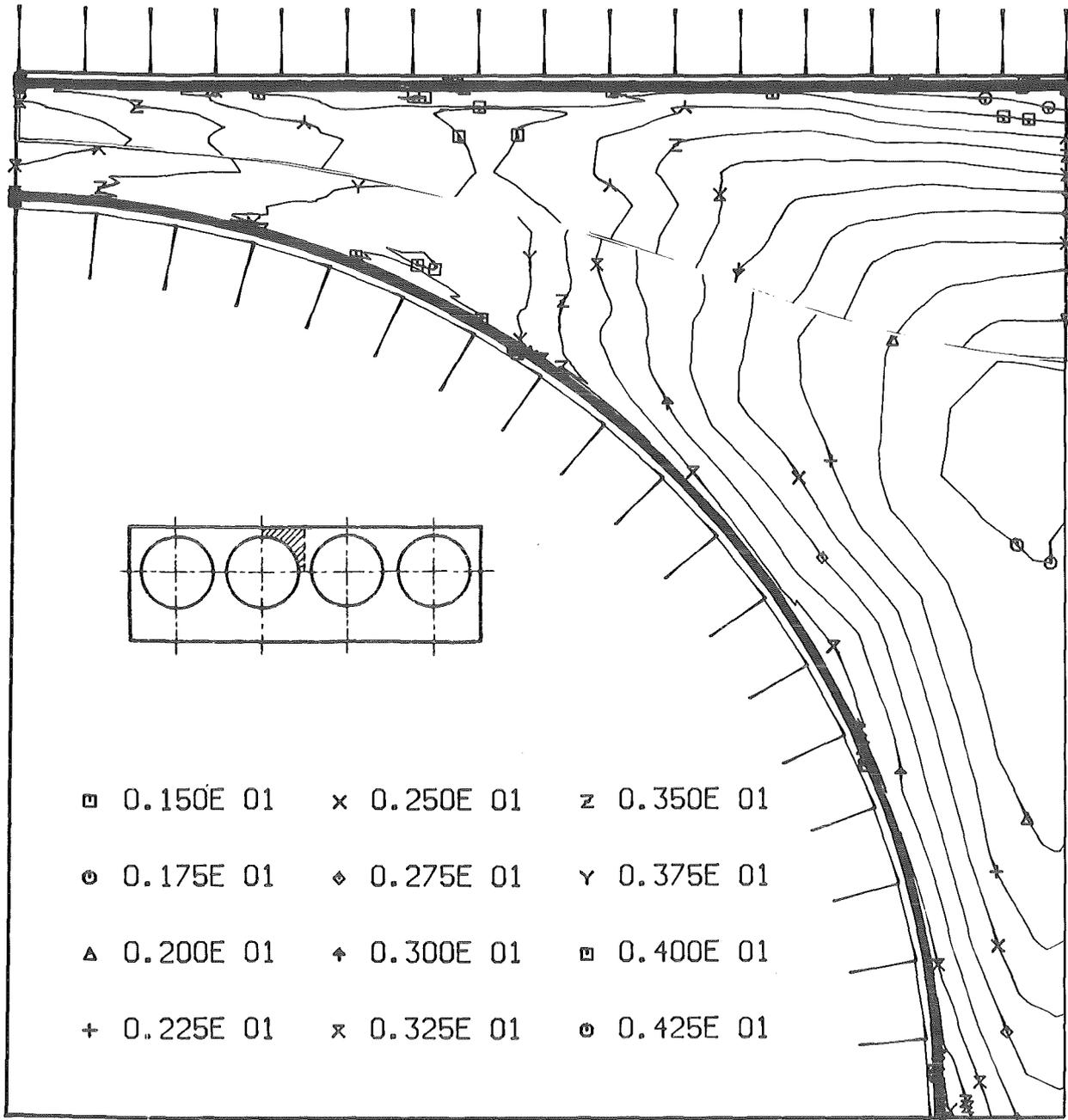


Abb.23 Kinetische Energie der Turbulenz (Höhenlinien) (manuell)

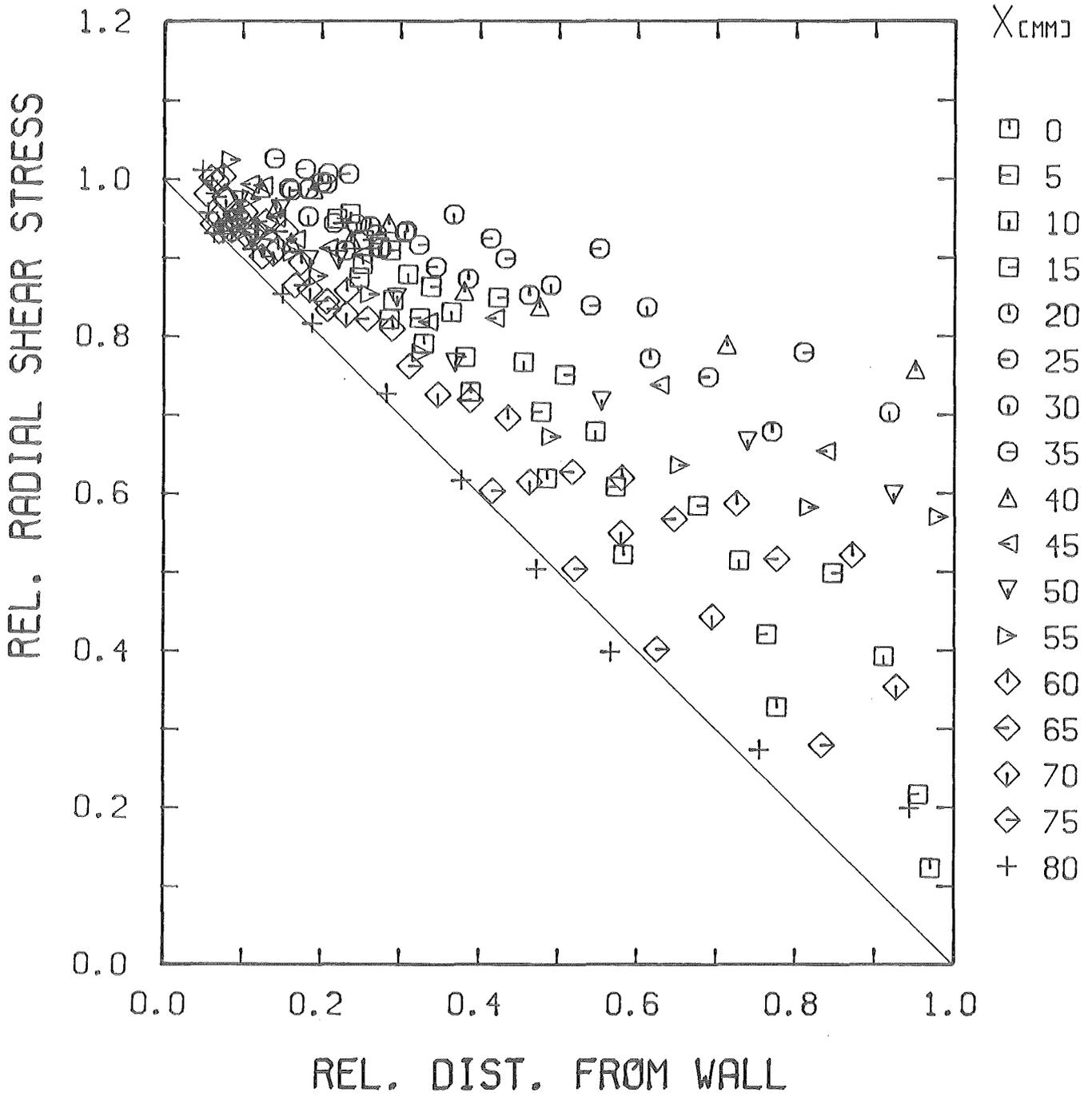


Abb.24 Schubspannung senkrecht zur Wand (r/ϕ)

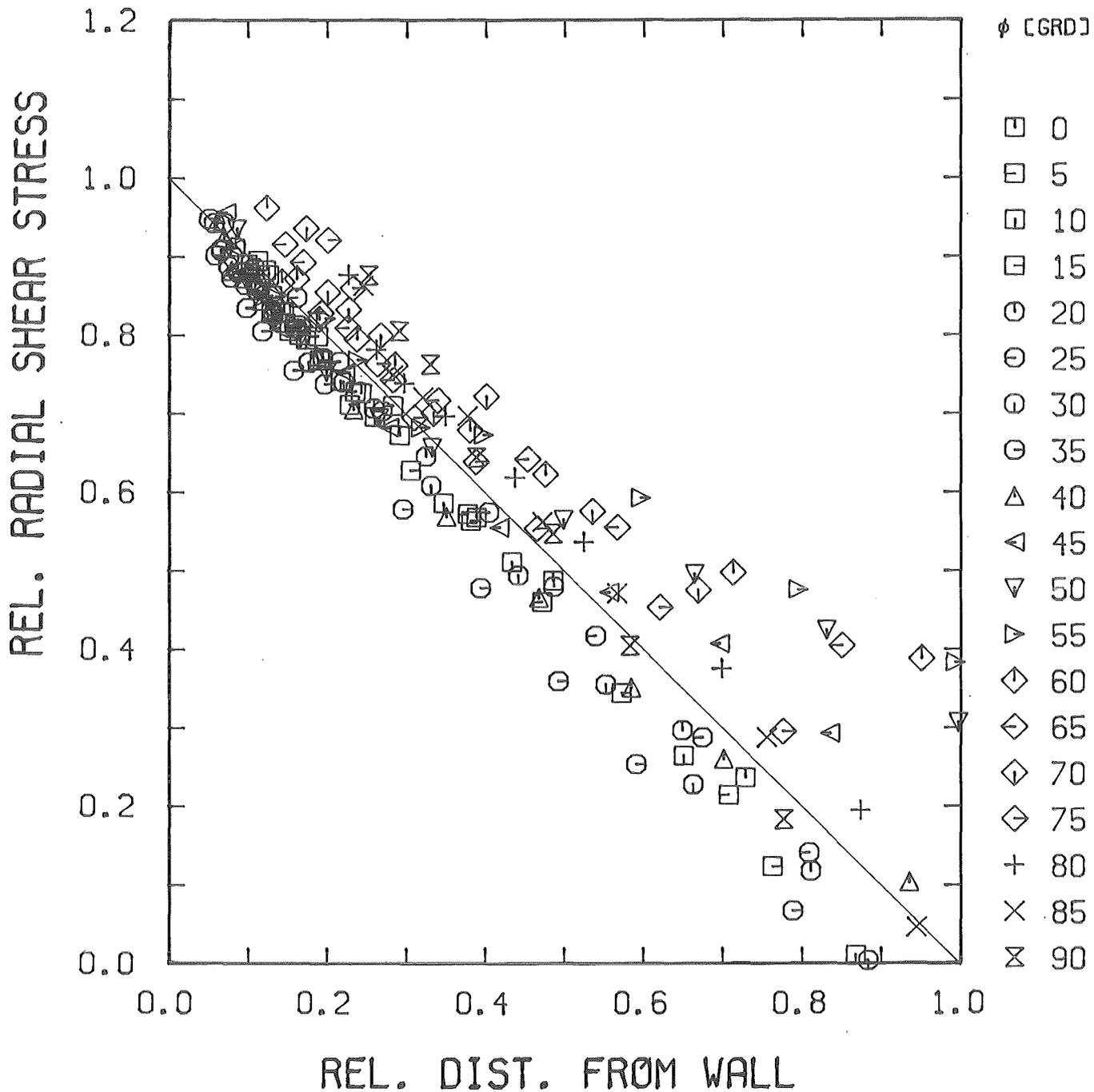


Abb. 25 Schubspannung senkrecht zur Wand (x/y)

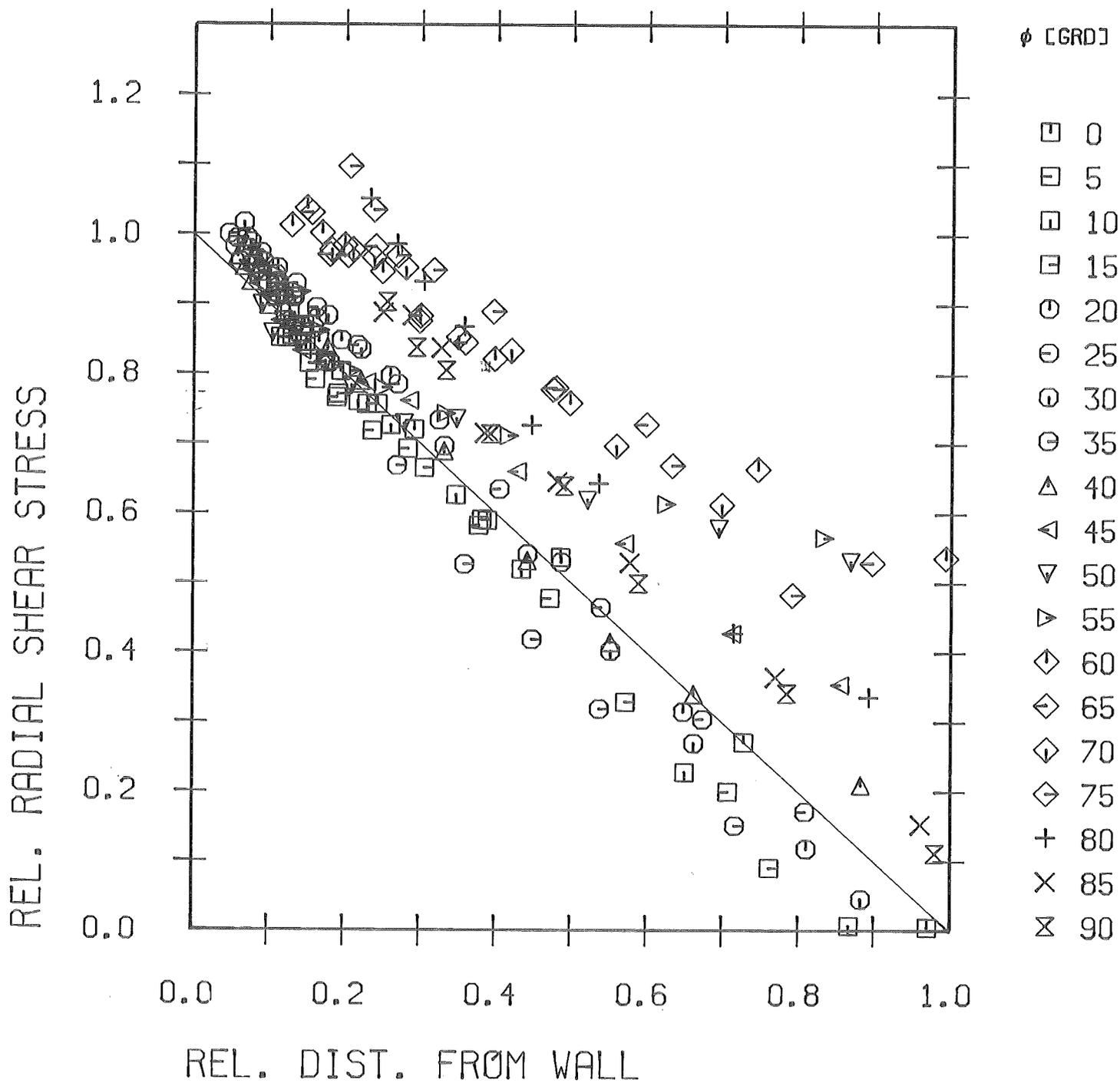
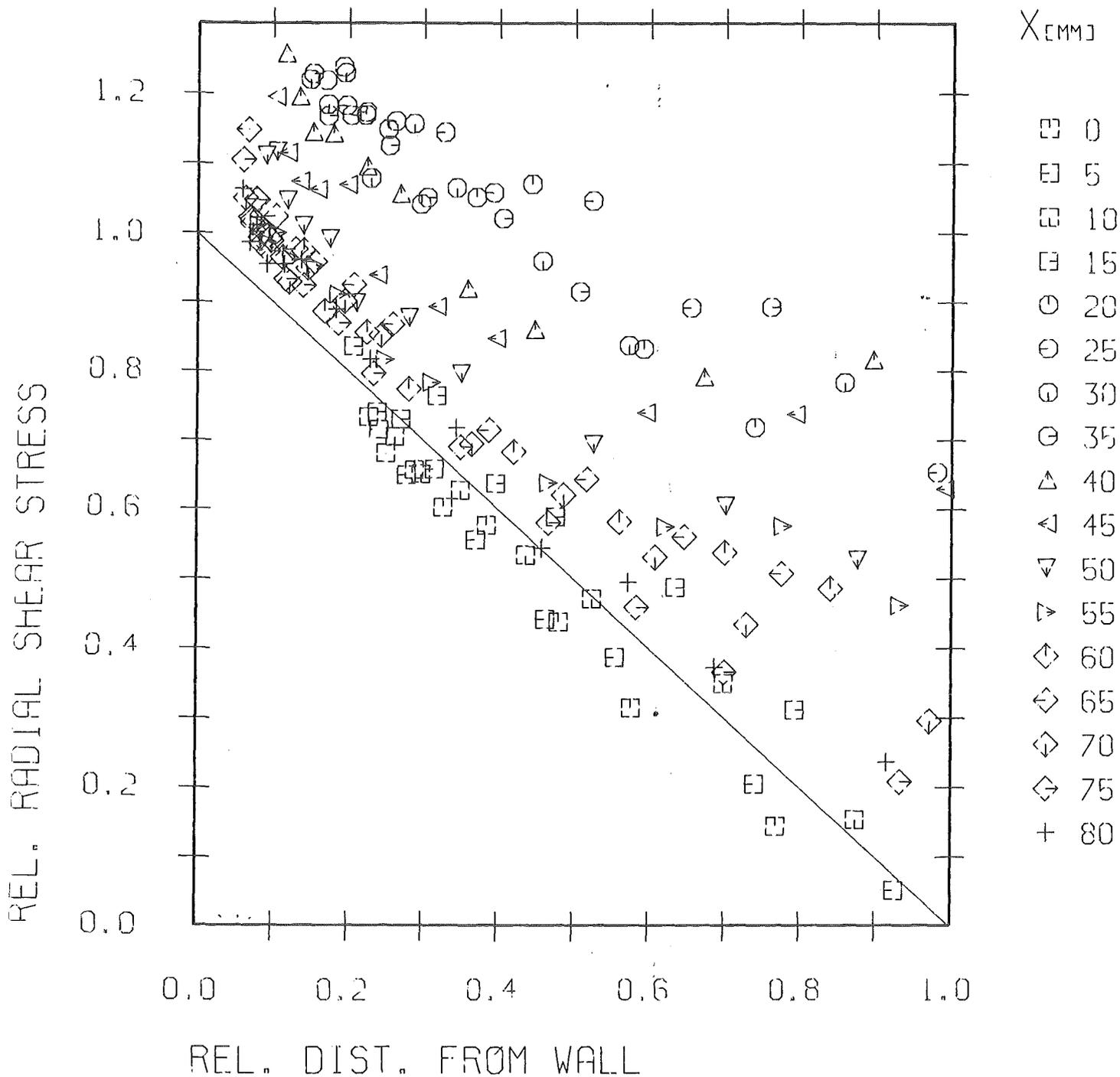


Abb.26 Schubspannung senkrecht zur Wand (r/ϕ) (manuell)



KfK

Abb. 27 Schubspannung senkrecht zur Wand (x/y) (manuell)

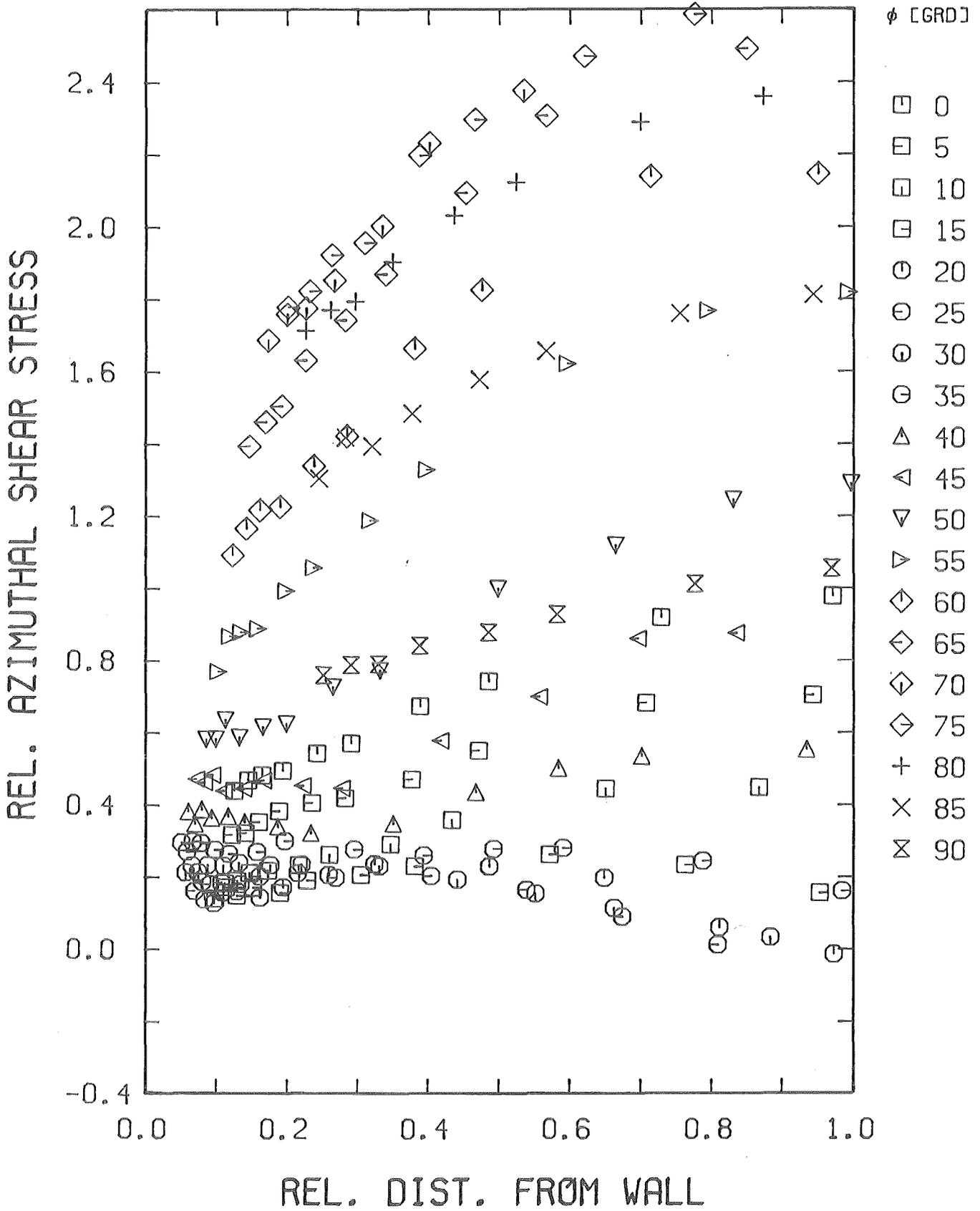


Abb.28 Schubspannung parallel zur Wand (r/ϕ)

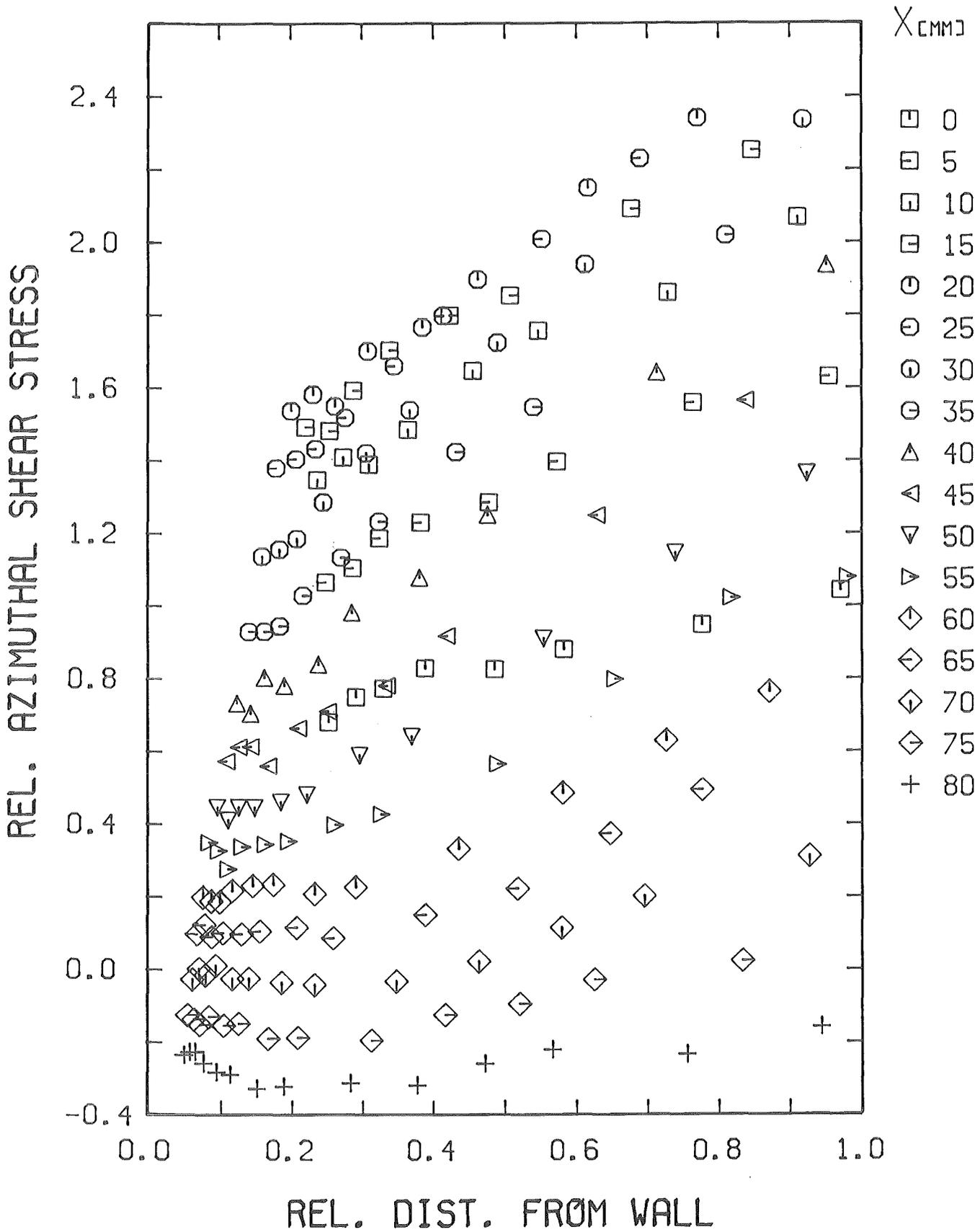


Abb. 29 Schubspannung parallel zur Wand (x/y)

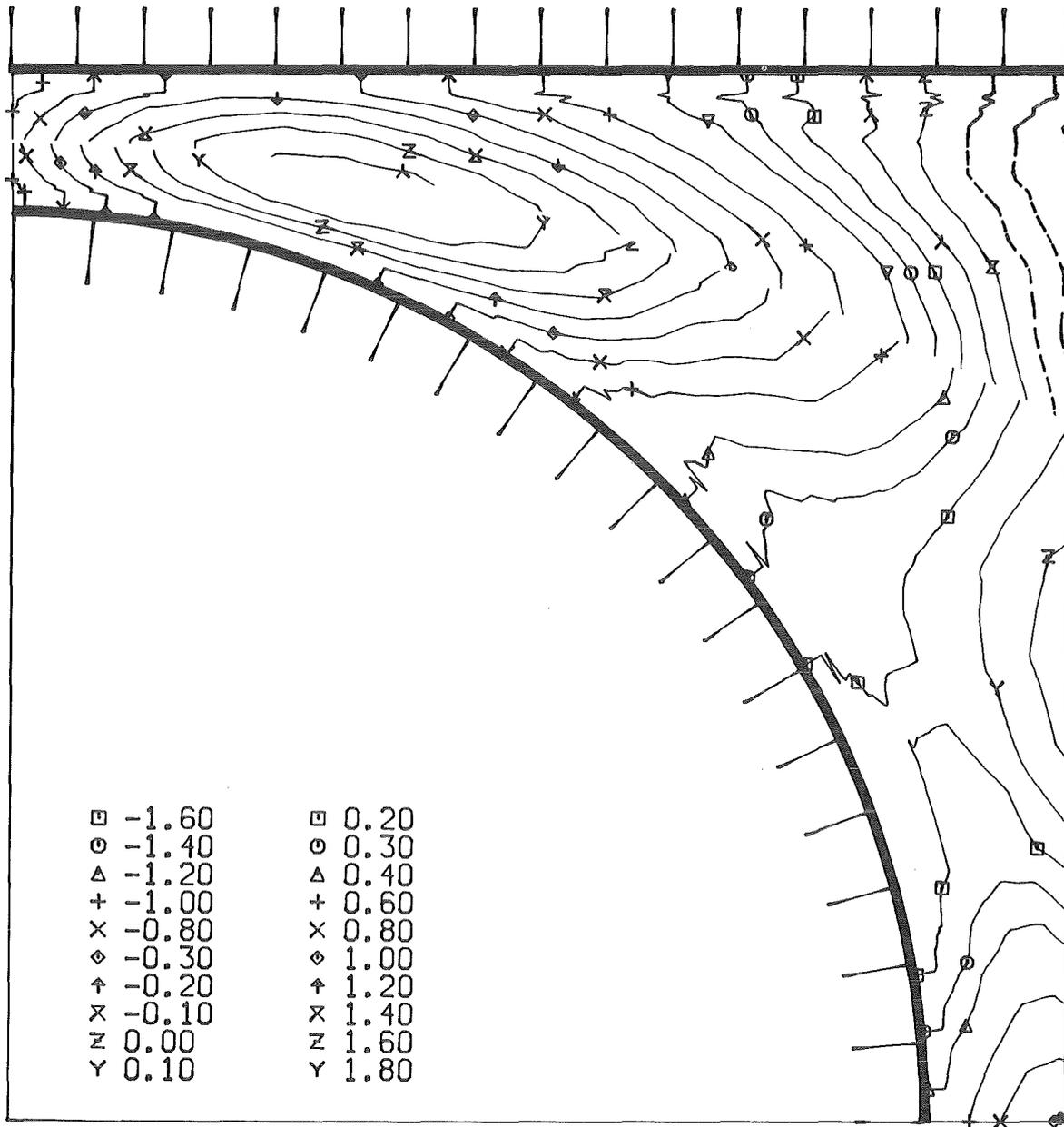


Abb.30 Schubspannung parallel zur Wand (Höhenlinien)

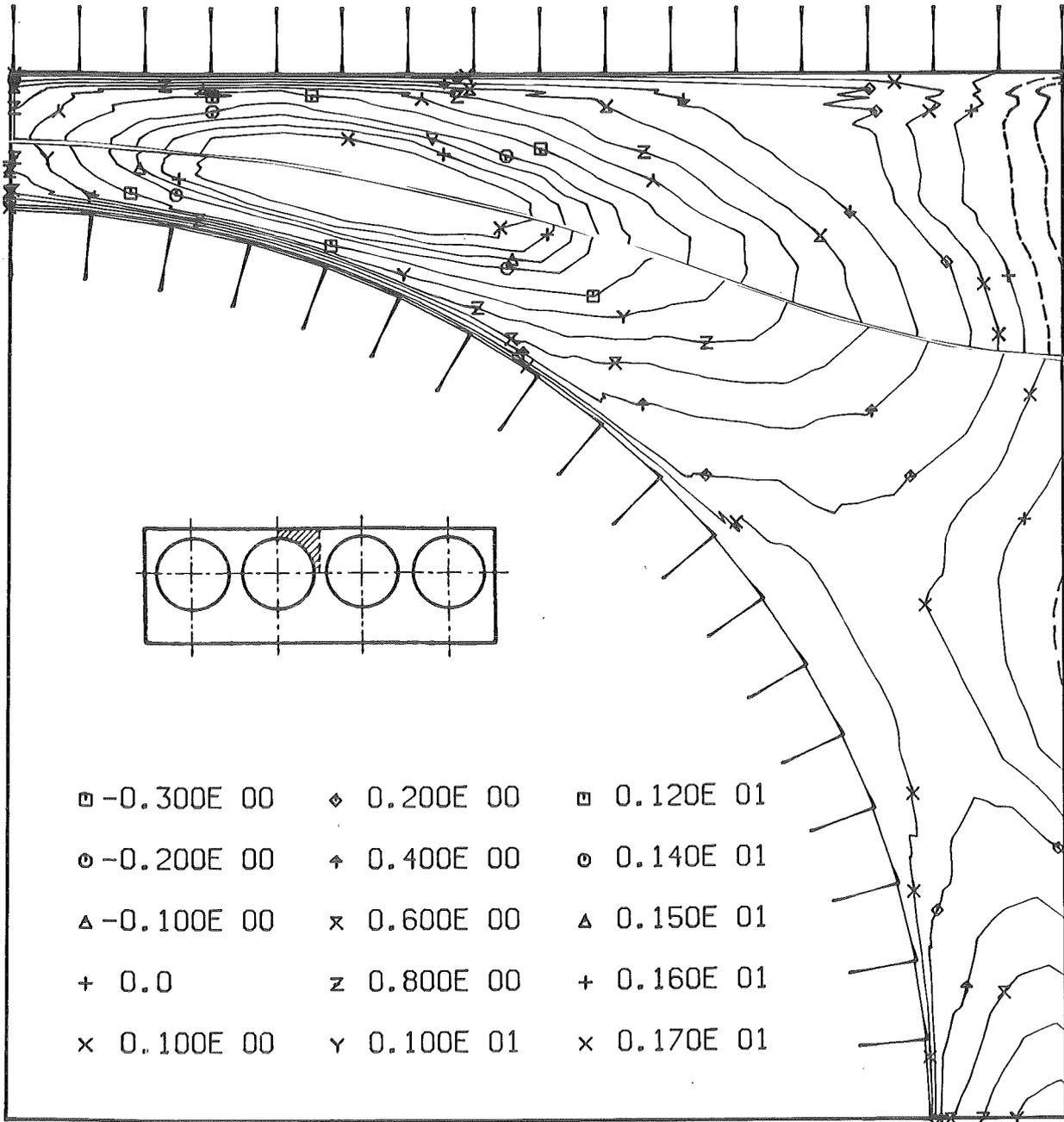


Abb. 31 Schubspannung parallel zur Wand (Höhenlinien) (manuell)

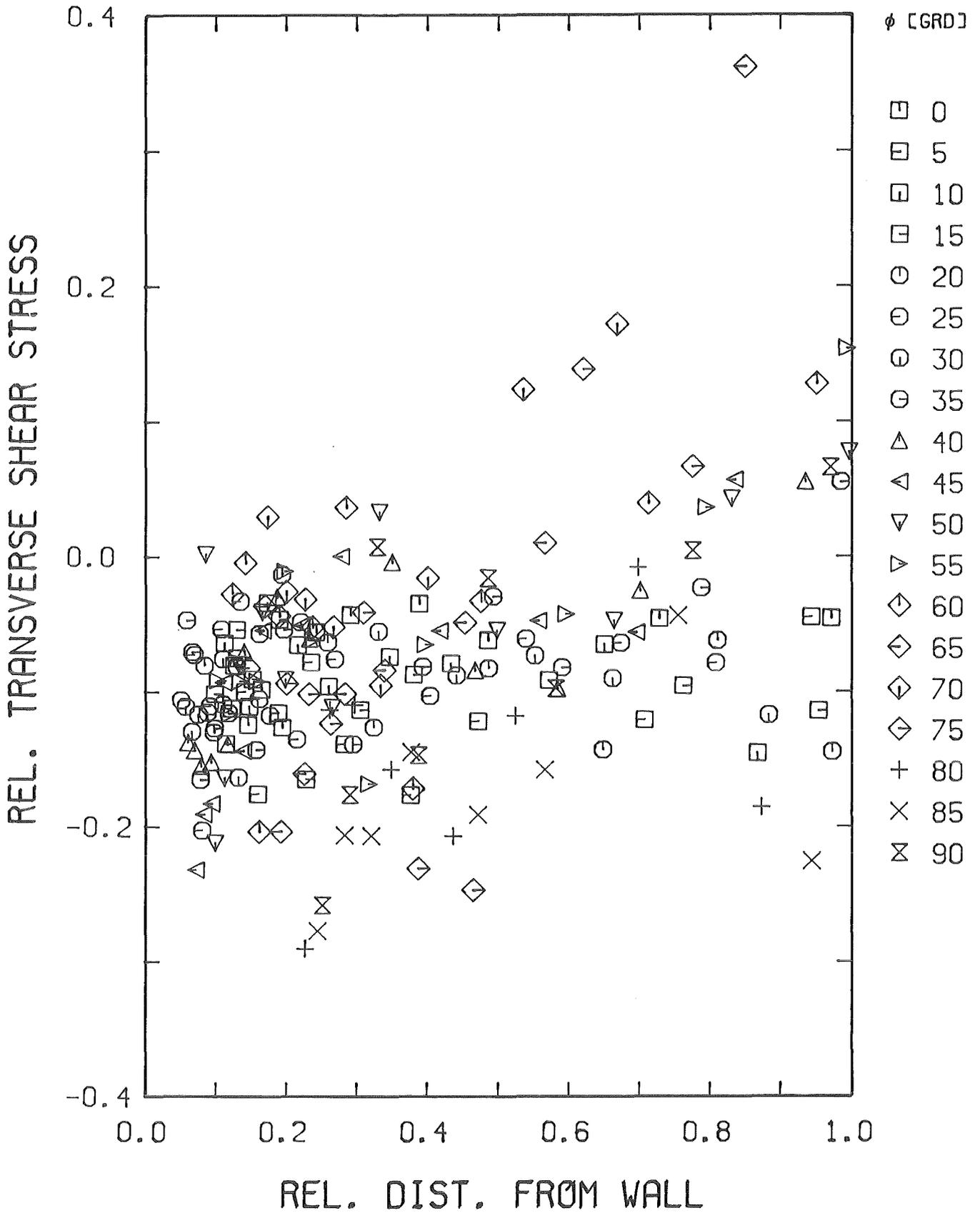


Abb.32 Transverse Schubspannung (r/ϕ)

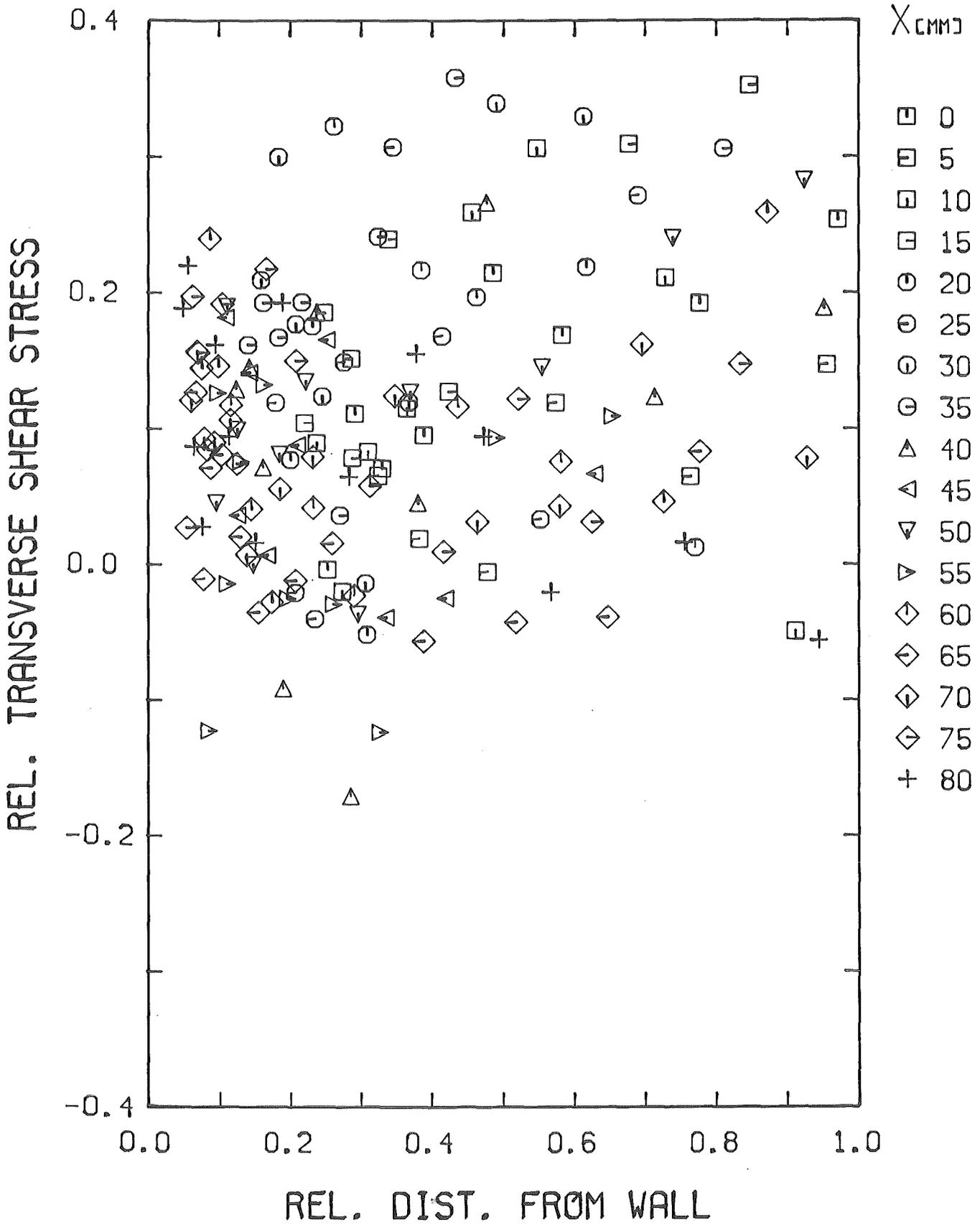


Abb.33 Transverse Schubspannung (x/y)

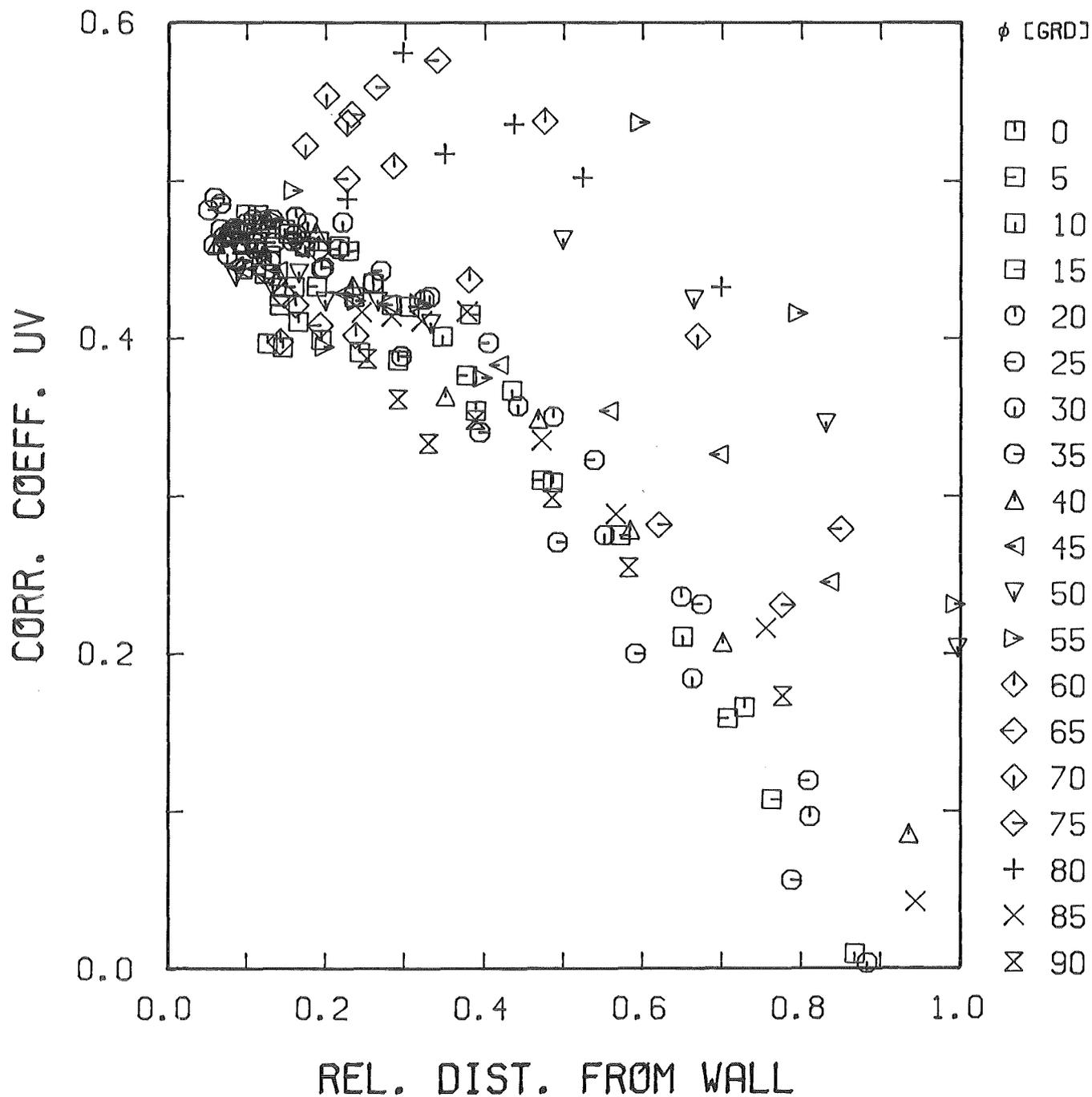


Abb.34 Korrelationskoeffizient R_{UV} (r/ϕ)

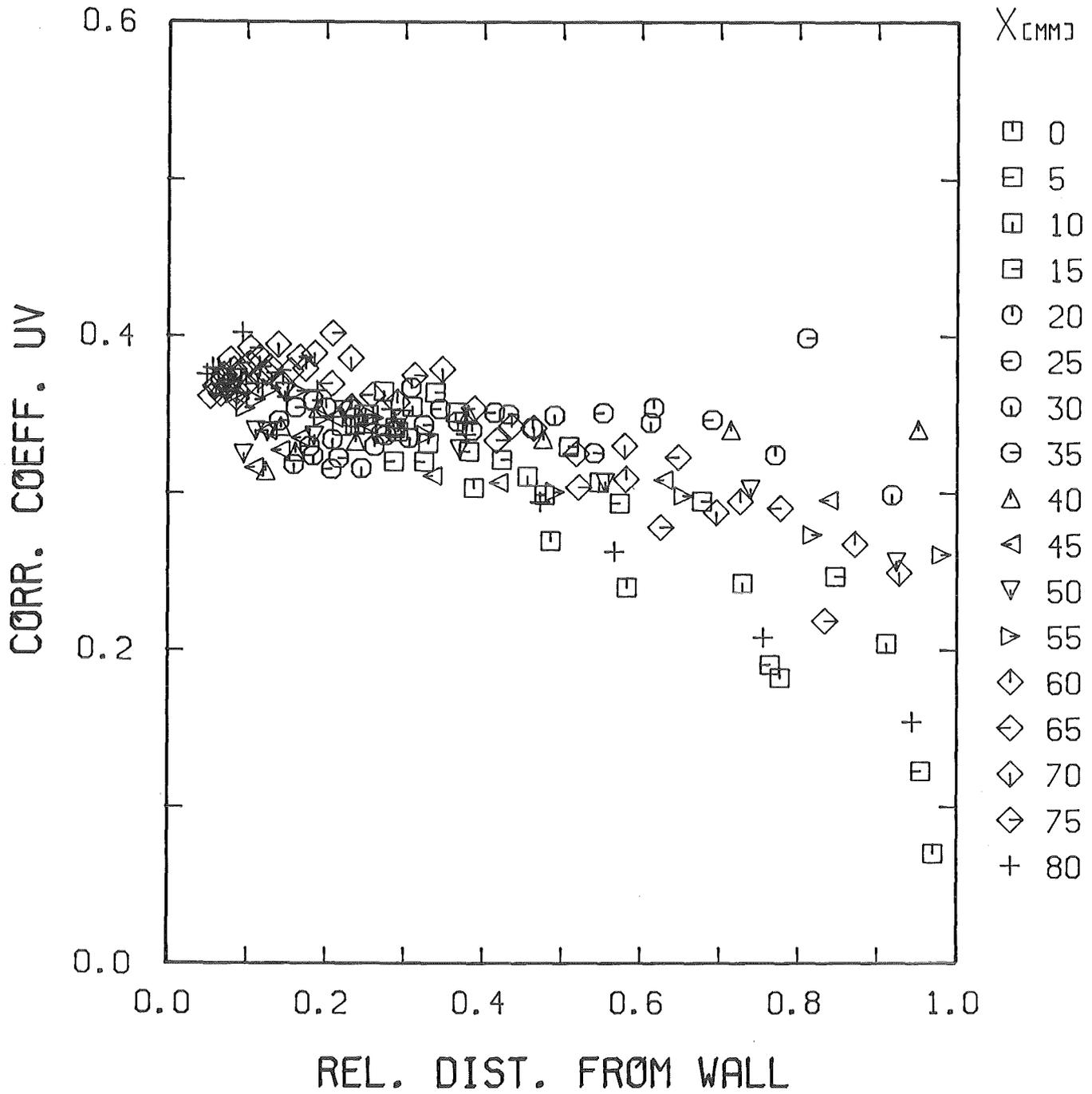


Abb.35 Korrelationskoeffizient R_{UV} (x/y)

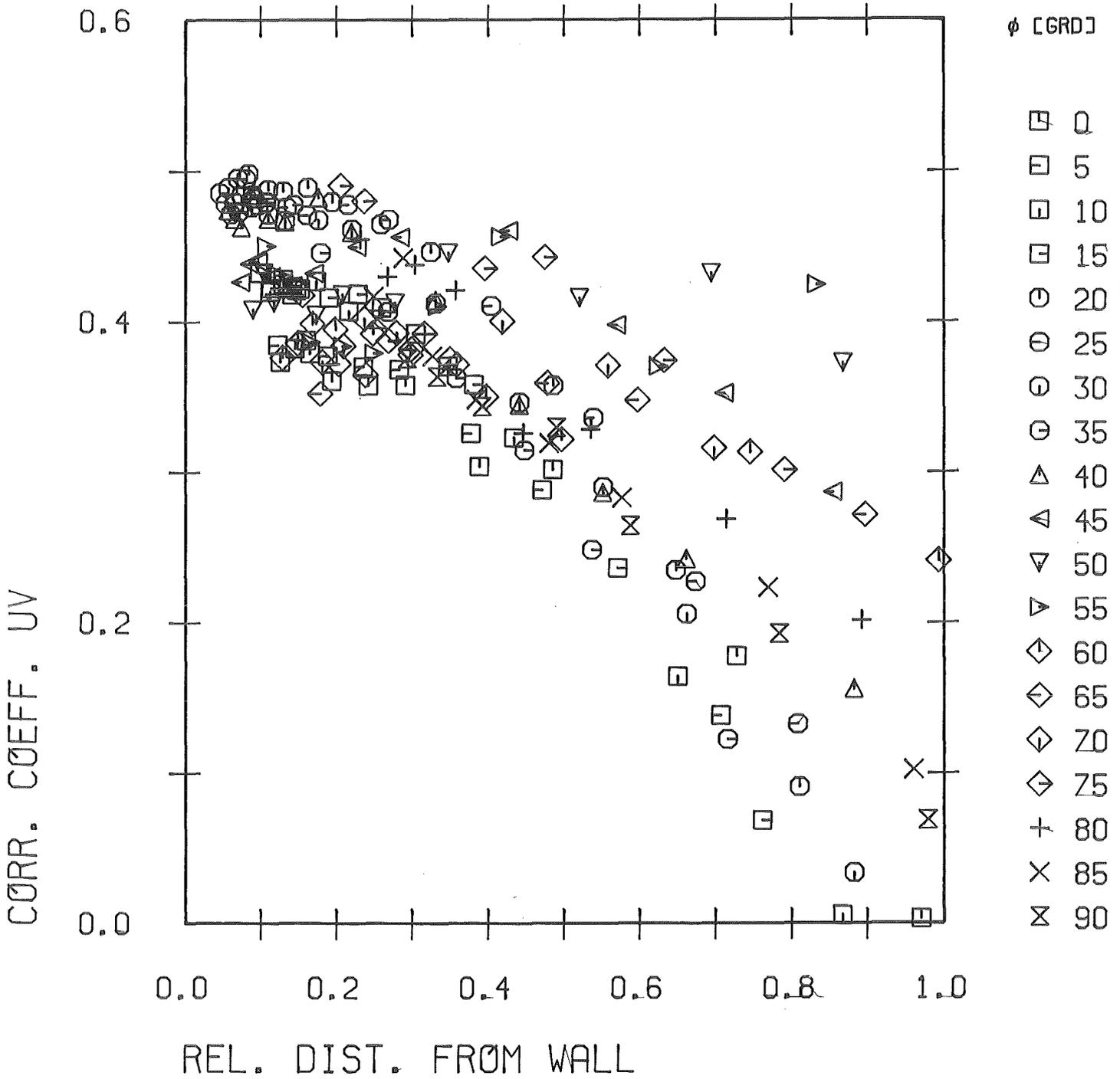


Abb.36 Korrelationskoeffizient R_{UV} (r/ϕ) (manuell)

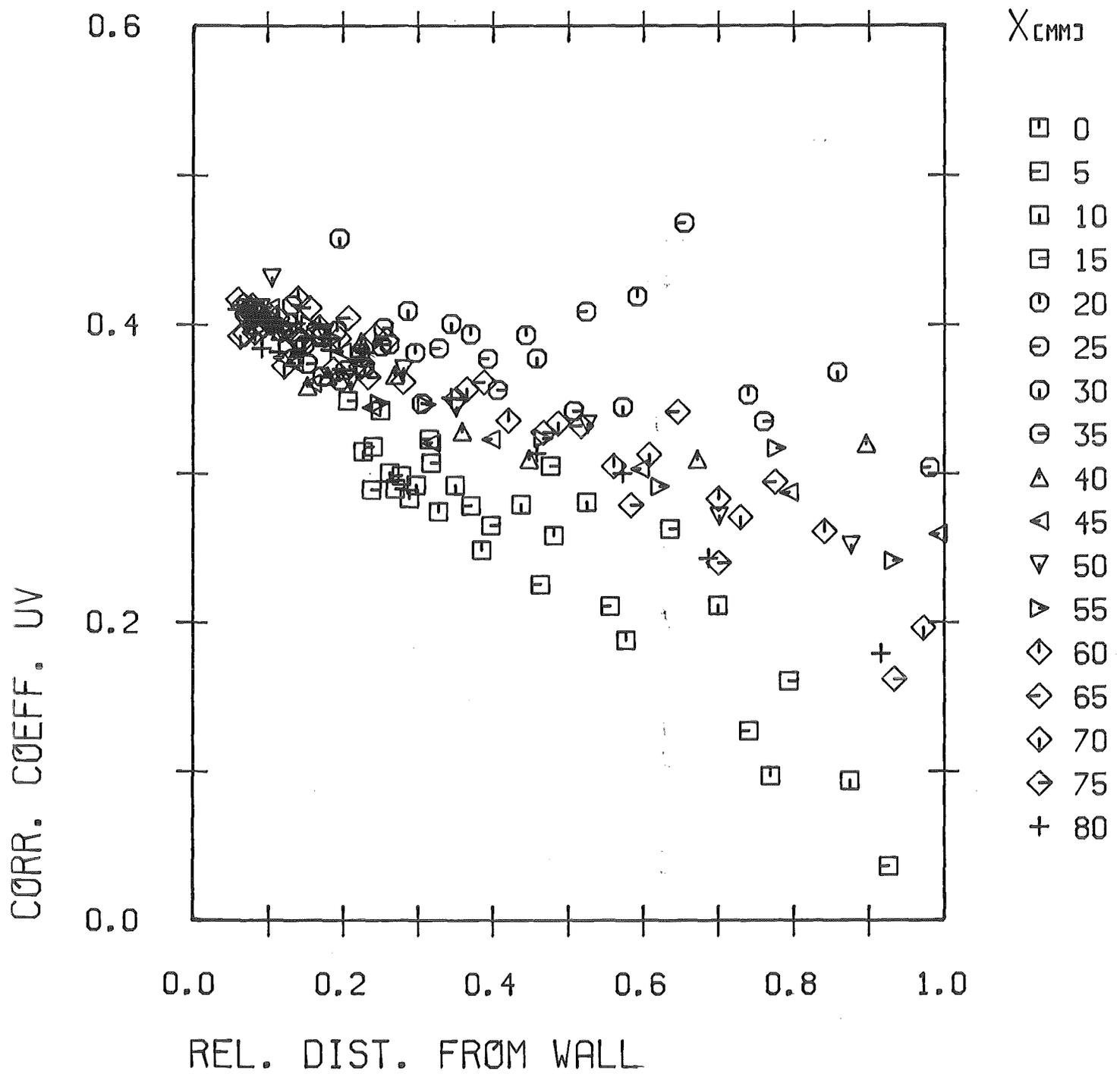


Abb.37 Korrelationskoeffizient R_{UV} (x/y) (manuell)

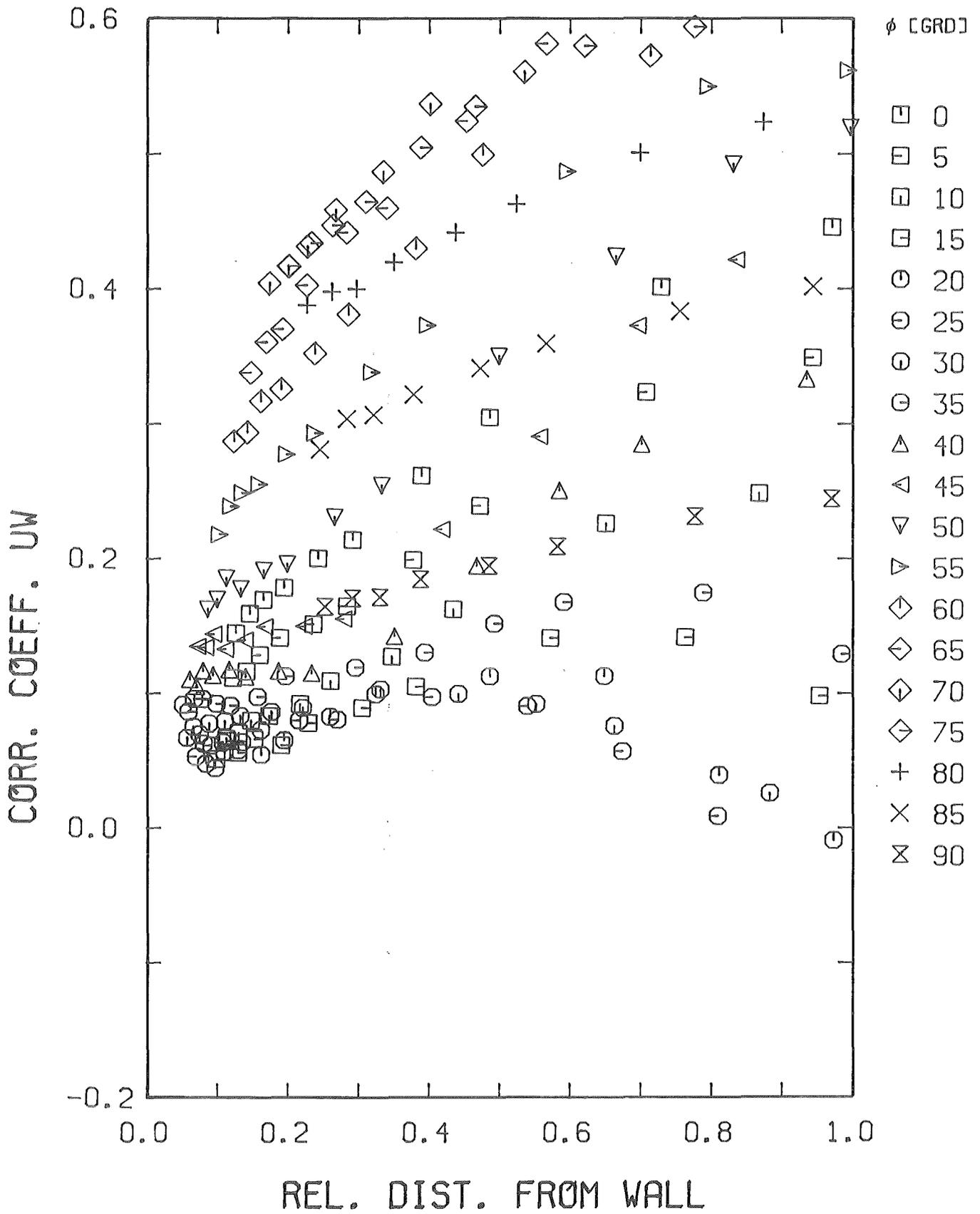


Abb.38 Korrelationskoeffizient R_{uw} (r/ϕ)

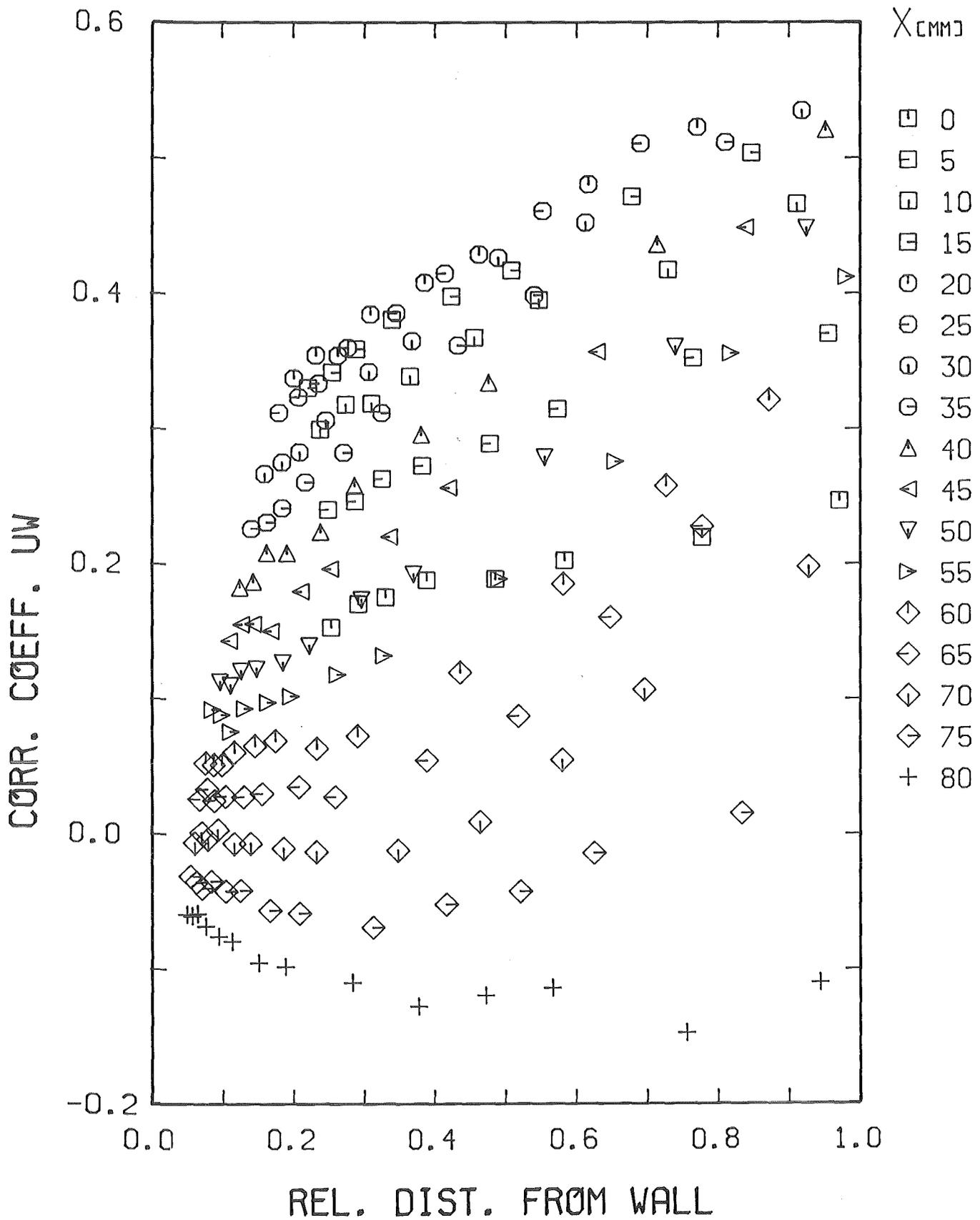
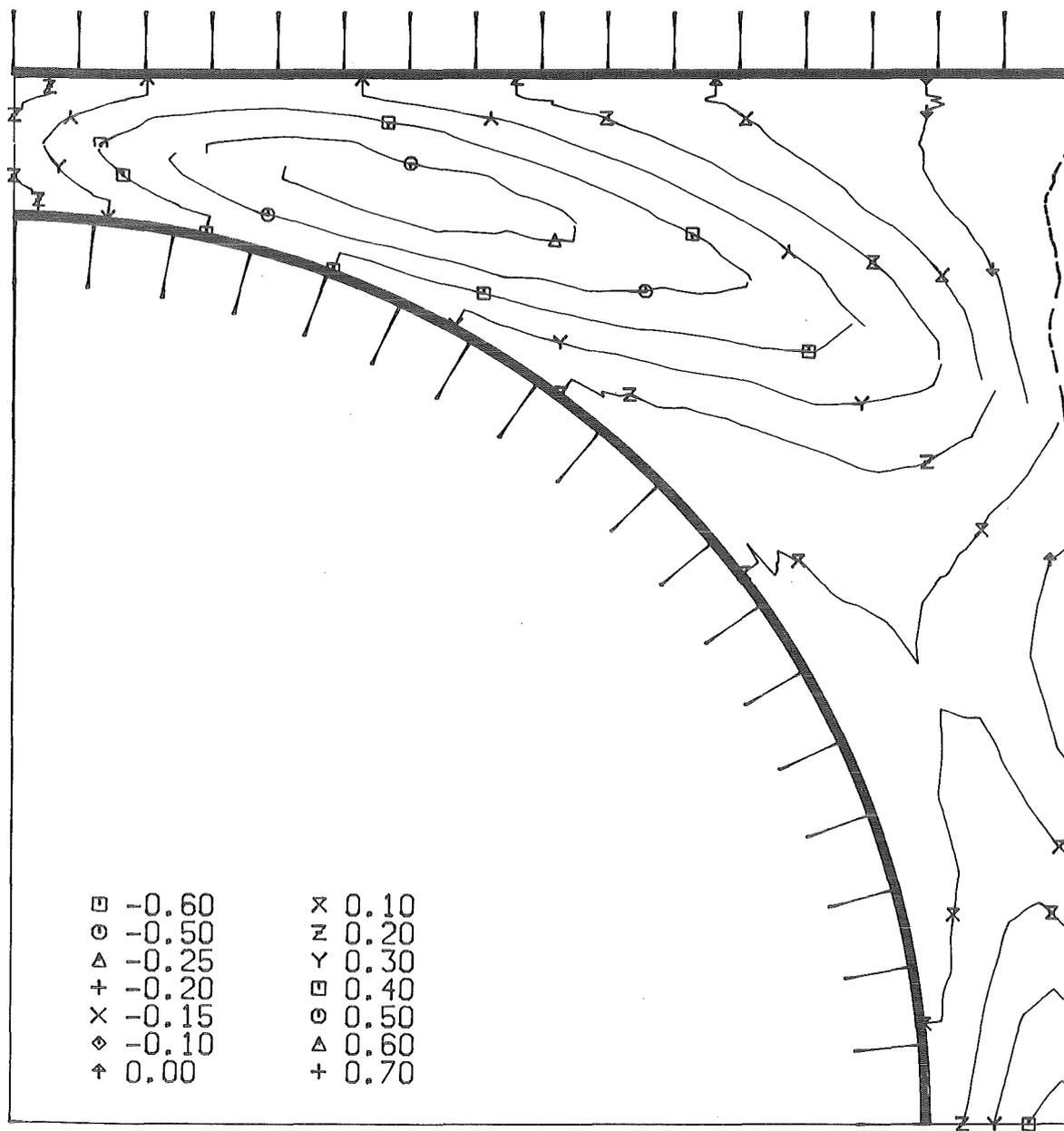


Abb.39 Korrelationskoeffizient R_{UW} (x/y)



KfK

Abb.40 Korrelationskoeffizient R_{UW} (Höhenlinien)

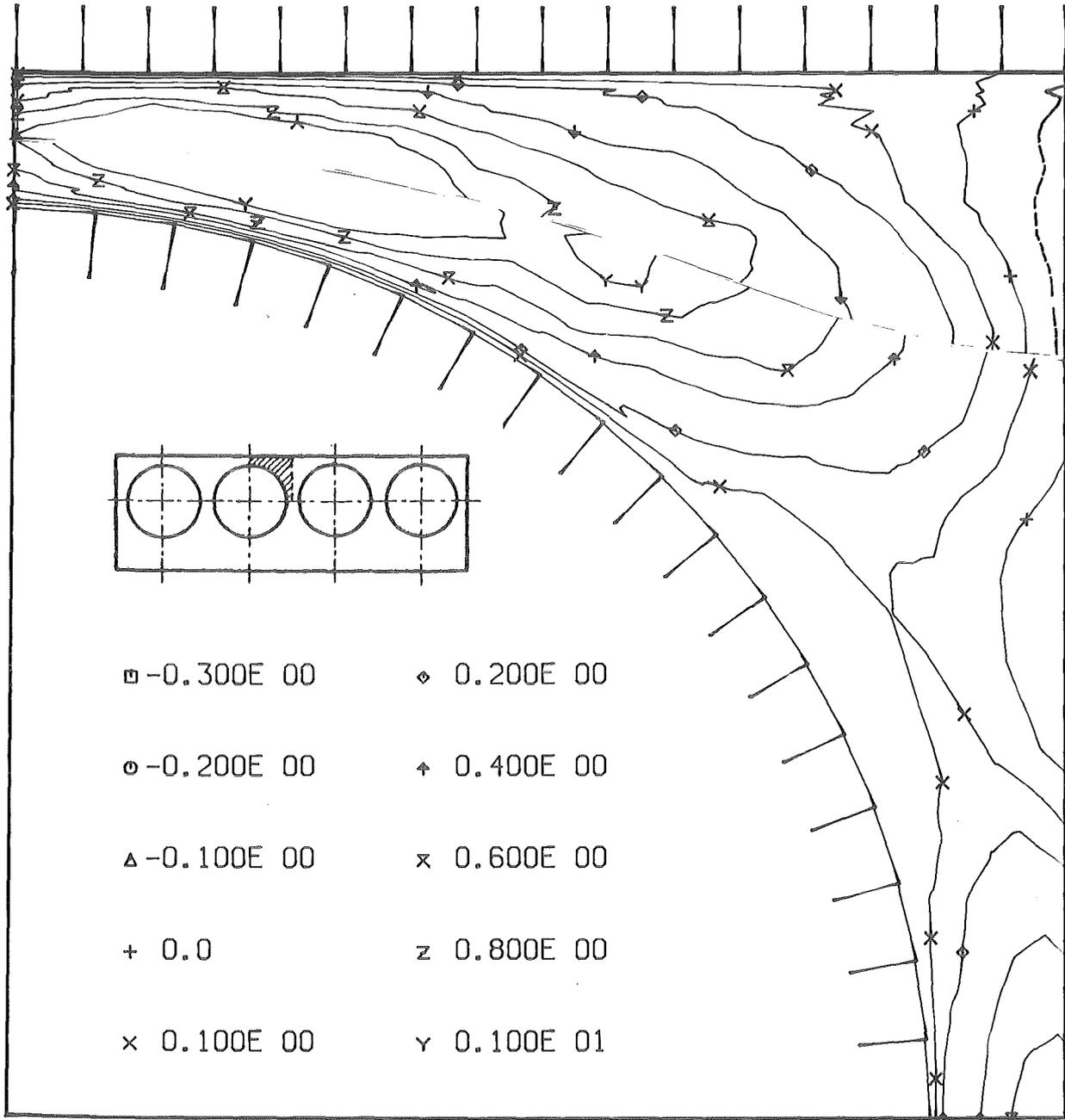


Abb.41 Korrelationskoeffizient R_{uw} (Höhenlinien) (manuell)

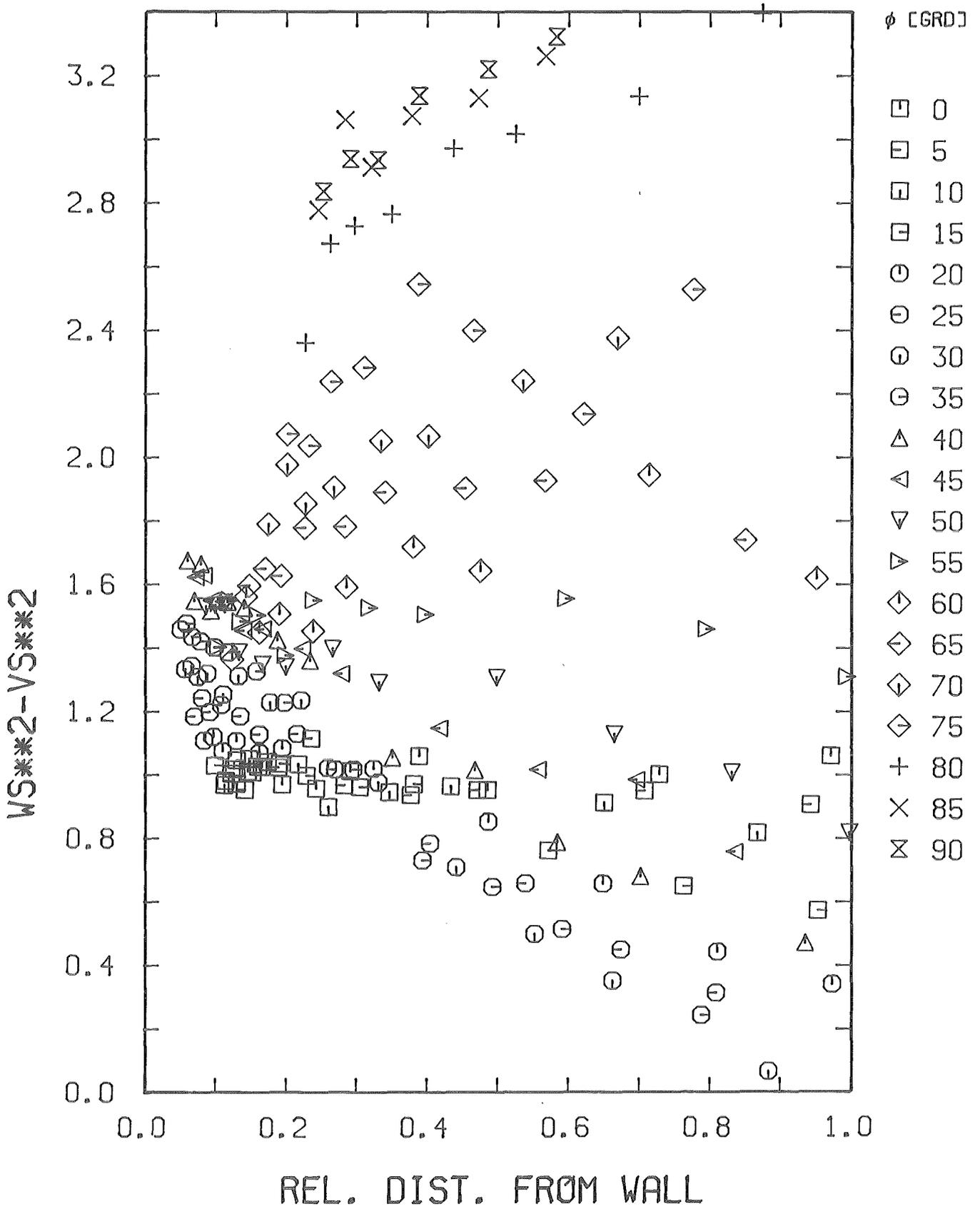


Abb.42 Differenz der Turbulenzintensitäten parallel und senkrecht zur Wand (r/ϕ)

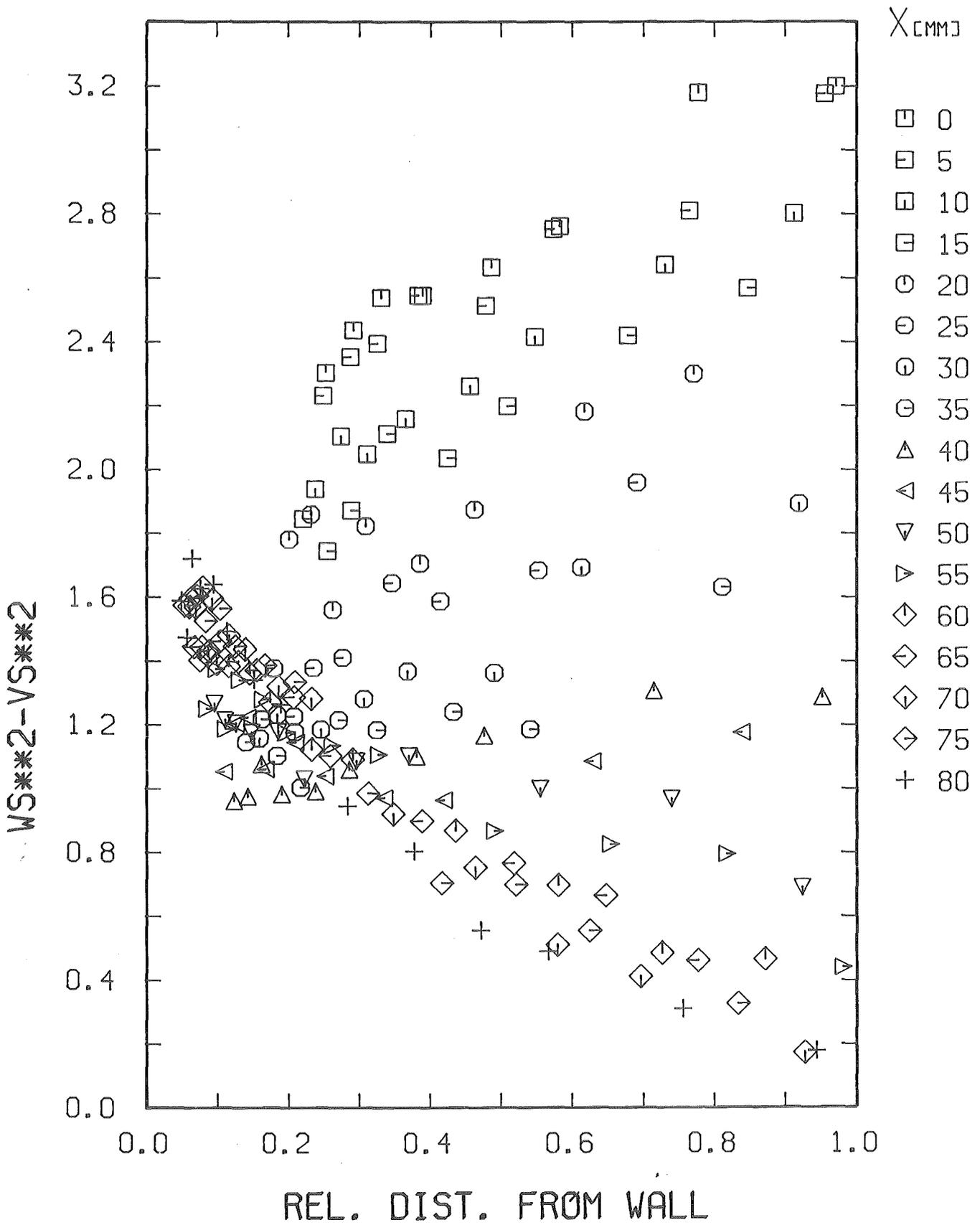


Abb.43 Differenz der Turbulenzintensitäten parallel und senkrecht zur Wand (x/y)

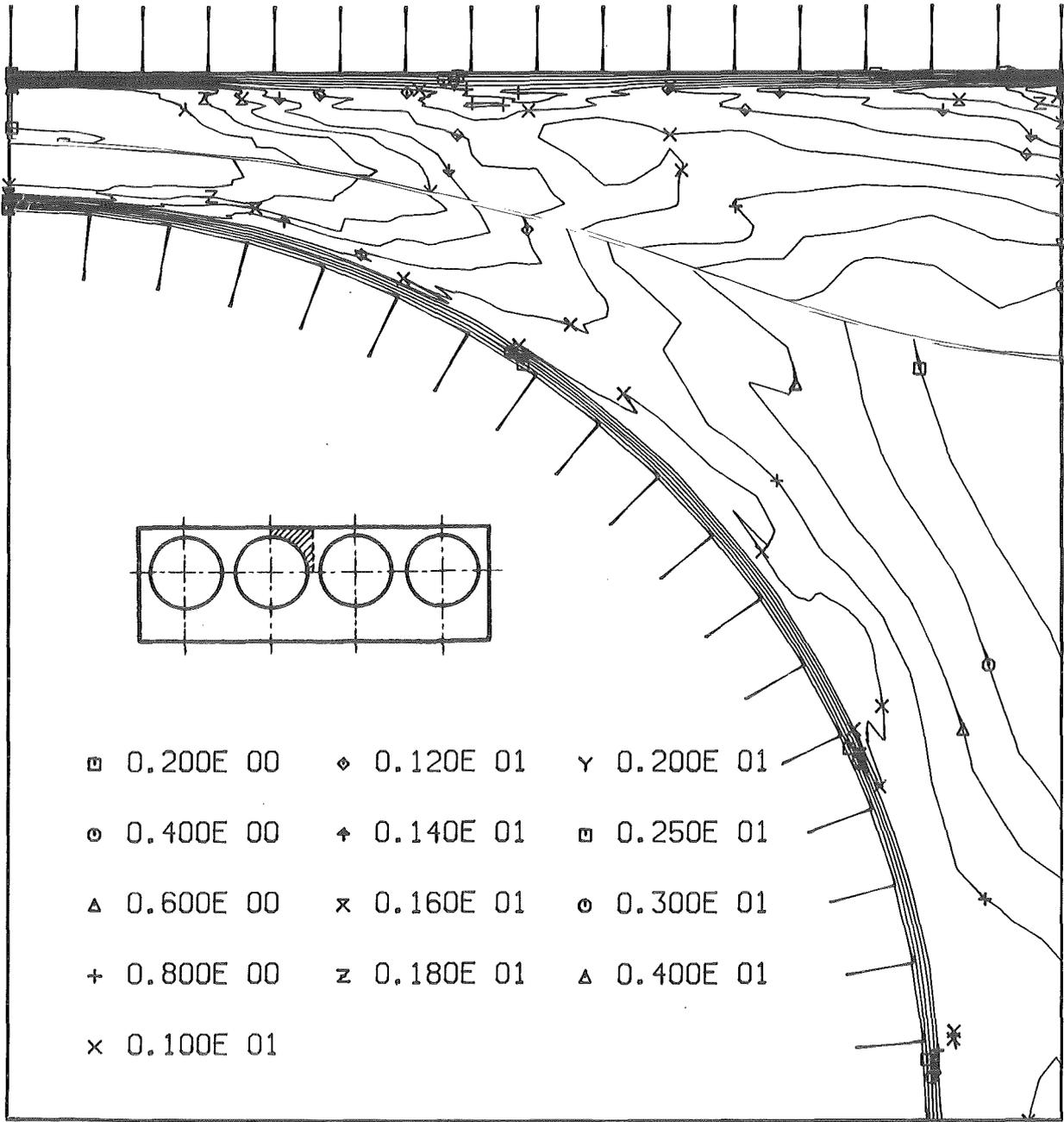
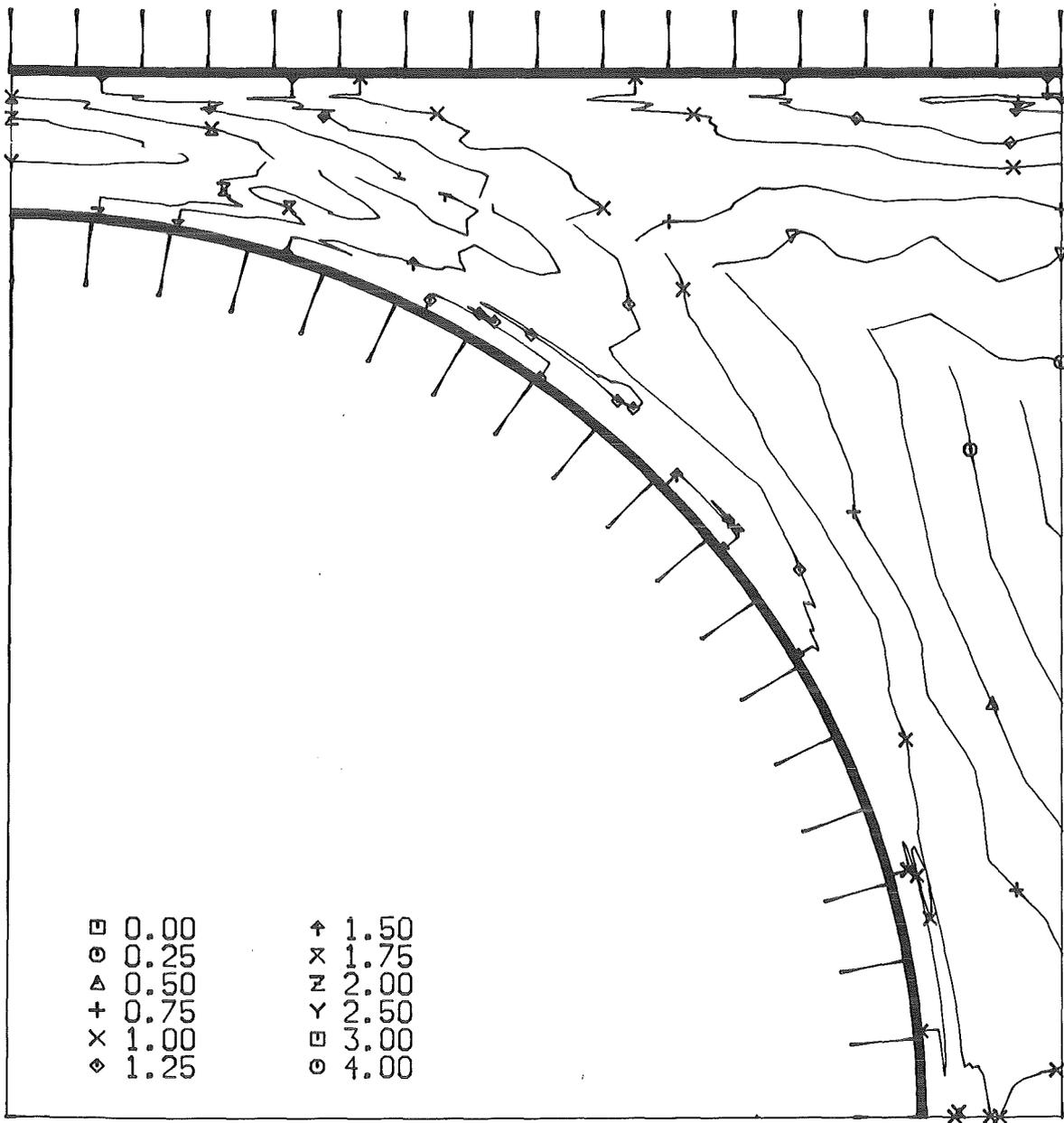


Abb.44 Differenz der Turbulenzintensitäten parallel und senkrecht zur Wand (Höhenlinien)



KfK

Abb. 45 Differenz der Turbulenzintensitäten parallel und senkrecht zur Wand (Höhenlinien) (manuell)

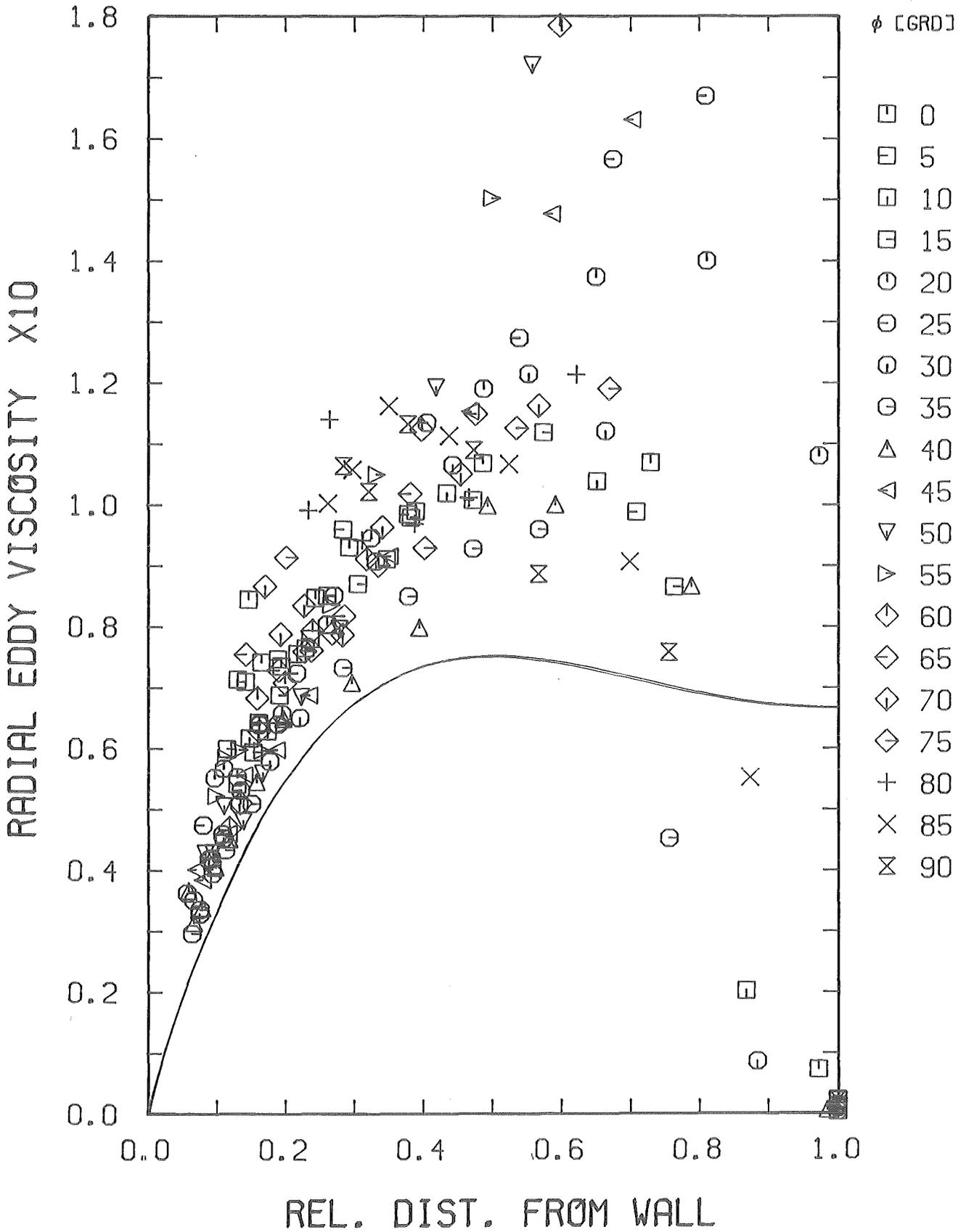


Abb.46 Wirbelviskosität senkrecht zur Wand (r/ϕ)

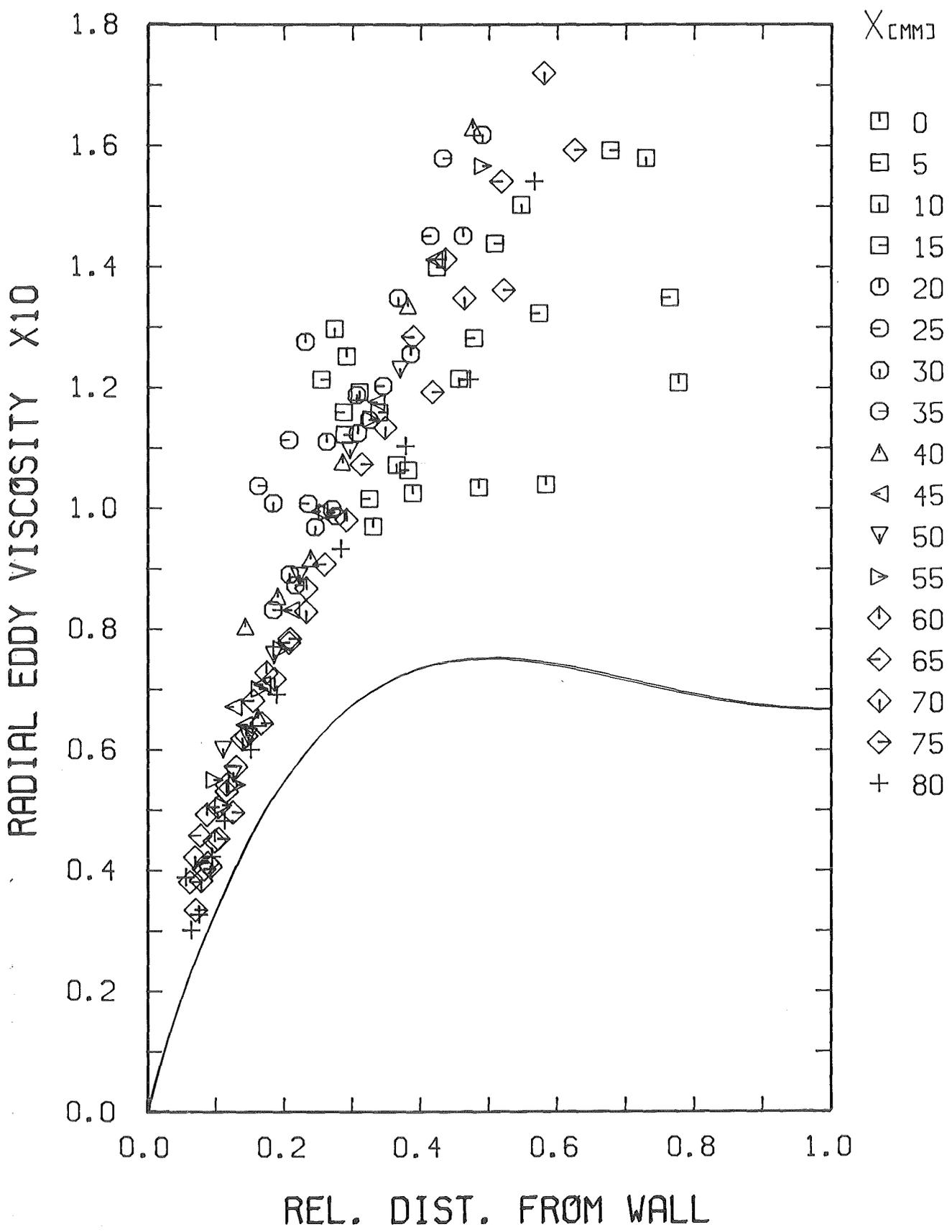


Abb.47 Wirbelviskosität senkrecht zur Wand (x/y)

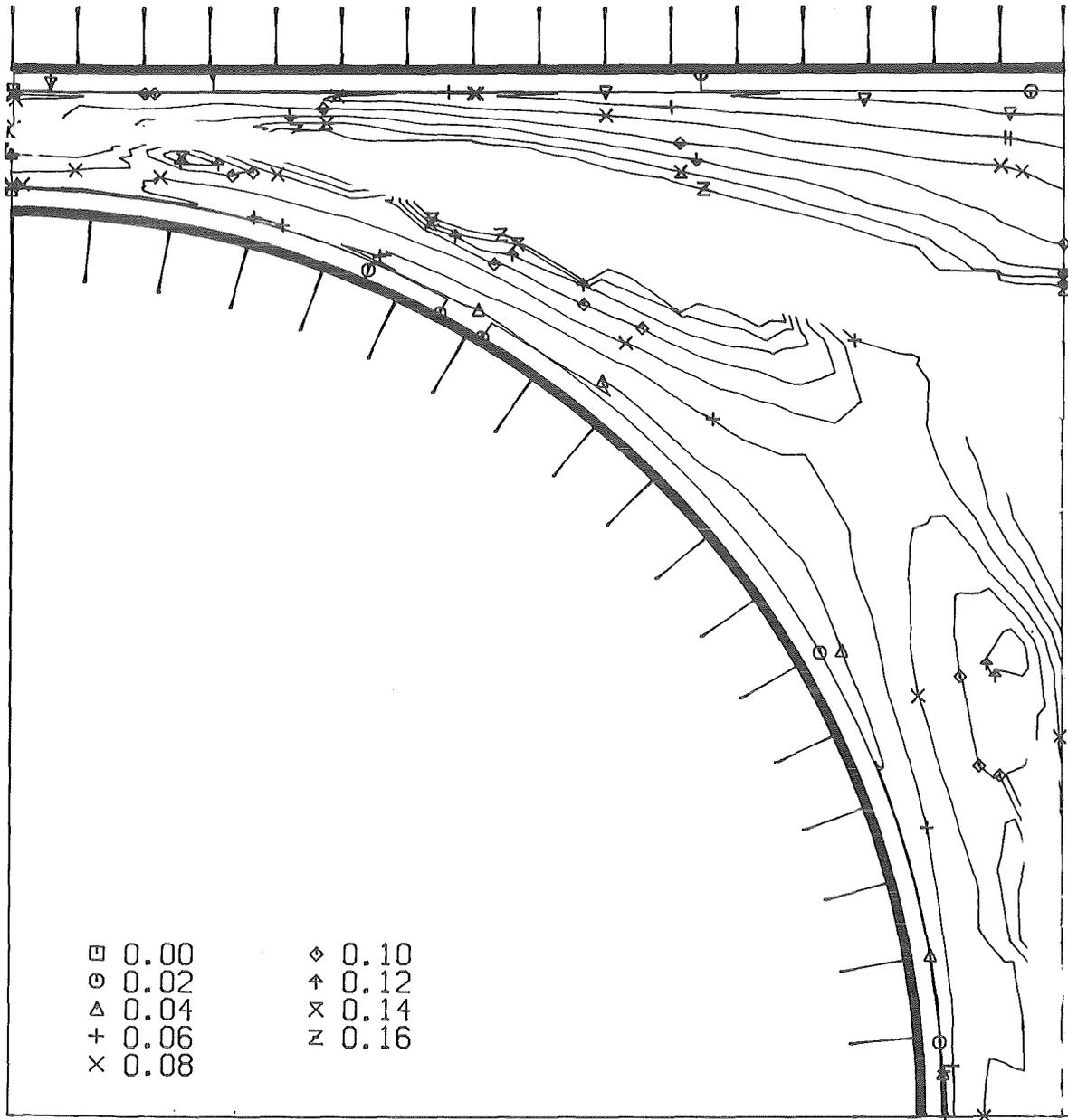


Abb.48 Wirbelviskosität senkrecht zur Wand (Höhenlinien)

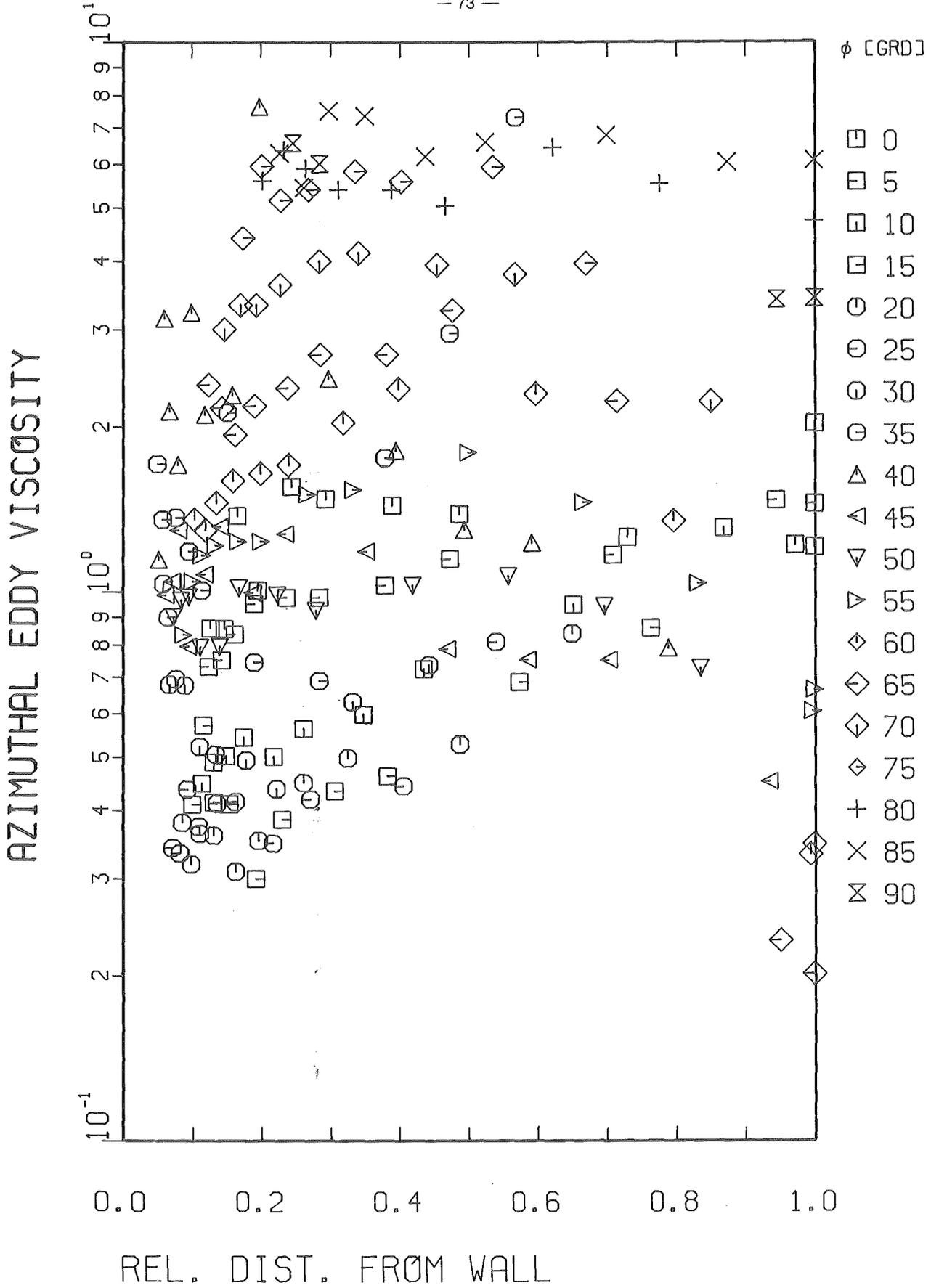


Abb.49 Wirbelviskosität parallel zur Wand (r/ϕ)

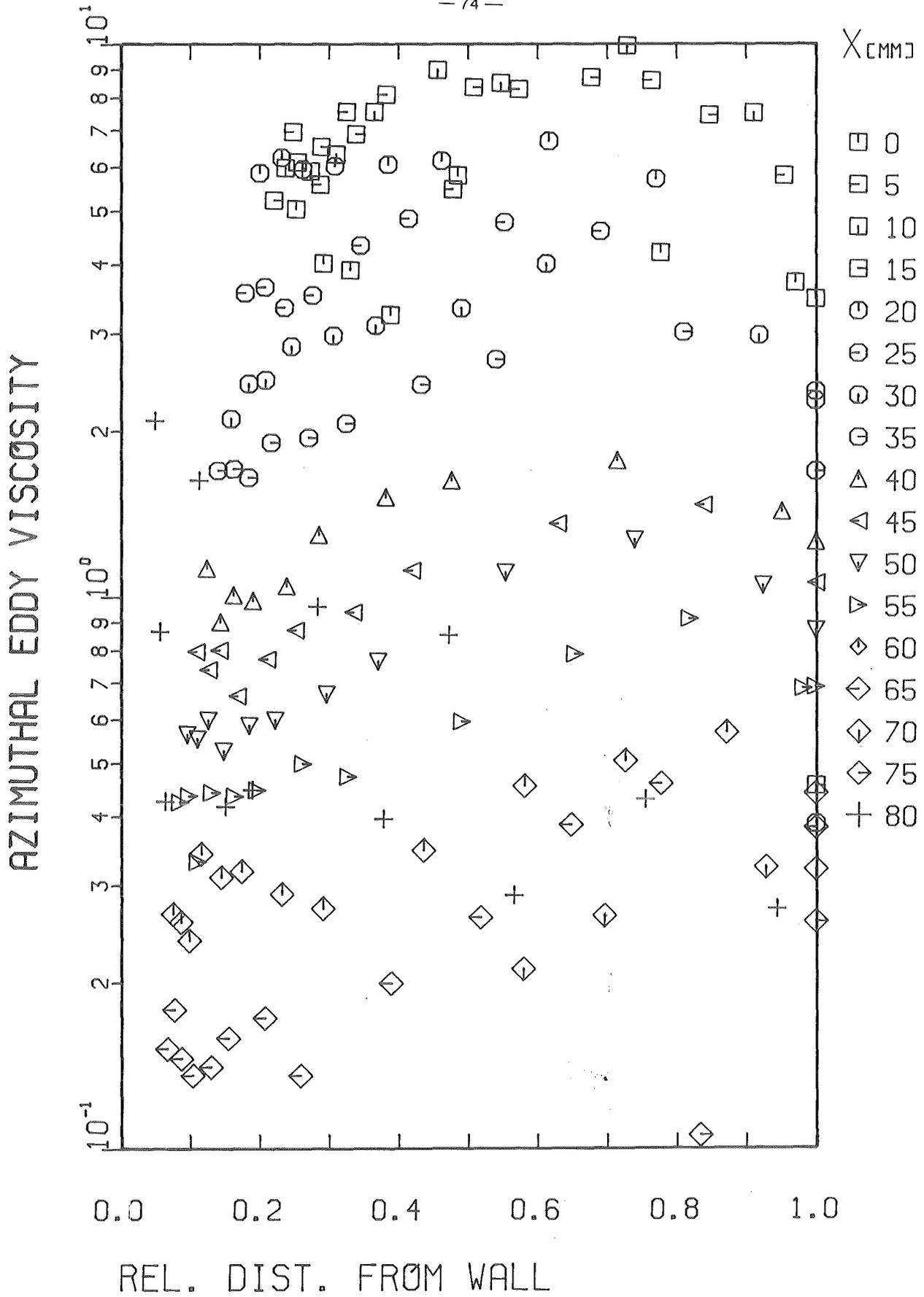
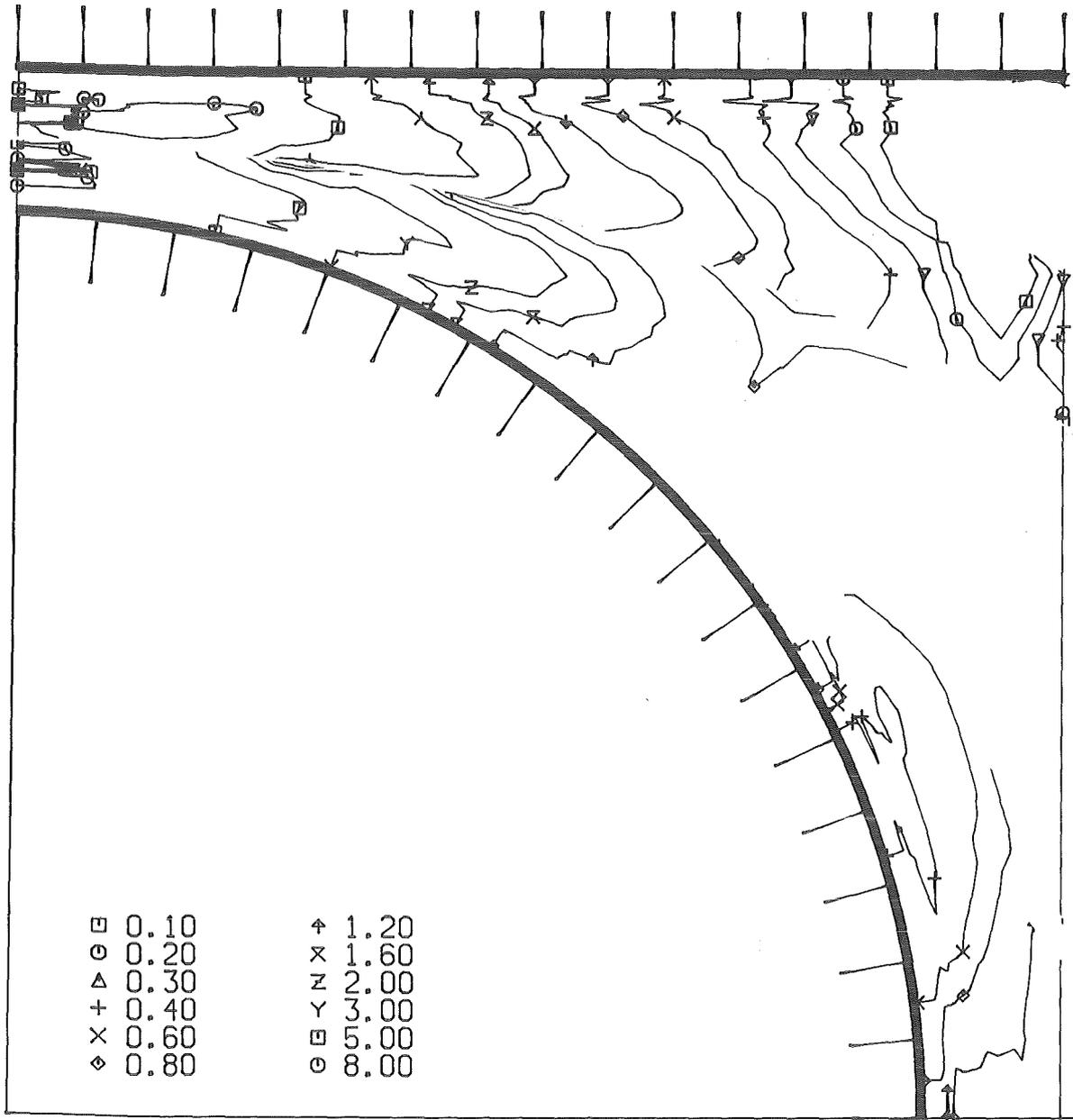


Abb.50 Wirbelviskosität parallel zur Wand (x/y)



KfK

Abb.51 Wirbelviskosität parallel zur Wand (Höhenlinien)

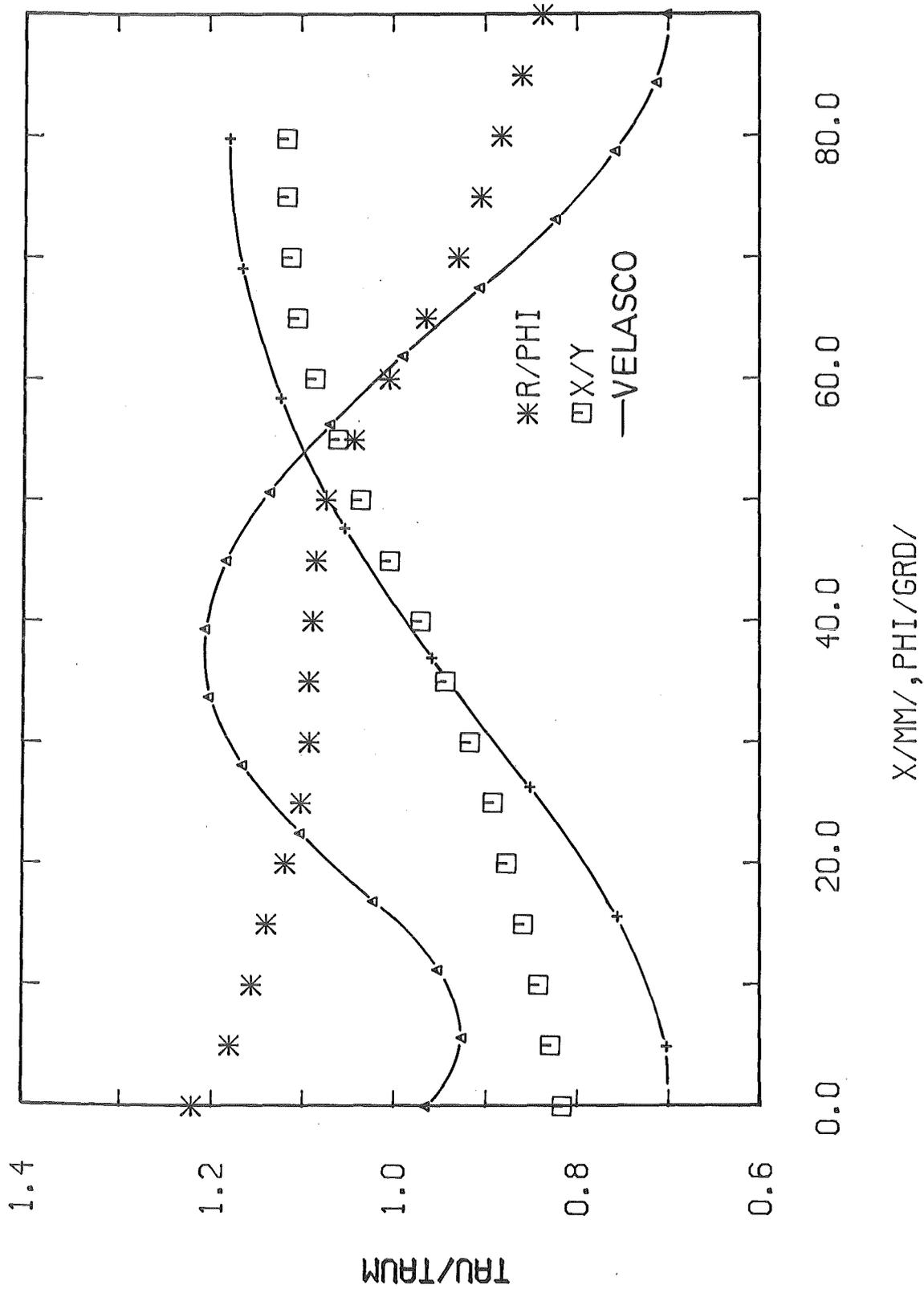


Abb. 52 Wandschubspannungsverteilungen: Vergleich mit VELASCO