

wurde mit Hilfe von Stromlinienbildern in vertikaler Schnittebene und frontalen Stereoaufnahmen untersucht. Kinematographische Aufnahmen lieferten einen Einblick in die Dynamik des „natürlichen“ Umschlagvorganges. Als charakteristisch erwies sich das Auftreten von längswirbelartigen Störungen in den äußeren und inneren Grenzschichtzonen mit verschiedenartigem Verhalten. In der äußeren Zone konnte Entstehen, Anfachung und Dämpfung beobachtet werden. Bei den inneren Störungen verlief der Vorgang im Entstehungsstadium außerordentlich schnell und zuerst punktförmig. Erst bei großen Grashof'schen Zahlen konnte vereinzelt ein Zusammenschließen der wandnahen Längswirbel über mehr als eine Wellenlänge beobachtet werden.

Bei einer Platte in Luft wurden Hitzdrahtmessungen der Störungsgeschwindigkeiten in der Grenzschicht ohne und mit kleinen erzwungenen Störungen durchgeführt, die durch Rauchfäden-Visualisierungen des Umschlages ergänzt wurden. Die Hitzdrahtmethode, kombiniert mit erzwungenen Pulsdrahtstörungen, erwies sich als besonders aufschlußreich. Es traten allerdings kleine langperiodige Schwankungen in den Grenzschichtgrund- und Störungsgeschwindigkeiten auf, sowie ein periodisches seitliches Wandern der Längswirbel. Dies wirkte sich sehr störend auf die Interpretation der Hitzdrahtmessungen aus. Zur Zeit werden verschiedene Stabilisierungsmaßnahmen auf ihre Wirksamkeit untersucht. Der Umfang der dazu noch notwendigen Modifikationen und Messungen macht es aber unmöglich, diese Untersuchungen noch vollständig im Rahmen dieser Arbeit zu bringen. Die Hitzdrahtergebnisse wurden mit der theoretischen Instabilitätskurve und Störungsgeschwindigkeitsverteilung für Tollmien-Schlichting-artige Störungen von KURTZ und CRANDALL verglichen. Die qualitative Übereinstimmung der Meßergebnisse ist gut, allerdings reichte die Empfindlichkeit der zur Verfügung stehenden Instrumentation nicht aus, um die neutrale Kurve genau bestimmen zu können.

Mögliche Verbesserungen der Versuchstechnik wurden auf Grund der vorliegenden Erfahrung angegeben.

Literatur

- [1] ECKERT, E. R. G., E. SOEHNGEN u. P. F. SCHNEIDER: Studien zum Umschlag laminar-turbulent der freien Konvektions-Strömung an einer senkrechten Platte. 50 Jahre Grenzschichtforschung herausgeg. v. H. GÖRTLER und W. TOLLMIEH, S. 407—418. Braunschweig: Vieweg 1955.

- [2] HOLMAN, J. P., H. E. GARTRELL, and E. E. SOEHNEN: A study of free convection boundary layer oscillations and their effects on heat transfer. ASME Paper No. 60-SA-25 (1960).
- [3] BIRCH, W. D.: On the stability of free convection boundary layers on a vertical flat plate. M. S. Thesis, Air Force Inst. Techn. Wright-Patterson AFB, Ohio 1957.
- [4] GARTRELL, H. E.: On the oscillations of free convection boundary layers. M. S. Thesis, Air Force Inst. Techn. Wright-Patterson AFB, Ohio 1959.
- [5] ECKERT, E. R. G., J. P. HARTNETT, and T. F. IRVINE: Flow visualisation studies of transition to turbulence in free convection flow. ASME Paper No. 60-Wa-260 (1960).
- [6] SZEWCZYK, A. A.: Stability and transition of the free convection layer along a vertical flat plate. TN BN 247, AFOSR-765, Univ. Maryland, 1961.
- [7] — Stability and transition of the free convection layer along a vertical flat plate. Intern. J. Heat/Mass Transfer. **5**, 903—914 (1962).
- [8] FUJII, T.: On the development of a vortex street in a free convection boundary layer. JSME Bul. **2**, 8, 551—555 (1959).
- [9] HAMA, F. R.: Streaklines in a perturbed shear flow. Phys. Fluids **5**, 644—650 (1962).
- [10] PLAPP, J. E.: Laminar boundary-layer stability in free convection. Pt. 1, Ph. D. Thesis, Cal. Inst. Tech. 1957 (s. auch J. Aeronaut. Sci. **24**, 318—319 (1957)).
- [11] OSTRACH, S., and S. H. MASLEN: Stability of laminar viscous flows with a body force. Intern. Developments in Heat Transfer, 1961. Intern. Heat Transfer Conf., part V, pp. 1017—1023 (1962).
- [12] KURTZ jr., F., and S. H. CRANDALL: Computer-aided analysis of hydrodynamic stability. J. Math. and Phys. **41**, 264—279 (1962).
- [13] SCHUBAUER, G. B.: Mechanism of transition at subsonic speeds. Grenzschichtforschung Symposium Freiburg 1957, S. 85—109. Berlin-Göttingen-Heidelberg: Springer 1958.
- [14] —, and P. S. KLEBANOFF: Contributions on the mechanics of boundary-layer transition. NACA Report No. 1289 (1956).
- [15] —, and H. K. SKRAMSTAD: Laminar-boundary-layer oscillations and transition on a flat plate. NACA Report No. 909 (1948).
- [16] KLEBANOFF, P. S., and K. D. TIDSTROM: Evolution of amplified waves leading to transition in a boundary-layer with zero pressure gradient. NACA Techn. Note D-195 (1959).
- [17] — — and L. M. SARGENT: The three-dimensional nature of boundary-layer instability. J. Fluid Mech. **12**, part 1, 1—34 (1962).
- [18] TANI, I., and H. KOMODA: Boundary-layer transition in the presence of streamwise vortices. J. Aerosp. Sci. **29**, 440—444 (1962).
- [19] KOVASZNAY, L. S. G., H. KOMODA and B. R. VASUDEVA: Detailed flow field in transition. Proc. Heat Transf. Fluid Mech. Inst., Seattle, Wash., 1962, pp. 1—26. Stanford, Calif.: Stanford Univ. Press 1962.
- [20] GÖRTLER, H., u. H. WITTING: Theorie der sekundären Instabilität der laminaren Grenzschichten. Grenzschichtforschung Symposium Freiburg 1957, S. 110—126. Berlin-Göttingen-Heidelberg: Springer 1958.
- [21] WITTING, H.: Über den Einfluß der Stromlinienkrümmung auf die Stabilität der laminaren Strömungen. Arch. Rat. Mech. Anal. **2**, 243—287 (1958).

- [22] BENNEY, D. J.: A non-linear theory for oscillations in a parallel flow. *J. Fluid Mech.* **10**, 209—236 (1961).
- [23] BENNEY, D. J., and C. C. LIN: On the secondary motion induced by oscillations in a shear flow. *Phys. Fluids* **4**, 656—657 (1960).
- [24] GREENSPAN, H. P., and D. J. BENNEY: On shear-layer instability, breakdown and transition. *J. Fluid Mech.* **15**, 133—153 (1963). — Vgl. auch verkürzte Vorankündigung: Remarks on transition and the stability of time-dependent shear layers. *Phys. Fluids* **5**, 862—863 (1962).
- [25] CRIMINALE jr., W. O., and L. S. G. KOVASZNAY: The growth of localized disturbances in a laminar boundary layer. *J. Fluid Mech.* **14**, I, 59—80 (1962).
- [26] KOVASZNAY, L. S. G.: A new look at transition. *Aeronautics and Astronautics*, pp. 161—172. Oxford-London-New York-Paris: Pergamon Press 1960.
- [27] WERLE, H.: Note technique O.N.E.R.A. 5/97 A.S. 14—20.
- [28] WORTMANN, F. X.: Eine Methode zur Beobachtung und Messung von Wasserströmungen mit Tellur. *Z. angew. Phys.* **5**, 201—206 (1953).
- [29] EICHHORN, R.: Flow visualisation and velocity measurement in natural convection with the tellurian dye method. *Trans. ASME, Ser. C* **83**, 379—381 (1961).
- [30] — Flow visualisation and velocity measurement in natural convection with the tellurian dye method. *J. Heat Transfer C* **83**, 379 (1961).
- [31] BOUROT, J. M.: Chronophotographie des champs aérodynamiques. *Publs. sci. et tech. ministère air (France)* No. 226 (1949).
- [32] — Chronophotographie des vibrations d'un fluide. *Publs. sci. et tech. ministère air (France)* No. 264 (1952).
- [33] CHARTIER, CH.: Etude expérimentale du sillage des ailes. *Publs. sci. et tech. secrétar. état aviation (France)* No. 178 (1942).
- [34] GOLDSMITH, H. L., and S. G. MASON: Particle motions in sheared suspensions. XIII. The spin and rotation of disks. *J. Fluid Mech.* **12**, pt. I, 88—96 (1962).
- [35] BRETHERTON, F. P.: The motion of rigid particles in a shear flow at low Reynolds number. *J. Fluid Mech.* **14**, pt. II, 284—304 (1962).
- [36] SEGRE, G., and A. SILBERBERG: Behaviour of macroscopic rigid spheres in Poiseuille flow. *J. Fluid Mech.* **14**, pt. I, 136—157 (1962).
- [37] SCHULTZ-GRUNOW, F., u. P. SAND: Ein Entmischungseffekt in Suspension bei wandnaher Scherströmung. Kurzvortrag auf der Jahrestagung der GAMM (1963 in Karlsruhe).
- [38] KRAUS, W.: Messung des Temperatur- und Geschwindigkeitsfeldes bei freier Konvektion. Karlsruhe: Braun 1955.
- [39] SCHMIDT, E., u. W. BECKMANN: Das Temperatur- und Geschwindigkeitsfeld von einer wärmeabgebenden senkrechten Platte bei natürlicher Konvektion. *Forsch. Gebiete Ingenieurw.* **1**, 341—349, 391—406 (1930).
- [40] COUVERTIER, P.: Application des décharges électriques à l'exploration des écoulements gazeux aux grandes vitesses. *Publs. sci. et tech. ministère air (France)*, No. 365 (1960).
- [41] EICHHORN, R.: Measurement of low speed gas flows by particle trajectories: a new determination of free convection velocity profiles. *Intern. J. Heat/Mass Transfer* **5**, 915—928 (1962).
- [42] GRIFFITHS, E., and A. H. DAVIS: The transmission of heat by radiation and convection. *Spec. Rep. No. 9, Food Investigation Board, British Dept. Sci. and Ind. Res.*, 1922.

- [43] SCHOENHALS, R. J., and J. A. CLARK: Laminar free convection boundary-layer perturbations due to a transverse wall vibration. *J. Heat Transfer C* **84**, 225—234 (1962).
- [44] KOVASZNAY, L. S. G.: Turbulence measurements. Physical measurements in gas dynamics and combustion. Vol. IX, High Speed Aerodynamic and Jet Propulsion. Princeton, New Jersey: Princeton Univ. Press 1954.
- [45] — Turbulence measurements. *Appl. Mechanics Revs.* **12**, 375—380 (1959).
- [46] WEHRMANN, O.: Methoden und Anwendungen der Hitzdraht-Meßtechnik für Strömungsvorgänge. *Konstruktion* **10**, 299—307 (1958).
- [47] — Weiterentwicklung und neuartige Anwendung der Hitzdrahtmeßtechnik. *Konstruktion* **13**, 183—186 (1961).
- [48] COLLIS, D. C., and M. J. WILLIAMS: Two-dimensional convection from heated wires at low Reynolds numbers. *J. Fluid Mech.* **6**, 357—384 (1959).
- [49] — Forced convection of heat from cylinders at low Reynolds numbers. *J. Aeronaut. Sci.* **23**, 697—698 (1956).
- [50] —, and M. J. WILLIAMS: Free convection of heat from fine wires. A.R.L., Aero Note 140.
- [51] COLE, J., and A. ROSHKO: Heat transfer from wires at Reynolds number in the Oseen range. Guggenheim Aeron. Labor. Calif. Inst. Techn. Pasadena, Public. No. 354 (1954).
- [52] TOMOTIKA, S., and H. YOSINOBU: On the convection of heat from cylinders immersed in a low speed stream of compressible fluid. *J. Math. and Phys.* **36**, 112—120 (1957).
- [53] MAHONY, J. J.: Heat transfer at small Grashof numbers. *Proc. Roy. Soc. (London) A* **238**, 412—423 (1957).
- [54] KING, L. V.: On the convection of heat from small cylinders in a stream of fluid. *Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A* **214**, 373—432 (1914).
- [55] CORRISIN, S., and M. S. UBEROI: Spectra and diffusion in a round turbulent jet. NACA Rep. 1040 (1951).
- [56] — Extended applications of the hot-wire anemometer. NACA TN 1864 (1949).
- [57] SIMMONS, L. F. G.: A shielded hot-wire anemometer for low speeds. *J. Sci. Instr.* **26**, 407—444 (1949).
- [58] ROSE, W. G.: Some corrections to the linearised response of a constant-temperature hot-wire anemometer operated in a low-speed flow. *J. Appl. Mechanics E* **29**, 554—558 (1962).
- [59] SCHUBAUER, G. B., and P. S. KLEBANOFF: Theory and application of hot-wire instruments in the investigation of turbulent boundary layers. NACA ACR No. 5 K 27 (1946).
- [60] GAUDFERNAU, J.: Anémometrie à fils chauds. *Recherche aéronaut.* No. 48, 15—22 (1955).
- [61] WEBSTER, C. A. G.: A note on the sensitivity to yaw of a hot-wire anemometer. *J. Fluid Mech.* **13**, part 2, 307—312 (1962).
- [62] CORRISIN, S.: Directional sensitivity for a finite hot-wire anemometer. OSR TN-60—171 (1960).
- [63] ASHKENAS, H.: Hot-wire measurements with X-meters. Grad. School of Aeron. Engin. Cornell Univ., Ithaca, New York, May 1955.
- [64] GERSHUNI, G. Z.: Stability of plane convective motion of a liquid. *Zhur. tekhn. Fiz.* **23**, 1838—1844 (1953).

- [65] OSTRACH, S.: An analysis of laminar free convection flow and heat transfer about a flat plate parallel to the direction of the generating body force. NACA Rep. 1111 (1953).
- [66] EMMONS, H. W.: The laminar turbulent transition in a boundary layer. J. Aeronaut. Sci. **18**, 490—498 (1951).
- [67] MOCHIZUKI, M.: Smoke observations on boundary layer transition caused by a spherical roughness element. J. Phys. Soc. Japan **16**, 995—1008 (1961).
- [68] — Hot-wire investigation of smoke patterns caused by a spherical roughness element. Natural Sci. Report of the Ochanomizu Univ. **12**, No. 2, 87—101 (1961).
- [69] JONES, W. P.: Trends in unsteady aerodynamics. J. Roy. Aeronaut. Soc. **67**, No. 627, 137—151 (1963).
- [70] HAMA, F. R., J. D. LONG, and J. C. HEGARTY: On transition from laminar to turbulent flow. J. Appl. Phys. **28**, 388 (1957).
- [71] — Boundary layer transition induced by a vibrating ribbon on a flat plate. Proceedings of the 1960 Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute, p. 92. Stanford/Calif.: Stanford Univ. Press 1960.
- [72] — Progressive deformation of a curved filament by its own induction. Phys. Fluids **5**, 1156—1162 (1962).
- [73] KAPPUS, H.: Stabilität der Konvektionsgrenzschicht an der senkrechten geheizten Platte. Erscheint in Kürze als DVL-Bericht des Inst. für Angewandte Mathematik und Mechanik der DVL, Freiburg i. Br.
- [74] MENZEL, K.: Beitrag zur dreidimensionalen, nichtlinearen Stabilitätstheorie der längsgeströmten Platte. Diss., Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i.Br., 1964.

Eingeführte Bezeichnungen

x	Abstand von Plattenvorderkante in Strömungsrichtung
y	Abstand von der Plattenoberfläche
z	Abstand in Spannweitenrichtung, von Plattenmitte gemessen (vgl. Abb. 5)
U, V, W	Geschwindigkeiten der Grenzschicht-Grundströmung in x -, y -, z -Richtung
U_M	Maximale Grenzschichtgeschwindigkeit der Grundströmung
u, v, w	Störungsgeschwindigkeiten in x -, y -, z -Richtung
\bar{u}	Zeitlicher Mittelwert der u -Störungsgeschwindigkeit
δ	Grenzschichtdicke, wo $U = 0,01 U_M$ ist
T	Temperatur der geheizten Platte
T_w	Hitzdrahttemperatur
T_∞, t_∞	Temperatur außerhalb der Grenzschicht [°K], [°C]
$\Delta T = T - T_\infty$	Aufheiztemperatur der Platte
$Gr_x = \frac{g x^3 (T - T_\infty)}{\nu^2 T_\infty}$	Grashof'sche Zahl bei freier Konvektion
$Re = \frac{U_M \delta}{\nu}$	Reynoldssche Zahl
t	Störungstemperatur
f	Frequenz der erzwungenen Störungen
λ	Wellenlänge der Tollmien-Schlichting-artigen Störungen
$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda}$	Wellenzahl
$\beta_i = IM(\beta)$	Anfachungsgröße beim Tollmien-Schlichtingschen Störungsansatz
ψ	Stromfunktion

Nähere Aufnahme-Daten zu den Abbildungen

Die Aufnahme- und Beleuchtungsrichtungen sind mit großen Buchstaben abgekürzt wie auf Abb. 1 und 3 angegeben.

Die Lichtspaltlage ist zusätzlich mit h (horizontal) oder v (vertikal) bezeichnet. Bei der Lichtquellenangabe bedeutet: P Dia-Projektor; S Stroboskop; EB Elektronenblitz. Die x -Koordinatenangabe bezieht sich auf Bildmitte. Das eingeführte Koordinatensystem ist auf Abb. 5 ersichtlich. Nur bei den Rauchfaden-Aufnahmen wird die z -Koordinate von der linken Plattenseite gemessen.

t_{∞} bei den Versuchen in Luft betrug $12-20^{\circ}\text{C}$ und änderte sich während der Versuche nach Erreichen des stationären Zustandes praktisch nicht. Bei der Platte im Wassertank erhöhte sich die Wassertemperatur allmählich während des Versuchs auf $24-26^{\circ}\text{C}$ (bezogen auf $\frac{3}{4}$ der Plattenhöhe). ΔT stellt die mittlere Aufheiztemperatur der Platte dar.

Abb.	Abb.-Maßstab	Aufnahme-richtung	Lichtspalt		Expo-nierung [sec]	Licht-quelle	ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	Koordinaten (Bildmitte)	
			Breite [cm]	Richtung u. Lage				x [cm]	z [cm]
12	1,8 : 1	D	0,5	A, v	12	P	13	38	3,5
13	1,25 : 1	D	0,8	A, v	30	P	13	3,2	3,5
14	2,25 : 1	D	0,5	A, v	0,2	P	13	20	3,5
15, 16	1,6 : 1	D	0,5	A, v	0,2	P	13	38	3,5
17	1 : 1,7	A	1,2	A, h	0,2	P	13	33	0
18	1,8 : 1	A	1,2	A, h	0,2	P	13	38	0
19	1,8 : 1	A	1,2	A, h	0,5	P	13	38	0
20	1,8 : 1	A	1,2	A, h	2	P	13	38	0
21	1 : 1,75	D	1,8	A, v	0,125	P	13	32	3,0
22	1,35 : 1	D	1,8	A, v	0,125	P	13	34	3,0
23	1 : 1,6	D	1,8	A, v	0,2	P	13	30,5	0
24	1 : 1,1 2,4 : 1 3,3 : 1	A	1,8	D, v	0,4	P	13	35	0
25					0,6	P	13		0
26					0,4	P	13		0
27					0,6	P	13		0
28	1 : 3,3	A	1,8	D, v	0,125	P	13	28	0
29	1 : 1,6	A	1,8	D, v	0,125	P	13	34	0
30	1 : 4,4	A	1,8	D, v	0,125	P	13	33	0
31	1 : 3,9	A	1,8	D, v	0,3	P	13	34	0
32-36	aus	A	30	D, v	$\frac{1}{1000}$	EB	15,7	aus	
37-38	Raster-	C	30	D, v	$\frac{1}{1000}$	EB	11,8	Raster-	
39-43	teilung	B	30	D, v	$\frac{1}{1000}$	EB	18,2	teilung	
44	ersicht-	B	25	D, v	80 μsec	S	19,8	ersichtlich	