

AKUSTISCHE BEEINFLUSSUNG VON FREISTRAHLGRENZSCHICHTEN

DR.-ING. A. MICHALKE UND DR.-ING. O. WEHRMANN

Deutsche Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V. Institut für
Turbulenzforschung, Berlin

Das Phänomen des laminar-turbulenten Umschlages beobachtete als erster Reynolds¹ 1883 an der Rohrströmung. Reynolds² sprach die Vermutung aus, dass die Laminarströmung oberhalb einer gewissen Grenze labil wird und unter Einwirkung kleiner Störungen in die turbulente Strömungsform übergehen kann.

Aus diesen Überlegungen entwickelte sich die hydrodynamische Stabilitätstheorie. Ihr Ziel war die Berechnung von Bedingungen, für die in einer laminaren Strömung kleine Störungen zeitlich anwachsen. Wegen der grossen mathematischen Schwierigkeiten gelang es erst Tollmien³ 1929 und später Schlichting⁴, dieses Problem für die Plattengrenzschicht bei sehr kleinen periodischen Störungen, für die man die Störungs-Differentialgleichungen linearisieren darf, zu lösen. Mit der berechneten Indifferenzkurve lässt sich prüfen, ob für eine vorgegebene Störfrequenz und für eine feste Reynolds-Zahl die Störung zeitlich anwächst oder abnimmt.

Die experimentelle Bestätigung der Stabilitätstheorie erfolgte erst 1943 durch Schubauer und Skramstad⁵. Sie untersuchten die Grenzschicht an einer Platte mittels der Hitzdrahtmesstechnik und konnten die Anfachung von zufällig auftretenden natürlichen Störungen beobachten. Doch ein Vergleich mit den theoretischen Ergebnissen war schwierig, da die Frequenz und Amplitude dieser natürlichen Störungen zu unregelmässig und deshalb nur schwer messbar waren. Deshalb erzeugten Schubauer und Skramstad künstliche sinusförmige Störungen in der laminaren Plattengrenzschicht mit einem dünnen schwingenden Band und wurden somit den Voraussetzungen der Theorie nach zweidimensionalen periodischen Störungen besser gerecht. Mit dieser künstlichen Beeinflussung der Grenzschicht konnten Schubauer und Skramstad angefachte, gedämpfte und neutrale Störungen beobachten, die quantitativ in Einklang mit der Stabilitätstheorie standen.

Schubauer und Skramstad versuchten auch auf andere Art, in der laminaren Plattengrenzschicht künstliche Störungen zu erregen. Da sie nämlich festgestellt hatten, dass ein Schallfeld den laminar-turbulenten Übergang beeinflusst, prägten sie der Grenzschicht mit einem Lautsprecher künstlich ein Schallfeld auf. Sie hatten jedoch mit dieser akustischen Beeinflussung wenig Erfolg, da sich in ihrem Windkanal Resonanzeffekte und stehende Schallwellen ausbildeten, die eine eindeutige Beeinflussung der Grenzschicht unmöglich machten.

Seit diesen Versuchen von Schubauer und Skramstad ist die Erzeugung von künstlichen Störungen in einer laminaren Grenzschicht ein wichtiges Hilfsmittel beim Studium des laminar-turbulenten Überganges geworden. So führten u. a. Schubauer und Klebanoff⁶ weitergehende Untersuchungen an der Plattengrenzschicht ebenfalls mit einem schwingen Band durch. Laufer und Vrebalovich⁷ untersuchten die Stabilität einer laminaren Überschall-Plattengrenzschicht unter Einwirkung von kleinen periodischen Druckstößen aus einem Schlitz in der Platte. Erwähnt sei auch eine Stabilitätsuntersuchung der Grenzschicht an einem zweidimensionalen Tragflügel von Bergh⁸, der eine akustische Beeinflussung der Tragflügel-Grenzschicht anwendete.

Bei den experimentellen Untersuchungen des laminar-turbulenten Überganges in freien Grenzschichten wurde zur Erzeugung künstlicher Störungen vorwiegend das Schallfeld eines Lautsprechers gewählt. In Arbeiten von Wille, Wehrmann, Fabian⁹, Wehrmann¹⁰ und Wehrmann und Wille¹¹ wurde seit 1956 über die akustische Beeinflussung eines axial-symmetrischen Freistrahles berichtet. Unabhängig davon wendete auch Sato^{12/13} die akustische Beeinflussung bei einer abgelösten Grenzschicht hinter einer Stufe und bei ebenen Freistrahlen Sato¹⁴ und Sato und Sakao¹⁵ an. Neuerdings hatte Sato und Kuriki¹⁶ mit dieser Methode auch Erfolg bei der Untersuchung des Nachlaufes hinter einer Platte.

Im folgenden soll über die Vor- und Nachteile der künstlichen Erregung von Störungen in einer Grenzschicht mit einem schwingenden Band und mit Schall berichtet werden.

ZUR ERREGUNG KÜNSTLICHER STÖRUNGEN DURCH EIN SCHWINGENDES BAND

Ein senkrecht zur Hauptströmungsrichtung periodisch schwingendes Band in einer Grenzschicht erzeugt eine örtlich begrenzte Störung, die durch die Strömung mitgenommen und dadurch in eine transversale Welle verwandelt wird. Die in Schwingung versetzten Teilchen des Mediums führen also eine freie Schwingung aus, d. h. sie sind der erregenden Wirkung des Bandes entzogen, und die weitere Entwicklung der Störung hängt nur von den Strömungsparametern ab. Die Amplitude der Störung kann nach genügender Lauflänge in der Strömung anwachsen oder auch abklingen, falls nicht der Umschlag durch unvermeidliche natürliche Störungen das vollständige Abklingen der gedämpften künstlichen Störung verhindert.

Ein schwingendes Band zur Erzeugung von periodischen Störungen in einer Grenzschicht eignet sich im allgemeinen nur für ebene Strömungsprobleme. Soll auch eine ebene Störung erzeugt werden, so muss die Schwingungsamplitude

längs des Bandes konstant sein. Die Dicke des Bandes muss möglichst gering sein, um eine Störung des Grenzschichtprofils durch den Nachlauf hinter dem Band möglichst klein zu halten. Das schwingende Band, das Schubauer und Skramstad⁵ benutzten, zeigt Fig. 1. Das Band hatte rechteckigen Querschnitt von 0.05 mm Dicke und 2.5 mm Breite und wurde an den Enden elastisch gespannt. Unter dem Einfluss von in der Platte eingebauten Magneten konnte das Band zum Schwingen angeregt werden, wenn es von einem Wechselstrom variabler Frequenz durchflossen wurde.

Für freie ebene Grenzschichten ist diese Methode jedoch nicht anwendbar. Deshalb wurde von Wille, Wehrmann und Michalke¹⁶ für die Untersuchung in einem ebenen Freistrahle eine andere Konstruktion angewendet, die Fig. 2 zeigt. Zur Erzielung ebener Störungen wurde ein Stahlband von 0.1 mm Dicke und 1 mm Breite und einer Länge von 500 mm mit einer Zugkraft von 10 kp sehr stark vorgespannt und von zwei Schwingungserzeugern angeregt. Das Band führte dann Schwingungen wie ein starrer Balken mit konstanter Amplitude längs des Bandes aus.

Das schwingende Band als Störungserzeuger hat aber einen grossen Nachteil. Das Grenzschichtprofil wird nämlich durch das Band trotz dessen kleiner Abmessungen erheblich verändert. Fig. 3 zeigt ein Grenzschichtprofil im ebenen Freistrahle, gemessen mit einem Konstant-Temperatur-Hitzdrahtmessgerät und aufgezeichnet von einem Lichtpunktschreiber bei kontinuierlicher Bewegung der Hitzdrahtsonde, und zwar ohne Band, mit nichtschwingendem Band und bei schwingendem Band mit kleiner und grosser Auslenkung. Ein

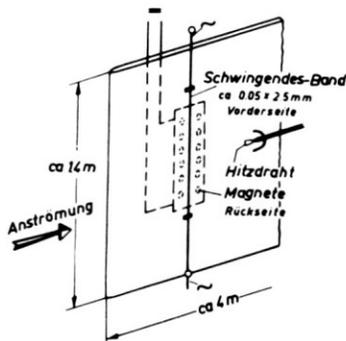


Fig. 1. Schwingendes Band für die Plattengrenzschicht.

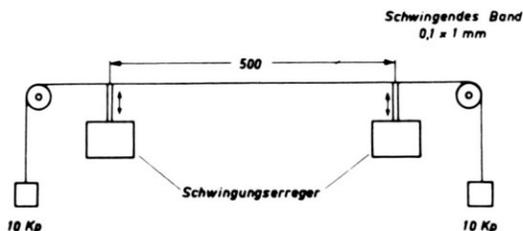


Fig. 2. Schwingendes Band für ebene Freistrahlgrenzschichten.

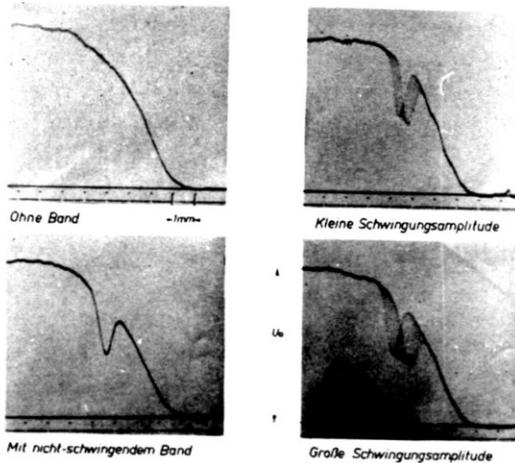


Fig. 3. Geschwindigkeitsprofile im ebenen Freistrah 1 mm hinter einem schwingenden Band. Strahlgeschwindigkeit $U_0 = 2$ m/s; Frequenz $f = 10$ Hz.

weiterer Nachteil des schwingenden Bandes ist, dass die Stör-Amplitude nur sehr schwer gemessen und im allgemeinen nicht als infinitesimal klein bezeichnet werden kann.

ZUR ERREGUNG KÜNSTLICHER STÖRUNGEN DURCH SCHALL

Im Gegensatz zum schwingenden Band erzeugt ein Lautsprecher in der Nähe einer Grenzschicht eine räumlich verteilte Störung in Form von Schallwellen; denn der Schall von einem Lautsprecher kann nicht scharf gebündelt werden. Deshalb ist die Erzeugung einer lokalen Störung in der Grenzschicht nicht möglich. Die Störung wird von dem Strömungsmedium stromab mitgeführt, steht jedoch weiterhin ständig unter dem Einfluss der Erregung. Es handelt sich also um eine erzwungene Schwingung, und ein Abklingen der Störung ist prinzipiell unmöglich.

Um die künstliche Störung in der Grenzschicht durch das Schallfeld eindeutig definieren zu können, ist es erforderlich, im gesamten Strömungsfeld den Schall in seinem zeitlichen Verlauf sinusförmig und seine Intensität konstant zu halten. Diese Forderung ist nicht immer zu erfüllen, da sich unter Einfluss von festen Wänden stehende Schallwellen und Resonanzeffekte ausbilden können. Die Grösse der Stör-Amplitude kann mit einem Messmikrophon und einem Schallpegelmesser als Schalldruck gemessen werden. Deshalb bereitet auch die Überprüfung des Schallfeldes keine Schwierigkeiten. Im Gegensatz zum schwingenden Band eignet sich die akustische Beeinflussung auch für dreidimensionale Strömungsprobleme, so zum Beispiel für den axialsymmetrischen Freistrah.

Bei den Freistrahlgrenzschichten zeigte es sich, dass bereits sehr geringe Schallintensität eine Beeinflussung der Grenzschicht hervorruft. Bei einem Geräuschpegel von 50 db genügte zur akustischen Beeinflussung der Grenzschicht bereits eine Schallintensität, die einem Gesamt-Schallpegel von 55 db entsprach. Das hat den Vorteil, dass die erzeugte Störung in der Grenzschicht

der Voraussetzung der linearisierten Stabilitätstheorie nach infinitesimal kleinen Störungen weitgehend entspricht; zum anderen ergibt sich jedoch aus dieser Tatsache die Forderung, dass die Messstrecke gegen unerwünschte Beeinflussung durch Raumschall weitgehend abgeschirmt werden muss. Um eine künstliche Beeinflussung der Grenzschicht zu erzielen, muss also die Schallintensität vom Lautsprecher grösser als der allgemeine Geräuschpegel im Messraum sein. Zum anderen existiert für die Schallintensität eine obere Grenze. Bei Benutzung der Hitzdrahtmessmethode darf die Hitzdrahtsonde nämlich nicht als Mikrophon wirken, d.h. die aus dem Schallfeld resultierenden Geschwindigkeitsschwankungen im Raum anzeigen. Bei sorgfältiger Schallabdämmung im Messraum ist es immer zu erreichen, dass genügend Spielraum für die Variation der Schallintensität innerhalb dieser beiden Grenzen bleibt. Die Grössenordnung der erzeugten Störung bei akustischer Beeinflussung lässt sich abschätzen. Bei einer Schallfrequenz von 100 Hz und einem Schalldruck von 100 db beträgt zum Beispiel die Schallschnelle ca. 0.5 cm/s und die Störamplitude ca. 0.01 mm.

Erfährt die Störung aufgrund der Strömungsparameter keine Anfachung, so kann sie von der Hitzdrahtsonde unter diesen Voraussetzungen auch nicht gemessen werden. Deshalb können im Gegensatz zur Erregung mit einem schwingenden Band nur angefachte Störungen bei akustischer Beeinflussung von Freistrahlgrenzschichten beobachtet werden. Figure 4 zeigt ein Geschwindigkeitsprofil in axialsymmetrischen Freistrahle ohne Beeinflussung, bei Erregung mit Schall einer Frequenz, wobei die Störung nicht angefacht wird, und mit angefachten Störungen bei Erregung mit zwei verschiedenen Schallintensitäten.

Die unterschiedliche Wirkung der beiden Methoden zur Erzeugung künstlicher Störungen zeigen die folgenden Bilder am Beispiel des ebenen Freistrahls: In Fig. 5 werden angefachte Störungen mit Wirbelcharakter gezeigt, die in der unteren Grenzschicht mit einem schwingenden Band erregt wurden. Die obere Grenzschicht wird dadurch jedoch nicht beeinflusst und steht nur unter dem Einfluss natürlicher Störungen. Diese gegenseitige Unabhängigkeit der beiden

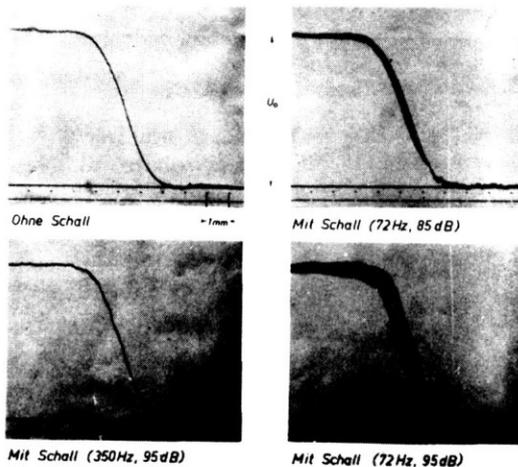


Fig. 4. Geschwindigkeitsprofile im runden Freistrahle bei Schallbeeinflussung. Strahlgeschwindigkeit $U_0 = 3$ m/s.

Grenzschichten eines ebenen Freistrahls hat schon Sato¹ vermutet. Mit zwei Lautsprechern, die sich ober- und unterhalb des Freistrahls befinden, können dagegen in beiden Grenzschichten angefachte Störungen erregt werden. Sind beide Lautsprecher gleichphasig geschaltet, so erhält man nach Fig. 6 eine symmetrische Wirbelanordnung, die sich auch ohne akustische Beeinflussung ausbildet. Ist die Lautsprecherschaltung gegenphasig, so wird, wie Fig. 7 zeigt, eine antisymmetrische Wirbelanordnung erzwungen, die bei diesen Reynoldszahlen von Natur aus nicht entsteht.

Beim runden Freistrahls führt die akustische Beeinflussung mit zwei gleichphasigen Lautsprechern zur Bildung von Ringwirbeln, die auch ohne akustische Beeinflussung entstehen; bei Erregung mit gegenphasigen Lautsprechern jedoch entstehen antisymmetrisch angeordnete Halbringwirbel. Diese beiden Wirbelanordnungen werden in Figs. 8 und 9 gezeigt. Die Wirbelstruktur des Übergangsgebietes von Freistrahlgrenzschichten wurde bereits in den oben zitierten Arbeiten beschrieben.

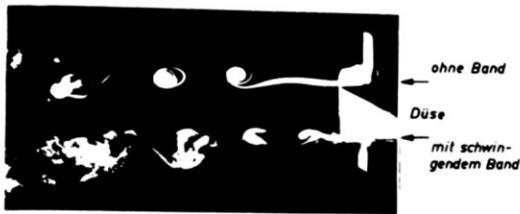


Fig. 5. Durch Rauch sichtbar gemachte Grenzschichten eines ebenen Freistrahls. Die untere Grenzschicht wird mit einem schwingendem Band beeinflusst. Strahlgeschwindigkeit $U_0 = 1.45$ m/s; Frequenz des Bandes $f = 22$ Hz.



Fig. 6. Ebene Freistrahlgrenzschichten (mit Rauch sichtbar gemacht) bei akustischer Beeinflussung durch zwei gleichphasige Lautsprecher ober- und unterhalb des Strahls. Strahlgeschwindigkeit $U_0 = 1.45$ m/s; Schallfrequenz $f = 16$ Hz.



Fig. 7. Ebene Freistrahlgrenzschichten (mit Rauch sichtbar gemacht) bei akustischer Beeinflussung durch zwei gegenphasige Lautsprecher ober- und unterhalb des Strahls. Strahlgeschwindigkeit $U_0 = 2$ m/s; Schallfrequenz $f = 30$ Hz.

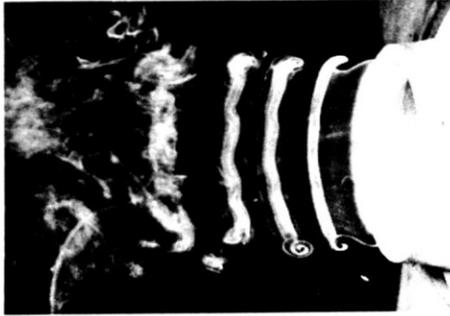


Fig. 8. Mit Rauch sichtbar gemachte Grenzschicht eines runden Freistrahls bei akustischer Beeinflussung mit zwei gleichphasigen Lautsprechern ober- und unterhalb des Strahls. Strahlgeschwindigkeit $U_0 = 2$ m/s; Schallfrequenz $f = 42$ Hz.

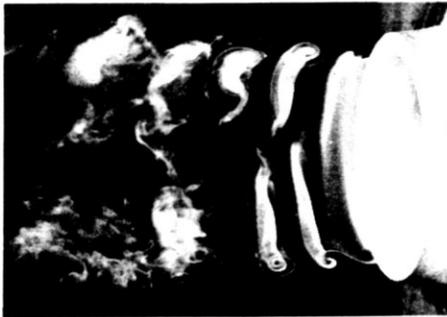


Fig. 9. Mit Rauch sichtbar gemachte Grenzschicht eines runden Freistrahls bei akustischer Beeinflussung mit zwei gegenphasigen Lautsprechern ober- und unterhalb des Strahls. Strahlgeschwindigkeit $U_0 = 2$ m/s; Schallfrequenz $f = 42$ Hz.

ERGEBNISSE VON HITZDRAHTMESSUNGEN BEI AKUSTISCHER BEEINFLUSSUNG VON FREISTRALHGRENZSCHICHTEN

Die Freistrahlgrenzschicht wurde stromab hinter einer axialsymmetrischen Düse untersucht, die an der Frontplatte einer Überdruckkammer befestigt war, wie Fig. 10 zeigt. Um den Geräuschpegel möglichst niedrig zu halten, wurde die ganze Anlage mit schallschluckenden Wänden umgeben. Die Messungen erfolgten mit einem Konstant-Temperatur-Hitzdrahtmessgerät nach Wehrmann,¹⁸ das mit Transistoren arbeitet und dessen Ausgangsspannung proportional der Strömungsgeschwindigkeit ist. Mit diesem Gerät können Geschwindigkeitsschwankungen ohne Amplitudenabfall und ohne Phasendrehung bis 4 kHz gemessen werden. Der allgemeine Frequenzbereich erstreckt sich von 0 bis 30 kHz.

Wie die Sichtbarmachung von Freistrahlgrenzschichten gezeigt hat, rollt sich die freie Strahlgrenzschicht bereits kurz hinter der Düse zu mäanderförmigen Gebilden auf, die als Wirbel interpretiert werden können. Nach einem

Film von Berger¹⁹ zeigt Fig. 11 einen Freistrahel in Wasser hinter einer axial-symmetrischen Düse, bei dem die Grenzschicht an zwei Stellen mit Farbe sichtbar gemacht wurde.

Eine theoretische Erklärung für die Entstehung von Wirbeln in einer freien Grenzschicht gaben Schade und Michalke.²¹ Der Vorgang der Wirbelbildung in der Freistrahlgrenzschicht wäre danach folgendermassen zu beschreiben:

Infolge der Reibung bildet sich in der Düse eine Wandgrenzschicht und dahinter eine freie Scherschicht aus, die sich bei geringer Zähigkeit mit Hilfe der Grenzschichttheorie beschreiben lässt. Die freie Scherschicht ist bei geringer Zähigkeit gegenüber einem bestimmten Bereich von Frequenzen und Wellenlängen instabil, der sich mit Hilfe der Stabilitätstheorie, bei sehr geringer Zähigkeit in guter Näherung mit Hilfe der reibungslosen Stabilitätstheorie, berechnen lässt. Durch künstliche Erregung lassen sich alle instabilen Frequenzen bzw. die zugehörigen Wellenlängen anregen; ohne künstliche Beeinflussung bildet sich vorwiegend die am stärksten instabile Störung aus. Sobald sich

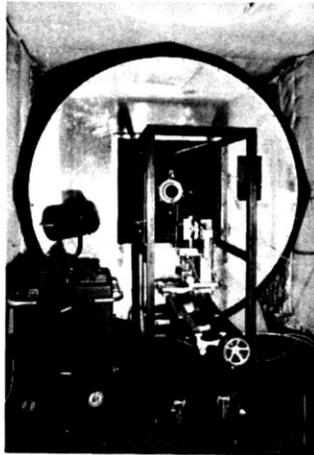


Fig. 10. Versuchskammer mit Düse und Bewegungsmechanismus für die Hitzdrahtsonde.

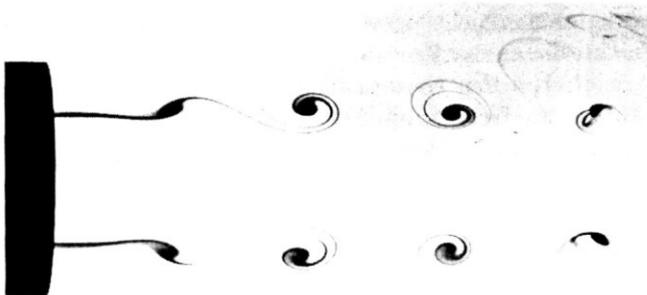


Fig. 11. Aufrollung der Freistrahlgrenzschicht in Wasser bei einer Reynoldszahl $Re = 1800$.

eine dominierende Wellenlänge ausgebildet hat, rollt sich die Scherschicht bei geringer Zähigkeit unter dem Einfluss der gegenseitigen Induktion der in ihr verteilten Rotation unter Erhaltung von Frequenz und Wellenlänge auf, wie das Rosenhead²² und Hama und Burke²² für eine Wirbelschicht in einer idealen Flüssigkeit beschrieben haben. Die Zähigkeit hat auf die Wirbelbildung keinen direkten Einfluss, sondern wirkt sich nur auf dem Umweg über die Ausbildung des Grenzschichtprofils aus. Deshalb geht die Zähigkeit nur über eine für das Grenzschichtprofil charakteristische Länge, z.B. die Grenzschichtdicke, in das Problem ein.

Zur Überprüfung dieser Hypothese wurden im axialsymmetrischen Freistrah hinter einer speziellen Düse die Frequenz der natürlich entstehenden Wirbel und bei akustischer Beeinflussung die Wellenlänge, d.h. der Abstand zweier aufeinanderfolgender Wirbel, in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz mit der Hitzdrahtmesstechnik ermittelt.

Da die natürlich entstehende Wirbelbildung infolge der Unregelmässigkeit der natürlichen Störungen nicht streng periodisch erfolgt, wurde aus vielen Frequenzmessungen ein zeitlicher Mittelwert dieser sogenannten natürlichen Frequenz gebildet. Eine Messung der Wellenlänge ohne künstliche Beeinflussung war aus demselben Grunde nicht möglich. Bei akustischer Beeinflussung jedoch hat Wehrmann²⁰ für konstante Strahlgeschwindigkeit mit einer festen und einer bewegten Hitzdrahtsonde die jeder Erregerfrequenz zugeordnete Wellenlänge gemessen. Der Schalldruck von 95 db war bei diesen Messungen konstant und sein zeitlicher Verlauf sinusförmig im Strömungsfeld hinter der Düse.

Für die dimensionslose Auftragung dieser Grössen wurde als charakteristische Länge in der Scherschicht die Verdrängungsgrenzschichtdicke im Endquerschnitt der Düse gewählt, die von Michalke²⁴ berechnet und gemessen wurde.

Ausserdem wurden Geschwindigkeitsprofile stromab hinter der Düse gemessen. Figure 12 zeigt gemittelte Profile aus Messungen bei verschiedenen Geschwindigkeiten im Endquerschnitt der Düse und 16 mm stromab. Das letztere Profil wurde auf seine Stabilität gegenüber kleinen periodischen Störungen untersucht und zur Vereinfachung linear approximiert. Die mit der Rayleighschen Gleichung durchgeführte reibungslose Stabilitätsrechnung für dieses Näherungsprofil führte überraschenderweise bereits zu einer guten quantitativen

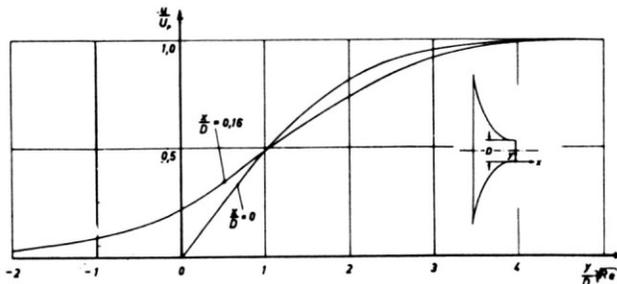


Fig. 12. Mittelwerte der gemessenen Grenzschichtprofile in und hinter der Wirbelfadendüse.
 U_p Potentialgeschwindigkeit; Düsendurchmesser $D = 10$ cm.

Übereinstimmung von angefachten Wellenlängen und Frequenzen in der freien Grenzschicht mit den gemessenen Wellenlängen und Frequenzen der Wirbel.

Fig. 13 zeigt in dimensionsloser Auftragung die in Luft und Wasser gemessene natürliche Wirbelfrequenz sowie den theoretischen Wert der maximal angefachten Stör-Frequenz in Rayleighscher Näherung. Die gemessene Wirbelfrequenz ist in Übereinstimmung mit der Theorie unabhängig von der Reynoldszahl. In Fig. 14 ist die dimensionslose Wellenzahl durch Schall erregter Wirbel aufgetragen in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz bei drei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten. Auch hier ist keine Abhängigkeit von der Reynoldszahl ersichtlich. Gleichzeitig ist der theoretische Verlauf der angefachten Wellenzahl in der Grenzschicht als Funktion der Störfrequenz eingezeichnet.

Die qualitative wie quantitative Übereinstimmung von Theorie und Experiment scheint die Hypothese über die Entstehung von Wirbeln in einer freien Strahlengrenzschicht zu rechtfertigen. Die Ergebnisse zeigen aber auch deutlich, wie wichtig und notwendig es ist, bei der experimentellen Stabilitätsuntersuchung von Grenzschichten künstliche Beeinflussung anzuwenden.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Erzeugung künstlicher Störungen in einer laminaren Grenzschicht ist ein wesentliches Hilfsmittel bei der experimentellen Untersuchung des laminar-turbulenten Übergangs. Schübauer und Skramstad wendeten bei ihrer Unter-

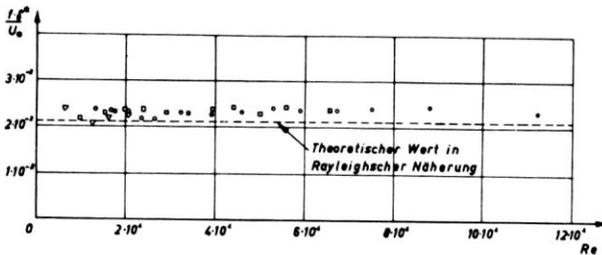


Fig. 13. Natürliche Wirbelfrequenz als Funktion der Reynoldszahl. Messungen in Luft bei einem Düsendurchmesser $D = 10$ cm (\circ); $D = 7.5$ cm (\square), und in Wasser bei $D = 1.5$ cm (∇).

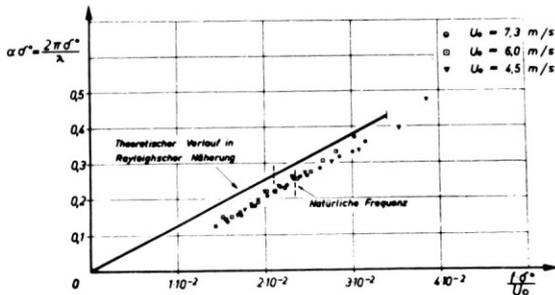


Fig. 14. Wellenzahl als Funktion der Wirbelfrequenz bei akustischer Beeinflussung. Düsendurchmesser $D = 10$ cm.

suchung der Plattengrenzschicht zwei verschiedene Methoden an: Erzeugung von künstlichen Störungen mit einem schwingenden Band und mit Schallwellen von einem Lautsprecher.

Mit einem schwingenden Band wird eine örtlich begrenzte Störung erregt, die in der Grenzschicht angefacht oder gedämpft wird. Ein Nachteil dieser Methode ist die Störung des Grenzschichtprofils durch den Nachlauf hinter dem Band.

Bei der akustischen Beeinflussung wird eine räumlich verteilte Störung erzeugt, deren Amplitude sehr klein gehalten werden kann. Nachteilig wirkt sich aus, dass leicht stehende Wellen und Resonanzeffekte auftreten können. Ausserdem lassen sich bei akustischer Beeinflussung keine gedämpften Störungen beobachten.

Weiterhin wird versucht, mit Hilfe von Hitzdrahtmessungen in einer Freistrahlgrenzschicht bei akustischer Beeinflussung die Entstehung von Wirbeln in freien Grenzschichten zu erklären. Eine freie Grenzschicht ist für bestimmte Frequenzen bzw. Wellenlängen instabil. Wird eine wellenförmige Störung in der Grenzschicht angefacht, so rollt sie sich unter Erhaltung von Frequenz und Wellenlänge zu Wirbeln auf. Bei kleiner Zähigkeit hat die Reibung keinen direkten Einfluss auf die Anfachtung der Störungen und auf die Wirbelbildung, sondern wirkt sich nur auf dem Umweg über die Ausbildung des Grenzschichtprofils aus.

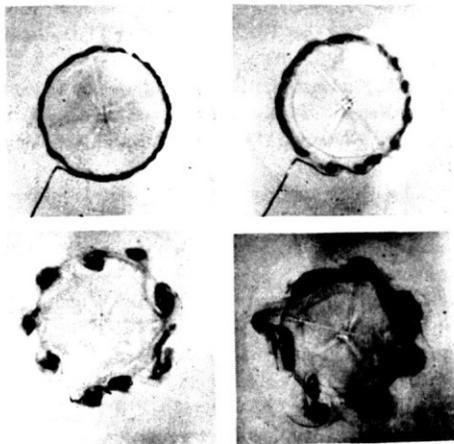
LITERATUR

1. Reynolds, O., "An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels," *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 1883.
2. ———, "On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion," *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 1895.
3. Tollmien, W., "Über die Entstehung der Turbulenz," I. Mitteilung Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, *Math. Phys. Klasse* 21-24, 1929.
4. Schlichting, H., "Zur Entstehung der Turbulenz bei der Plattenströmung," Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, *Math. Phys. Klasse* 182, 1933.
5. Schubauer, G. B., and H. K. Skramstad, "Laminar Boundary Layer Oscillations and Transition on a Flat Plate. National Bureau of Standards," *Research Paper RP 1772*, 1947.
6. Schubauer, G. B., and P. S. Klebanoff, "Contributions on the Mechanics of Boundary Layer Transition," *NACA Rep. 1289*, 1956.
7. Laufer, S., and T. Vrebalovich, "Stability of a Supersonic Laminar Boundary Layer on a Flat Plate," *California Institute of Technology, Rep. No. 20-116*, 1958.
8. Bergh, H., "A Method for Visualizing Periodic Boundary Layer Phenomena," in *Grenzschichtforschung*, Berlin, Springer, 1958.
9. Wille, R., O. Wehrmann, and H. Fabian, "Further Investigations of the Laminar-Turbulent Transition in a Free Jet (Annular Nozzle)," *AFOSR TR 57-31*, 1956.
10. Wehrmann, O., "Akustische Steuerung der turbulenten Anfachtung im Freistrah," *Jahrbuch WGL*, 1957.
11. ———, and R. Wille, "Beiträge zur Phänomenologie des laminar-turbulenten Übergangs im Freistrah bei kleinen Reynoldszahlen," in *Grenzschichtforschung*, Berlin, Springer, 1958.
12. Sato, H., "Experimental Investigation of the Transition of Separated Layer," *J. Phys. Soc. Japan*, 11, 1956.
13. ———, "Further Investigation on the Transition of Two-Dimensional Separated Layer at Subsonic Speeds," *J. Phys. Soc. Japan*, 14, 1959.

14. ———, "The Stability and Transition of a Two-Dimensional Jet," *J. Fluid Mech.* 7, part 1, 1960.
15. ———, and F. Sakao, "The Stability and Transition of Two-Dimensional Jet for Small Reynolds Numbers," *Aero. Research Institute*, Tokyo, Sept. 1961.
16. ———, and K. Kuriki, "The Mechanism of Transition in the Wake of a Thin Flat Plate Placed Parallel to a Uniform Flow," *J. Fluid Mech.* 11, part 3, 1961.
17. Wille, R., O. Wehrmann, and A. Michalke, "Growth of Turbulent Fluctuations in Free Shear Flow," *AFOSSR TR 2142*, April, 1961.
18. Wehrmann, O., "Weiterentwicklung und neuartige Anwendung der Hitzdrahtmesstechnik," *Konstruktion* 13, Heft 5, 1961.
19. Berger, E., "Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung," *Wissenschaftlicher Film C 816/1960*, Inst. Wiss. Film, Göttingen, 1961.
20. Wehrmann, O., "Untersuchungen von abgelösten rotationssymmetrischen Grenzschichten," *DVL-Bericht*, 131, 1960.
21. Schade, H., and A. Michalke, "Zur Entstehung von Wirbeln in einer freien Grenzschicht," *Z. Flugwiss.* 10 (1962), *AFOSSR TR 3191* (1962).
22. Rosenhead, L., "The Formation of Vortices from a Surface of Discontinuity," *Proc. Roy. Soc., A*, 134, 1931.
23. Hama, F. R., and F. R. Burke, "On the Rolling-up of a Vortex Sheet," *Institute for Fluid Dynamics and Appl. Math., University of Maryland*, Techn. Note BN-220, 1960.
24. Michalke, A., "Theoretische und experimentelle Untersuchung einer rotationssymmetrischen laminaren Düsenrenzschicht," *DVL-Bericht*, 177, 1961.

Discussor: John R. Weske, University of Maryland

The authors' paper is remarkable for the excellent visualization of the vortex pattern of the separated cylindrical boundary layer and for their lucid analysis of the physical process observed. Having demonstrated the possibility of stabilization of vortex frequency by external acoustic driving oscillations, they skillfully put this phenomenon to good use in deriving an array of significant measurements for the oscillatory motion.



Figs. 1-4. Periodic concentrations of vorticity at successively greater intervals of time after creating a surface of discontinuity between an inner cylinder of stagnant fluid and a surrounding concentric vortex.

When considering the life cycle of periodic oscillations in boundary layers it is well to be aware of the fact brought out in earlier investigations by the authors (see Ref. 1), and demonstrated also by Pierce in his studies of the rolling-up of shear layers (Ref. 2), that the frequency of recurrence of oscillations in free shear layers has a tendency to decrease with increase of shear layer thickness.

This process was investigated by the writer for a free cylindrical boundary layer created between an inner circular cylinder of initially stagnant fluid and the surrounding field of a concentric potential vortex. This shear layer developed with time upon withdrawing instantaneously in axial direction a thin walled cylindrical tube. The vorticity directed, in this case, parallel to the axis also tends to concentrate in periodic patterns about the perimeter as shown by dye technique on the sequence of photographs, Figures 1 to 4 taken at successively greater intervals of time after removal of the separating tube. It is seen that the number of areas of concentration of vorticity here subject to the restraint that the wave length must be an even fraction of the perimeter decreases with time. Correlation of the time schedule of occurrence of equally spaced peripheral vorticity concentrations with the computed rate of increase of radial width of the layer of transition (Ref. 3), reveals a strong trend toward geometrical similarity of the individual wave, i.e., toward proportionality between wavelength and width of free boundary layer as expressed by constancy of Strouhal number. These characteristics of free boundary layer oscillations are considered significant when approaching the problems concerning the mechanism of decay of periodic motions and the origin of turbulence in free boundary layers to which the authors also make reference.

REFERENCES

1. Wille, Rudolf, "Modellvorstellungen zum Uebergang Laminar Turbulent," *Proc. Comm. for Research*, North Rheno-Westfalia, No. 72, 1960.
2. Pierce, D., "Photographic Evidence of Formation and Growth of Vorticity Behind Plates Accelerated from Rest in Still Air," *J. Fluid Mechanics*, vol. 11, pp. 460-464.
3. Weske, J. R., and T. M. Rankin, "Production of Secondary Vortices in the Field of a Primary Vortex," University of Maryland, Inst. for Fluid Dynamics and Appl. Math., T.N. B-244, AFOSR-623.

