

Verminderung des Strömungswiderstandes von Körpern durch Leitflächen

Von K. FREY, Danzig¹⁾

(Mitteilung aus dem Institut für Hydro- und Aerodynamik der Techn. Hochschule Danzig)

I. Einführung — II. Vorversuche über die Art der Strömung an unterteilten Leitflächen — III. Versuche an umströmten Körpern: 1. Zweck der Versuche und Versuchsanordnung; 2. Durchführung der Versuche und Meßergebnisse — IV. Erörterung der Meßergebnisse: 1. Stirnwiderstand ohne Leitflächen; 2. Stirnwiderstand mit Leitflächen: a) Abnahme des Widerstandes infolge unterteilter Leitflächen; b) Vergleich unterteilter Leitflächen mit nicht unterteilten; c) Einfluß von Störungen auf die Wirkung der unterteilten Leitflächen; 3. Endwiderstand ohne Leitflächen; 4. Endwiderstand mit Leitflächen — V. Zusammenfassung

I. Einführung

Erfahrungsgemäß müssen Widerstandskörper, wenn sie nur geringe Strömungsverluste verursachen sollen, verhältnismäßig lang gestreckt und gut gerundet sein; mit Rücksicht auf andere Gesichtspunkte ist das jedoch nicht immer ausführbar. Man ist daher in neuerer Zeit bestrebt, durch verschiedenartige Hilfsmittel auch für gedrängte Bauformen, d. h. auch bei scharf gekrümmten bzw. geknickten Wänden einen günstigen Strömungsverlauf mit niedrigen Verlusten zu erzielen. Wegen der Einfachheit, Betriebssicherheit und Billigkeit haben von diesen Mitteln bisher lediglich die Leitflächen eine zunehmende praktische Bedeutung²⁾ erlangt. Bekannt geworden sind für durchströmte und umströmte Körper nur ungeteilte Leitflächen. Sie wurden entweder einzeln oder mehrfach angeordnet, Abb. 1 bis 8³⁾. Bei Anordnung mehrerer Leitflächen wurden sie lediglich nebeneinander gestellt, Abb. 2 bis 4 und 8. Auf Grund der günstigen Ergebnisse mit mehreren Vorsegeln und Spaltflügeln liegt der Gedanke nahe, die Leitflächen gestaffelt hintereinander anzuordnen; diese Anordnung wird im folgenden als „unterteilte Leitflächen“ bezeichnet, Abb. 9 bis 11. Da eine Anordnung von Leitflächen nur bei an sich recht ungünstigen Körperformen größeren Vorteil verspricht, müssen sie auf eine verhältnismäßig kurze Länge beschränkt bleiben. Die nachfolgenden Untersuchungen sollen ihre Wirkungen und Eigenschaften an sich und im Vergleich zu bekannten Anordnungen klären. Sie beschränken sich, abgesehen von den Vorversuchen, zunächst auf umströmte Körper. Eingehende Untersuchungen für durchströmte Körper werden später mitgeteilt.

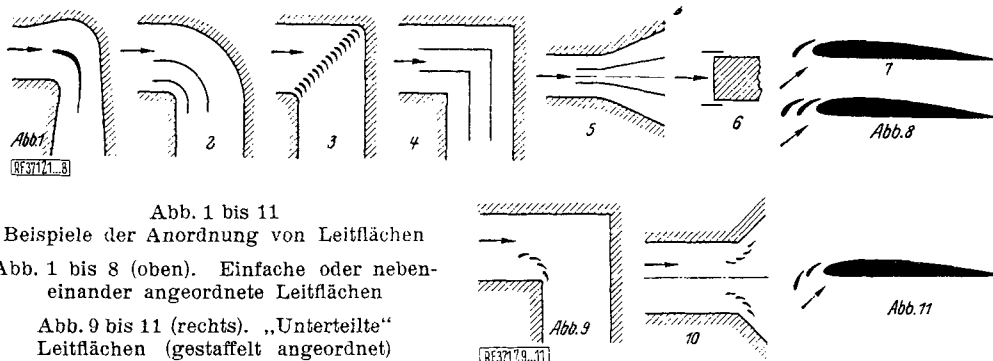


Abb. 1 bis 11
Beispiele der Anordnung von Leitflächen
Abb. 1 bis 8 (oben). Einfache oder nebeneinander angeordnete Leitflächen
Abb. 9 bis 11 (rechts). „Unterteilte“ Leitflächen (gestaffelt angeordnet)

¹⁾ Die Arbeit wurde auf Veranlassung und unter Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Flügel durchgeführt. s. Jahrb. Schiffbautechn. Ges. Bd. 31 (1930) S. 87. Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Föttinger, Berlin, danke ich für das lebhafteste Interesse, welches er jederzeit den Versuchsergebnissen entgegenbrachte, sowie für die überaus tatkräftige Unterstützung hinsichtlich ihrer praktischen Verwertung. Der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft danke ich für die Unterstützung der Versuche.

²⁾ M. Hansen u. K. Jaroschek, VDI-Zeitschr. Bd. 76 (1932) S. 169, Abschnitt: Erfahrungen mit Modellversuchen.

³⁾ Veröffentlichungen über Leitflächen:

Für durchströmte Körper:

J. Lell, Beitrag zur Kenntnis der Sekundärströmungen in gekrümmten Kanälen, München-Berlin 1913, S. 15 u. 22. Berliner Städt. Elektr.-W., VDI-Zeitschr. Bd. 71 (1927) S. 1195. F. Oesterlen, VDI-Zeitschr. Bd. 72 (1928) S. 1741, Abb. 17 u. 19; S. 1831, Abb. 22. R. Bambach, VDI-Forschungsheft 327, Berlin 1930. J. Ackeret, Escher Wyß-Mitt. Bd. 4 (1931) S. 73. H. Zeuner, VDI-Zeitschr. Bd. 75 (1931) S. 309. G. Kröber, Ing.-Arch. Bd. 3 (1932) S. 516.

Für umströmte Körper:

A. Betz, Ber. u. Abhdl. d. Wissensch. Ges. Luftfahrt, 6. Heft, München-Berlin 1922, S. 23. C. Wieselberger, Ergebn. Aerodyn. Versuchsanstalt zu Göttingen, II. Lfg., München-Berlin 1923, S. 55. G. Lachmann, Z. Flugtechn. Motorluftsch. Bd. 15 (1924) S. 109, 173 u. 181. E. Everling, VDI-Zeitschr. Bd. 71 (1927) S. 645. M. Curry, Die Yacht Bd. 25 (1928) Nr. 7, S. 11. O. Schrenk, Z. Flugtechn. Motorluftsch. Bd. 20 (1929) S. 562. H. Multray, Handb. d. Experimentalphysik herausgeg. v. W. Wien u. F. Harms, Bd. IV, 2. Teil, Leipzig 1932, S. 335. W. Repenthin, Ing.-Arch. Bd. 3 (1932) S. 91 (Abb. 12 u. 17 u. S. 104, 105, 108). Fred E. Weick, Nat. Advis. Comm. Aeron., Reports 313 u. 314, Washington 1929.

II. Vorversuche über die Art der Strömung an unterteilten Leitflächen⁴⁾

Um die Versuche so billig wie möglich durchführen und dennoch die Wirkung der unterteilten Leitflächen eingehend untersuchen zu können, wurden zunächst Vorversuche an einer der Wasserrinnen des Institutes durchgeführt. Bei diesen Versuchen zeigte es sich, daß neben scharf gekrümmten und geknickten Wänden die mit „unterteilten Leitflächen“ bezeichnete Art sichtlich wirkungsvoller ist als andere Anordnungen und insbesondere ein leichteres Auffinden der günstigsten Stellung der Leitflächen infolge geringerer Empfindlichkeit gegen störende Einflüsse sichert. Eine Auswahl von Lichtbildern über diese Versuche wurde bereits veröffentlicht⁵⁾.

Da diese Versuche mit Wasser auf kleine Reynoldssche Zahlen beschränkt bleiben mußten, wurden noch weitere Vorversuche im Windkanal des Institutes bis etwa zu den 50 fachen Reynoldsschen Zahlen durchgeführt (Wassergeschwindigkeit rd. 0,05 m/s, Luftgeschwindigkeit rd. 30 m/s). Die Erfahrungen aus den Wasserrinnenversuchen bestätigten sich im Windkanal vollauf; lediglich bei stärker gerundeten Formen, bei denen ein Einfluß der Reynoldsschen Zahl auf die Lage der Ablösungsstelle von vornherein zu erwarten war, ergaben sich größere Unterschiede.

III. Versuche an umströmten Körpern

1. Zweck der Versuche und Versuchsanordnung. Zweck der Versuche ist, zahlenmäßig nachzuprüfen, ob tatsächlich unterteilte Leitflächen eine namhafte Widerstandsverminderung hervorrufen, ob sie sehr empfindlich gegen eine Änderung der Anordnung, gegen Änderung der Anströmrichtung und gegen Unterbrechungen (s) längs der Spannweite ($a + s + b$), s. a. Abb. 17, sind und welche Eigenschaften sie im Vergleich zu den nicht unterteilten Leitflächen besitzen. Um ein weiteres Maß für die Widerstandsverminderung zu erhalten, soll ferner der Einfluß von Abrundungen des Modells ohne Leitflächen auf den Widerstand untersucht werden.

Für den vorliegenden Zweck genügt es, die Untersuchungen zunächst auf umströmte Körper mit ebener Strömung zu beschränken⁶⁾. Die in Abb. 12 im Profilschnitt wiedergegebenen Körper mit

⁴⁾ G. Flügel, Jahrb. Schiffbautechn. Ges. Bd. 31 (1930) S. 87. In diesem Vortrag werden die benutzten Versuchseinrichtungen beschrieben (Abb. 1 bis 3), sowie die wichtigsten Ergebnisse mitgeteilt (S. 103 bis 106 und 113).

⁵⁾ G. Flügel, s. Fußnote 4, Abb. 22 bis 27; F. Michel, Feuerungstechnik Bd. 18 (1930) S. 233, Abb. 6 bis 9.

⁶⁾ Inzwischen sind die Versuche mit gutem Erfolg auch auf umströmte Körper mit räumlicher Strömung (anlässlich von Scherbrettuntersuchungen) und auf durchströmte Körper ausgedehnt worden. Die Ergebnisse werden später veröffentlicht werden.

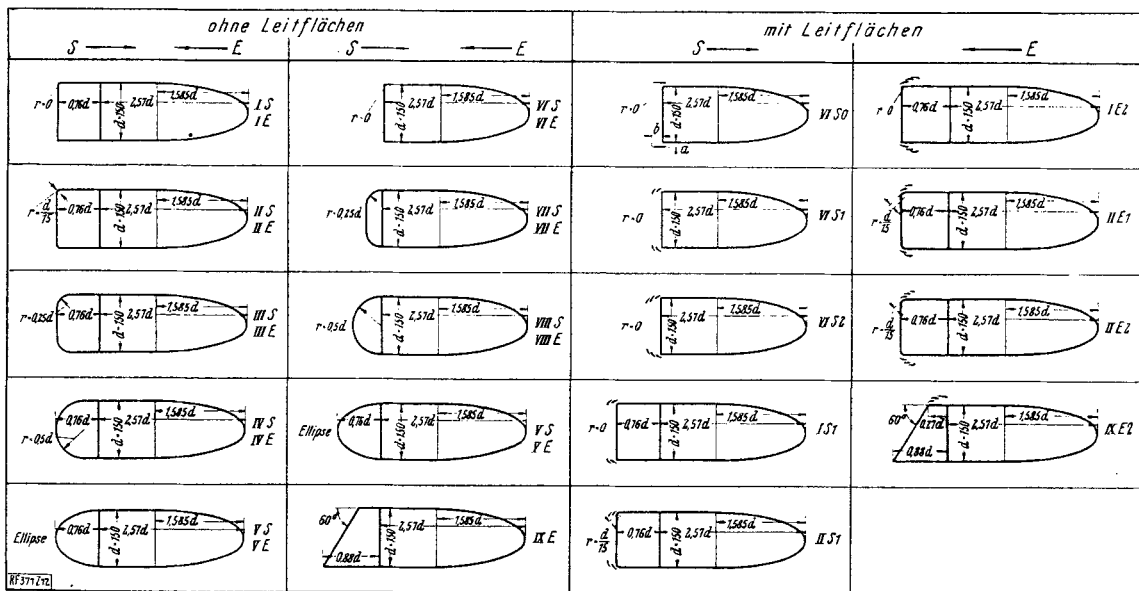


Abb. 12. Schnitte der untersuchten Modelle (Spannweite 500 m)

Zu Abb. 12 und 13. Die römischen Ziffern bezeichnen die Modellnummern, die arabischen die Zahl der Unterteilungen der Leitflächen, Indices (Strich) geänderte Leitflächenstellungen. Die Buchstaben S oder E mit Pfeilen geben die Anströmrichtung gegen die Stirnfläche oder gegen die Endfläche des Modells an

einer Spannweite von 500 mm wurden zwischen parallelen, ebenen festen Wänden an der Dreikomponentenwaage des bereits erwähnten Windkanals aufgehängt. Die hölzernen, gut polierten Modelle bestanden aus einem Hauptkörper mit auswechselbaren, sorgfältig angepaßten Ansätzen (vgl. Abb. 12). Der Übergang vom Hauptkörper zum Ansatz wurde gut mit Staufferfett verschmiert. Als begrenzende Seitenwände dienten sorgfältig gerichtete, gespachtelte und polierte ebene Blechtafeln von 1,3 m Länge und 1,0 m Höhe. Sie waren durch gespannte Drähte und auf der Rückseite durch längslaufende Winkelleisen versteift und festgehalten.

Die unterteilten Leitflächen waren aus Messing und viermal längs der Spannweite durch dünne Halter am Modell befestigt. Sie waren in weiten Grenzen einstellbar, und zwar konnte ihr Anstellwinkel, der Abstand des gesamten Satzes vom Hauptkörper in Stromrichtung und senkrecht dazu, die Überdeckung der Teilflächen und die Spaltbreite geändert werden. Stets wurde geprüft, ob die jeweils gewählten Stellungen über die ganze Spannweite genügend gleich waren. Die Profilform der Teilprofile der Leitflächen war immer dieselbe (allerdings wurde auf das genaue Einhalten der Form kein übertriebener Wert gelegt). Ihre Wahl erfolgte nach den bekannten Richtlinien für gute Profile in Anlehnung an die bereits erwähnten Wasserrinnenversuche. Die untersuchten Leitflächensätze sind in Abb. 12 im maßstäblichen Verhältnis zu den Modellen wiedergegeben und in größerem Maßstab in Abb. 13 zusammengestellt.

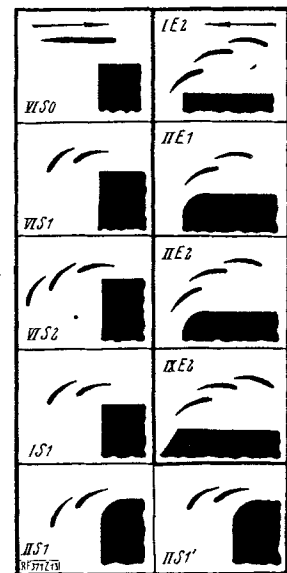


Abb. 13. Formen und Stellungen der Leitflächen, ungefähr Maßstab 1 : 3

↔ Anströmrichtung

2. Durchführung der Versuche und Meßergebnisse. In Vorversuchen wurde festgestellt, daß die seitlichen Begrenzungswände groß und steif genug waren und daß die Modelle ruhig genug hingen, so daß die rd. 2,5 mm breiten Spalten zwischen Modell und seitlichen Begrenzungswänden genügend gleich blieben. Ferner wurde bei dem Anstellwinkel $\alpha = 0^\circ$ festgestellt, daß eine Vergrößerung der Spaltbreite bis aufs Dreifache keine wesentliche Änderung der Meßergebnisse zeitigte^{6a)} und daß der Übergang vom Hauptkörper zum Ansatz sorgfältig genug ausgeführt war.

Die Hauptversuche betrafen:

1. Widerstandsbeiwert $\zeta_w = P_w / q F$ mit P_w = Widerstand, q = Staudruck, F = Bezugsfläche der in Abb. 12 wiedergegebenen Profilschnitte beim Anstellwinkel 0° , abhängig von der Reynoldsschen Zahl⁷⁾, Abb. 14, 15, 18, 19 und 20.
2. Einfluß von Unterbrechungen der unterteilten Leitflächen längs der Spannweite auf den Widerstandsbeiwert beim Anstellwinkel 0° , abhängig von der Reynoldsschen Zahl, Abb. 17 und 21.
3. Einfluß einer Änderung der Anströmrichtung; Aufnahme der Polaren mit und ohne Leitflächen, Abb. 16 und 22.

Die Versuche mit Leitflächen wurden so durchgeführt, daß entweder eine stumpfe Stirnfläche bei günstig geformtem Modellende oder eine stumpfe Endfläche bei günstig geformter Stirnseite vorhanden war, Abb. 12. Da so jeweils die stumpfe Fläche ausschlaggebend für die Größe des Widerstandes ist, werden die Ergebnisse nach Stirn- und Endwiderständen (S und E) eingeteilt. Bei den Vergleichsversuchen über den Einfluß der Abrundungen an den stumpfen Flächen wurde diese Einteilung beibehalten. Die Bezeichnung ist in Abb. 12 und 13 für die durch Pfeile gekennzeichneten beiden Anströmrichtungen „S“ und „E“ für den Stirn- bzw. Endwiderstand und in Abb. 14 bis 22 einheitlich so durchgeführt worden, daß sich die römische Zahl auf die Modellform ohne Leitfläche bezieht, die großen römischen Buchstaben S und E die Anströmrichtungen andeuten und die angefügte arabische Zahl die Zahl der Unterteilungen der Leitflächen bezeichnen. Stets wurden mit demselben Modell und denselben Leitflächen bei einer mittleren Reynoldsschen Zahl Vergleichsversuche bei systematisch geänderter Leitflächenstellung durchgeführt, um die ungefähr günstigste Leitflächenanordnung zu ermitteln. In Abb. 16, 17 und 22 sind solche, durch ' (Strich) gekennzeichneten Vergleichsversuche zu Abb. 14, 17 und 20 wiedergegeben, wobei gleiche Anstellwinkel und Reynoldssche Zahlen verglichen werden müssen. Die verhältnismäßig geringe Empfindlichkeit der unterteilten Leitflächen gegen Stellungsänderungen wird so in Verbindung mit den zu Abb. 16 in

^{6a)} Für $\alpha > 0^\circ$ wurde die Spaltwirkung [s. O. Fluchsbart, Z. f. angew. Math. u. Mech. Bd. 11 (1931) S. 411] nicht berücksichtigt, weil sie für die Klärung des Einflusses der Leitflächen von untergeordneter Bedeutung ist.

⁷⁾ Bei allen Untersuchungen in dieser Arbeit über den Einfluß der Reynoldsschen Zahl wurde als Länge die Modelllänge ohne Leitflächen eingeführt.

Abb. 13 wiedergegebenen Stellungen $II S 1$ und $II S 1'$ erkennbar. Bei den Versuchen mit Leitflächen wurde ferner sorgfältig darauf geachtet, daß sich die Leitflächen nicht etwa unter dem Einfluß der Luftkräfte verstellten. Nach den Versuchen wurden die benutzten Stellungen der unterteilten Leitflächen an fünf Punkten längs der Spannweite gemessen. In Abb. 12 und 13 sind diese Stellungen mit mittleren Werten maßstäblich enthalten; die Abweichungen von den Mittelwerten waren längs der Spannweite immer nur gering.

Bei den vorliegenden Untersuchungen handelt es sich im wesentlichen um die Beeinflussung des Wirbelwiderstandes an scharf gekrümmten und geknickten Wänden. Zu seiner klaren Trennung vom Gesamtwiderstand wird im folgenden die für diese Zwecke gemäß der Strömungsbeobachtung im Windkanal ausreichende Annahme gemacht, daß Modell VS , Abb. 12, praktisch keinen Wirbelwiderstand mehr besitzt. Die prozentuale Verminderung des Wirbelwiderstandes beträgt dann z. B. für Modell $IS 1$ gegenüber Modell IS : $100 \left(\frac{\zeta_{w IS} - \zeta_{w IS 1}}{\zeta_{w IS} - \zeta_{w VS}} \right)$ und für Modell IXE gegenüber Modell IE : $100 \left(\frac{\zeta_{w IE} - \zeta_{w IXE}}{\zeta_{w IE} - \zeta_{w VS}} \right)$. Hiervon wird bei dem Vergleich der Versuchsergebnisse Gebrauch gemacht.

Viele Versuche wurden in größeren Zeitabständen wiederholt. Sie bestätigten die Zuverlässigkeit der ersten Messungen.

IV. Erörterung der Meßergebnisse

1. Stirnwiderstand ohne Leitflächen. Bei den Widerstandskurven der untersuchten symmetrischen Modelle ohne Leitflächen tritt die an sich bekannte außerordentlich starke, widerstandsvermindernde Wirkung von Abrundungen (Profile $II S$, $III S$, $IV S$, VS , $VII S$ und $VIII S$) gegenüber scharfen Kanten (Profile IS und VIS) hervor, Abb. 14 und 15. Auch die Einflüsse der Reynoldsschen Zahl und der Modelllänge erscheinen in bereits bekannter Weise. Sie mußten, wie erwähnt, festgestellt werden, um einen Vergleich für die Versuche mit Leitflächen zu schaffen. Um den Einfluß von Modellform und Modelllänge anschaulich wiederzugeben, wurden die Widerstandsbeiwerte in Abb. 14 auf die größte Projektionsfläche (Länge in Stromrichtung \times Spannweite), in Abb. 15 auf den größten Spantquerschnitt bezogen. Das Streuen der Versuchspunkte ist eine Folge der intensiven Wirbelablösung. Für die stumpfe Form mit

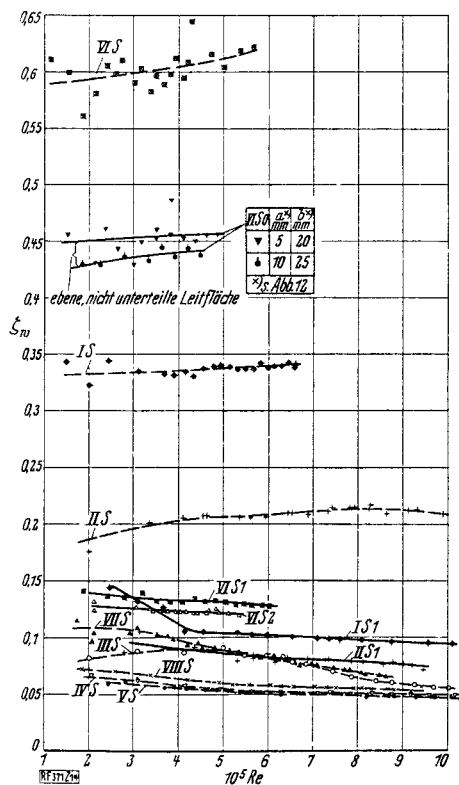


Abb. 14. Widerstandsbeiwerte, bezogen auf die größte Projektionsfläche

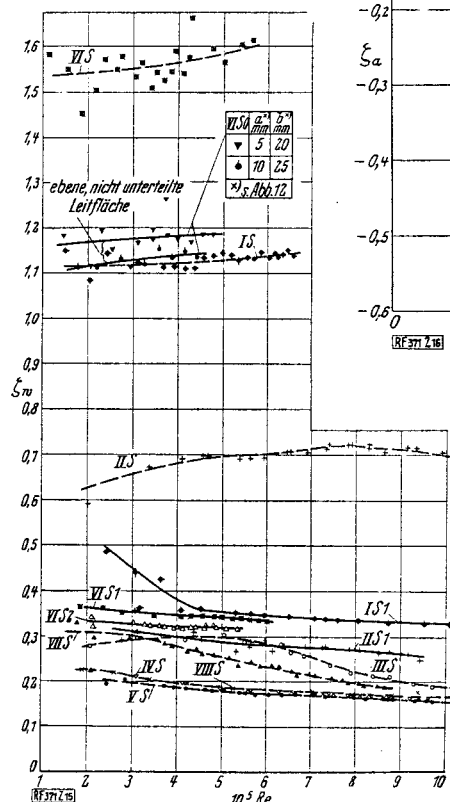


Abb. 15. Widerstandsbeiwerte, bezogen auf den größten Spantquerschnitt

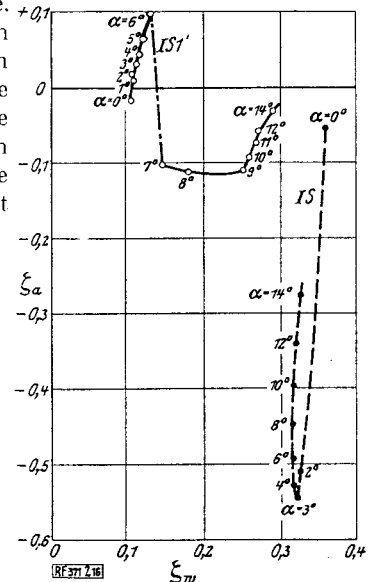


Abb. 16. Polarkurven der Profile IS ohne und $IS 1'$ mit Leitflächen, bezogen auf die größte Projektionsfläche, für Anstellwinkel $\alpha = 0^\circ$ bis 14° bei einer Reynoldsschen Zahl $Re = 4,68 \cdot 10^5$

Abb. 14 u. 15 (links). Stirnwiderstand verschied. Profile ohne und mit unterteilten und nicht unterteilten Leitflächen beim Anstellwinkel $\alpha = 0^\circ$, abhängig von der Reynoldsschen Zahl Die Profilbezeichnungen beziehen sich auf Abb. 12

Ansatz (*IS*) wurden für die Polarkurve die Anstellwinkel α von 0° bis 14° gemessen, Abb. 16. Im Gegensatz zu normalen symmetrischen Profilen ergeben sich hier bei positiven Anstellwinkeln negative Werte für den Auftriebsbeiwert ζ_a . Der Unterschied von ζ_w gegen Abb. 14, Kurve *IS*, wurde in Kontrollmessungen teils als Einfluß der Reynoldsschen Zahl festgestellt und teils als Folge einer Rauigkeitsänderung, hervorgerufen durch kleine Ausbesserungen am Modell, um die kleinen durch die Haltevorrichtungen für die Leitflächen inzwischen entstandenen Beschädigungen zu beseitigen. Diese Kontrollmessungen ergaben, daß auch die periodischen Schwankungen der Meßpunkte *IS* in Abb. 14 auf Einflüsse der Reynoldsschen Zahl zurückzuführen sind.

Als weiteres Beispiel über den Einfluß der Rauigkeit auf den Widerstand des Modells ohne Leitflächen vergleiche man die Kurven *IIS* in Abb. 14 und der unten besprochenen Abb. 17. Es handelt sich auch hier um die Rauigkeit, die bei den Versuchen für Abb. 17 nach Fortnahme der Leitflächen und Verschmieren der zur Aufnahme der Leitflächenhalter angebrachten schmalen Schlitz mit Fett zurückblieb. Ein nachträgliches Verspachteln und Polieren ergab wieder die Kurve nach Abb. 14⁸⁾.

2. Stirnwiderstand mit Leitflächen.

a) Abnahme des Widerstandes infolge unterteilter Leitflächen. Die Versuche über den Stirnwiderstand mit Leitflächen, die ebenfalls, soweit die Modelllänge eine Rolle spielte, sowohl auf die größte Projektionsfläche als auch auf den größten Spantquerschnitt bezogen⁹⁾ aufgetragen wurde, zeigen folgendes, Abb. 14 bis 17: Bei den Untersuchungen mit durchlaufenden unterteilten Leitflächen mit einem Anstellwinkel $\alpha = 0^\circ$ wurden tatsächlich bedeutende Widerstandsverminderungen gemessen, Abb. 14 und 15, Kurven *IS 1*, *VIS 1*, *VIS 2*, *IIS 1*. Die zweimalige Unterteilung der Leitflächen ergab dabei einen geringeren Widerstand und wegen der geringeren Empfindlichkeit gegen eine Änderung der Leitflächenstellung ein leichteres Auffinden der besten Einstellung als die einmalige Unterteilung (Kurven *VIS 2* und *VIS 1*). Auch konnte dadurch ein Pfeifen, welches offenbar ein Kennzeichen nicht ganz passender Leitflächenstellung ist, leichter vermieden werden. Durch eine geringe Abrundung der Stirnkanten des Modells sinkt der Widerstand weiter (Kurve *IIS 1*). Der Einfluß der Reynoldsschen Zahl ist grundsätzlich der gleiche wie bei den günstigsten Abrundungen ohne Leitflächen, jedoch nimmt der Widerstandsbeiwert bei den unterteilten Leitflächen mit wachsender Reynoldsscher Zahl in dem untersuchten Bereich rascher ab, z. B. Abb. 14, Kurve *IIS 1* gegenüber Kurve *V S*. Der Einfluß der unterteilten Leitflächen ist weiter aus Zahlentafel 1 zu erkennen, wobei nochmals hervorgehoben sei, daß nach dem Charakter der Kurven die Wirkung der unterteilten Leitflächen bei höheren Reynoldsschen Zahlen anscheinend noch günstiger wird. Die nach den Vorversuchen an der Wasserrinne zu erwartende starke widerstandsvermindernde Wirkung der unterteilten Leitflächen hat sich also bereits bei den ersten Versuchen vollauf bestätigt. Bei sämtlichen Versuchen mit Leitflächen wurden immer die gleichen nach den Vorversuchen an der Wasserrinne entworfenen Profile verwendet. Die ermittelten Bestwerte sind daher sehr wahr-

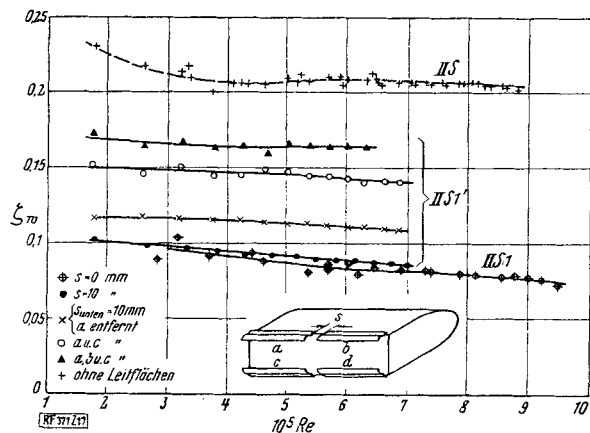


Abb. 17. Einfluß einer Unterbrechung oder des Fehlens der Leitflächen auf den Stirnwiderstand des Profils *IIS* beim Anstellwinkel $\alpha = 0^\circ$, bezogen auf die größte Projektionsfläche, abhängig von der Reynoldsschen Zahl

⁸⁾ Man erkennt daraus, wie schwierig es ist, selbst den Einfluß verhältnismäßig geringfügiger örtlich begrenzter Rauigkeitsänderungen von vornherein sicher abzuschätzen, sofern diese unmittelbar an der Ablösungsstelle eintreten, und daß bei den verschiedenen Vergleichsmessungen tatsächlich sehr leicht kleinere scheinbare Unstimmigkeiten auftreten können. Vgl. hierzu *O. Flachsbart*, Ergebn. Aerodyn. Versuchsanst. zu Göttingen, IV. Lfg., München-Berlin 1932, S. 106.

⁹⁾ Wegen der Veränderlichkeit der Leitflächenstellungen wurden in beiden Fällen die Bezugsflächen auf das Modell ohne Leitflächen bezogen.

Zahlentafel 1

Einfluß der unterteilten Leitflächen
(bezogen auf den größten Spantquerschnitt, Abb. 15)

Profil (Abb. 12)	Reynoldssche Zahl $10^5 Re$	ζ_w		$\zeta_w' = \zeta_w / \zeta_{wVS}^{**})$		Verminderung des Wirbelwiderstandes durch unterteilte Leitflächen %
		ohne Leit- flächen	mit unterteilten Leitflächen	ohne Leit- flächen	mit unterteilten Leitflächen	
<i>VS</i>	5,5	0,175				
<i>VS</i>	9,0	0,16				
<i>VIS</i>	5,5	1,6	0,335 [<i>VIS 1</i>] 0,315 [<i>VIS 2</i>]	9,15	1,9	9
<i>IS</i>	6	1,135	0,34 [<i>IS 1</i>]	6,5	1,95	83
<i>IIS</i>	9,0	0,71	0,26 [<i>IIS 1</i>]	4,44	1,62	82

^{*)} ζ_w und ζ_{wVS} bei jeweils gleichem Re

scheinlich noch keine absoluten Bestwerte; denn zu deren Ermittlung wären außerordentlich umfangreiche Versuche mit systematisch geänderter Profilform und -größe notwendig gewesen, weil solche Feinheiten aus dem Wasserrinnenversuch nicht zu entnehmen sind. Es erschien statt dessen zunächst wertvoller, bei den bisherigen, bereits recht günstigen Ergebnissen auf die Ermittlung des absoluten Bestwertes zu verzichten und sich auf die weitere Untersuchung der Haupteigenschaften der unterteilten Leitflächen zu beschränken. Selbst mit bestgeformten unterteilten Leitflächen wird allerdings nie ganz der geringe Widerstand günstigster Körperformen zu erzielen sein, weil die Leitflächen an den Stellen höchster örtlicher Geschwindigkeit stehen, so daß Oberflächenreibung und abgehende kleine Wirbel stärker ins Gewicht fallen.

b) Vergleich unterteilter Leitflächen mit nicht unterteilten. Zur Beurteilung der Vorteile unterteilter Leitflächen wurden auch bekannte Anordnungen mit nicht unterteilten ebenen und gewölbten Leitflächen untersucht.

Die ebenen Flächen, Kurven *VI S 0*¹⁰⁾, in Abb. 14 und 15, verringern den Wirbelwiderstand des Modelles ohne Leitflächen, gleichfalls auf den größten Spantquerschnitt bezogen (Abb. 15), nur um durchschnittlich 29 %. Die Versuche mit einer gewölbten, nicht unterteilten Leitfläche zeigten im Gegensatz zu den unterteilten Leitflächen die bekannte außerordentliche Empfindlichkeit gegen eine Änderung der Leitflächenstellung. Die günstigsten Werte sanken fast auf die der Kurve *IS 1*; sie wurden daher in Abb. 14 und 15 nicht eingetragen. Die gewölbten, nicht unterteilten Leitflächen entstanden aus den einmal unterteilten Leitflächen durch Fortnahme der ersten Teilfläche. Es ist anzunehmen, daß auch hier durch systematische Änderungen der Leitflächen-Tiefe und -Profilform noch Verbesserungen im Widerstandsbeiwert zu erzielen sein werden, daß aber auch die schon in den Vorversuchen beobachtete weit größere Empfindlichkeit gegen ungenaue Einstellung als wesentlicher Unterschied gegenüber den unterteilten Leitflächen bestehen bleibt. Die unterteilten Leitflächen dürften daher bei scharfen Umlenkungen und unsicherer bzw. veränderlicher Anströmungsrichtung den nicht unterteilten strömungstechnisch immer überlegen sein.

c) Einfluß von Störungen auf die Wirkung der unterteilten Leitflächen. Abb. 17 zeigt den Einfluß von Unterbrechungen (*s* mm breit) der unterteilten Leitflächen längs der Spannweite. Er ist im Gegensatz zu derartigen Störungen, die an Tragflächen infolge kleiner Unterbrechungen auftreten¹¹⁾, völlig unbedeutend. Die Stromfadenbeobachtung gab einen Einblick in die Art der Strömung. Sie zeigte z. B. für den Fall, daß nur noch auf der halben Spannweite Leitflächen angeordnet waren, in diesem Bereich eine relativ geordnete Strömung an, während anschließend sofort Ablösung einsetzte. Das Wirbelgebiet war jedoch in seiner Ausdehnung senkrecht und längs zum Modell auffallend kleiner und von geringerer Wirbelintensität, als wenn gar keine Leitflächen vorhanden waren. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die geordnete Strömung hinter den Leitflächen sich stark verbreiterte und so das Wirbelgebiet zum großen Teil auffüllte. Hinsichtlich der Empfindlichkeit der Leitflächeneinstellung vergleiche man in Abb. 13 und 17 die Leitflächenstellungen sowie die Kurven *II S 1* und *II S 1'* (letztere für eine Unterbrechung oben und unten von *s* = 10 mm) miteinander. Der Unterschied der Leitflächenstellungen ist verhältnismäßig groß, während sich die Widerstandsbeiwerte nur wenig geändert haben. Dieses Ergebnis ist um so beachtlicher, als die Rauigkeit der Leitflächen bei den Versuchen zu *II S 1'* absichtlich durch Einwirkung von Salzsäure und durch Lötzinntropfen vergrößert worden war und ein Teil der an sich geringen Widerstandserhöhung bereits auf die Unterbrechungen (*s*) zurückzuführen ist.

Weiter wurde der Einfluß einer Änderung des Modell-Anstellwinkels untersucht. Bei $Re = 4,68 \cdot 10^5$ wurde als schwierigster Fall das scharfkantige Modell *IS 1* mit nur einmal unterteilten Leitflächen gewählt, dessen Polarkurve ohne Leitflächen, Abb. 16, bereits besprochen wurde. Kurve *IS 1'*, Abb. 16, zeigt, daß sich die Polare gegenüber dem Modell ohne Leitflächen vollständig ändert und im wesentlichen den Charakter wie bei einem gewöhnlichen Tragflügelprofil annimmt. Auch hier ist bei $\alpha = 0^\circ$ gegenüber der Kurve *IS 1* in Abb. 14 bei $Re = 4,68 \cdot 10^5$ kein merklicher Einfluß der erhöhten Oberflächenreibung an den Leitflächen im Widerstandsbeiwert festzustellen¹²⁾. Aus Wasserrinnenversuchen war noch zu entnehmen, daß bei mehrfacher Unterteilung der Leitflächen das Abreißen der Strömung noch später als bei einfacher Unterteilung eintritt.

¹⁰⁾ Infolge eines Mißverständnisses wurden die Leitflächen so befestigt, daß im Versuch die zugeschärfte Seite Eintrittskante wurde. Aus guten Gründen sind hierdurch jedoch keine wesentlichen Änderungen der Ergebnisse gegenüber dem Fall mit abgerundeter Vorderkante zu erwarten. Von einer Änderung der Anordnung wurde daher abgesehen.

¹¹⁾ J. Ackeret, Ergebn. Aerodyn. Versuchsanstalt zu Göttingen, III. Lfg., München-Berlin 1927, S. 92.

¹²⁾ Es handelt sich um die gleiche Vergrößerung der Rauigkeit wie bei obigem Versuch *II S 1'*. Der Index ' bezeichnet auch in Abb. 16 eine etwas andere Leitflächenstellung als bei Kurve *IS 1* in Abb. 17. In diesem Fall beschränkte sich der Unterschied der Stellungen lediglich auf eine bessere Ausgleicheung der, wie erwähnt, an 5 Punkten längs der Spannweite nachgemessenen Leitflächenstellungen.

3. Endwiderstand ohne Leitflächen. Weitere Untersuchungen betrafen die Widerstandsänderung bei umströmten Körpern mit gut gerundetem Kopf, aber verschiedenen Endformen ohne Leitflächen. Auch sie sollten als Vergleichsbasis für die Wirkung der Leitflächen dienen. Die Widerstandsbeiwerte wurden hier lediglich auf die größte Projektionsfläche bezogen.

Die Ergebnisse, Abb. 18, lassen erkennen, daß hier die Abrundung nicht die Bedeutung hat wie beim Stirnwiderstand, Abb. 14, und daß der Unterschied zwischen ungünstigster und günstigster Form wesentlich geringer ist. Da die günstigste Abrundung, die Ellipse, immer noch reichlich gedungen ist und nach Fadenbeobachtungen noch ein schwaches Wirbelfeld am Ende verbleibt, wurde in Abb. 19 der Einfluß der Schlankheit der Ellipse durch die Kurven VS und VE wiedergegeben. Es sind langgestreckte, sich langsam verjüngende Formen notwendig, wenn man merkliche Widerstandsverminderung erzielen will.

Die Kurven in Abb. 18 für die stumpf endigenden Modelle VE und IE ohne und mit Ansatz liegen weit auseinander. Dies liegt nicht nur an den verschiedenen großen Projektionsflächen, sondern ist auch auf die bekannte Erscheinung zurückzuführen, daß der für den Widerstand maßgebende Unterdruck hinter der stumpfen Endfläche bei relativ kurzen Modellen rasch mit wachsender Modelllänge abnimmt¹³⁾.

Anschließend wurde noch die Form IXE , Abb. 12 und 13, mit einseitiger scharfkantiger Abschrägung unter 60° gegen die Stromrichtung untersucht, Abb. 19. Der Vergleich mit Kurve VS in Abb. 19 und Kurve IE in Abb. 18 lehrt, daß bei einer derartigen Abschrägung unter 60° der Widerstand nur um rd. 23 % sinkt. Bei einem kleineren Winkel der Schräge der Endfläche gegen die Stromrichtung ist die Widerstandsverminderung größer¹⁴⁾.

¹³⁾ C. Wieselsberger, Ergebn. Aerodyn. Versuchsanstalt zu Göttingen, I. Lfg., München-Berlin 1923, S. 120.

¹⁴⁾ Dies wurde für eine Abschrägung unter 45° bestätigt. Die Kurve wird hier nicht wiedergegeben, weil es sich in Übereinstimmung mit den Vorversuchen an der Wasserrinne ergab, daß die vorhandenen Leitflächen für dieses Modell so ungeeignet waren, daß keine Verbesserung erzielt wurde. Über den Einfluß von Abschrägungen vgl. G. Flügel, Hydraulische Probleme, Berlin 1926, S. 133, Abb. 27.

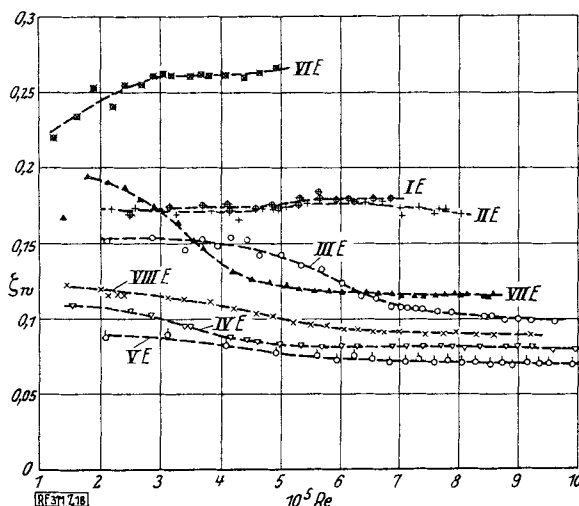


Abb. 18. Profile ohne Leitflächen

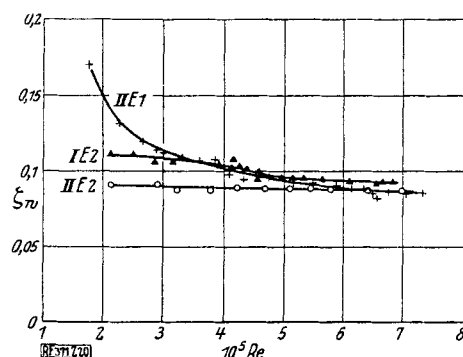


Abb. 20. Profile mit unterteilten Leitflächen

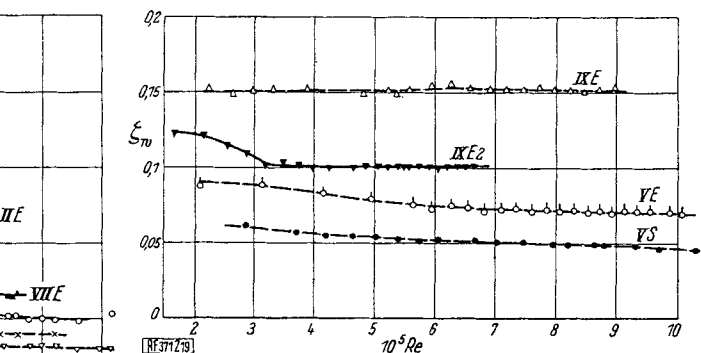


Abb. 19. Unter 60° abgeschrägtes Profil IXE ohne und mit Leitflächen im Vergleich zu den günstigen Modellformen VE und VS

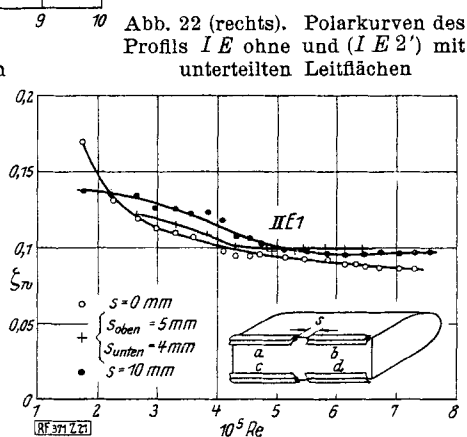


Abb. 21. Einfluß von Unterbrechungen der Leitflächen

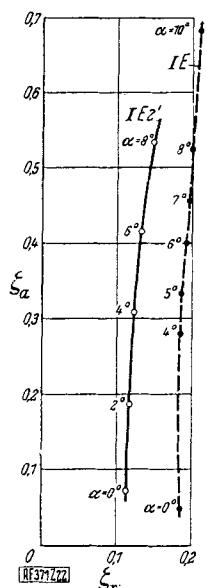


Abb. 18 bis 21. Endwiderstand verschiedener Profile ohne Leitflächen und mit unterteilten Leitflächen beim Anstellwinkel $\alpha = 0^\circ$, bezogen auf die größte Projektionsfläche, abhängig von der Reynoldsschen Zahl

4. Endwiderstand mit Leitflächen. Die Ergebnisse, Kurve $IX E 2$ in Abb. 19 und die Kurven in Abb. 20 lassen erkennen: Die zweimalige Unterteilung ist weniger empfindlich gegen eine Änderung der Reynoldsschen Zahl als die einmalige; bei $Re = 7 \cdot 10^5$ beträgt die Verminderung des Wirbelwiderstandes bei Modell $IE 2$ rd. 70 %, bei Modell $II E 2$ rd. 69 % und bei Modell $IX E 2$ rd. 50 %. Der Gesamtwiderstand war hierbei um 76 %, 76 % und 100 % größer als bei dem strömungstechnisch günstig geformten Modell VS , während er bei den gleichen Modellen ohne Leitflächen um 258 %, 246 % und 200 % größer war, Abb. 18, Kurven IE und $II E$, und Abb. 19, Kurve $IX E$.

Aus den gleichen Erwägungen, wie bei den Messungen über Stirnwiderstände, wurde auf eine systematische Änderung der Profilformen und -größen der Leitflächen zwecks Auffindens der denkbar besten Formen verzichtet. Es wurden die gleichen Sätze von unterteilten Leitflächen wie bei den Untersuchungen über die Stirnwiderstände benutzt. Fadenbeobachtungen ließen erkennen, daß mit diesen, nach den Vorversuchen an der Wasserrinne für eine starke Verminderung des Endwiderstandes zu kleinen Leitflächensätzen die Strömung hinter dem Modell nicht hinreichend umgelenkt wurde, daß aber die intensive Wirbelung hinter dem Modell beseitigt war. Daraus ist jedenfalls größtenteils die im Verhältnis zu den Stirnverlusten geringere prozentuale Verminderung des Wirbelwiderstandes zu erklären. Ohne Zweifel sind aber dabei auch noch Grenzschichteinflüsse mit beteiligt. Im Gegensatz zu den Versuchen über den Stirnwiderstand, bei welchen die Leitflächenwirkung durch abgebremste Grenzschichtflüssigkeit noch nicht sehr beeinträchtigt ist, hat hier die Grenzschicht bereits eine größere Dicke erreicht und erschwert dadurch die Umsetzung von Geschwindigkeit in Druck. Die Untersuchungen ergeben also vermutlich hier ebenfalls nicht die absoluten Bestwerte, sondern sollen lediglich bestätigen, daß die aus den Vorversuchen erwartete starke Widerstandsverminderung tatsächlich eintritt. Die Prüfung des Einflusses von Störungen auf die Wirkung der unterteilten Leitflächen ergaben auch hier eine geringe Empfindlichkeit. Abb. 21 zeigt, daß auch beim Endwiderstand eine Unterbrechung s der Leitflächen, entsprechend Abb. 17, nur geringen Einfluß auf den Widerstandsbeiwert hat. Weiter wurde Modell IE ohne und mit zweimal unterteilten Leitflächen ($IE 2'$) in einem Anstellwinkelbereich von $\alpha = 0^\circ$ bis 8° gemessen, Abb. 22. Beide Polaren verlaufen störungsfrei. Gegenüber der Polare IE ist der Verlauf der Polare $IE 2'$ etwa der gleiche wie bei Profilen mit verringertem Widerstand am Profilende¹⁵⁾. Der ' (Strich) bei $IE 2'$ weist wieder darauf hin, daß die Leitflächenstellung gegenüber Kurve $IE 2$, Abb. 20, geändert wurde. Bei gleichem Anstellwinkel $\alpha = 0^\circ$ und gleicher Reynoldsscher Zahl $Re = 4,68 \cdot 10^5$ ist dabei der Unterschied der ξ_w -Werte gering. Die Unempfindlichkeit ist hier noch größer als beim Stirnwiderstand.

V. Zusammenfassung

Die Leitflächen zur Verbesserung der Strömung und Verminderung der Ablösungsverluste an scharf gekrümmten bzw. scharfkantigen Körpern werden auf den Einfluß untersucht, den eine „Unterteilung“ der Leitflächen hat. Die Versuche beschränkten sich vorläufig auf umströmte Körper bei ebener Strömung ohne und mit einfachen und unterteilten Leitflächen. Bei stumpfer Stirn mit scharfen oder mäßig abgerundeten Ecken wurde mit unterteilten Leitflächen eine Verminderung des Wirbelwiderstandes um durchschnittlich 85 % erreicht. Bei ungünstigen Endformen ergab sich mit unterteilten Leitflächen eine Verminderung des Widerstandes um rd. 70 %. Der Widerstand ungünstig geformter, aber mit Leitflächen versehener Körper war allerdings bei den Stirn- und Endwiderständen immer noch um rd. 60 bis 100 % größer als der eines gut geformten, schlanken Vergleichskörpers, während ohne Leitflächen die Stirnwiderstände um rd. 340 bis 800 % und die Endwiderstände um rd. 200 % bis 260 % größer waren. Nach den bisherigen Versuchen besitzen unterteilte Leitflächen gegenüber nicht unterteilten Leitflächen bei etwas geringerem Widerstand vor allem den Vorteil einer weit geringeren Empfindlichkeit der Widerstandsbeiwerte bei nicht richtig gewählter Einstellung bzw. schwankender Anströmrichtung. Unterbrechungen der Spannweite der unterteilten Leitflächen sowie verstärkte Rauigkeit erhöhen die Widerstandsbeiwerte nur wenig. Mit wachsender Reynoldsscher Zahl nehmen diese ab.

[RF 371]

¹⁵⁾ J. Ackeret, Ergebn. Aerodyn. Versuchsanstalt zu Göttingen, III. Lfg., München-Berlin 1927, S. 82.