

Einige Erfahrungen beim Einsatz von Hitzdrahtsonden nahe einer festen Wand

K. Graichen

1. Einleitung

Die Hitzdrahtmeßtechnik ist ein verbreitet angewendetes Verfahren zur Untersuchung turbulent verlaufender Strömungsvorgänge. Beim Einsatz dieser Meßtechnik sind zahlreiche meßmethodische Fragen zu klären, die im Überblick zum Beispiel in [1], [2] umrissen sind.

In der vorliegenden Arbeit werden einige Erfahrungen mitgeteilt, die die Kenntnisse über die Einsatzmöglichkeiten der Hitzdrahtmeßtechnik bei der Untersuchung wandnaher Zonen turbulenter Grenzschichtströmungen ergänzen.

Beim Einsatz von Hitzdrahtsonden zur Untersuchung turbulenter Wandgrenzschichten wird in der Fachliteratur insbesondere auf zwei Effekte aufmerksam gemacht, die u. U. zu erheblichen Fehlern im Meßresultat führen können:

- einen zusätzlichen Wärmeleitungseffekt vom „heißen“ Hitzdraht zur i. allg. kälteren Wand, der auf das unterschiedliche Wärmeleitvermögen von Fluid und Wandmaterial zurückzuführen ist und der sich nur bemerkbar macht, wenn sich der Hitzdraht (HD) in unmittelbarer Nähe der Wand befindet;
- einen Verdrängungseffekt, der mit den Störungen in Zusammenhang gebracht werden kann, die die HD-Sonde auf das Geschwindigkeitsfeld ausübt. Je nach Sondenkonstruktion läßt sich die Verdrängungswirkung des Gebers in einem mehr oder weniger großen Bereich der Grenzschicht nachweisen.

Beiden Problemen, die bei der Untersuchung wandnaher Grenzschichtbereiche zumeist gekoppelt auftreten, sind bereits zahlreiche Arbeiten gewidmet worden. (Ein Literaturüberblick findet sich in [3].) Die Motivation für experimentelle Arbeiten zu diesen Problemen am Institut für Mechanik der AdW ergibt sich daraus, daß hinsichtlich des Verdrängungseffekts eigene Eichexperimente nie völlig zu umgehen sind, da hierbei zahlreiche sonden- und versuchsstandsspezifische Größen Einfluß ausüben, wenngleich der vorhandenen Literatur einige allgemeinere Empfehlungen zu entnehmen sind.

Bezüglich des oben erwähnten Leitungseffekts fällt zum gegenwärtigen Zeitpunkt eine gewisse Uneinheitlichkeit in den Auffassungen z. B. über den Einfluß des Wandmaterials oder des Hitzdrahtdurchmessers auf [3], so daß hier ergänzende experimentelle Aussagen durchaus von Wert sein können.

2. Zum Wärmeleitungseffekt

Aus den gegenwärtig vorliegenden Untersuchungen läßt sich zusammenfassend ableiten:

- Der Leitungseffekt beschränkt sich bei turbulenter Grenzschicht auf wandnächste Gebiete (etwa die viskose Unterschicht, die sich durch einen maximalen dimensionslosen Wandabstand von $y^+ = 5$ kennzeichnen läßt.

Dabei gilt: $y^+ = \frac{y \cdot u_\tau}{\nu}$ mit

y Wandabstand

$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$ Wandschubspannungsgeschwindigkeit

ν kinematische Zähigkeit

ρ Dichte

τ_w Wandschubspannung

Bei $u_\tau = 1 \text{ ms}^{-1}$, $\nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ergibt sich für $y^+ = 5$ ein Wandabstand y von etwa 0.1 mm.)

- Der vom Leitungseffekt verursachte Meßfehler in der mittleren Strömungsgeschwindigkeit ist vom Wandabstand des Hitzdrahts und vom Wärmeleitvermögen des Wandmaterials und des Fluids abhängig.
- Die Unterschiedlichkeit zahlenmäßiger Angaben zum Leitungseffekt hat u. U. eine Ursache in einer mehr oder minder immer vorhandenen Verdrängungswirkung der Sonde, die dem eigentlich interessierenden Effekt überlagert ist.

Zur Untersuchung des Leitungseffekts wurde deshalb am Strömungstechnischen Labor des Instituts für Mechanik der AdW der DDR eine Versuchseinrichtung benutzt, bei der die Möglichkeit einer Verminderung der Sondenrückwirkung besteht und darüber hinaus der Einfluß des Wandmaterials, der Drahttemperatur, des Wandabstands verfolgt werden kann. Untersuchungsobjekt ist die turbulente Strömungsgrenzschicht, die sich an einem schlanken, in ruhender Luft rotierendem Kreiszyylinder ausbildet. Damit sind einige Vorzüge verbunden:

- Die (abgesehen von randnahen Bereichen der Zylinderoberfläche) konstante Wandschubspannung τ_w ist a priori in Abhängigkeit von Zylinderdurchmesser, -drehzahl und kinematischer Zähigkeit der Luft bekannt. Die entsprechenden Experimente wurden in den vierziger Jahren von Theodorser/Regier [4] mit

Hilfe einer Momentenmeßvorrichtung ausgeführt. Aus der damit bekannten Wandschubspannung läßt sich bei Postulierung eines „Wandgesetzes“ der Form

$$\frac{\bar{u}}{u_T} = f\left(\frac{y \cdot u_T}{\nu}\right)$$

auf einfache Weise das „wahre“ Profil der mittleren Strömungsgeschwindigkeit $\bar{u}(y)$ in Wandnähe ermitteln.

- In Wandnähe liegen bei der Modellströmung höhere Geschwindigkeitswerte vor, so daß i. allg. sichergestellt ist, daß die üblichen Eichbeziehungen für HD-Sonden (ohne Einbeziehung von Auftriebseffekten) gültig sind.
- Das (grob beschrieben) „hyperbolische“ Gestalt besitzende Profil der mittleren Strömungsgeschwindigkeit sichert, daß zumindest die Verdrängungswirkung des Sondenschafts stark herabgesetzt wird. Beispielsweise beträgt bei der zumeist benutzten HD-Sonde die Strömungsgeschwindigkeit am Beginn des Sondenschaftes (d. h. am Übergang zu den Haltestiften für den Hitzdraht) bei stärkster Annäherung der Sonde an die Wandung weniger als 20 % der Zylinderumfangsgeschwindigkeit u_w .

2.1. Zum Strömungsfeld in der Nähe eines in ruhendem Medium rotierenden Kreiszyinders

Einen guten Überblick über die Strömungsphänomene nahe einem rotierenden Kreiszyinder vermittelt eine 1975 erschienene Arbeit von Kasagi/Hirata [6]. Die enge Verwandtschaft zu Plattengrenzschichten wurde experimentell belegt, u. a. was die Möglichkeit einer schichtenweisen Darstellung der Grenzschicht mit viskoser Unterschicht, Übergangsschicht, „logarithmischer“ Schicht und Grenzschichtaußenbereich betrifft. Es konnte gezeigt werden, daß für $Re_D \gtrsim 10^3$ die Strömungsgrenzschicht turbulent ist.

(Es gilt $Re_D = \frac{u_w \cdot D}{\nu}$)

- D Zylinderdurchmesser
- u_w Zylinderumfangsgeschwindigkeit.)

Für etwa diesen Re -Bereich hat Kays [7] die experimentellen Resultate von [4] zum Reibungswiderstand schlanker rotierender Kreiszyinder in folgender Weise approximiert:

$$\frac{1}{\sqrt{c_f}} = -1.828 + 1.77 \ln [Re_D \sqrt{c_f}] \quad (1)$$

$$(Re_D \cdot \sqrt{c_f} > 950)$$

Diese Beziehung liegt unseren Berechnungen der Wandschubspannung zugrunde, wobei gilt:

$$\sqrt{\frac{c_f}{2}} = \frac{u_T}{u_w} \quad (2)$$

und c_f ein Reibungskoeffizient ist. Die Strömungsgeschwindigkeit in Wandnähe ist dann nach [6] mit der Wandschubspannung, dem Zylinderradius und der Umfangsgeschwindigkeit des Zylinders verknüpft:

$$\frac{\tau_w}{\rho} = \nu \left(\frac{d\bar{u}}{dr} \Big|_{y=0} - \frac{u_w}{R} \right) \quad (3)$$

wobei r von der Zylinderachse, y von der Mantelfläche zählt. Zusätzlich gilt:

$$\bar{u} \Big|_{y=0} = u_w \quad (\text{Haftbedingung}).$$

Spärlich sind bisher die Resultate zum Turbulenzfeld in dieser Modellströmung: Lediglich in [6] und [8] sind einige Angaben zu finden.

2.2. Beschreibung der Versuchseinrichtung

Versuchsobjekt ist ein schlanker, hydraulisch glatter Kreiszyinder (Bild 1), der auf einer Drehmaschine bearbeitet wurde. Diese Drehmaschine wurde anschließend ohne Änderung der Einspannung des Zylinders auch bei der Untersuchung des Geschwindigkeitsfeldes benutzt. Die Zylinderdrehzahl wurde mit Hilfe eines induktiven Gebers gemessen. Um Einflüsse des Wandmaterials studieren zu können, wurde der Zylinder teils aus Aluminium, teils aus PVC gefertigt. Als Meßsonden dienten $5 \mu\text{m}$ -Normalsonden, die in Anlehnung an den Sondentyp DISA A 25 gefertigt wurden. Der Hitzdraht wur-

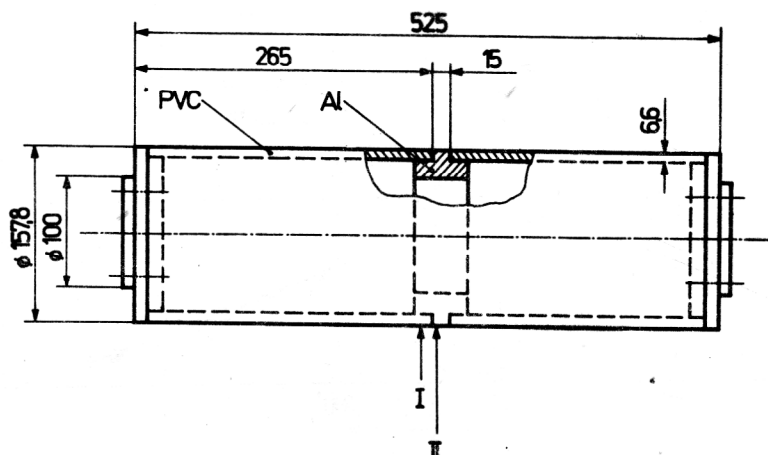


Bild 1
Kreiszyinder

de parallel zur horizontal liegenden Drehachse des Zylinders zugeführt. Zur genauen Einstellung der Wandabstände der Sonde wurde auf dem Support der Drehmaschine eine spezielle Verstellvorrichtung befestigt ($\Delta r = 0.01 \text{ mm}$). Als Meßsystem fand das Anemometer DISA 55 M 01 Verwendung. Externe Voltmeter dienen zur Ermittlung der mittleren Brückenspannung am Anemometer und zur Bestimmung des Effektivwertes der Brückenspannungsschwankung. Die Messung der Gastemperatur wurde mit Quecksilberthermometern vorgenommen. Die bezüglich der axialen Zylinderkoordinate benutzten beiden Sondenpositionen sind in Bild 1 veranschaulicht, die Wandabstände des Hitzdrahts reichen von minimal etwa 0.03 mm bis etwa 10 mm ; damit wird der wandnahe Bereich der turbulenten Grenzschicht bei den von uns benutzten Zylinderdrehzahlen (zwischen 1000 und 1500 min^{-1}) erfaßt. Die Nullage der Sonde wurde durch direkten Wandkontakt der HD-Sonde festgestellt. Die Eichung der HD-Sonden erfolgte in einem Freistrahversuchsstand ($\phi 30 \text{ mm}$) im Geschwindigkeitsbereich von 2 ms^{-1} bis etwa 15 ms^{-1} .

(Zum Vergleich: Die Umfangsgeschwindigkeit des Zylinders lag zwischen 8.5 ms^{-1} und 12.5 ms^{-1} .)

2.3. Meßresultate

Die Bilder 2 bis 5 zeigen Meßresultate für die mittlere Strömungsgeschwindigkeit \bar{u} . Dabei zeigt Bild 2 in linearer Auftragung ein Meßprofil $\bar{u}(y)$ bzw. $\bar{u}(y^+)$ für $Re_D \approx 9 \cdot 10^4$. Zum Vergleich eingetragen wurde das sich aus (1), (2), (3) ergebende Profil, das nach Voraussetzung im Bereich $0 < y^+ < 5$ als gültig angenommen werden kann. Der Leitungseffekt widerspiegelt sich in der Abweichung der Meßpunkte bei $y^+ < 3$. Die erhöhte Wärmeabfuhr vom Hitzdraht führt zu einer Erhöhung der Brückenspannung am Konstant-Temperaturanemometer, die bei Auswertung ohne geeignete Korrekturen zu einer scheinbar erhöhten mittleren Strömungsgeschwindigkeit führt. Das Profil wird im Bereich $3 < y^+$

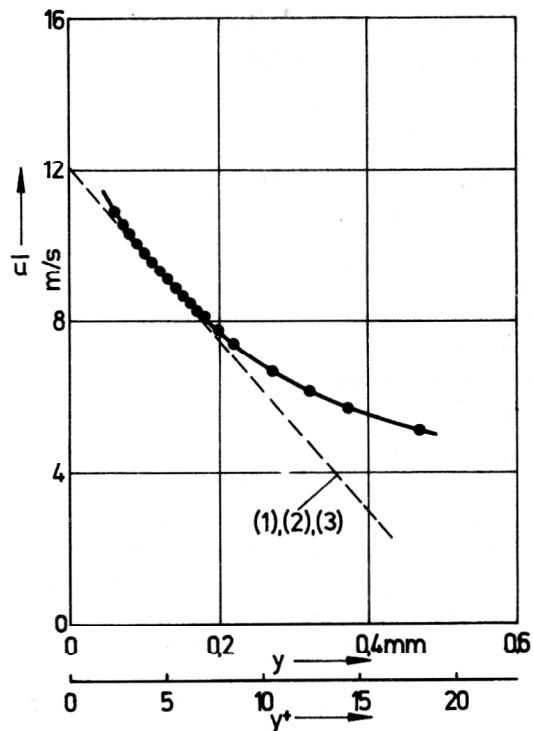
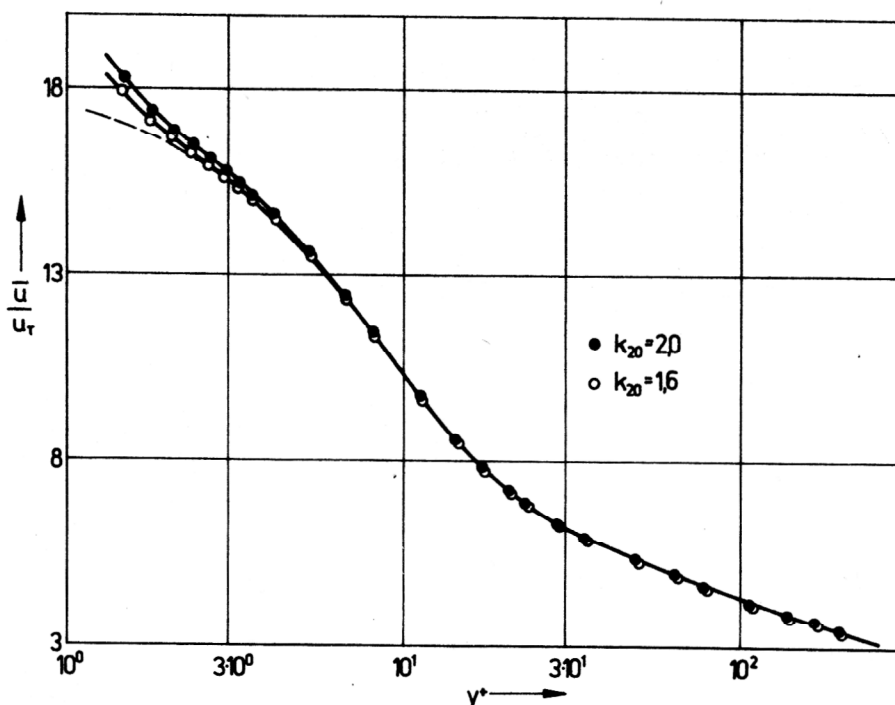


Bild 2
Geschwindigkeitsprofil der Zylinderumströmung
(● Messung bei $Re_D \approx 9 \cdot 10^4$)

< 5 nahezu unverfälscht gemessen. In [9] mitgeteilte Erfahrungen werden damit bestätigt. Die Bilder 3, 4 belegen den Einfluß von Drahttemperatur (Drahtüberhitzung) und Wandmaterial auf den Leitungseffekt. Die Erhöhung der Drahttemperatur vergrößert den Leitungseffekt ebenso wie die Verwendung gut wärmeleitender

Bild 3
Geschwindigkeitsprofil der Zylinderumströmung (Wandmaterial Aluminium) bei zwei Überhitzungsverhältnissen der Sonde
(--- berechneter Profilverlauf)



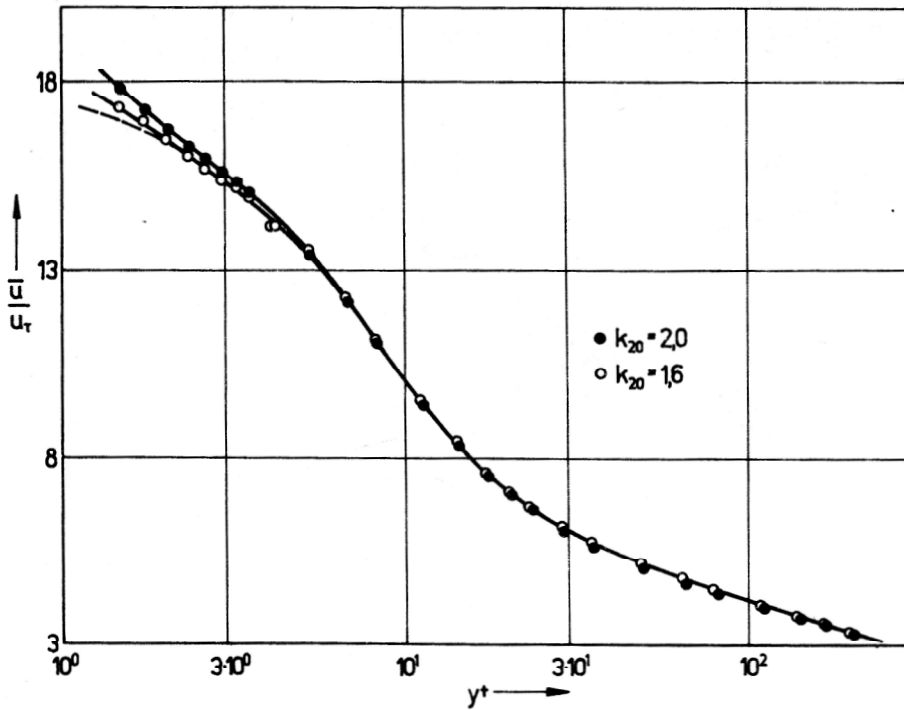
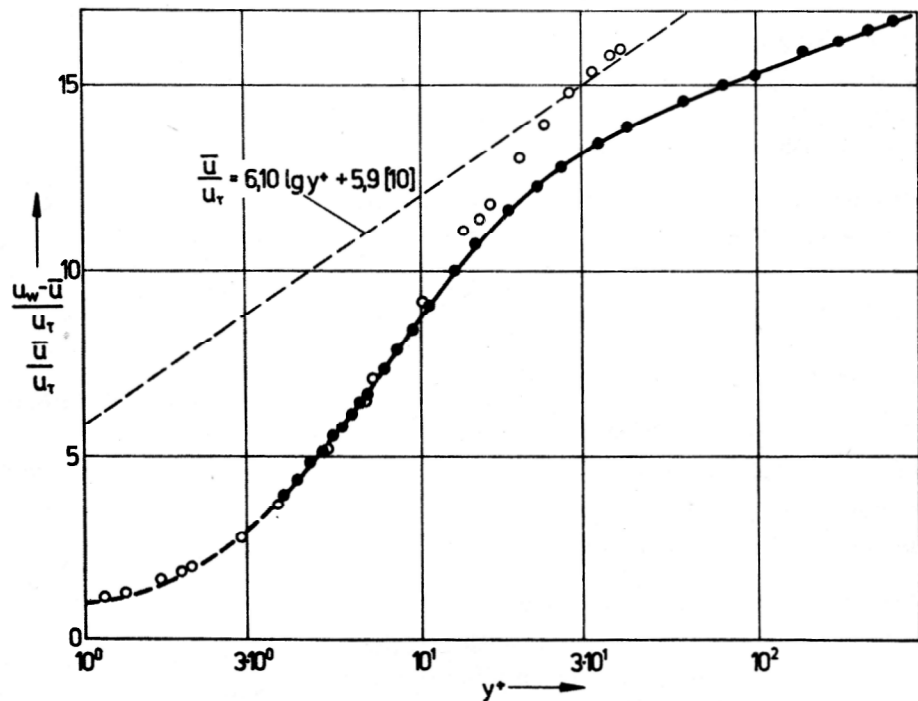


Bild 4 \triangle
 Geschwindigkeitsprofil der Zylinderumströmung (Wandmaterial PVC) bei zwei Überhitzungsverhältnissen der Sonde (--- berechneter Profilverlauf)

Bild 5
 Vergleichende Darstellung von Geschwindigkeitsprofilen in turbulenten Wandgrenzschichten (o Kanalströmung, Ausschnitt) (● Zylinderumströmung, ohne wandnächste Punkte)



Wandmaterialien. In die halblogarithmische Darstellung $\bar{u}/u_r(y^+)$ sind neben den Versuchsergebnissen auch die theoretisch zu erwartenden Profile eingetragen worden. Für Wandabstände des Heizdrahts y^+ größer als 3 verschwindet der Leitungseffekt. Mit Bild 5 wird versucht, einen Vergleich zu anderen turbulenten Wandgrenzschichten herzustellen: Gegenübergestellt wurden das Geschwindigkeitsprofil einer turbulenten Kanalströmung [10] und am rotierenden Kreiszyylinder für $Re_D \approx 12 \cdot 10^4$, wobei für letzteres Profil der besseren Vergleichbarkeit wegen die Relativgeschwindigkeit $u_w - \bar{u}$

aufgetragen wurde. Deutlich sichtbar ist, daß es bei der gewählten Darstellungsart in beiden Fällen zur Ausbildung „logarithmischer Bereiche“ kommt, wenngleich quantitativ starke Unterschiede existieren.

Mit verringertem Wandabstand nehmen die Unterschiede zwischen beiden Profilen ab, bis sie in der viskosen Unterschicht nahezu zusammenfallen. Einen entsprechenden Vergleich für $\sqrt{u'^2}$, den Effektivwert der Geschwindigkeitsschwankung, bezogen auf u_r , zeigt Bild 6. Auch hier offenbaren sich im Außenbereich der Grenz-

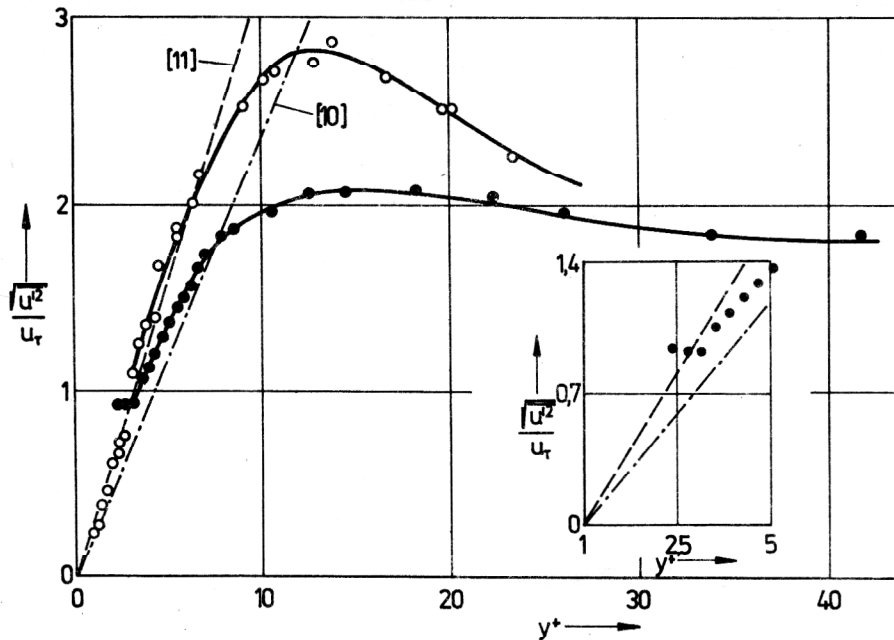


Bild 6
Vergleichende Darstellung von Profilen der Turbulenzintensität in turbulenten Wandgrenzschichten
(o Kanalströmung
(● Zylinderumströmung)

schicht gravierende Unterschiede; im wandnächsten Bereich folgen die Profile nahezu gleichen Gesetzmäßigkeiten. Für $y^+ < 3$ ist bei der Zylinderumströmung eine exakte Ermittlung von $\sqrt{u'^2}$ nicht mehr möglich. Ursache ist auch hier der Leitungseffekt. In Bild 6 ebenfalls eingetragen sind Messresultate nach [10] und [11]. Hier wurde mit Hilfe verschiedener Wandschubspannungsmesser eine Aussage über $\sqrt{u'^2}$ in unmittelbarer Nähe der Wand erhalten.

2.4. Schlußfolgerungen

Für den Einsatz einfacher HD-Sonden zur Messung von $\bar{u} \sqrt{u'^2}$ in unmittelbarer Nähe fester Wände ergeben sich folgende Schlußfolgerungen:

- Der Wärmeleitungseffekt wird bei turbulenten Grenzschichten im Bereich $y^+ < 3$ wirksam. Das gilt sowohl für die \bar{u} – als auch die $\sqrt{u'^2}$ – Messung.
- Die Größe des Meßfehlers ist vom Wandabstand des Hitzdrahts, der Drahttemperatur und den Eigenschaften des Wandmaterials abhängig. Zur Verringerung des Meßfehlers durch den Leitungseffekt empfiehlt sich die Verwendung schlecht wärmeleitender Materialien und das Arbeiten mit möglichst geringen Drahttemperaturen.
- Korrekturverfahren für den HD-Leitungseffekt sollten zumindest die Berücksichtigung der o. g. Einflußgrößen zulassen. Ein entsprechender Vorschlag wurde kürzlich von Polyakov/Shindin [12] veröffentlicht. Das oft zitierte Korrektur-Diagramm für den Leitungseffekt nach Oka/Kostic [13] besitzt diesen allgemeinen Charakter noch nicht.

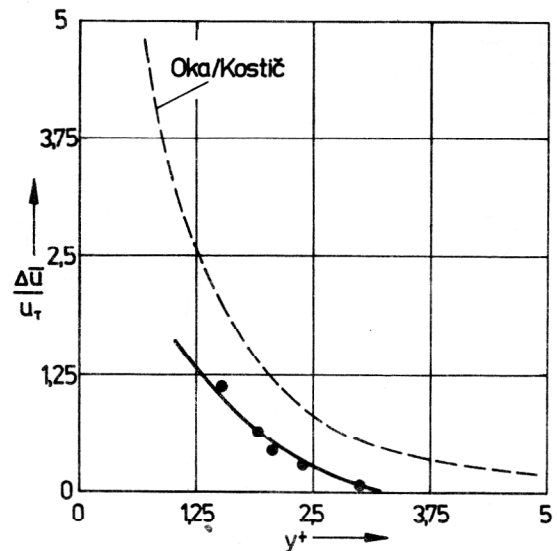


Bild 7
Auswirkung des Wandeffektes auf Geschwindigkeitsmessungen:
 $\Delta \bar{u} = \bar{u}_{\text{falsch}} - \bar{u}_{\text{wahr}}$

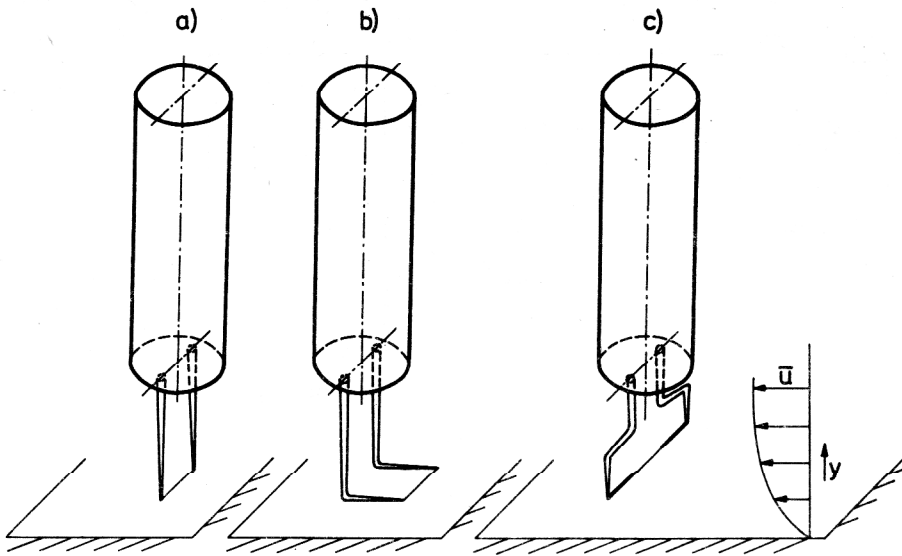
(● Zylinderumströmung bei $Re_D \approx 9 \cdot 10^4$,
Wandmaterial Aluminium, $k_{20} = 2.0$)

Bild 7 zeigt einen Vergleich dieses Korrekturdiagramms mit Resultaten, die aus unseren Untersuchungen am Kreiszyylinder (für eine Drahttemperatur, ein Wandmaterial und festes Re_D) abgeleitet werden konnten.

3. Zur Verdrängungswirkung von Miniatur-HD-Sonden

Wegen spezieller Gegebenheiten an strömungstechnischen Versuchsanlagen und aus Gründen einer bequemen und genauen Sondenjustierung und -zuführung läßt es sich manchmal nicht umgehen, HD-Sonden so in turbulente Grenzschichten einzuführen, daß der Sondenchaft senkrecht angeströmt und gänzlich von Kern- bzw. Grenzschichtströmung beaufschlagt wird. Aus meh-

Bild 8
Sondentypen bei der Untersuchung
des Verdrängungseinflusses



rerer Arbeiten (u. a. [14], [15]) ist bekannt, daß dadurch die Geschwindigkeit am Meßort erheblich verändert werden kann.

Untersuchungen in einer ebenen Plattengrenzschicht dienten der quantitativen Erfassung dieser Störungen bei drei verschiedenen Sondenkonfigurationen. Bild 8 zeigt schematisiert die Versuchsanordnung und die verwendeten Sondentypen, die sämtlich einen Schaftdurchmesser von 3 mm aufwiesen:

- a) Miniatur-Normalsonde, Drahtdurchmesser 5 μm , Bauart DISA A 25
- b) Grenzschichtsonde, Drahtdurchmesser 5 μm , Bauart DISA PO4
- c) Wollaston-Sonde, Drahtdurchmesser 5 μm / 50 μm , Eigenbau Institut für Mechanik.

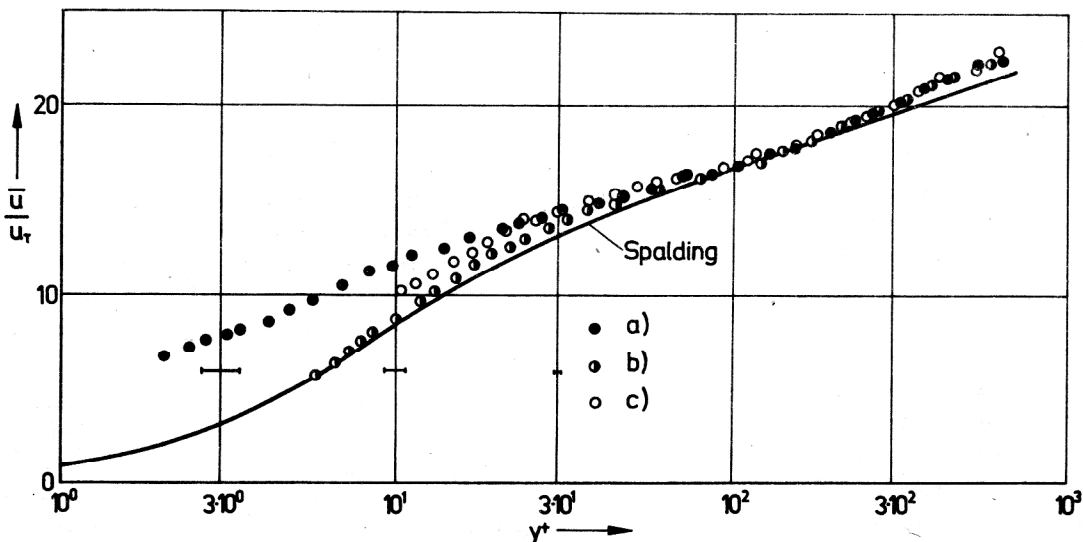
Verglichen wurden die mit den o. g. Sonden erhaltenen Meßprofile $\bar{u}(y)$, $\sqrt{u'^2}(y)$ untereinander und mit Resultaten anderer Autoren.

3.1. Einige Meßresultate

Bild 9 zeigt Meßprofile $\bar{u}/u_T(y^+)$ für die drei Sondentypen, aufgenommen in einem Bereich der Plattengrenzschicht, in dem die Grenzschichtdicke $\delta \approx 25 \text{ mm}$ beträgt. Die Kerngeschwindigkeit war auf etwa 12 ms^{-1} eingestellt. Neben den Meßresultaten wurde das Spaldingsche Wandgesetz (vgl. [16]) eingetragen, das als brauchbare Approximation für den wandnahen Bereich turbulenter Plattengrenzschichten bei hydraulisch glatter Oberfläche angesehen werden kann.

Bild 10 zeigt entsprechende Resultate für die Meßgröße $\sqrt{u'^2}/u_T(y)$. Hier werden mangels anderer begründeter Gesetzmäßigkeiten Versuchsergebnisse nach [16] zum Vergleich eingetragen. Die Messung der Wandschubspannung in der Plattengrenzschicht erfolgte mit Preston-Rohren, zur Auswertung

Bild 9
Meßprofile der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in der Plattengrenzschicht bei verschiedenen Sondenkonfigurationen
(—) Streubreite der Meßwerte aufgrund fehlerhafter y-Bestimmung)



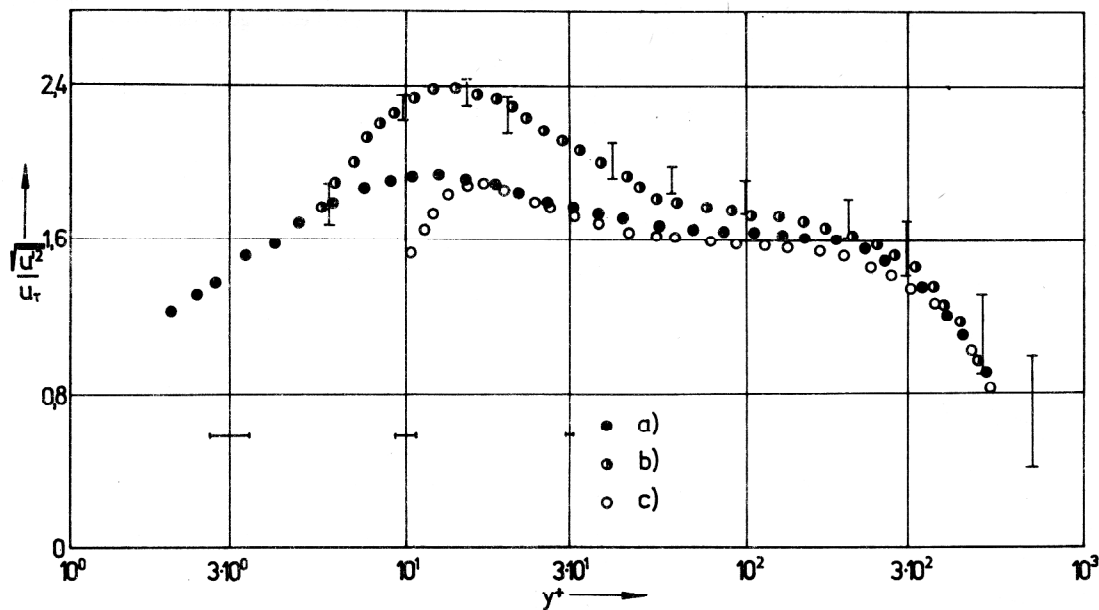


Bild 10
 Meßprofile der Turbulenzintensität in der Plattengrenzschicht bei verschiedenen Sondenkonfigurationen (—, vgl. Bild 9
 I Meßwerte nach [16])

tung wurde der universelle Eichzusammenhang nach Patel [17] benutzt.

3.2. Schlußfolgerungen

- Die Störwirkung der drei untersuchten Sondentypen ist unterschiedlich.
- Bei der hier untersuchten Art der Sondenzuführung empfiehlt sich die Verwendung spezieller (gekröpf-ter) Grenzschichtsonden.
- Die Wollaston-Sonde besitzt bei den hier diskutierten Versuchen keine wesentlichen Vorzüge gegenüber konventionellen Miniatur-Sonden, was dafür spricht, daß die wesentliche Störwirkung vom Sondenschaft ausgeht.
- Die Meßfehler sind besonders ausgeprägt bei kleinen Wandabständen. Dabei wird \bar{u} stets zu groß bestimmt. Es ist vorstellbar, daß in Strömungen mit großem Geschwindigkeitsgradienten eine merkliche Zusatzgeschwindigkeit in Richtung der Schaftachse induziert wird.
- Der charakteristische Verlauf von $\sqrt{u'^2} / u_T (y^+)$ mit einem Maximum bei $y^+ \approx 15$ wird nur von der Grenzschichtsonde richtig wiedergegeben. Die beiden anderen Sonden liefern in diesem Bereich Meßfehler von etwa 25 %, allerdings wird die Lage des Maximums von $\sqrt{u'^2}$ bezüglich der y^+ -Achse richtig wiedergegeben.
- Auch bei Verwendung von HD-Meßverfahren, die mit gedrehten Eindrahtsonden arbeiten, wird bei der geschilderten Art der Sondenzuführung diese Störwirkung zu beachten sein. Entsprechende Eichversuche sind deshalb auch hier notwendig.

3.3. Einige Erläuterungen zur Bestimmung des Wandabstands der Hitzdrahtsonde

Einfache Abschätzungen zeigen, daß für Grenzschichtuntersuchungen im Bereich der viskosen Unterschicht ($y^+ < 5$) der Abstand zwischen Hitzdraht und Wand mit einer Genauigkeit von etwa 0.01 mm feststellbar sein sollte. Trotz Erprobung mehrerer Verfahren ist am Strömungstechnischen Labor des IMech derzeit noch kein allen Ansprüchen genügendes Verfahren verfügbar. Im einzelnen wurden folgende Möglichkeiten erprobt:

- Die HD-Sonde wird bei guten Sicht- und Beleuchtungsmöglichkeiten (im Betriebsregime „Widerstandsmessung“ des Anemometers) bis zum direkten Wandkontakt an die Wand herangeführt. Der Wandkontakt wird durch eine sprunghafte Änderung des Kaltwiderstandes der Sonde angezeigt. Das Risiko einer vorzeitigen Sondenerstörung ist groß.
- Beobachtung des Sondendrahts im Vergleich zu einem Vergleichsstück genau bekannter Höhe, zur Beobachtung wird ein Fernrohr benutzt; die Genauigkeit der Abstandsbestimmung geht kaum über ± 0.05 mm hinaus.
- Ausnutzung der E_0 -Anzeige des Anemometers (mittlere Brückenspannung bei verschwindender Strömungsgeschwindigkeit), die bei geringen Wandabständen der Sonde von diesem abhängt. Bild 11 gibt einen Eindruck von der Größe des hier eine Rolle spielenden Leitungseffekts für zwei Wandmaterialien und zwei Drahttemperaturen. Ein derartiges Eichdiagramm läßt sich dann bei der Messung an der ebenen Platte bei vergleichbarem Temperaturregime zur Wandabstandsermittlung benutzen. Die Genauigkeit dürfte bei etwa ± 0.03 mm liegen.
- Benutzung eines Justierstücks (Bild 12), das Fühlstifte enthält, die unter einem Mikroskop gegenüber der HD-Sonde justiert werden und am Meßobjekt bis zum direkten Wandkontakt gebracht werden. Der Wandkontakt wird durch ein optisches Signal angezeigt.

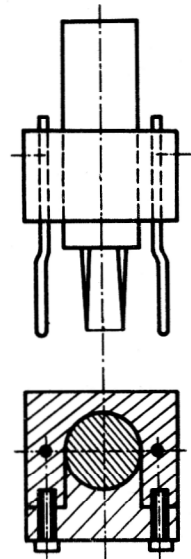
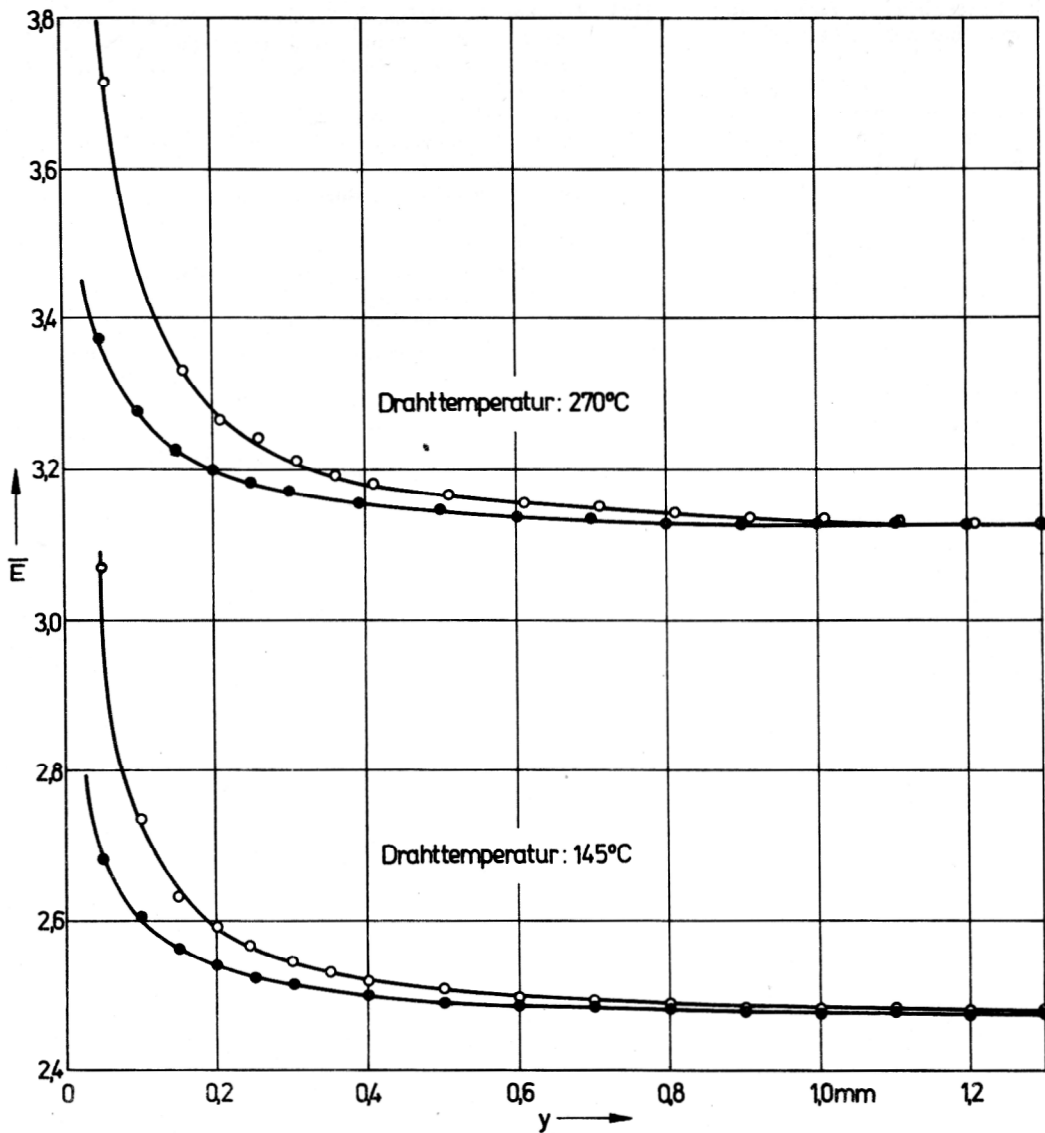


Bild 11
Wandeffekt bei verschwindender Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Drahttemperatur und Wandmaterial

Bild 12
Kontaktgeber zur Ermittlung des Wandabstandes von HD-Sonden

Danach kann das Justierstück ohne Ausbau der Sonde entfernt werden. Die gesamte Prozedur ist recht aufwendig, dürfte jedoch gegenwärtig die geeignetste sein. Die Wiederholgenauigkeit liegt bei etwa ± 0.02 mm.

4. Zusammenfassung

Mit Hilfe experimenteller Untersuchungen konnten Erkenntnisse über die Einsatzmöglichkeiten der HD-Meßtechnik bei der Untersuchung wandnaher Bereiche turbulenter Wandgrenzschichten gewonnen werden. Ein Wärmeleitungseffekt, der im Bereich der viskosen Unterschicht der Grenzschicht wirksam ist, und die Störwirkung der HD-Sonde selbst, die in einem großen Bereich der Grenzschicht existiert, begrenzen die Genauigkeit der HD-Messungen. Das gilt im Falle normal angeströmter, einfacher HD-Sonden sowohl für die Ermittlung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit als auch des Turbulenzgrades.

Besondere Aufmerksamkeit ist einer genauen Bestimmung des Wandabstandes der HD-Sonde bei derartigen Experimenten zu widmen.

Die Ergebnisse des Abschnitts 3 sind unter Mitwirkung von Herrn Dipl.-Ing. Andreas und Herrn cand. ing. Balaschk erarbeitet worden, die als Praktikanten am Institut für Mechanik der AdW der DDR gearbeitet haben. Für ihre Mithilfe sei an dieser Stelle gedankt.

LITERATUR

- [1] Comte-Bellot, G.: Hot-wire anemometry. Annual Review Fluid Mechanics 8 (1976), S. 209.
- [2] Comte-Bellot, G.: Hot-wire and hot-film anemometers. In: Measurement of unsteady fluid dynamic phenomena. Washington 1977.
- [3] Graichen, K.: Ein Beitrag zur Problematik von Hitzdrahtmessungen in der Nähe turbulent umströmter fester Wände. Unveröff. Bericht des Strömungstechn. Labors des Inst. f. Mech. der AdW, Okt. 1979. Vgl. auch: Hot-wire measurements near a solid wall. Preprint P-10/80 des ZIMM der AdW, 1980.

- [4] Theodorsen, T., Regier, A.: Experiments on drag of revolving discs, cylinders and streamline rods at high speeds. NACA Rep. 793 (1944).
- [5] Graichen, K.: Untersuchungen zum Geschwindigkeitsverhalten von Hitzdrahtsonden unter Einschluß des Gebiets kleiner Geschwindigkeiten. Unveröff. Bericht des Strömungstechn. Labors des Inst. f. Mech. der AdW, August 1977.
- [6] Kasagi, N., Hirata, A.: Transport phenomena in near-wall region of turbulent boundary layer around a rotating cylinder. ASME paper 75 WA/HT-58 (1975).
- [7] Kays, W.: Heat transfer from a rotating cylinder with and without cross-flow. J. Heat Transfer 80 (1958) H. 1, S. 70 – 78.
- [8] Ustimenko, B.P.: Processy turbulentnogo perenosy vo vrasčajusčichsja tečenijach. Nauka, Alma-Ata, 1977.
- [9] Willmarth, W.: Axially symmetric turbulent boundary layers on cylinders. J. Fluid Mechanics 76 (1976) H. 1, S. 35 – 64.
- [10] Eckelmann, H.: Experimentelle Untersuchungen in einer turbulenten Kanalströmung mit starken viskosen Wand-schichten. Mitt. aus dem MPI für Strömungsforschung 48 (1970).
- [11] Mitchell, J., Hanratty, Th.: A study of turbulence at a wall using an electrochemical wall shear-stress meter. J. Fluid Mechanics 26 (1966) H. 1, S. 199 – 221.
- [12] Polyakov, A., Shindin, S.: Peculiarities of hot-wire measurements of mean velocity and temperature in the wall vicinity. Letters Heat and Mass Transfer 5 (1978) H. 1, S. 53 – 58.
- [13] Oka, S., Kostic, C.: Influence of wall proximity on hot-wire velocity measurements. DISA-Information 13 (1972), S. 29 – 33.
- [14] Repik, E.: Issledovanie vlijanija bliznosti stenki na pokazanija termoanemometra Izv. Sib. Otd. AN SSSR (1969) H. 13, S. 45 – 52.
- [15] Van Thinh, N.: Messungen mit einem Hitzdraht in einer turbulenten Strömung in der Nähe einer Wand. DISA-Information 7 (1969), S. 13 – 18.
- [16] Blom, J.: An experimental determination of the turbulent Prandtl number in a developing temperature boundary layer. Dissertation, Eindhoven 1970.
- [17] Patel, V.: Calibration of the Preston tube and limitations of its use in pressure gradients. J. Fluid Mechanics 23 (1965) H. 1, S. 185 – 208.

Anschrift des Verfassers:

Dr. K. Graichen
Akademie der Wissenschaften der DDR
Institut für Mechanik
1199 Berlin-Adlershof
Rudower Chaussee 5