

Sonderdruck aus „50 Jahre Grenzschichtforschung“
herausgegeben von H. GÖRTLER und W. TOLLMIEHN
(Verlag Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig)

Von F. X. WORTMANN
Institut für Gasströmungen an der Technischen Hochschule Stuttgart

**Untersuchung instabiler Grenzschichtschwingungen
in einem Wasserkanal mit der Tellurmethode**

Übersicht: Die Theorie der instabilen laminaren Grenzschichten, die von *W. Tollmien* und *H. Schlichting* bereits in den dreißiger Jahren entwickelt wurde, konnte experimentell erst 1941–1943 von *G. B. Schubauer* und *H. K. Skramstad* mit Hitzdrahtgeräten bestätigt werden. Da die Gültigkeit dieser Theorie lange angezweifelt wurde und die Versuche von *Schubauer-Skramstad* unwiederholt geblieben sind, so wird hier kurz über einige entsprechende Messungen mit der Tellurmethode berichtet.

I. EINLEITUNG

Zur Untersuchung einer instabilen laminaren Grenzschicht, die einer turbulenten Grenzschicht im allgemeinen vorausgeht, war man bisher fast ausschließlich auf die Hitzdrahtsonde angewiesen. Die vorliegende Arbeit ist aus der Absicht entstanden, die Eignung der Tellurbeobachtungsmethode [6] zur Untersuchung derartiger Grenzschichten zu prüfen und am Beispiel der Plattengrenzschicht zu erproben. Die in einem kleinen Wasserkanal durchgeführten Messungen beschränken sich darauf, die Amplitudenverteilung der Störgeschwindigkeiten senkrecht zur Wand und den Zusammenhang der dimensionslosen Frequenz

$$\frac{\beta_r \nu}{U_0^2}$$

($\beta_r = 2\pi n =$ Kreisfrequenz; $U_0 =$ Potentialgeschwindigkeit; $\nu =$ kinematische Zähigkeit) der neutralen Grenzschichtschwingung mit der *Reynoldsschen* Zahl

$$Re_{\delta^*} = \frac{U_0 \delta^*}{\nu} \quad (1)$$

($\delta^* =$ Verdrängungsdicke der Grenzschicht) zu ermitteln. Diese beiden Abhängigkeiten bilden den wesentlichen Inhalt der *Tollmien-Schlichtingschen* Theorie [1, 2, 3] zur Entstehung der Turbulenz, die durch einen Teil der Messungen erneut bestätigt wird.

II. STABILITÄTSDIAGRAMM UND AMPLITUDENVERTEILUNG

Die Stabilitätstheorie untersucht die Bedingungen, unter denen eine der Grundströmung überlagerte Störbewegung, die als ebene Wellenbewegung angenommen wird, mit der Zeit anwächst oder abklingt. Das Ergebnis wird in einem Stabilitätsdiagramm dargestellt, wie es Abb. 1, die der Arbeit von *G. B. Schubauer* und *H. K. Skramstad* [5] entnommen ist, für den Fall der ebenen Platte zeigt. Darin ist über der *Reynoldsschen* Zahl die dimensionslose Frequenz der Störbewegung auf-

getragen. Die eingezeichnete Kurve, die als Indifferenzkurve bezeichnet wird, umschließt den Bereich, innerhalb dessen Störungen geeigneter Frequenz angefacht werden. Eine Einzelstörung, die im Stabilitätsdiagramm eine Waagrechte im Sinne wachsender *Reynoldsscher* Zahlen durchläuft, wird in der Grenzschicht bis zum Erreichen des Kurvenzweiges I gedämpft und hat beim Überschreiten des Kurvenzweiges II die maximale Amplitude erreicht. Bei größeren *Reynoldsschen* Zahlen wird die Störung wieder gedämpft. Weiterhin ist für die ebene Platte von *H. Schlichting* [4] auch die Amplitudenverteilung der Störgeschwindigkeiten senkrecht zur Wand angegeben worden, und zwar für je einen Punkt der Indifferenzkurve I bzw. II mit den Wertepaaren

$$Re_{\delta^*} = 893, \quad \frac{\beta_r \nu}{U_0^2} = 62,3 \cdot 10^{-6}$$

$$\text{bzw. } Re_{\delta^*} = 2070, \quad \frac{\beta_r \nu}{U_0^2} = 42,4 \cdot 10^{-6}.$$

Es wird damit nach [4] möglich, aus der Grundströmung $U(y)$ ($y =$ Wandabstand) und den beiden überlagerten Störgeschwindigkeiten

$$u' = k [\varphi_r'(y) \cos(\alpha x - \beta_r t) - \varphi_i'(y) \sin(\alpha x - \beta_r t)] U_0 \quad (2)$$

$$v' = k \alpha [\varphi_r(y) \sin(\alpha x - \beta_r t) + \varphi_i(y) \cos(\alpha x - \beta_r t)] U_0, \quad (3)$$

wobei k ein willkürlicher Intensitätsfaktor, $\alpha = \frac{2\pi}{\lambda}$ die Kreiswellenzahl und $\varphi_r, \varphi_i, \varphi_r', \varphi_i'$ die Amplitudenverteilungen senkrecht zur Wand sind, das gesamte Geschwindigkeitsfeld einer neutralen Grenzschichtschwingung darzustellen.

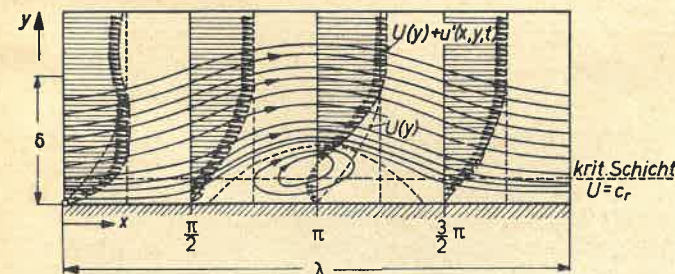


Abb. 2. Stromlinienbild und Geschwindigkeitsverteilung nach *Schlichting* [3] für eine neutrale Schwingung der Grenzschicht an der längsangeströmten ebenen Platte.

$$Re_{\delta^*} = 893; \quad \frac{\beta_r \nu}{U_0^2} = 62,3 \cdot 10^{-6}; \quad \int_0^{\delta} \sqrt{u'^2} dy = 0,172 \delta U_0 = \text{Intensität der Störbewegung } (\overline{u'^2} = \text{zeitlicher Mittelwert der quadrierten } u'\text{-Komponente})$$

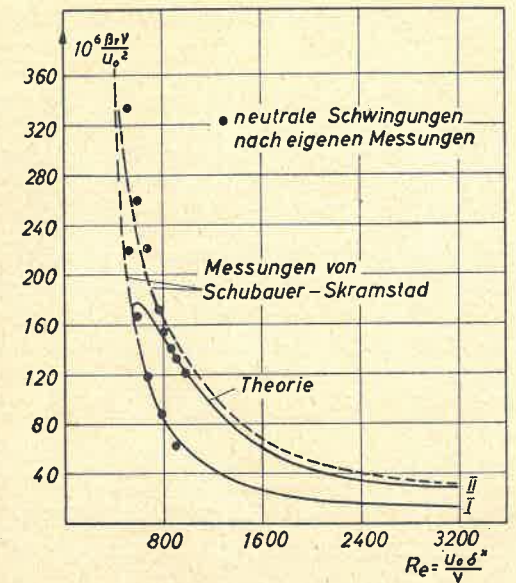


Abb. 1. Indifferenzkurven für neutrale Störungsfrequenzen bei der längsangeströmten ebenen Platte. Theorie nach *Tollmien* [1] und *Schlichting* [2]. Messungen von *Schubauer* und *Skramstad* [5]

Abb. 2, die dem *Schlichtingschen* Buch [3] entnommen ist, zeigt dieses Feld für die neutrale Schwingung des Zweiges I der Indifferenzkurve. Auf weitere Einzelheiten soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden (siehe das unten angeführte Schrifttum).

III. BESCHREIBUNG DER VERSUCHSEINRICHTUNGEN UND BEOBACHTUNGSMITTEL

Da die Tellurmethode nur bis zu Strömungsgeschwindigkeiten von 10 bis 15 cm/sec einfach zu handhaben ist, so werden für größere Werte von Re_{δ^*} erhebliche Kanalabmessungen notwendig. Für das Ziel dieser Arbeit erschien es ausreichend, $Re_{\delta^*} = 10^3$ zu erreichen, so daß mit $U_0 = 10$ cm/sec und $\nu = 10^{-2}$ cm²/sec $\delta^* = 1$ cm werden muß. Die entsprechende Kanallänge beträgt etwa 300 cm.

Abb. 3 zeigt in einer vereinfachten Übersichtszeichnung den benutzten Wasserkanal. Er wird unter Zwischenschaltung zweier Überlaufgefäße und eines Sammel-

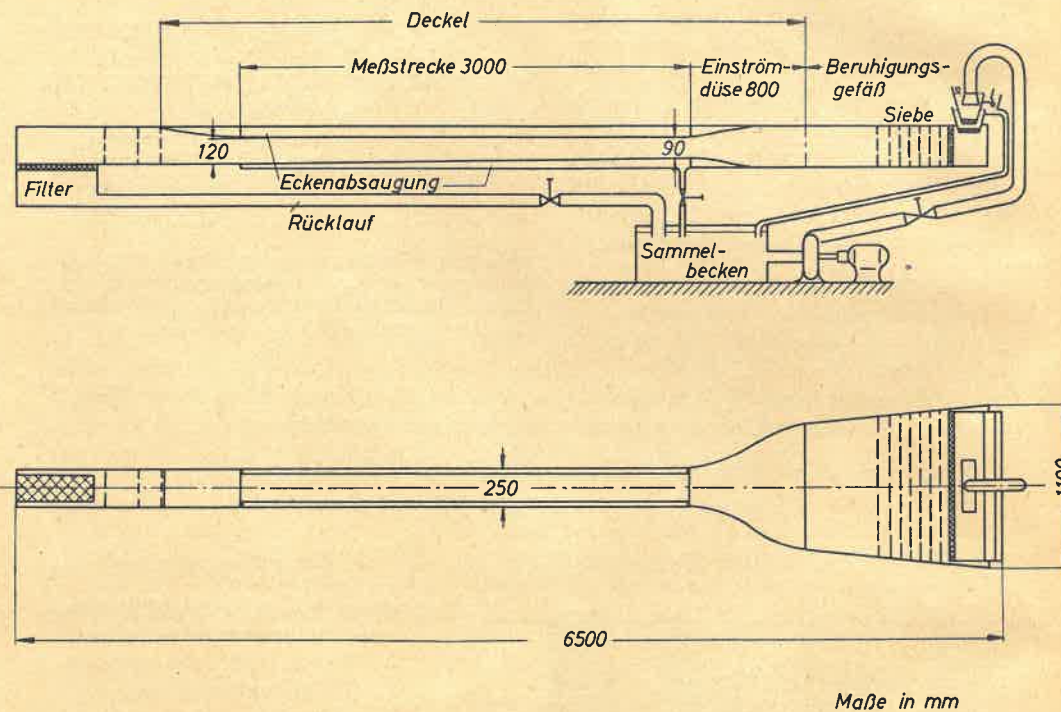


Abb. 3. Übersichtszeichnung des Wasserkanals

beckens durch eine Wasserpumpe angetrieben. Um konvektive Störungen durch Schwankungen der Lufttemperatur zu vermeiden, ist der Kanal im Keller des Instituts aufgestellt. Von den an allen vier Wänden der Meßstrecke entstehenden Grenzschichten wird die Deckengrenzschicht wegen ihrer leichten Zugänglichkeit zur Beobachtung benutzt. Da der rechteckige Meßquerschnitt $90 \div 120 \times 250$ mm beträgt, so ist die Grenzschicht an der Decke, bzw. am Boden nur näherungsweise zweidimensional.

Zur Beobachtung und Messung der Strömung findet in dieser Arbeit allein die Tellurmethode [6] Verwendung. Sie gestattet es, bestimmte Volumenelemente

der Wasserströmung mittels Tellur durch einen elektrischen Impuls- oder Dauerstrom kurzzeitig oder laufend anzufärben. Zu diesem Zweck wird das Tellur als Kathode, Elektrolytkohle als Anode und das Wasser als Elektrolyt benutzt. Die weiter unten folgenden Abbildungen 4, 5 und 6 zeigen verschiedene Anwendungen dieser Methode.

IV. HERSTELLUNG GEEIGNETER VERSUCHSBEDINGUNGEN

Zur Untersuchung der Eigenschaften einer instabilen Grenzschicht ist es notwendig, alle zufälligen Störungen möglichst vollständig auszuschalten. Der Einlauf in das Beruhigungsgefäß erfolgt darum über zwei hintereinandergeschaltete Überlaufgefäße, deren Unterseite als Ausströmöffnung dient, die jeweils mit einer 4 cm dicken, dichten Packung von Aluminiumspänen versehen ist. Gegen die Störungen des Rücklaufs wird die Meßstrecke am Auslauf durch eine Reihe ähnlicher Widerstände abgeschirmt. Außerhalb des Kanaldeckels, vgl. Abb. 3, besitzt die Strömung eine freie Oberfläche. Im Beruhigungsgefäß sind sieben Siebe aus Draht und Nylontüll mit einem Abstand von 10 cm eingesetzt. Die Maschenweiten aufeinanderfolgender Siebe sind verschieden, um Überlagerungseffekte zu vermeiden.

Wenn auch der Pumpenantrieb und die kleinen Kanalabmessungen, insbesondere das kleine Kontraktionsverhältnis der Einströmdüse von 1:5,2, für die Herstellung einer störungsfreien Strömung ungünstig und lediglich durch finanzielle

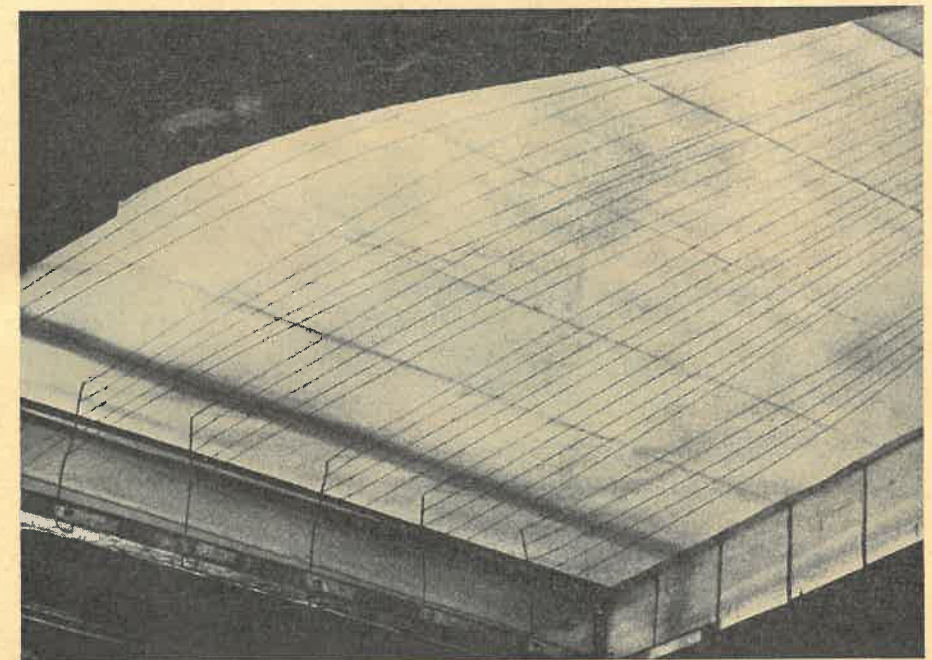


Abb. 4. Tellurstromlinien in der Einströmdüse. Belichtungszeit 60 sec. Durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit 4–5 cm/sec. Jede Stromlinie beginnt an einer Tellurperle. Jeweils 5 Perlen liegen in einer zum Boden senkrechten Ebene

Rücksichten bedingt waren, so konnten trotzdem die Störgeschwindigkeiten quer zur Strömungsrichtung kleiner als 0,03 % der Hauptgeschwindigkeit gehalten werden. Abb. 4 gibt davon einen anschaulichen Eindruck: die in der abgedeckten Einströmdüse erkennbaren Tellurstromlinien sind während der Belichtungszeit von 60 sec etwa dreifach durchlaufen worden und trotzdem scharf.

Durch die Steuerung der elektrischen Stromstärke hat man es in der Hand, kontrastreiche Stromlinien bis herunter zu 0,1 mm Durchmesser herzustellen. In dieser Weise lassen sich vor der Einströmdüse noch Quergeschwindigkeiten von $5 \div 10 \cdot 10^{-4}$ der Hauptgeschwindigkeit beobachten.

Beim Durchströmen der Meßstrecke bildet sich in den vier Ecken eine verdickte Grenzschicht aus, die wesentlich eher als die Wandgrenzschicht instabil wird. Diese Eckengrenzschicht zeigt, wie bereits früher vom Verfasser [6] angegeben, prinzipiell das gleiche Verhalten wie die ebene Grenzschicht: eine Schwingungsbewegung bestimmter Frequenz, die etwa vier- bis fünfmal so hoch ist wie im ebenen Fall, erfährt eine maximale Anfachung und führt im allgemeinen zum Umschlag. Durch eine Absaugereinrichtung, die in jeder Ecke aus einer Lochreihe (Lochdurchmesser 1 mm, Abstand 5 mm) und einem dahinterliegenden Sammelrohr besteht (vgl. Abb. 3), kann die Instabilität beseitigt werden. Zur Stabilisierung genügt es, die längs der Meßstrecke konstante Menge

$$\frac{d\delta^{*2}}{dx} \cdot U_0 \Delta x \quad \left[\frac{L^3}{T} \right]$$

(x = Abstand vom Beginn der Meßstrecke) abzusaugen. Die Wirkung der Absaugung erkennt man sehr gut daran, daß auch bei großen Störungsamplituden der Deckengrenzschicht in den vier Kanalecken keine Querbewegungen beobachtbar sind.

Die Einstellung eines konstanten Druckverlaufes längs der Meßstrecke erfolgt in üblicher Weise durch einen in der Höhe verstellbaren Kanaldeckel. Dabei wird die notwendige Deckelhöhe bzw. der notwendige Abstand vom Boden zunächst theoretisch abgeschätzt und mit Hilfe eines einfachen Abstandsmeßgerätes, das schlittenartig über den Kanalboden gleitet, eingestellt. Die Geschwindigkeitsverteilung wird dann photographisch durch den räumlichen Abstand einer Reihe von Tellurwolken gemessen, die stromauf von der jeweiligen Meßstelle periodisch in die Potentialströmung gesetzt werden [6]. Die Genauigkeit dieser Messung erlaubt es, im vorliegenden Fall die Geschwindigkeitskonstanz bis auf $1 \div 2\%$ U_0 zu prüfen. Da das Verhältnis der Grenzschichtdicken zur Dicke des Potentialkernes relativ groß ist, so läßt sich eine konstante Kerngeschwindigkeit U_0 bei einer gegebenen Absaugemenge und Deckeleinstellung nur für ein bestimmtes $\frac{U_0}{v}$ erreichen.

V. BEOBACHTUNG DER GRENZSCHICHTSCHWINGUNGEN

Zur Erzeugung der Grenzschichtschwingungen wird nach dem Vorbild von Schubauer und Skramstad [5] ein Band benutzt, das quer zur Strömungsrichtung und flach auf die Innenseite des Deckels montiert wird. Es ist 7 mm breit und aus einer 0,2 mm dicken elastischen Kunststoff-Folie geschnitten. Die periodische Bewegung senkrecht zur Wand erfolgt durch zwei Stoßstangen, die in einem Abstand von 70% der Kanalbreite durch den Deckel nach oben führen und dem Band in

diesem Bereich eine gleichbleibende Amplitude erteilen. Sie werden von einem drehzahlgeregelten Motor über ein Reibradgetriebe und ein Kurbelgestänge angetrieben. Die Frequenzen liegen zwischen 0,67 bis 0,067 Hz. Das Band kann leicht an verschiedenen Stellen der Meßstrecke angebracht werden.

Die Geschwindigkeitskomponenten der Störbewegung werden in folgender Weise gemessen:

- a) Die Größe der u' -Komponente kann unmittelbar aus der Differenz zweier Geschwindigkeitsprofile abgelesen werden. Die Differenz zweier Profile in den Extremlagen der Schwingungsbewegung liefert eine Vergleichsmöglichkeit mit der Verteilung $\varphi_r'(y)^1$. Die untere Grenze der feststellbaren Störgeschwindigkeiten ist z. Z. durch die photographische Wiedergabe der Profile begrenzt und liegt etwa bei

$$\frac{u'}{U_0} = 3 \div 5 \cdot 10^{-3}$$

- b) Die Größe der Quergeschwindigkeiten v' bzw. w' läßt sich aus den maximalen Durchbiegungen Δy bzw. Δz der Tellurstreichlinien, die an einzelnen längs angeströmten Tellurdrähten erzeugt werden, ermitteln. Integriert man Gl. (3) bei festem x über eine halbe Schwingungszeit, so erhält man als maximale Amplitudendifferenz der Bahnlinien

$$|\Delta y|_{\max} = 2 \frac{k \alpha \varphi_r U_0}{\beta_r} = 2 \frac{v'_{\max}}{\beta_r}$$

oder

$$\frac{v'_{\max}}{U_0} = \frac{1}{2} \frac{\beta_r |\Delta y|_{\max}}{U_0}$$

Jedes Volumenelement einer Streichlinie liegt gleichzeitig auch auf einer Bahnlinie. Beschränkt man sich auf den vorliegenden Fall einer periodischen Bewegung, so wird jeder Ort, der von einer Bahnlinie erreicht wird, zu irgend-



Abb. 5. Blick durch die Seitenwände der Meßstrecke von unten gegen den Kanaldeckel. Abstand der Streichlinien voneinander = 50% der Deckelbreite. Höhe beider Streichlinien in der oszillierenden Grenzschicht: $y/\delta = 0,65$. Der dünne Tellurdraht in der Mitte der schwarzen Kohlenelektrode wird am unteren Ende durch 0,4 mm dicke Stahldrähte gehalten

¹⁾ Die Amplitude der Verteilungen $\varphi_i(y)$ bzw. $\varphi_i'(y)$ ist gegenüber der Amplitude von $\varphi_r(y)$ bzw. $\varphi_r'(y)$ sehr klein. Außerdem verschwindet sie nach Gleichung (2) und (3) in den Extremwerten.

einem Zeitpunkt auch von einer Streichlinie berührt. Andererseits können aber Streichlinien auch nicht dorthin gelangen, wo keine Bahnlinien hinkommen. Dies bedeutet, daß die Einhüllenden beider Kurvenscharen zusammenfallen und daß die maximalen Amplitudendifferenzen Δy der Streich- und Bahnlinien an einem festen Ort identisch sind. Da man ein $\Delta y = 5 \cdot 10^{-3}$ cm noch gut beobachten kann, so lassen sich mit Tellurstreichlinien z. B. für $\beta_r = 1 \text{ sec}^{-1}$, $U_0 = 10 \text{ cm/sec}$ noch Quergeschwindigkeiten bis zu

$$\frac{v'}{U_0} \approx 2,5 \cdot 10^{-4}$$

verfolgen. Die Differenzen Δy werden am Okularmikrometer eines kleinen Fernrohres abgelesen. Sie lassen sich aber, wie man z. B. aus Abb. 5 erkennt, auch gut mit dem freien Auge verfolgen. Diese Abbildung, die einen Blick

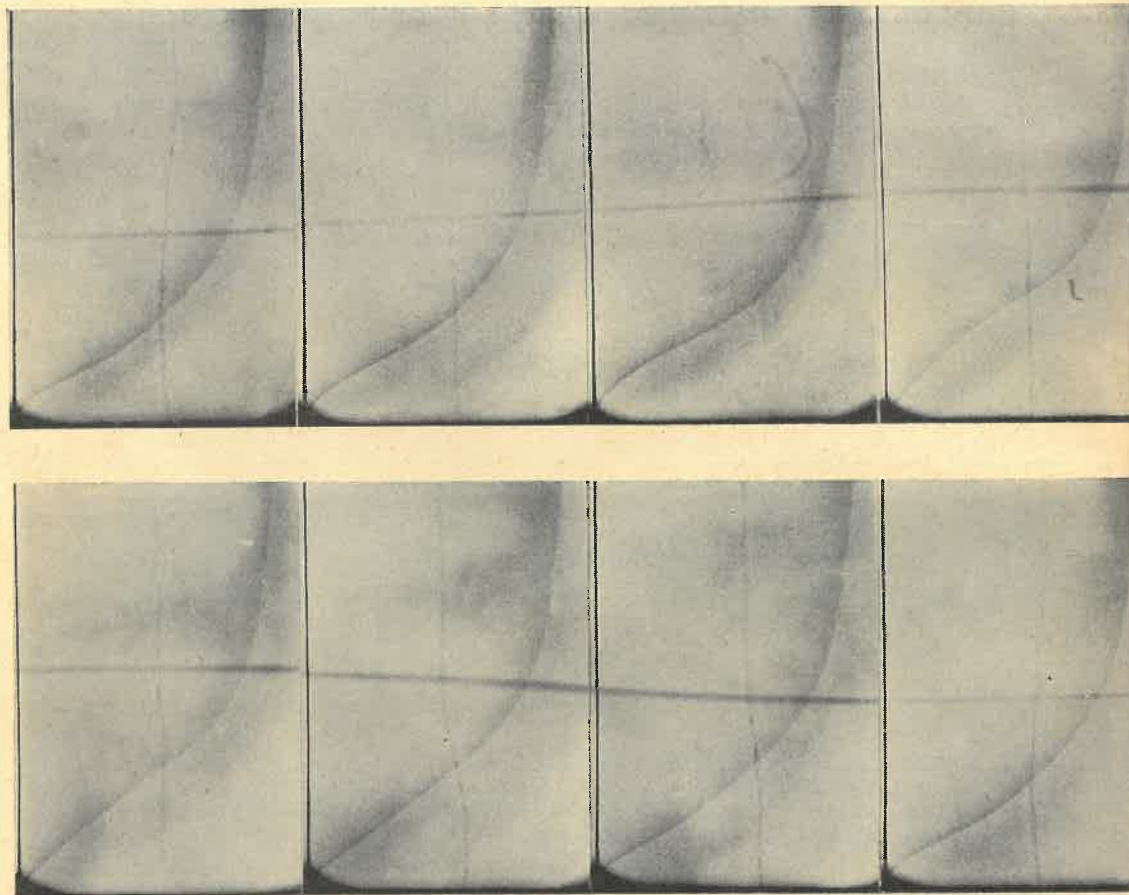


Abb. 6. Geschwindigkeitsverteilung der neutralen Grenzschichtschwingung bei $Re\delta^* = 900$ und $\beta_r = 0,64$

durch die Seitenwände der Meßstrecke von unten gegen den Kanaldeckel gibt, zeigt durch zwei weit auseinanderliegende Streichlinien, die in einer Ebene parallel zum Deckel erzeugt werden, daß die Grenzschicht in der ganzen Kanalbreite phasengleich schwingt. Die Dicke der Grenzschicht beträgt an dieser Stelle etwa das 1,5fache des Streichlinienabstandes von der Wand. Man erkennt gleichzeitig die Anordnung des Tellurdrahtes senkrecht zum Deckel und die schwarze Gegenelektrode.

Photographiert man die Grenzschichtprofile an einer Stelle hintereinander mit verschiedenen Phasenlagen, so erhält man ein der Abb. 2 entsprechendes Bild der Grenzschichtschwingung. Abb. 6 gibt eine Serie derartiger Aufnahmen wieder. Die erkennbare Streichlinie liegt bei diesen Aufnahmen außerhalb der Ebene des Grenzschichtprofils und ist darum unscharf abgebildet. Zur Veranschaulichung der Profilveränderung sind in Abb. 7 die Mittelwerte mehrerer Aufnahmen, deren Phasendifferenz etwa 180 Grad beträgt, übereinander gezeichnet. Die starke Krümmung der Tellurprofile in Wandnähe gibt das richtige Geschwindigkeitsprofil verzerrt wieder. Auf eine Korrektur, wie in [6] angegeben, wird aber bei der Ermittlung der u' -Komponente verzichtet, da die Differenz der Korrekturen belanglos ist.

Zur Feststellung der neutralen Frequenzen der Indifferenzkurve werden ebenfalls Streichlinien benutzt. Für den Kurvenzweig II genügt es, diejenigen Frequenzen zu messen, die an einer bestimmten Stelle der Meßstrecke bzw. für eine bestimmte Reynoldssche Zahl die maximale Amplitude Δy liefern (siehe Abb. 10). Für den Zweig I ist es dagegen erforderlich, zwei Amplituden im Abstand von etwa ± 10 cm von der Meßstelle miteinander zu vergleichen.

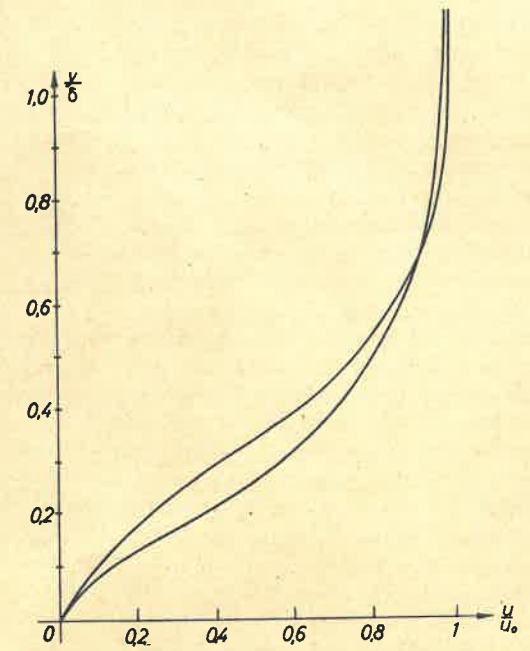


Abb. 7. Zwei Grenzschichtprofile in den Extrempunkten der Grenzschichtschwingung mit einer Phasendifferenz von 180°. Die beiden Profile sind Mittelwerte mehrerer Aufnahmeserien wie in Abb. 6

VI. MESSERGEBNISSE

Die maximalen Geschwindigkeitsdifferenzen der Grenzschichtprofile in Abb. 7 sind in Abb. 8 als $\frac{u'}{U_0}$ über der Grenzschichtdicke aufgetragen und mit der theoretischen Amplitudenverteilung φ_r' verglichen. Für die Bestimmung des Maßstabes in y -Richtung ist wie in [4] die Beziehung $\delta = 2,93 \delta^*$ benutzt worden. Die Ver-

teilung φ_r' ist noch so normiert, daß die mittlere Schwingungsintensität $\int_0^1 \varphi_r' d\frac{y}{\delta}$

der theoretischen Verteilung etwa genau so groß ist wie die gemessene. Die Übereinstimmung ist von einer ähnlichen Güte wie bei den Messungen von *Schubauer* und *Skramstad*. Die im Vergleich zum Hitzdrahtgerät geringe Meßgenauigkeit der u' -Bestimmung aus der Differenz zweier Grenzschichtprofile wird durch eine gegenüber den amerikanischen Messungen ungefähr zehnfach größere Schwingungsamplitude ausgeglichen.

Die Verteilung der Bewegungsamplitude Δy bzw. Geschwindigkeitsamplitude v' senkrecht zur Wand, die in oszillierenden laminaren Grenzschichten bisher nicht gemessen wurde, ist in Abb. 9 angegeben. Man erkennt, daß die gemessene Verteilung vom theoretischen Verteilungstyp φ_r , dessen Amplitude in Abb. 9 willkürlich gewählt ist, erheblich abweicht. Die Ursache für diese Abweichung hängt vielleicht mit dem Auftreten einer dritten Bewegungskomponente Δz quer zur xy -Ebene zusammen, die in der *Tollmien-Schlichting*'schen Theorie nicht auftritt. Die Verteilung der Δz -Amplitude ist ebenfalls in Abb. 9 im gleichen Maßstab angegeben. Die gleichzeitige Beobachtung mehrerer Streichlinien in einer Ebene parallel zum Deckel zeigt, daß die Bewegung in z -Richtung auf der gesamten Kanalbreite mit Ausnahme der Ecken, in denen alle Amplituden abklingen, nahezu die gleiche Phase und Amplitude besitzt. Verzichtet man auf die künstlich erregte Störung, so verschwindet, genau wie alle übrigen Störgeschwindigkeiten, auch die Querkomponente parallel zur Wand. Diese Δz bzw. w' -Komponente ist aber nicht durch Ungleichmäßigkeiten der künstlichen Störung verursacht, weil ihre Größe und Verteilung selbst von starken willkürlichen Fehlern des Bandantriebes kaum beeinflußt wird. Bei den amerikanischen Messungen [5], wurden die Quergeschwindigkeiten der Grenzschichtschwingung nicht untersucht.

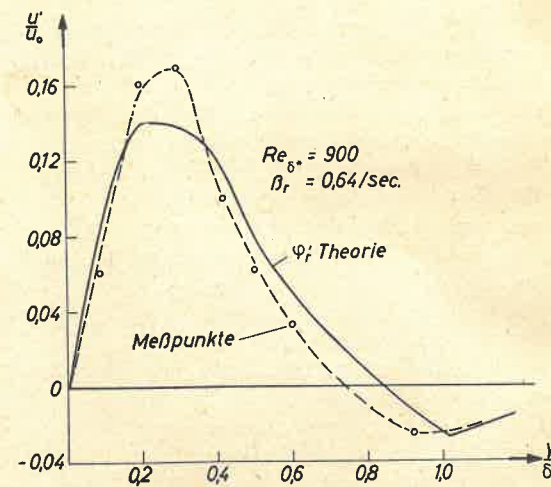


Abb. 8. Vergleich der Amplitudenverteilung der u' -Komponente nach Abb. 6 und 7 mit der theoretischen Verteilung φ_r' nach *Schlichting* [4]

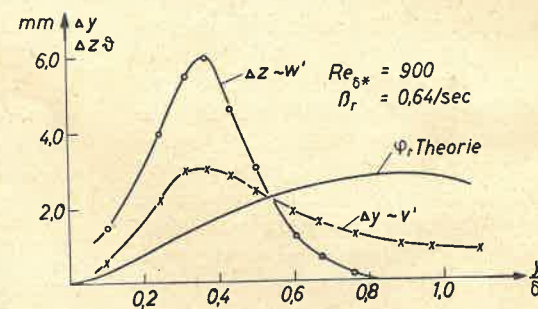


Abb. 9. Die Amplitudenverteilungen der Querbewegungen in y - und z -Richtung. φ_r = theoretische Verteilung der v' -Komponente nach *Schlichting* [4] für die rein zweidimensionale Störungsbewegung. Der Maßstab der Verteilung φ_r ist willkürlich

Wegen der kleinen Kanalabmessungen muß es dahingestellt bleiben, ob es sich hier um einen Effekt handelt, der auch in einer zweidimensionalen Strömung möglich ist, oder ob die Ursache in einer Rückkopplung der Deckengrenzschicht mit den übrigen drei Grenzschichten zu suchen ist.

Das Ergebnis der Amplitudenmessungen zur Bestimmung der Indifferenzkurve ist in Abb. 10 und Abb. 11 wiedergegeben. In Abb. 10 ist die Amplitude Δy mit willkürlichem Maßstab über der Schwingungszeit des Störungsbandes für verschiedene Lagen x der Meßstelle aufgetragen. Das entsprechende Re_{δ^*} errechnet sich daraus zu

$$Re_{\delta^*} = 1,73 \sqrt{\frac{\nu(x+x_1)}{U_0}}$$

Die zusätzliche Länge x_1 ist aus der an mehreren Stellen gemessenen Verdrängungsdicke der Grenzschicht ermittelt und berücksichtigt die Wirkung der Abdeckung der Einströmdüse auf die effektive Plattenlänge. Die Auswertung dieser Meßergebnisse, die die neutralen Frequenzen des Kurvenzweiges II liefern (siehe oben), ist in Abb. 11 zusammen mit den Meßpunkten des Zweiges I eingetragen. Man erkennt, daß die allgemeine Übereinstimmung sowohl mit der theoretischen Indifferenzkurve von *Tollmien* und *Schlichting* als auch mit der experimentellen Kurve von *Schubauer* und *Skramstad* gut ist. Insbesondere wird durch die Messungen die Abweichung der experimentellen Kurve bei kleinen *Reynoldsschen* Zahlen nach höheren Frequenzen hin bestätigt. Ob die Meßpunkte um $Re_{\delta} \approx 10^3$ die experimentelle oder theoretische Kurve stützen, kann mit Rücksicht auf die Unzulänglichkeit der Meßstrecke nicht entschieden werden.

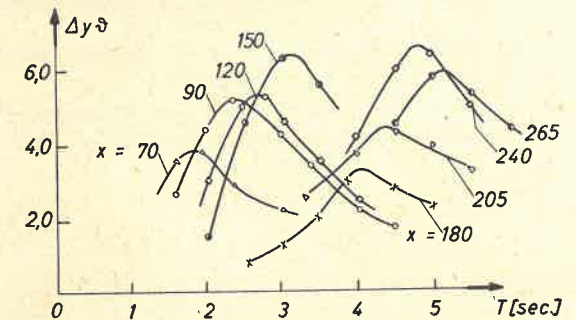


Abb. 10. Die Amplitude der Querbewegung Δy in Abhängigkeit von der Schwingungszeit der künstlichen Störung und der Lage x der Meßstelle. Der Maßstab der Ordinate ist willkürlich

VII. ZUSAMMENFASSUNG

Es werden Messungen an einer instabilen Grenzschicht in einem kleinen Wasserkanal mit der Tellurmethode durchgeführt. Dabei wird der Zusammenhang der neutralen Grenzschichtschwingungen mit der *Reynoldsschen* Zahl (Indifferenzkurve) und die zur Wand senkrechten Amplitudenverteilungen der Geschwindigkeitskomponenten gemessen.

Das Ergebnis dieser Messungen kann die theoretische Lage der Indifferenzkurve und die Amplitudenverteilung der u' -Komponente erneut bestätigen, obwohl keine zweidimensionale, sondern eine dreidimensionale Störungsbewegung beobachtet wurde.

Die Arbeit wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft ermöglicht und im Institut für Gasströmungen der Technischen Hochschule Stuttgart durchgeführt. Für vielfache Unterstützung schulde ich Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Weise besonderen Dank.

Literatur

- [1] *Tollmien, W.*: Über die Entstehung der Turbulenz, 1. Mitteilung. Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math. Phys. Klasse 21 (1929). Engl. Übersetzung in NACA Techn. Mem. Nr. 609 (1931).
- [2] *Schlichting, H.*: Zur Entstehung der Turbulenz bei der Plattenströmung. Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math. Phys. Klasse 182 (1933), vgl. auch ZaMM 13, 171 (1933).
- [3] *Schlichting, H.*: Grenzschichttheorie. Braun, Karlsruhe 1951.
- [4] *Schlichting, H.*: Amplitudenverteilung und Energiebilanz der kleinen Störungen bei der Plattenströmung. Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math. Phys. Klasse, Fachgruppe I, 1, 47 (1935).
- [5] *Schubauer, G. B., Skramstad, H. K.*: Laminar Boundary Layer Oscillations and Stability of Laminar Flow. NACA Rep. 909.
- [6] *Wortmann, F. X.*: Eine Methode zur Beobachtung und Messung von Wasserströmungen mit Tellur. Zeitschr. f. angew. Physik, Bd. 5, 1953, S. 201–206.

Eingegangen am 7. 8. 1954