

KERNFORSCHUNGSZENTRUM

KARLSRUHE

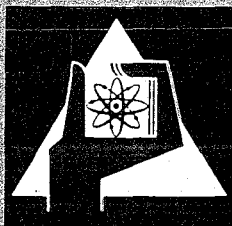
Juli 1972

KFK 1642

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Schneller Brüter

**Untersuchungen der Turbulenz- und
Schubspannungsverteilung an einem
Kreisrohr mit einem Hitzdraht-Anemometer**

K. Rehme



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Juli 1972

KFK 1642

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik

Projekt Schneller Brüter

Untersuchungen der Turbulenz- und
Schubspannungsverteilung an einem
Kreisrohr mit einem Hitzdraht-Anemometer

von

K. Rehme

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

Zusammenfassung

Um ein DISA-Hitzdraht-Anemometer für experimentelle Untersuchungen der Schubspannungs- und Turbulenzverteilungen bei turbulenten Strömungen zu verwenden, wurde ein Eichversuch mit einem Kreisrohr durchgeführt. Für Kreisrohre kann die Schubspannungsverteilung theoretisch ermittelt werden, außerdem sind eine Reihe von Arbeiten bekannt, in denen über Meßergebnisse von Turbulenzgrößen berichtet wird. Zur Auswertung wird eine von B. KJELLSTRÖM entwickelte Methode $\langle \bar{I} \rangle$ verwendet. Die Untersuchungen wurden für Reynoldszahlen zwischen $2 \cdot 10^4$ und $2 \cdot 10^5$ für eine Rohrlänge von 75 Rohrdurchmesser durchgeführt. Die experimentellen Ergebnisse der Schubspannungsverteilung sind in ausgezeichneter Übereinstimmung mit den theoretischen Werten; die gemessenen Turbulenzgrößen stimmen sehr gut mit den in der Literatur verfügbaren Werten überein.

Abstract

To use a DISA hot-wire anemometer for the experimental investigation of shear stress and turbulence of turbulent flow a test was performed in a circular channel. For circular tubes the shear stress distribution can be obtained theoretically and, besides, a number of papers is known in the literature communicating the measurements of turbulence intensities. For the evaluation of the data a method developed by B. KJELLSTRÖM $\langle \bar{I} \rangle$ is adopted. The measurements were conducted for Reynolds numbers ranging between $2 \cdot 10^4$ and $2 \cdot 10^5$ at a position of 75 tube diameters. The experimental results of the shear stress distribution are in excellent agreement with the theoretical values; the experimental turbulence intensities are in very good agreement with the data published in the literature.

1. Einleitung

In den letzten Jahren hat es sich gezeigt, daß die Gesetzmäßigkeiten für turbulente Strömungen, die an symmetrischen Strömungen (Kreisrohren und parallelen Platten) gewonnen wurden, nicht ohne weiteres auf nichtkreisförmige Kanäle übertragen werden können. Insbesondere zeigte eine Analyse experimenteller Ergebnisse mit asymmetrischen Strömungen, daß eine Koinzidenz von Geschwindigkeitsmaximum und Nullschubspannung im Gegensatz zu symmetrischen Strömungen nicht vorliegt [2]. Da die vorliegenden experimentellen Untersuchungen nicht ausreichen, um die Besonderheiten asymmetrischer Strömungen zu beschreiben und da es darüber hinaus erforderlich zu sein scheint, die in den hoch entwickelten Rechenprogrammen zur Berechnung der Strömungs- und Temperaturverteilung in nichtkreisförmigen Kanälen enthaltenen Annahmen über die Transporteigenschaften [3,4,5,6] der turbulenten Strömung experimentell zu überprüfen, wurde entschieden, diese Untersuchungen mit einem Hitzdraht-Anemometer durchzuführen. Damit die Genauigkeit der mit dem Hitzdraht-Anemometer ermittelten Ergebnisse abgeschätzt werden kann, wurden Eichversuche an einem Kreisrohr durchgeführt. Das Kreisrohr eignet sich für einen Eichversuch besonders gut, da es eine Reihe von Veröffentlichungen gibt, in denen über experimentelle Ergebnisse an Kreisrohren berichtet wird. Außerdem läßt sich bei Kreisrohren die Schubspannungsverteilung analytisch ermitteln.

2. Experimentelle Anordnung

2.1 Versuchsanlage

Die Versuche wurden an einem offenen Luftkreislauf (Abb.1) durchgeführt. Ein GHH-Schraubenverdichter liefert $1000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ Luft mit einem Druck von 0.4 MPa. Über einen Luftkühler, der eine Tempera-

turregelung der Luft gestattet und einen Wasserabscheider gelangt die Luft in eine Blendenmeßstrecke. Von dort tritt die Luft über ein Filter, in dem Partikel größer als 1 Mikron ausgeschieden werden und einen Schalldämpfer in die Teststrecke ein. Am Eintritt zu dieser Teststrecke liegt ein Strömungsgleichrichter, der im wesentlichen aus einer Lochplatte und einem Drallzerstörer in Form paralleler Röhrrchen besteht.

Die eigentliche Teststrecke besteht aus einem Kreisrohrkanal aus gezogenem Messing mit einem Durchmesser von $d = 99.97$ mm und einer Länge von 7500 mm. Die gesamte Länge ist aus drei Schüssen von je 2500 mm zusammengesetzt. Unmittelbar am Eintritt ist ein 80 mm langes Rohrstück mit Rechteckrippen künstlich aufgerauht, um die Ausbildung des Geschwindigkeitsprofils zu beschleunigen. Die Meßebene liegt am Ende des Rohres, wo die Luft in die Umgebung offen austritt. Abb.2 zeigt ein Bild der Gesamtanlage, Abb.4 zeigt den Rohraustritt.

2.2 Meßanordnung

2.2.1 Durchsatzmessung

Der Durchsatz wurde mit einer Normblende $\overline{17}$ mit einem Rohrdurchmesser von $D = 83$ mm und einer ungestörten Einlauflänge von 60 Durchmessern bestimmt. Die zu messenden Absolut- und Differenzdrucke wurden je nach Größe mit Rohrfederanometern Kl 0.1 (Wallace u. Tiernan), einschenkigen Quecksilbermanometern (Manoskop) oder mit einem Betz-Manometer ermittelt (Abb.3). Zur Berücksichtigung der Luftfeuchtigkeit wurden die relative Luftfeuchtigkeit und die Temperatur im Ausgangszustand gemessen. Die Lufttemperatur an der Meßblende wurde durch ein Quecksilberfederthermometer bestimmt.

2.2.2 Messung der Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen

2.2.2.1 Einstellvorrichtung

Zum Einstellen der Meßsonden (Pitotrohr bzw. Hitzdrahtgeber) wird ein Kreuzsupport benutzt, durch den die Meßsonden in zwei zueinander senkrechten Richtungen senkrecht zur Strömungsrichtung verfahren werden können. Auf dem Kreuzsupport ist ein Höhensupport montiert, der das Verfahren der Sonde in Strömungsrichtung gestattet (Abb.4). Der Kreuzsupport ist auf 0.01 mm einstellbar. Die Position der Meßsonden relativ zum Kreisrohr wird mit Hilfe eines Meßmikroskops (Fa. Zeiss) mit einer Genauigkeit von ± 0.005 mm festgelegt. Gleichzeitig wird mit diesem Meßmikroskop der Winkel gemessen, den der Hitzdraht mit der Strömungsrichtung bildet.

2.2.2.2 Pitotrohr

Der zeitliche Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit wird mit einem Pitotrohr gemessen. Dazu werden Injektionsnadeln aus Edelstahl von $d_a = 0.5$ mm Außendurchmesser und $d_i = 0.3$ mm verwendet. Die Pitotrohre sind am Meßquerschnitt sehr sorgfältig plangeschliffen und entgratet worden. Der statische Druck im Meßquerschnitt wird über eine Wandanbohrung von $d = 0.6$ mm Durchmesser bestimmt. Die beiden Drucke werden über ein Schrägrohrmanometer (Fa. Lambrecht, Göttingen) (Abb.3) gegeneinander geschaltet. Zur Bestimmung der Dichte der Luft im Meßquerschnitt werden der statische Druck, ebenfalls über ein Schrägrohrmanometer, und die Lufttemperatur mit einem geeichten Quecksilberthermometer gemessen. Die gemessene Verteilung des zeitlichen Mittelwerts der Strömungsgeschwindigkeit wird zur Eichung der Hitzdrahtgeber benutzt.

2.2.2.3 Hitzdraht-Anemometer

Als Hitzdraht-Anemometer wird ein Konstant-Temperatur-Anemometer der Fa. DISA verwendet (Abb.3). Das Gebersignal wird dem Anemometer (55D01) zugeführt, von dort über ein Hilfsgerät (55D25) zur Messung der Ausgangsspannung an ein 4-Digit Digitalvoltmeter (Phillips) bzw. zur Messung des Effektivwertes des Wechselspannungsanteils über ein Effektivwertvoltmeter (55D35) ebenfalls an das Digitalvoltmeter (Abb.5).

Zur optimalen Einstellung des Verstärkerkreises wird ein Oszillograph - RM15 - (Rohde u. Schwarz) benutzt. Die Bedienung wird nach der Gebrauchsanweisung der Fa. DISA vorgenommen [8].

Als Geber werden Miniaturgeber (DISA) verwendet, gerade Geber 55F31 und schräge Geber zur Messung unter 45° zur Strömungsrichtung 55F32, die in einem Geberhalter 55A21 eingebaut sind.

3. Auswertungsverfahren

Die Ergebnisse wurden mit einem Rechenprogramm ermittelt. Die Grundgleichungen sollen hier kurz aufgeführt werden.

3.1 Geschwindigkeitsprofil

Der zeitliche Mittelwert der Geschwindigkeit u ergibt sich aus den Pitotrohrmessungen zu

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_f}} \quad (1)$$

mit Δp als dem Differenzdruck und ρ_f als der Dichte der feuchten Luft. Diese Dichte wird nach [9] ermittelt zu

$$\rho_f = \rho_{tr} + \varphi \cdot \rho_{WD} \quad (2)$$

mit der Dichte ρ_{tr} der trockenen Luft, die mit einem Rechenprogramm nach [10] aus dem Druck der trockenen Luft ($p - \varphi p_{WD}$) und der Lufttemperatur T_L bestimmt wird, der relativen Feuchte φ und der Dichte des Wasserdampfes ρ_{WD} , die sich ergibt aus

$$\rho_{WD} = \frac{p_{WD}}{R_{WD} T_L} \quad (3)$$

mit R_{WD} als der Gaskonstanten für Wasserdampf.

Alle Geschwindigkeitsmessungen sind korrigiert worden nach Mac Millan [11] wegen des Zähigkeitseinflusses auf das Pitotrohr an der Wand. Außerdem wurden die Geschwindigkeitsmessungen korrigiert wegen des Einflusses der Turbulenzintensitäten auf die Druckanzeige im Pitotrohr:

$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{pitot}} = \sqrt{1 - \frac{\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}}{\bar{u}_{pitot}^2}} \quad (4)$$

nach einer Angabe von EIFLER [12], die sich auf die Turbulenzintensitäten nach Messungen von LAUFER [13] stützt.

3.2 Turbulenzmessungen

Zur Berechnung der Turbulenzintensitäten und der Schubspannung in der Strömung wurde die von KJELLSTRÖM [1,14] entwickelte Auswertmethode verwendet, die von DURST u.a. [15] als sehr genaue Ergebnisse liefernde Methode bestätigt wurde.

Aus dem Gesetz für die Wärmeabfuhr von einem Draht von Collis und Williams [16] erhält man nach [17]

$$\beta^2 \overline{v'^2} = \frac{c^2}{\overline{u}^2} \left[\overline{u'^2} + \left(\frac{1 - k^2}{\tan \psi + k^2 \cot \psi} \right)^2 \overline{r'^2} + \right. \\ \left. 2 \frac{1 - k^2}{\tan \psi + k^2 \cot \psi} \overline{u'r'} \right] \quad (5)$$

wobei v' die Schwankungsgröße der angelegten Spannung \overline{V} , u' und r' die Schwankungsgeschwindigkeiten in axialer bzw. radialer Richtung, ψ der Winkel, unter dem der Draht gegen die Strömung angestellt ist und c der Exponent des Gesetzes von Collis und k ein Koeffizient für die Richtungsempfindlichkeit ist.

Mit der angelegten Spannung \overline{V}_0 bei Geschwindigkeit gleich null ist

$$\beta = \frac{2\overline{V}}{\overline{V}^2 - \overline{V}_0^2} \quad (6)$$

Die Messung mit einer geraden Sonde ($\psi = 90^\circ$) ergibt die Turbulenzintensität in axialer Richtung zu

$$\overline{u'^2} = \frac{\overline{u}^2}{c^2} \left(\frac{2\overline{V}}{\overline{V}^2 - \overline{V}_0^2} \right)^2 \overline{v'^2} \quad (7)$$

Wird mit einer schrägen Sonde mit je einem Anstellwinkel ψ_a und ψ_b gemessen, so kann die radiale Turbulenzintensität und die Schubspannung ermittelt werden aus:

$$2 \overline{u'r'} + \frac{1 - k^2}{\tan \psi_a + k^2 \cot \psi_a} \overline{r'^2} = \quad (8)$$

$$\frac{\tan \psi_a + k^2 \cot \psi_a}{1 - k^2} \left[\frac{\overline{u}^2}{c^2} \beta_a^2 \overline{v_a'^2} - \overline{u'^2} \right]$$

$$2 \overline{u'r'} + \frac{1 - k^2}{\tan \psi_b + k^2 \cot \psi_b} \overline{r'^2} = \quad (9)$$

$$\frac{\tan \psi_b + k^2 \cot \psi_b}{1 - k^2} \left[\frac{\overline{u}^2}{c^2} \beta_b^2 \overline{v_b'^2} - \overline{u'^2} \right]$$

In der Regel macht man die Messungen mit der gleichen Sonde, wobei sie um 180° gedreht wird. Ist im Idealfall $\psi_B = 180^\circ - \psi_a$, so ergibt sich aus (8) und (9)

$$\overline{r'^2} = \left(\frac{\tan \psi + k^2 \cot \psi}{1 - k^2} \right)^2 \left[\frac{\overline{u}^2}{2c^2} (\beta_{(+)}^2 \overline{v_{(+)}'^2} + \beta_{(-)}^2 \overline{v_{(-)}'^2}) - \overline{u'^2} \right] \quad (10)$$

und

$$-\rho \overline{u'r'} = \frac{\rho \overline{u}^2}{4c^2} \frac{\tan \psi + k^2 \cot \psi}{1 - k^2} \left[\beta_{(-)}^2 \overline{v_{(-)}'^2} - \beta_{(+)}^2 \overline{v_{(+)}'^2} \right] \quad (11)$$

wobei (+) und (-) jeweils zu den Anströmwinkeln ψ bzw. $180^\circ - \psi$ gehören.

Der Exponent des Gesetzes von Collis c wurde über eine Eichkurve der jeweiligen Sonde bestimmt. Dazu wurden jeweils die Geschwindigkeitsverteilungen mit dem Pitotrohr benutzt. Man erhält einen Wert c_e für eine bestimmte mittlere Geschwindigkeit \bar{u}_e . Die Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit wird nach Kjellström [1] berücksichtigt durch

$$c = c_e - 0.0007782 \rho_f (\bar{u} - \bar{u}_e) \quad (12)$$

Für die Richtungsempfindlichkeit wurde die ebenfalls von Kjellström [1] stammende Beziehung

$$k^2 = 0.0505 - 0.000415 \rho_f \bar{u} \quad (13)$$

verwendet.

4. Ergebnisse

4.1 Druckverlust

Der Druckverlustbeiwert λ ist definiert zu

$$\lambda = \frac{\Delta p / \Delta L}{\frac{\rho_f}{2} \bar{u}_m^2} \quad (14)$$

mit \bar{u}_m als der über den Strömungsquerschnitt gemittelten Strömungsgeschwindigkeit.

Die Reynoldszahl errechnet sich über die Beziehung

$$Re = \frac{\rho_f \bar{u}_m d}{\eta} \quad (15)$$

wobei η die dynamische Viskosität bedeutet.

Der statische Druck wurde für verschiedene Längen gemessen. Nachdem die Meßergebnisse für den Druckverlustbeiwert λ anfänglich eine Streuung von $\pm 10\%$ aufwiesen, konnte durch mehrmaliges sorgfältiges Bearbeiten der Druckanbohrungen die Ursache für diese Streuung, Grate der Druckmeßstellen, beseitigt werden. Die dann erhaltenen Resultate sind für drei verschiedene Differenzlängen in Abb.6 dargestellt. Die Meßwerte stimmen innerhalb $\pm 3\%$ mit der von MAUBACH [177] angegebenen Beziehung

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.035 \lg \operatorname{Re} \sqrt{\lambda} - 0.989 \quad (16)$$

für Kreisrohre überein.

4.2 Geschwindigkeitsprofil

Zur Prüfung, ob das Geschwindigkeitsprofil voll ausgebildet ist, wurde der zeitliche Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit auf verschiedenen Radien bestimmt. Als Beispiel sind in Abb.7 für zwei um 180° versetzte Radien die Profile aufgetragen.

Die Übereinstimmung der beiden Meßreihen und damit die Symmetrie des Geschwindigkeitsprofils ist ausgezeichnet, so daß eine voll ausgebildete Strömung vorausgesetzt werden kann.

Abb.8 zeigt gemessene Geschwindigkeitsprofile in dimensionsloser Form für verschiedene Reynoldszahlen. Mit der Schubspannungsgeschwindigkeit u^*

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho_f}} \quad (17)$$

gebildet mit der Wandschubspannung τ_w , ergibt sich die dimensionslose Geschwindigkeit u^+ zu

$$u^+ = \frac{\bar{u}}{u^*} \quad (18)$$

für den dimensionslosen Wandabstand y^+

$$y^+ = \frac{\rho y u^*}{\eta}, \quad (19)$$

wobei y der Wandabstand ist.

Zum Vergleich wurde in Abb.8 das sogenannte Wandgesetz nach Nikuradse [18] miteingetragen. Die Übereinstimmung der Meßwerte mit diesem Gesetz ist ausgezeichnet, wenn man von dem für die Kernströmung charakteristischen Buckel, den auch die Messungen von Nikuradse aufweisen, absieht.

In Abb.9 sind die gemessenen Geschwindigkeitsprofile in Form des sogenannten Mittengesetzes als $(u_{\max}^+ - u_m^+)$ über dem relativen Wandabstand aufgetragen. Sie werden verglichen mit der Gleichung, die von Reichardt [19] angegeben wurde:

$$u_{\max}^+ - u_m^+ = 2.5 \ln \frac{1 + 2\left(\frac{r}{R}\right)^2}{1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2} \quad (20)$$

wobei u_{\max}^+ die dimensionslose Geschwindigkeit im Zentrum des Rohres (Maximalgeschwindigkeit) darstellt. Die Beziehung von Reichardt liefert im allgemeinen etwas höhere Werte als die Messungen; das gleiche Resultat ergab sich ebenfalls bei den Messungen von Kjellström [17].

Alle Geschwindigkeitsprofilmessungen wurden etwa 40 mm vor dem Austritt (0.4 d) durchgeführt. Eine Kontrollmessung 5 mm vor dem Austritt (0.05 d) ergab keine Abweichung der Ergebnisse von denen an der normalen Meßposition.

4.3 Turbulenzintensität

Die axiale Turbulenzintensität, bezogen auf den zeitlichen Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit in Rohrmitte $\sqrt{u'^2}/\bar{u}_{\max}$, ist in Abb.10 über der Reynoldszahl Re_{\max} , gebildet mit der Maximalgeschwindigkeit \bar{u}_{\max} , dargestellt. Im Vergleich mit den verschiedenen Literaturangaben zeigt sich, daß die Meßwerte gut mit den Meßergebnissen anderer Autoren übereinstimmen. Zum Vergleich werden die Meßergebnisse von Laufer [13], Patel [20,21], Newman und Leary [22], Pike, Jackson, Bourke und Page [23], Goldstein und Kreid [24], Pennell, Sparrow und Eckert [25] sowie die Meßergebnisse von Kjellström [1,26] und Sandborn [27] verwendet. Man erhält auf diese Weise Meßwerte über einen Reynoldszahl-Bereich von $3 \cdot 10^3$ bis $1,5 \cdot 10^6$. Es zeigt sich, daß die relative Turbulenzintensität mit steigender Reynoldszahl sinkt. Die von Sandborn [27] vorgeschlagene Beziehung

$$\frac{\sqrt{u'^2}}{\bar{u}_{\max}} = 0.144 Re_{\max}^{-0.146} \quad (21)$$

gibt zwar die Sandbornschen Meßergebnisse gut wieder, jedoch nicht die zahlreichen neuen Meßergebnisse.

Als neue Beziehung wird deshalb

$$\frac{\sqrt{u'^2}}{\bar{u}_{\max}} = 0.1128 Re_{\max}^{-0.106} \quad (22)$$

vorgeschlagen. Diese Gleichung gilt für Re_{\max} von $3 \cdot 10^3$ bis $2 \cdot 10^6$ und stellt einen guten Mittelwert aller Meßergebnisse dar.

Abb.11 und 12 zeigen die axiale bzw. radiale Schwankungsgeschwindigkeit, bezogen auf die Schubspannungsgeschwindigkeit. Als Vergleichskurve wurden die Ergebnisse von Laufer [13] eingetragen. Abgesehen davon, daß die Messungen etwas höhere Werte liefern, da die Turbulenzintensität offensichtlich mit kleinerer Reynoldszahl steigt, ergibt sich qualitativ eine sehr gute Übereinstimmung für die Verteilung über den Querschnitt.

In Abb.13 wird schließlich die gemessene Schubspannungsverteilung mit der theoretischen Schubspannungsverteilung aufgrund der gemessenen Druckverlustbeiwerte λ dargestellt. Die Übereinstimmung ist gut, bis auf die Punkte in unmittelbarer Wandnähe. Die Standardabweichungen für die axiale bzw. radiale Schwankungsgeschwindigkeit und die Schubspannungsverteilung aus den 6 Meßreihen bei $Re = 2,3 \cdot 10^5$ zeigt Abb.14. Sie wurden ermittelt mit der bekannten Beziehung

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (x-\bar{x})^2}{n-1}} \quad (23)$$

Alle gemessenen Turbulenzintensitäten und Schubspannungen sind in Tab. 1 gelistet.

5. Schlußfolgerungen

Die dargestellten Meßergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit den Literaturwerten. Daraus kann geschlossen werden, daß die verwendete Meßeinrichtung richtig arbeitet und glaubwürdige Resultate liefert. Es zeigt sich außerdem, daß das Auswerteverfahren von Kjellström auch für kleinere Reynoldszahlen als bei den Kjellströmschen Messungen vorhanden ($Re > 2 \cdot 10^5$) mit gutem Erfolg verwendet werden kann. Für die erwünschten Messungen der Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilung in

nichtkreisförmigen Kanälen mit der gleichen Meßeinrichtung können damit zuverlässige Messungen erwartet werden.

Den Herren E. Mensinger und G. Wörner sei für ihre wertvolle Mitarbeit beim Aufbau der Versuchsanlage, bei der Durchführung der Versuche und deren Auswertung, Herrn A. Roth für die Anfertigung der Diagramme sehr gedankt.

Symbole

c	Exponent im Gesetz von Collis
d	Rohrdurchmesser
D	Blendendurchmesser
k	Koeffizient der Richtungsempfindlichkeit
p	Druck
Δp	Differenzdruck
r	radiale Geschwindigkeitskomponente
R	Rohrradius
T	Temperatur
u	axiale Geschwindigkeitskomponente
u^*	Schußspannungsgeschwindigkeit
V	Spannung
V_0	Spannung bei $\bar{u} = 0$
y	Wandabstand
η	dynamische Zähigkeit
λ	Druckverlustbeiwert
ρ	Dichte

φ	relative Feuchte
ψ	Winkel gegen die Strömungsrichtung
τ_w	Wandschubspannung
σ	Varianz
Re	Reynoldszahl

Indizes

WD	Wasserdampf
tr	trocken
f	feucht
L	Luft
e	Eichung
m	über den Querschnitt gemittelt
max	maximal
+	dimensionslos
-	zeitlicher Mittelwert
!	Schwankungsgröße
a(+)	zum schrägen Geber gehörig
b(-)	

Literatur

- [/1] B. KJELLSTRÖM and S. HEDBERG
Calibration Experiments with a DISA Hot-Wire Anemometer,
Report AE-338 der Aktiebolaget Atomenergie, Stockholm
(1968)
- [/2] K. MAUBACH and K. REHME
Negative Eddy Diffusivities for Asymmetric Turbulent
Velocity Profiles?, Int. J. Heat Mass Transfer 15, pp.425-
432 (1972)
- [/3] F. HOFMANN
Geschwindigkeits- und Temperaturfelder in Brennstabbündeln
symmetrischer und asymmetrischer Geometrie,
Dissertation TU Karlsruhe (1972)
- [/4] W. EIFLER und R. NIJSING
Berechnung der turbulenten Geschwindigkeitsverteilung und
Wandreibung in exzentrischen Ringspalten,
ATKE 18 (2), 133-142 (1971)
- [/5] W. EIFLER und R. NIJSING
Berechnung der turbulenten Geschwindigkeitsverteilung und
Wandreibung in asymmetrischen Stabbündeln,
ATKE 18 (3), 189-197 (1971)
- [/6] D.J. BENDER, D.M. SWITICK
Turbulent Velocity Distribution in a Rod Bundle,
89th Winter Annual Meeting, 3rd Energy Systems Exposition,
Am. Soc. of Mechanical Engrs. New York, N.Y. (1968),
paper 68-WA/HT-36
- [/7] Durchflußmessung mit genormten Düsen, Blenden und Venturi-
düsen (VDI-Durchflußmeßregeln),
DIN 1952, August 1971

- [/8] Gebrauchsanweisung und Servicehandbuch für Typ 55D01
Anemometer Grundgerät, DISA Elektronik A/S, Herlev,
Dänemark (Juni 1969)
- [/9] K.H. PRESSER
Wärmeübergang und Druckverlust an Reaktorbrennelementen
in Form längsdurchströmter Rundstabbündel,
Report Jül-486-RB der KFA Jülich (1967)
- [/10] G. VARADI
Thermodynamische Stoffwerte von Luft,
Report TM-IN-411 des Eidgenössischen Instituts für Reaktor-
forschung Würenlingen, Schweiz (1969)
- [/11] F.A. MAC MILLAN
Experiments on Pitot-Tubes in Shear Flow,
Report and Memoranda No. 3028 Ministry of Supply (AIR) London
(February 1956)
- [/12] W. EIFLER
Über die turbulente Geschwindigkeitsverteilung und Wand-
reibung in Strömungskanälen verschiedener Querschnitte,
Dissertation TH Darmstadt (1968)
- [/13] J. LAUFER
The Structure of Turbulence in Fully Developed Flow
NACA TN 1174 (1954)
- [/14] B. KJELLSTRÖM und S. HEDBERG
Die Eichung eines DISA Hitzdrahtanemometers und Bestätigung
der Eichung durch Messungen in einem zylindrischen Kanal,
DISA-Information Nr. 9, S. 8-21 (1970)
- [/15] F. DURST, A. MELLING and J.H. WHITELAW
The interpretation of hot wire signals in low turbulence
flows, Report ET/TN/B/5 des Imperial College of Science
and Technology, London (January 1971)

- [/16] D.C. COLLIS and M.J. WILLIAMS
Twodimensional convection from heated wires at low Reynolds numbers, Journal Fluid Mech. 6, pp. 357-384 (1959)
- [/17] K. MAUBACH
Reibungsgesetze turbulenter Strömungen, Chemie-Ing.-Technik 42 (15), S. 995-1004 (1970)
- [/18] J. NIKURADSE
Gesetzmäßigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Rohren, Forschungs-Arbeiten auf dem Gebiet des Ing.-Wesens, VDI-Forschungsheft No. 356 (1932)
- [/19] H. REICHARDT
Vollständige Darstellung der turbulenten Geschwindigkeitsverteilungen in glatten Leitungen, ZAMM 31, No.7, p.208-219 (1951)
- [/20] R.P. PATEL
Measurement of the Reynolds Stresses in a circular pipe as a means of testing a DISA constant temperature Hot-wire Anemometer Technical Note 63-6, Mechanical Engineering Research Lab., Mc Gill University, Montreal (1963)
- [/21] R.P. PATEL
Reynolds Stresses in Fully Developed Turbulent Flow Down a Circular Pipe, Report No. 68-7, Mechanical Engineering Research Laboratories, Mc Gill University, Montreal (1968)
- [/22] B.G. NEWMAN and B.G. LEARY
The measurement of the Reynolds stresses in a circular pipe as means of testing a hot-wire anemometer, Department of Supply, Aeronautical Research Labs., Report A.72 (1950)

- /237 E.B. PIKE, D.A. JACKSON, P.J. BOURKE and D.I. PAGE
Measurement of turbulent velocities from the Doppler
shift in scattered laser radiation,
J. Scient. Instrum. 1, pp. 727 (1968)
- /247 R.J. GOLDSTEIN and D.K. KREID
Fluid velocity measurement from the Doppler shift of
scattered laser radiation, Heat Transfer Laboratory,
Department of Mechanical Engineering, University of
Minnesota, Minneapolis, Minnesota, Report No. 85 (1968)
- /257 W.T. PENNELL, E.M. SPARROW and E.R.G. ECKERT
Turbulence intensity and time-mean velocity distribution
in low Reynolds number turbulent pipe flows,
Int. J. Heat Mass Transfer 15, pp. 1067-1074 (1972)
- /267 B. KJELLSTRÖM and S. HEDBERG
On Shear Stress Distribution for Flow in Smooth or
Partially Rough Annuli, Report AE-243 of AB Atomenergi,
Stockholm, Sweden (1966)
- /277 V.A. SANDBORN
Experimental Evaluation of Momentum Terms in Turbulent
Pipe Flow, Report NACA 3266 (1954)

Tabelle 1

Gemessene Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen

Bedeutung der Symbole:

RER	Reynoldszahl
ROM	Dichte der feuchten Luft
QM	Durchsatz
UQAVM	mittlere Geschwindigkeit
YREL	relativer Abstand von Rohrmitte
UQ	zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit $[\bar{m/s}]$
UREL	relative axiale Turbulenzintensität
VREL	relative radiale Turbulenzintensität
TAUREL	auf Wandschubspannung bezogene Schubspannung
SIGU	Standardabweichung UREL
SIGV	" VREL
SIGTAU	" TAUREL

RER = 0.387844E 05

ROM = 1.2010 KG/M**3
QM = 0.05548 KG/S
UQAVM = 5.8895 M/S

Y REL	UQ	UREL	VREL	TAUREL
0.9612	4.5684	2.2693	1.2985	1.1440
0.9011	5.1786	1.8382	1.4390	0.9957
0.8010	5.7378	1.6916	1.3195	0.8842
0.7008	6.1588	1.5611	1.2689	0.7927
0.6007	6.4201	1.4270	1.1497	0.6159
0.5006	6.6907	1.3230	1.0452	0.5013
0.4005	6.9282	1.2041	0.9402	0.3708
0.3004	7.1030	1.0868	0.8783	0.3179
0.2002	7.2700	0.9672	0.8343	0.2176
0.1001	7.3307	0.8454	0.7907	0.0882
0.0	7.3733	0.8088	0.7724	0.0
0.1001	7.3343	0.8458	0.7911	-0.0883
0.2002	7.2232	0.9311	0.8717	-0.2147
0.3004	7.0846	1.0766	0.8876	-0.3162
0.4005	6.9245	1.2034	0.9397	-0.3704
0.5006	6.7296	1.2974	1.1039	-0.5072
0.6007	6.4282	1.4184	1.1677	-0.6174
0.7008	6.1799	1.5733	1.2624	-0.7982
0.8010	5.7650	1.6933	1.3365	-0.8926
0.9011	5.1836	1.8461	1.4303	-0.9976
0.9612	4.4527	2.4538	0.3605	-1.0864

RER = 0.912948E 05

ROM = 1.1984 KG/M**3
QM = 0.13049 KG/S
UQAVM = 13.8833 M/S

YREL	UQ	UREL	VREL	TAUREL
0.9612	10.7694	2.3185	0.9630	1.1015
0.9011	12.2098	2.2150	0.8189	1.0184
0.8010	13.5263	2.0674	0.8597	0.9431
0.7008	14.3491	1.8849	0.8657	0.8147
0.6007	14.9887	1.7461	0.7918	0.6786
0.5006	15.5352	1.5341	0.8726	0.5902
0.4005	16.0225	1.4027	0.8113	0.4610
0.3004	16.4003	1.2476	0.7256	0.3103
0.2002	16.7696	1.1123	0.7027	0.2300
0.1001	16.9704	0.9867	0.6903	0.1257
0.0	17.0623	0.9271	0.6720	0.0068
0.1001	16.9934	0.9666	0.6768	-0.0955
0.2002	16.8161	1.0588	0.6924	-0.1746
0.3004	16.5427	1.1994	0.7092	-0.2691
0.4005	16.1763	1.3281	0.7710	-0.3767
0.5006	15.7352	1.4938	0.7861	-0.4894
0.6007	15.1874	1.6765	0.7808	-0.5907
0.7008	14.5296	1.7987	0.8932	-0.7265
0.8010	13.6987	2.0117	0.8878	-0.9095
0.9011	12.3794	2.1980	0.8214	-0.9896
0.9612	10.8297	2.3083	0.9273	-1.0863

RER = 0.232754E 06

ROM = 1.1866 KG/M**3
QM = 0.3366 KG/S
UQAVM = 36.1741 M/S

YREL	UQ	UREL	VREL	TAUREL
0.9603	29.0650	2.1651	1.1871	-0.9696
0.9003	32.9782	2.0966	1.2300	-0.9748
0.8002	35.8300	1.9131	1.1417	-0.8717
0.7002	37.6408	1.7379	1.1155	-0.7686
0.6002	39.1140	1.5592	1.1042	-0.6592
0.5002	40.3693	1.4376	1.0131	-0.5782
0.4001	41.4903	1.3035	0.9427	-0.4512
0.3001	42.3493	1.1532	0.9171	-0.3382
0.2001	43.0394	1.0131	0.8420	-0.2206
0.1000	43.4933	0.9311	0.7831	-0.1069
0.0	43.7934	0.8784	0.7639	-0.0156
0.1000	43.5685	0.9017	0.7816	0.0831
0.2001	43.1154	0.9814	0.8138	0.1711
0.3001	42.5036	1.1078	0.8647	0.3124
0.4001	41.5692	1.2354	0.9435	0.4205
0.5002	40.5325	1.3859	1.0021	0.5328
0.6002	39.2837	1.5353	1.0551	0.6443
0.7002	37.8171	1.7030	1.1319	0.7766
0.8002	34.1183	1.7698	1.0976	0.7906
0.9003	33.1292	2.0839	1.2044	0.9614
0.9603	33.5283	2.4852	1.4444	1.3304

RER = 0.226546E 06

ROM = 1.1853 KG/M**3
QM = 0.3247 KG/S
UQAVM = 34.9284 M/S

YREL	UQ	UREL	VREL	TAUREL
0.9612	28.2684	2.2150	1.0811	-1.0024
0.9011	31.9821	2.1159	1.0969	-0.9661
0.8010	34.7943	1.9173	1.0735	-0.8403
0.7008	36.6219	1.7358	1.0529	-0.7569
0.6007	38.0488	1.5628	1.0197	-0.6222
0.5006	39.1869	1.4111	0.9611	-0.5316
0.4005	40.1438	1.2741	0.9002	-0.4207
0.3004	40.9412	1.1457	0.8412	-0.3134
0.2002	41.6081	1.0294	0.7764	-0.1975
0.1001	42.0625	0.9313	0.7421	-0.1013
0.0	42.2335	0.8803	0.7340	-0.0112
0.1001	42.0780	0.9085	0.7371	0.0779
0.2002	41.7182	1.0007	0.7795	0.1776
0.3004	41.0850	1.1265	0.8207	0.2900
0.4005	40.2598	1.2544	0.8792	0.3924
0.5006	39.2548	1.3955	0.9501	0.4999
0.6007	38.1886	1.5454	1.0223	0.6233
0.7008	36.6764	1.7017	1.1003	0.7606
0.8010	34.7943	1.9059	1.0809	0.8390
0.9011	31.8987	2.0910	1.1690	0.9771
0.9612	28.2684	2.1814	1.1648	0.9678

RER = 0.231536E 06

ROM = 1.1888 KG/M**3
QM = 0.3311 KG/S
UQAVM = 35.5114 M/S

YREL	UQ	UREL	VREL	TAUREL
0.9612	28.6461	2.2911	0.9346	-0.9820
0.9011	32.3880	2.1968	0.9627	-0.9630
0.8010	35.2540	2.0018	0.9286	-0.8761
0.7008	37.1432	1.8072	0.9777	-0.7845
0.6007	38.4776	1.6422	0.8906	-0.6386
0.5006	39.6671	1.4897	0.8444	-0.5188
0.4005	40.7193	1.3451	0.8075	-0.4287
0.3004	41.5297	1.2059	0.7678	-0.3166
0.2002	42.1854	1.0802	0.7198	-0.2031
0.1001	42.6169	0.9999	0.6676	-0.1057
0.0	42.8158	0.9428	0.6669	-0.0134
0.1001	42.6476	0.9719	0.6686	0.0675
0.2002	42.2628	1.0537	0.7129	0.1750
0.3004	41.6867	1.1627	0.7901	0.2890
0.4005	40.8954	1.3180	0.8312	0.3978
0.5006	39.8841	1.4708	0.8786	0.5144
0.6007	38.6326	1.5964	0.9493	0.5991
0.7008	37.2324	1.8011	0.9779	0.7716
0.8010	35.3669	1.9767	0.9992	0.8830
0.9011	32.4085	2.1983	0.9840	0.9850
0.9612	28.7155	2.2970	1.0291	1.0348

MITTELWERTE UND STANDARDABWEICHUNGEN

YREL	UREL	SIGU	VREL	SIGV	TAUREL	SIGTAU
0.9612	2.2724	0.1178	1.1402	0.1752	1.0478	0.1407
0.9011	2.1304	0.0531	1.1078	0.1136	0.9712	0.0093
0.8010	1.9141	0.0806	1.0536	0.0767	0.8501	0.0346
0.7008	1.7478	0.0464	1.0594	0.0685	0.7698	0.0102
0.6007	1.5735	0.0395	1.0069	0.0762	0.6311	0.0209
0.5006	1.4318	0.0419	0.9416	0.0673	0.5293	0.0269
0.4005	1.2884	0.0412	0.8841	0.0564	0.4185	0.0214
0.3004	1.1503	0.0336	0.8336	0.0536	0.3099	0.0184
0.2002	1.0264	0.0361	0.7741	0.0508	0.1938	0.0194
0.1001	0.9408	0.0380	0.7300	0.0516	0.0904	0.0165
0.0	0.9005	0.0327	0.7216	0.0444	0.0134	0.0019

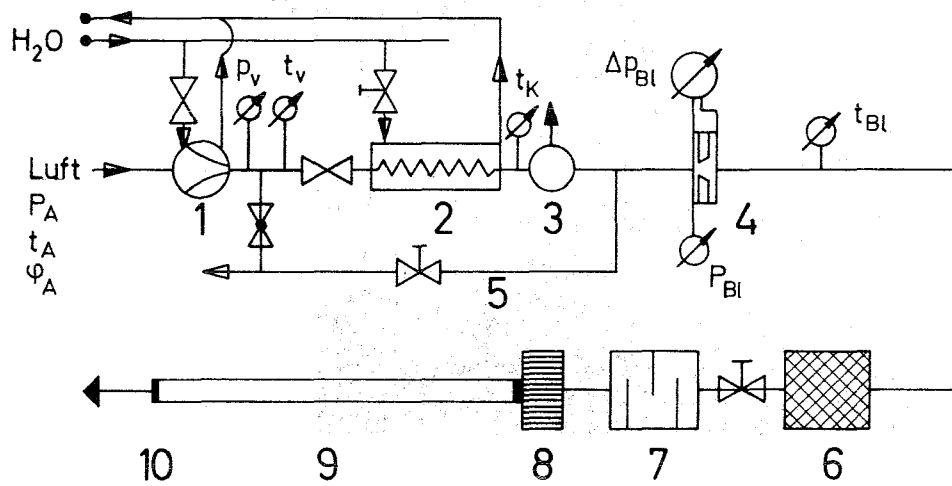
THE HISTORY OF THE UNITED STATES

CHAPTER I. THE DISCOVERY OF AMERICA

The discovery of America by Christopher Columbus in 1492 is one of the most important events in the history of the world. It opened up a new world of opportunity and led to the development of a new continent. Columbus's voyage was sponsored by the Spanish monarchs, Isabella and Ferdinand, and it was on their behalf that he set sail across the Atlantic Ocean.

Columbus's discovery of America was a result of his desire to find a new route to the East Indies. He believed that by sailing west from Europe, he could reach the Indies by a shorter route. His voyage was a great success, and it led to the establishment of a Spanish colony in America.

The discovery of America had a profound impact on the world. It led to the development of a new continent, and it opened up a new world of opportunity. It also led to the development of a new world of trade and commerce.



- | | |
|---|---|
| 1. Verdichter ($1000 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}}$, 4 bar, 80 kW) | P_v Druck am Verdichteraustritt |
| 2. Luftkühler | t_v Temperatur am Verdichteraustritt |
| 3. Wasserabscheider | t_k Temperatur Kühleraustritt |
| 4. Durchflußmessung | ΔP_{Bl} Wirkdruck an der Blende |
| 5. Bypass | P_{Bl} Druck vor der Blende |
| 6. Filter | t_{Bl} Temperatur an der Blende |
| 7. Schalldämpfer | P_A Druck am Verdichtereintritt |
| 8. Gleichrichter | t_A Temperatur am Verdichtereintritt |
| 9. Teststrecke | ϕ_A rel. Feuchte am Verdichtereintritt |
| 10. Offener Austritt (Meßebene) | |

Abb.1

Versuchsanlage (schematisch)

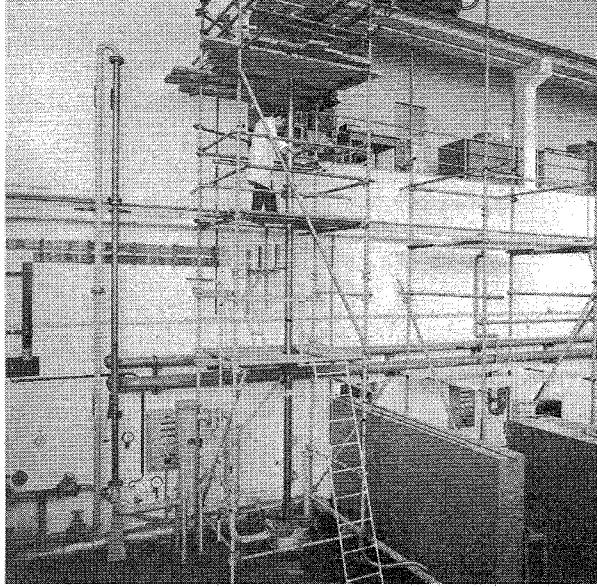


Abb.2 Gesamtansicht der Versuchsanlage

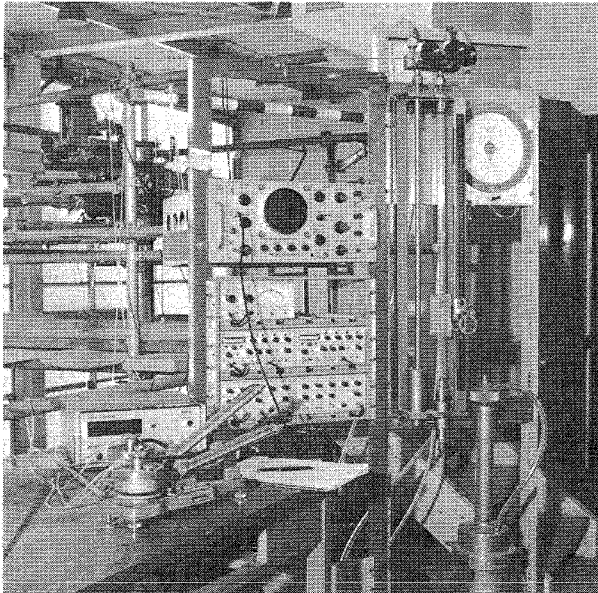


Abb.3 Meßplatz

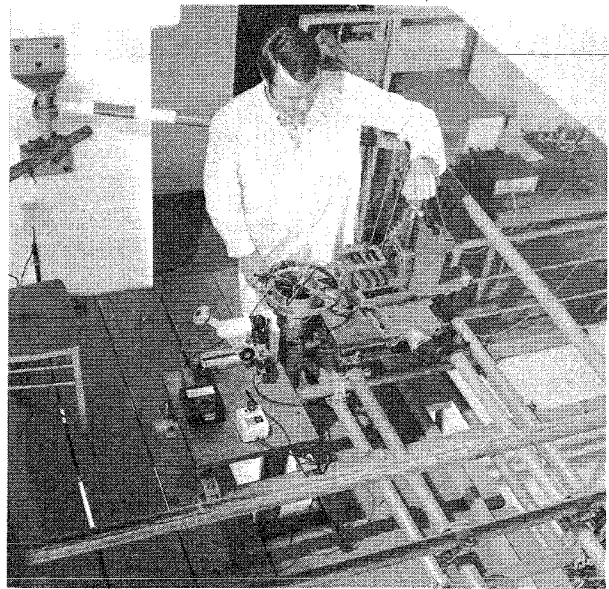
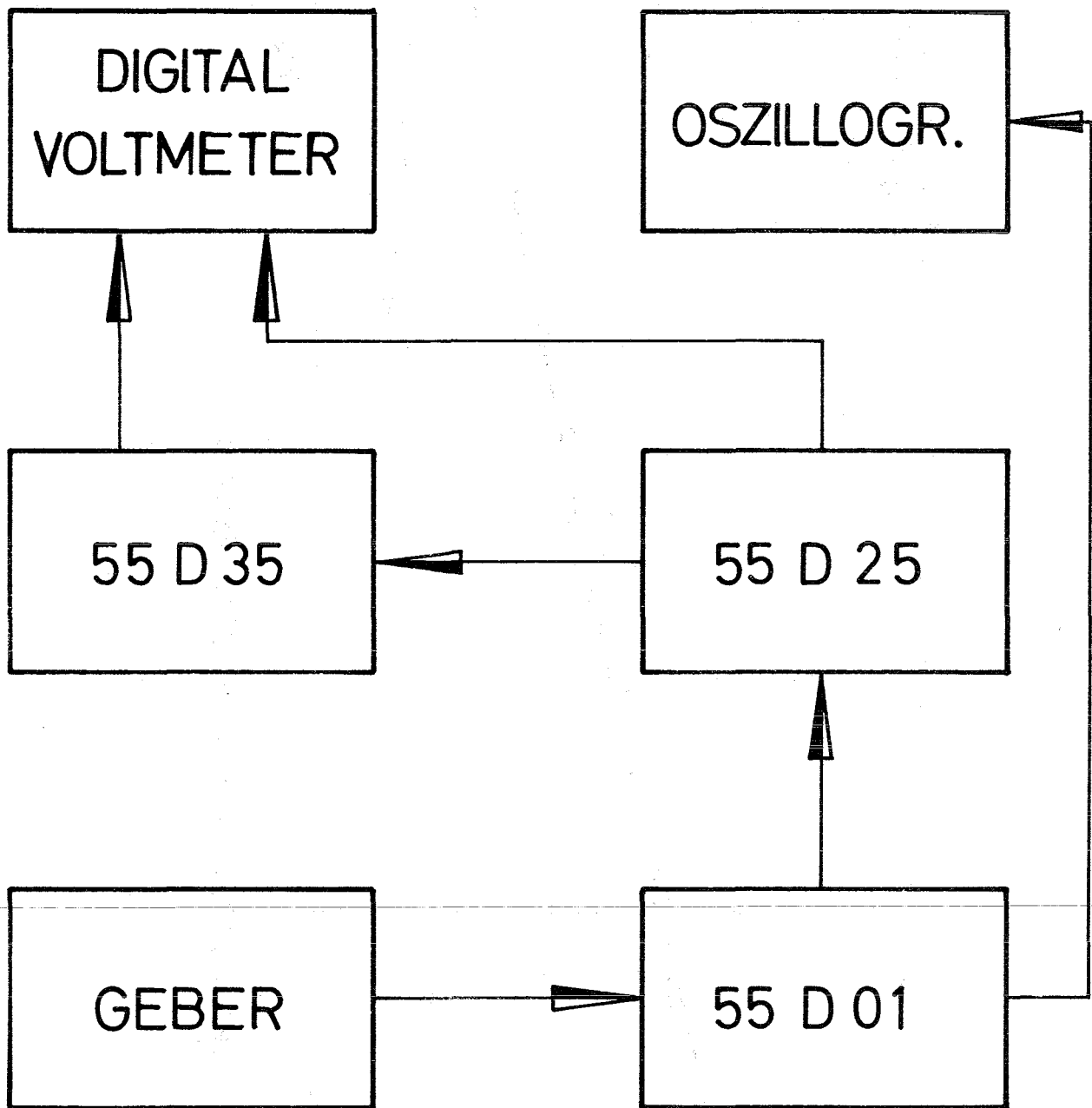


Abb.4 Meßebene



Versuchsaufbauten zur Messung der
Turbulenzintensität

Abb. 5

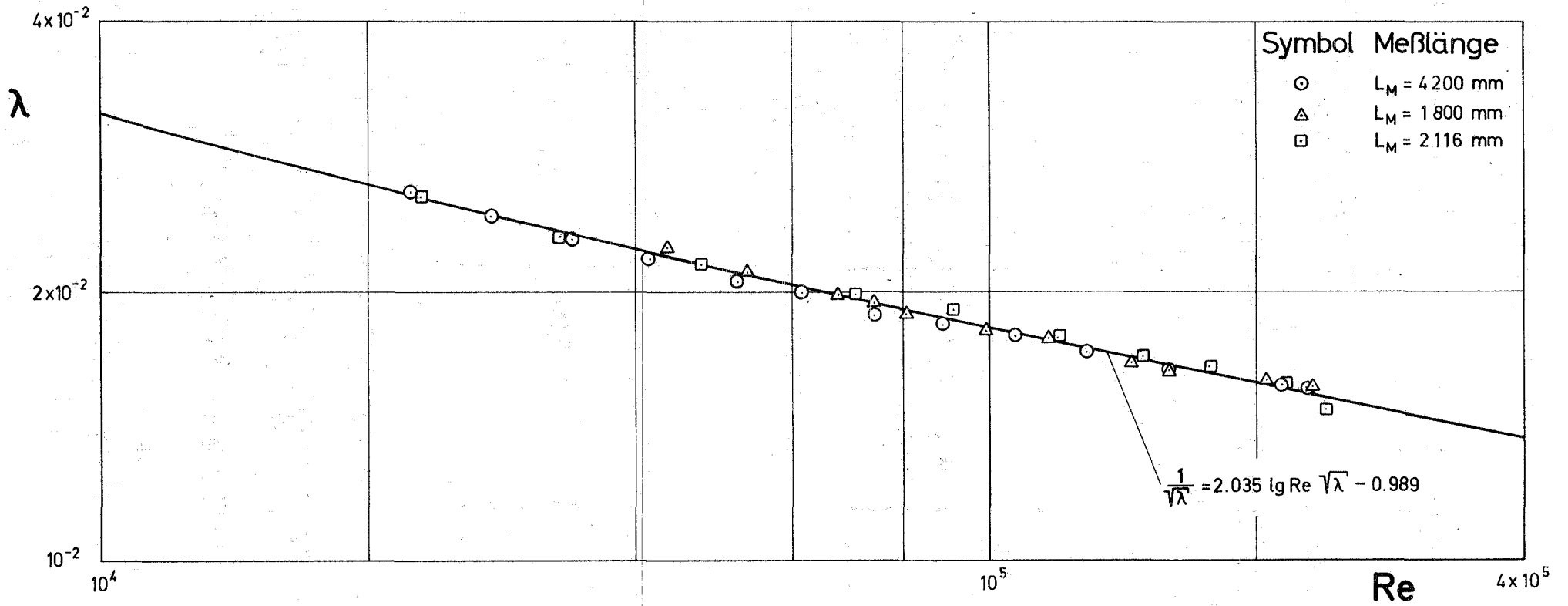


Abb. 6

Gemessene Druckverlustbeiwerte

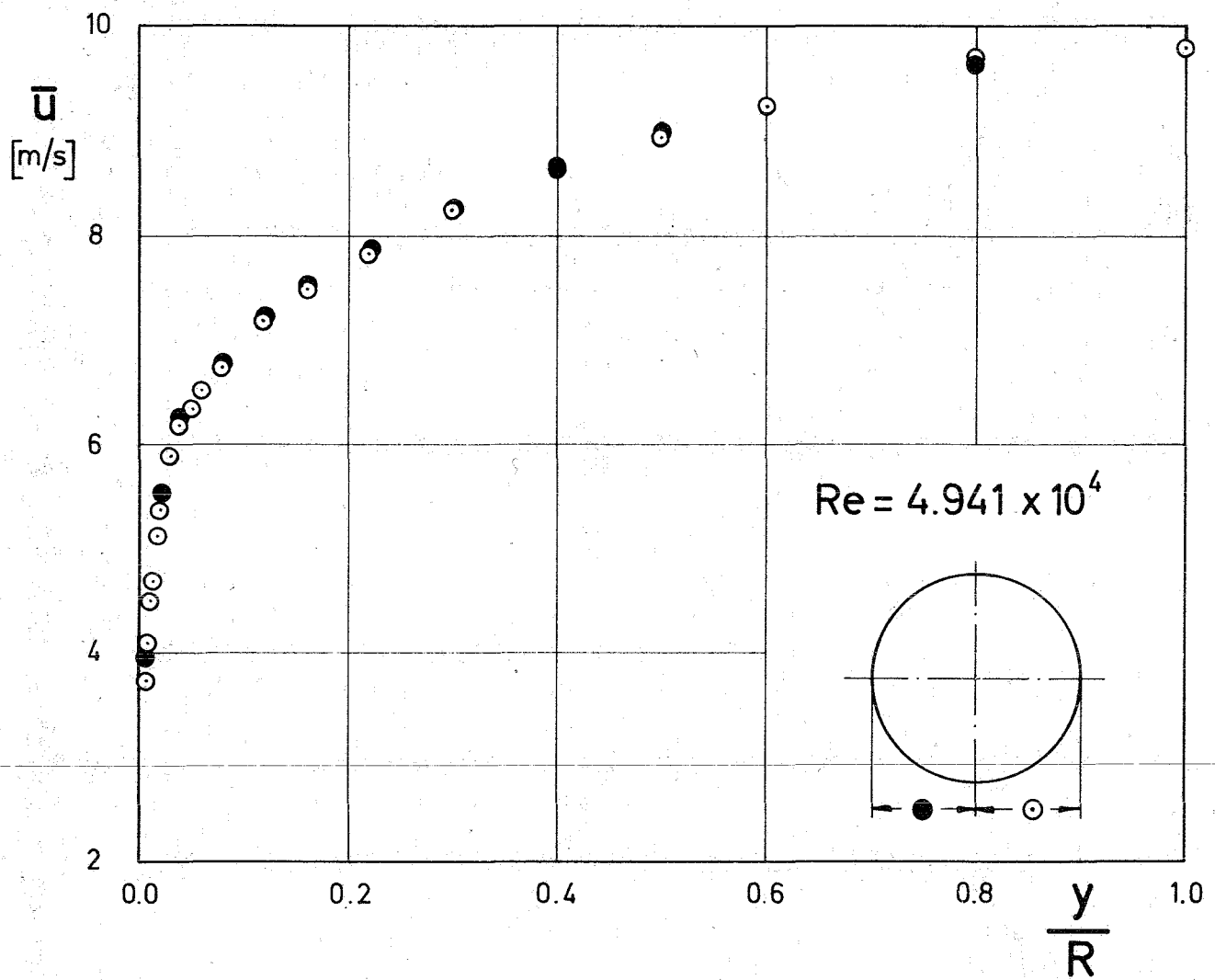


Abb.7

Gemessene Geschwindigkeitsprofile

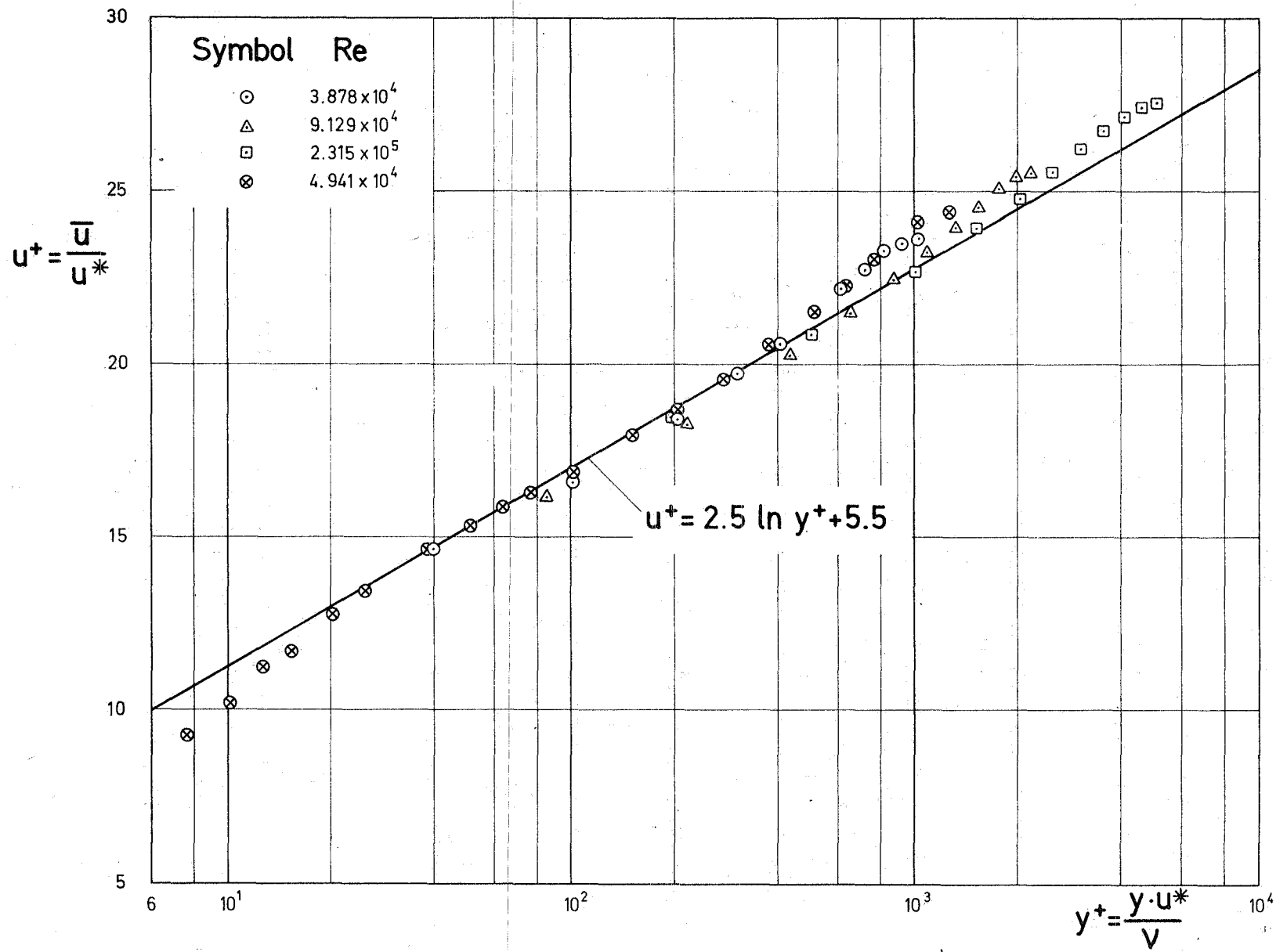


Abb. 8

Gemessene Geschwindigkeitsprofile (Wandgesetz)

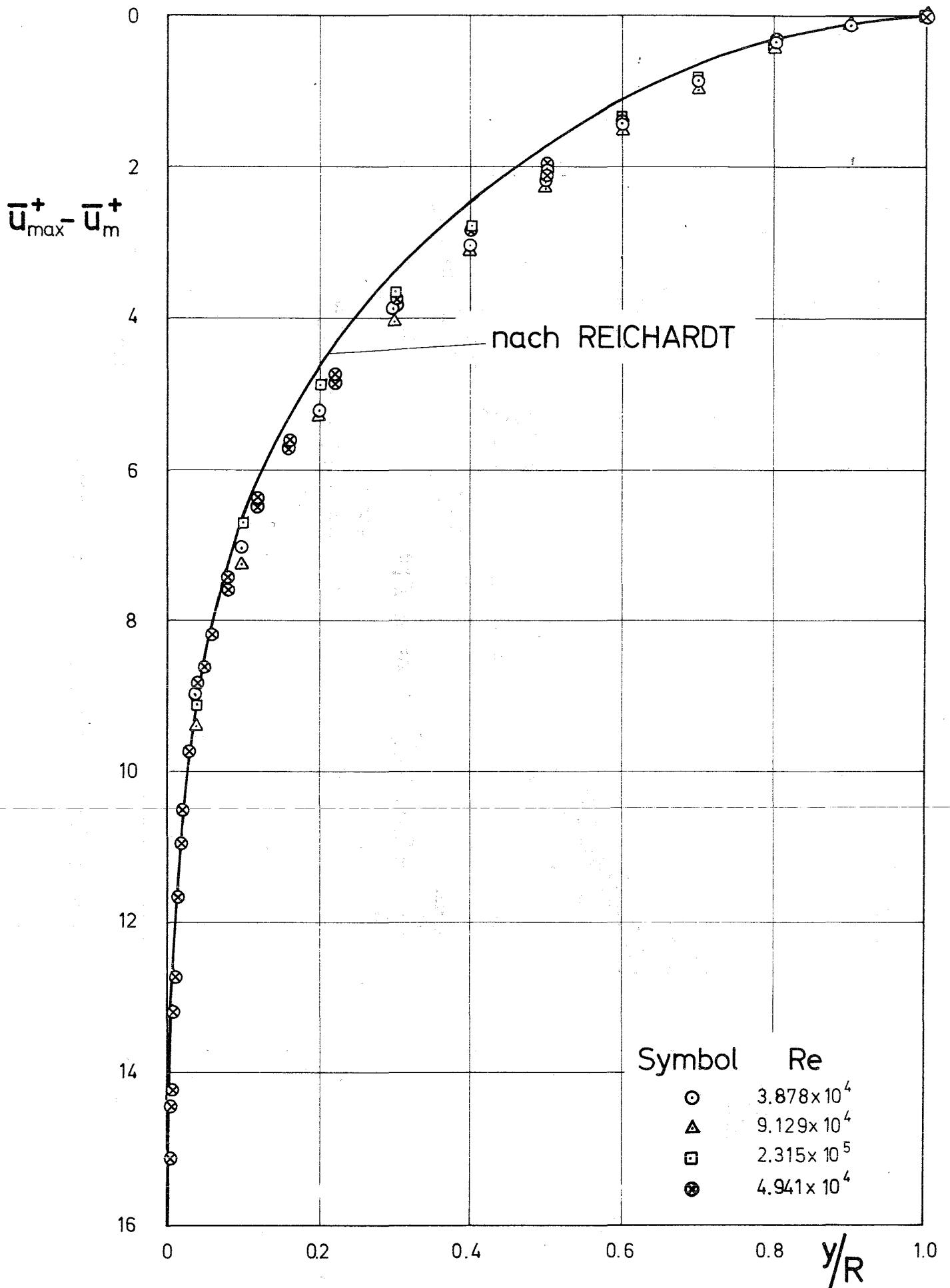


Abb.9

Gemessene Geschwindigkeitsprofile (Mittengesetz)

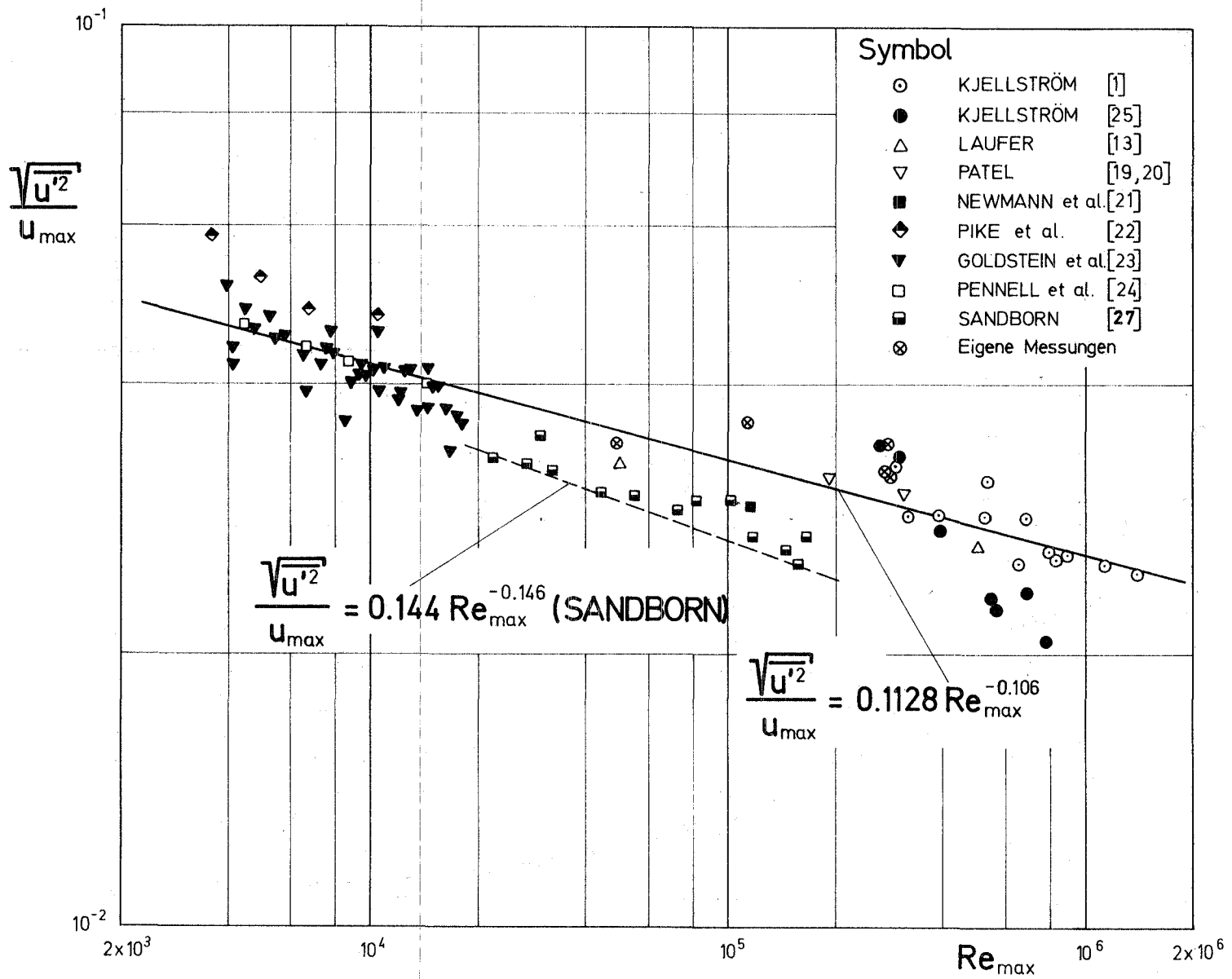


Abb. 10

Axiale Turbulenzintensität in Rohrmitte

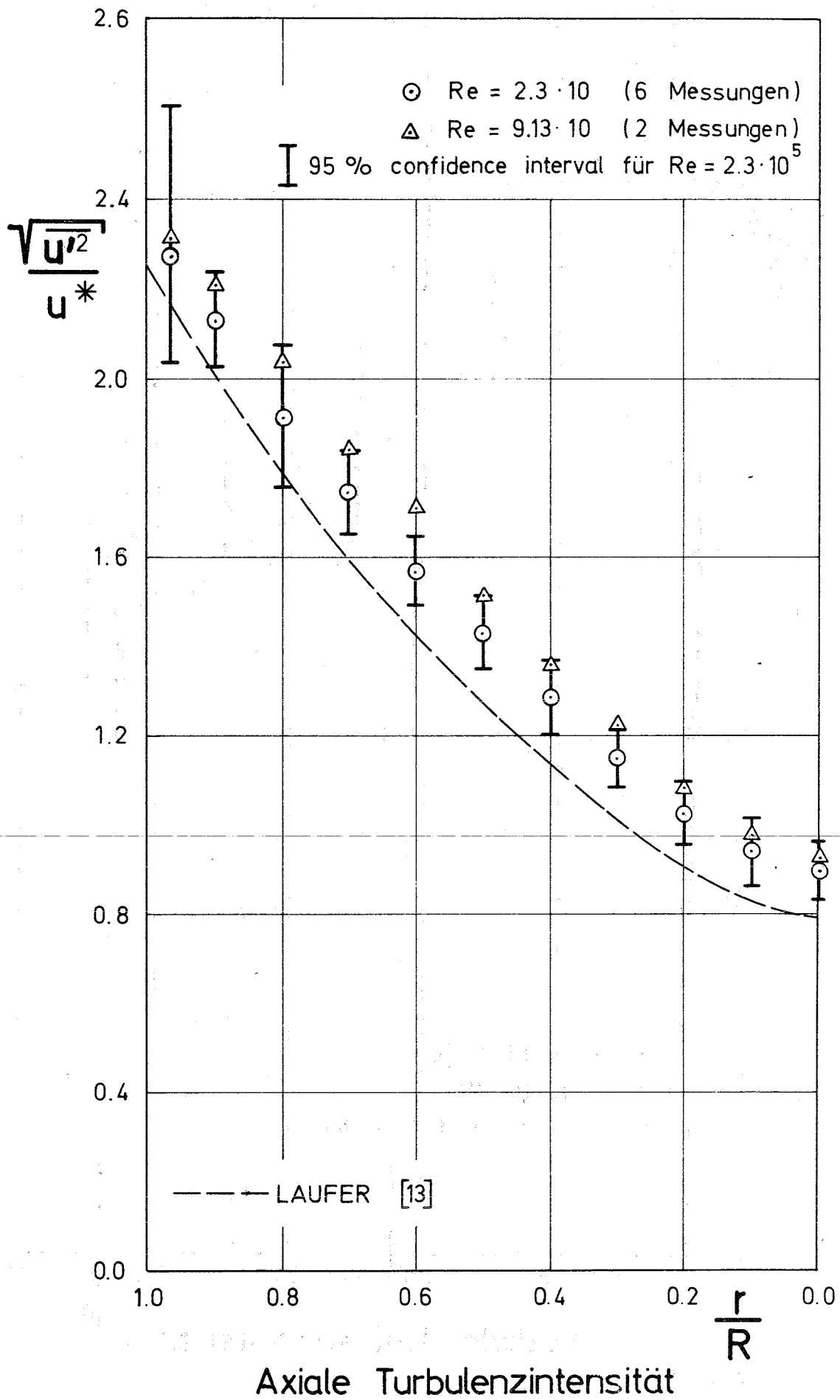


Abb. 11

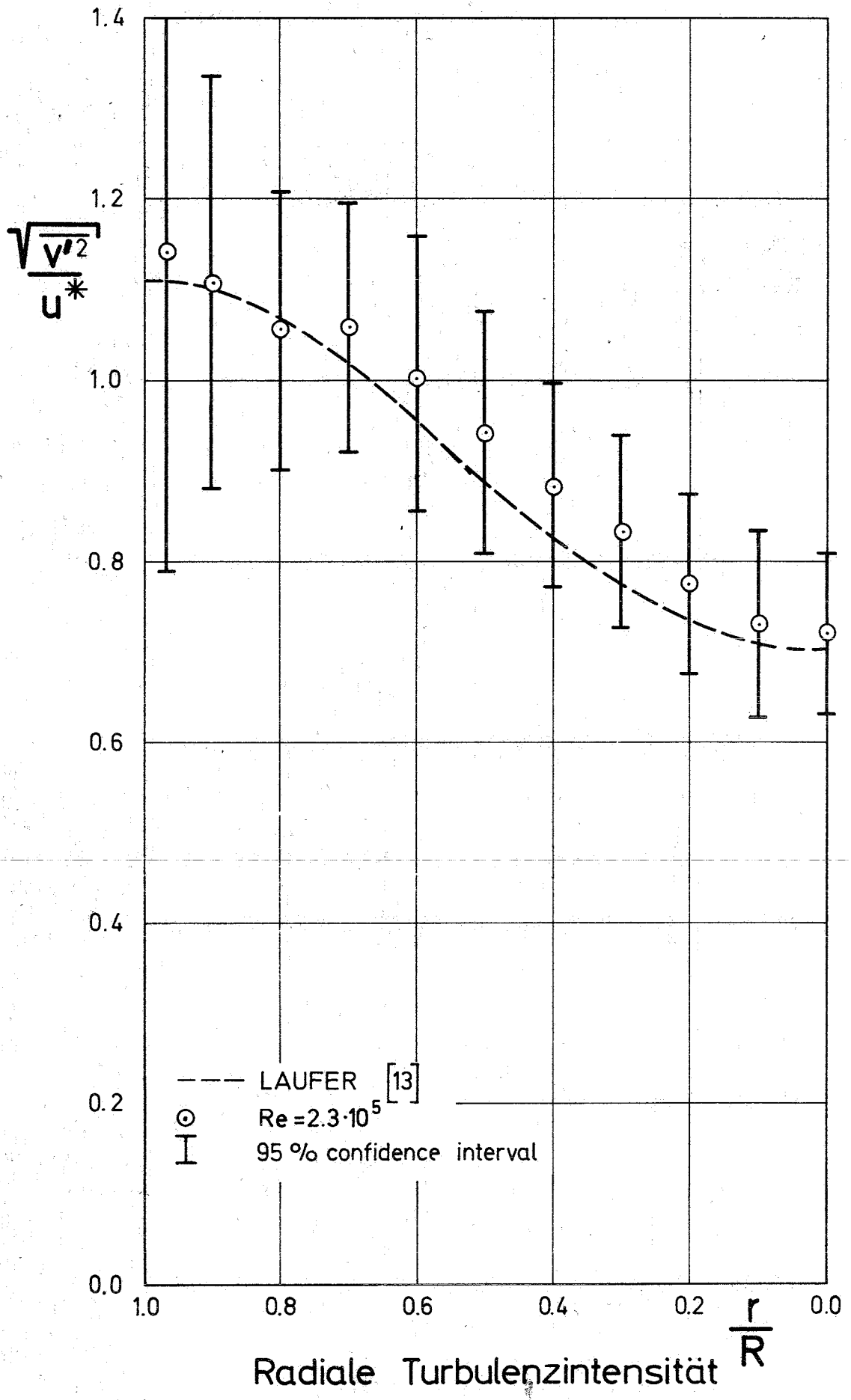
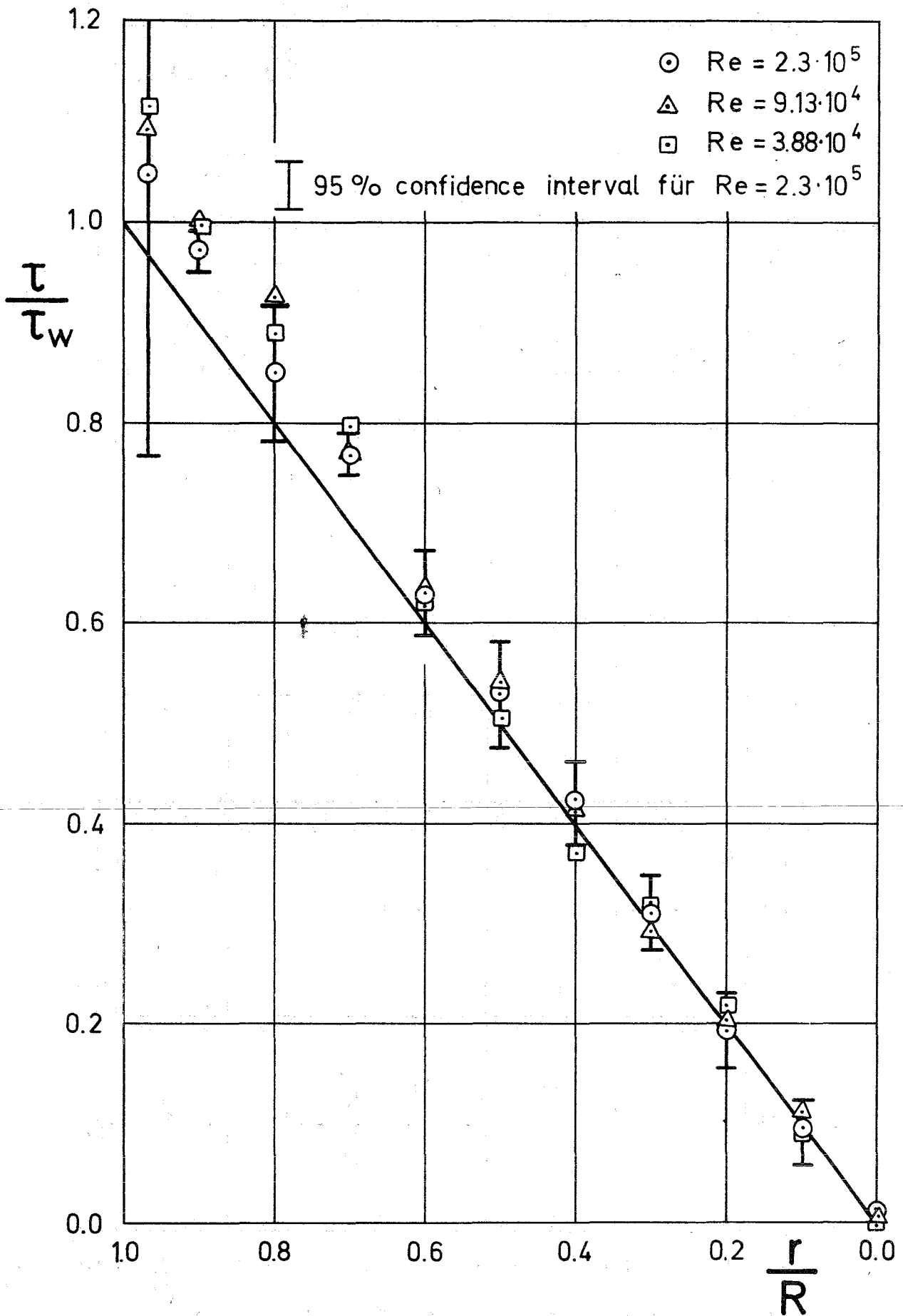
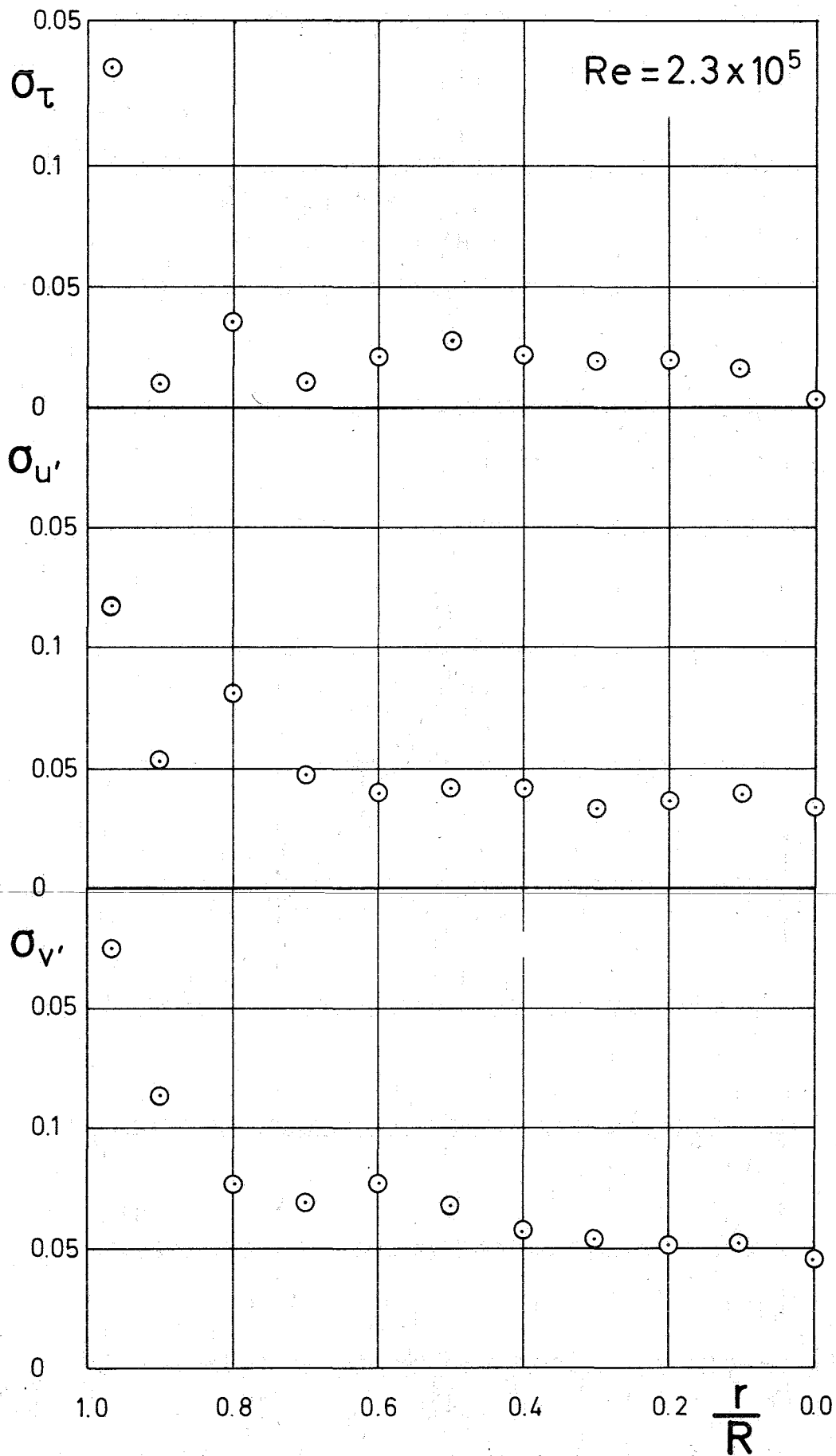


Abb. 12



Gemessene Schubspannungsverteilung

Abb. 13



Standardabweichungen der Turbulenzmeßwerte

Abb. 14