

F. X. Wortmann und D. Althaus, Stuttgart \*)

DK 533.6.07.011.32

## Der Laminarwindkanal des Instituts für Aero- und Gasdynamik an der Technischen Hochschule Stuttgart

Herrn Professor Dr.-Ing. Arthur Weise zum 60. Geburtstag gewidmet

*Übersicht: Am Institut für Aerodynamik und Gasdynamik der TH Stuttgart wurde ein mittelgroßer Windkanal für niedrige Geschwindigkeiten und besonders niedrigen Turbulenzgrad in Betrieb genommen. Er ist als offener Eiffeltyp ausgelegt und wird durch einen Windschutzring weitgehend vom Wetter unabhängig. Seine Maximalgeschwindigkeit beträgt 91 m/sec. Die Meßstrecke hat einen abgerundeten Rechteckquerschnitt von 0,73 m × 2,73 m. Die instrumentelle Ausrüstung erlaubt Profilmessungen bei Reynoldsschen Zahlen von  $2,5 \cdot 10^5$  bis  $6 \cdot 10^6$ . Die Meßwerte werden dabei in Wandlern und Analogrechnern verarbeitet und unmittelbar als bezogene und korrigierte Werte auf einem Koordinatenschreiber ausgegeben. Der extrem niedrige Turbulenzgrad macht den Kanal besonders geeignet zur Untersuchung all der Probleme, die mit der Laminarhaltung und der Widerstandsverminderung durch Laminarisierung verknüpft sind.*

*Summary: A medium-sized low-speed wind tunnel with a very low turbulence level has been installed at the Institute for Aerodynamics and Gasdynamics of the Technische Hochschule Stuttgart. The tunnel is built as an open tunnel of the Eiffel design and is virtually made independent of weather conditions by means of wind barriers. The maximum velocity is of 91 m/sec. The rectangular working section with rounded corners measures 0.73 m × 2.73 m. The instrumentation enables aerofoil section characteristics to be measured over a range of Reynolds numbers from  $2.5 \times 10^5$  to  $6 \times 10^6$ . The results are processed by transducers and analogue computers and directly presented in form of reduced values on a coordinate plotter. The extremely low turbulence level makes this tunnel ideally suited for investigation of all problems associated with laminar flow and with drag reduction due to laminarisation.*

*Résumé: Une soufflerie moyenne à basses vitesses et d'un degré de turbulence particulièrement faible fut mise en service par l'Institut de l'Aérodynamique et de la Dynamique des Gaz de la Technische Hochschule Stuttgart. Cette soufflerie est du type Eiffel sans retour et est rendu largement indépendant des conditions atmosphériques par une barrière protégeant contre le vent. La vitesse maximale est de 91 m/sec. La section de mesure rectangulaire à coins arrondis est de 0,73 m × 2,73 m. L'instrumentation permet de mesurer des caractéristiques de profil à des nombres de Reynolds de  $2,5 \times 10^5$  jusqu'à  $6 \times 10^6$ . Les valeurs mesurées sont traitées par transformateurs et calculatrices analogiques et présentées directement en forme de valeurs réduites par un enregistreur x, y. Par son degré de turbulence extrêmement faible, cette soufflerie se prête particulièrement à l'investigation de tous les problèmes liés au maintien du régime laminaire ainsi qu'à la réduction de la traînée par laminarisation.*

### 1. Einleitung

Beim Neubau des Instituts für Aerodynamik und Gasdynamik der Technischen Hochschule Stuttgart wurde in den Jahren 1958 bis 1962 unter anderem auch ein Laminarwindkanal für niedrige Geschwindigkeiten erstellt.

Abweichend von der üblichen Auslegung derartiger Anlagen wurde der Entwurf dieses Kanals ganz im Hinblick auf zwei spezielle Arbeitsgebiete zugeschnitten, die, wie uns scheint, auch in Zukunft in der Luftfahrttechnik von Bedeutung sein werden. Einerseits sollte der Kanal für die Untersuchung von Hochauftriebsproblemen geeignet sein und andererseits zur Klärung all der Fragen dienen, die mit der Widerstandsverminderung durch Laminarhaltung der Grenzschicht verknüpft sind. – Während die erste Aufgabe weitgehend die Abmessungen der

Meßstrecke bestimmt, erfordert die zweite einen extrem niedrigen Turbulenzgrad und damit einen relativ hohen Bauaufwand. Die erreichbaren Reynoldsschen Zahlen, die in beiden Fällen möglichst hoch liegen sollten, konnten bei einer gegebenen Antriebsleistung von 180 kW und einer Bausumme von etwa DM 200 000,- nur durch einen sehr guten Wirkungsgrad des Kanals gesichert werden. Im jetzigen Zustand werden folgende Leistungen erreicht: maximale Reynoldssche Zahl bei der Hochauftriebsmessung etwa  $6 \cdot 10^6$ ; Maximalgeschwindigkeit bei leerem Kanal 91 m/sec; Turbulenzgrad  $< 2 \cdot 10^{-4}$ . Die in mancher Hinsicht unkonventionelle Auslegung des Kanals soll hier kurz beschrieben werden.

### 2. Entwurf und Konstruktion

Ein Windkanal, der sehr turbulenzarm sein soll, erfordert ein hohes Kontraktionsverhältnis, das beim geschlos-

\*) Institut für Aerodynamik und Gasdynamik der TH Stuttgart.

senen Kanal eine recht aufwendige Rückführung notwendig macht. Ein offener Kanal vom *Eiffeltyp* ist in dieser Hinsicht wesentlich billiger, hat jedoch, wenn man ihn im Freien aufstellen muß, den Nachteil, stark von Wind und Wetter abhängig zu sein. Trotzdem entschieden wir uns für den offenen Kanaltyp, einerseits, weil der Kanal geschützt in einen Hochwald eingebettet werden konnte und der jährliche Windanfall in Stuttgart relativ gering ist, und andererseits, weil wir hofften, durch einen Windschutzring vor der Ansaugöffnung praktisch wetterunabhängig zu werden.

Die Abmessungen des Kanals ergeben sich aus denen der Meßstrecke, deren Querschnittsfläche von 2 m<sup>2</sup> aus der vorausgesetzten Antriebsleistung von 180 kW und der für Absaugversuche erwünschten Maximalgeschwindigkeit von rund 90 m/sec resultiert. Die Strahlleistung in der Meßstrecke muß dabei sechs- bis siebenmal höher

sein als die Gebläseleistung. Mit Rücksicht auf zwei-dimensionale Hochauftriebsmessungen wurde als Meßquerschnitt ein Rechteck von 2,73 m × 0,73 m gewählt.

Die Bilder 1 und 2 geben eine Vorstellung vom Gesamtaufbau des Kanals, wobei sich drei wesentliche Baugruppen unterscheiden lassen: der Windschutzring, der Ansaugteil mit Meßstrecke und erstem Diffusor und schließlich das Gebläse mit dem zweiten Diffusor. Alle Gruppen ruhen auf unabhängigen Fundamenten und sind wegen der Wärmedehnung und Schallisolation nur elastisch miteinander verbunden.

Die Konstruktion des Windschutzringes besteht im wesentlichen aus einer Reihe von Stahlstützen, die das Dach tragen. Hinter einer äußeren Bespannung aus Aluminium-Flachdrahtgewebe befindet sich eine sehr dichte Luftfiltermatte, die für Windböen und Turbulenz praktisch undurchdringlich ist. Sie besteht aus feinfase-

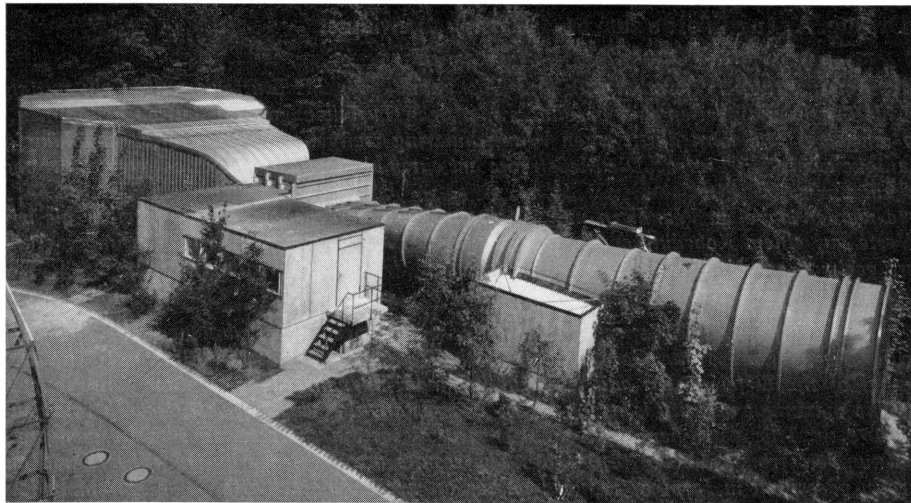


Bild 1. Gesamtansicht des Laminarwindkanals des Instituts für Aero- und Gasdynamik der TH Stuttgart

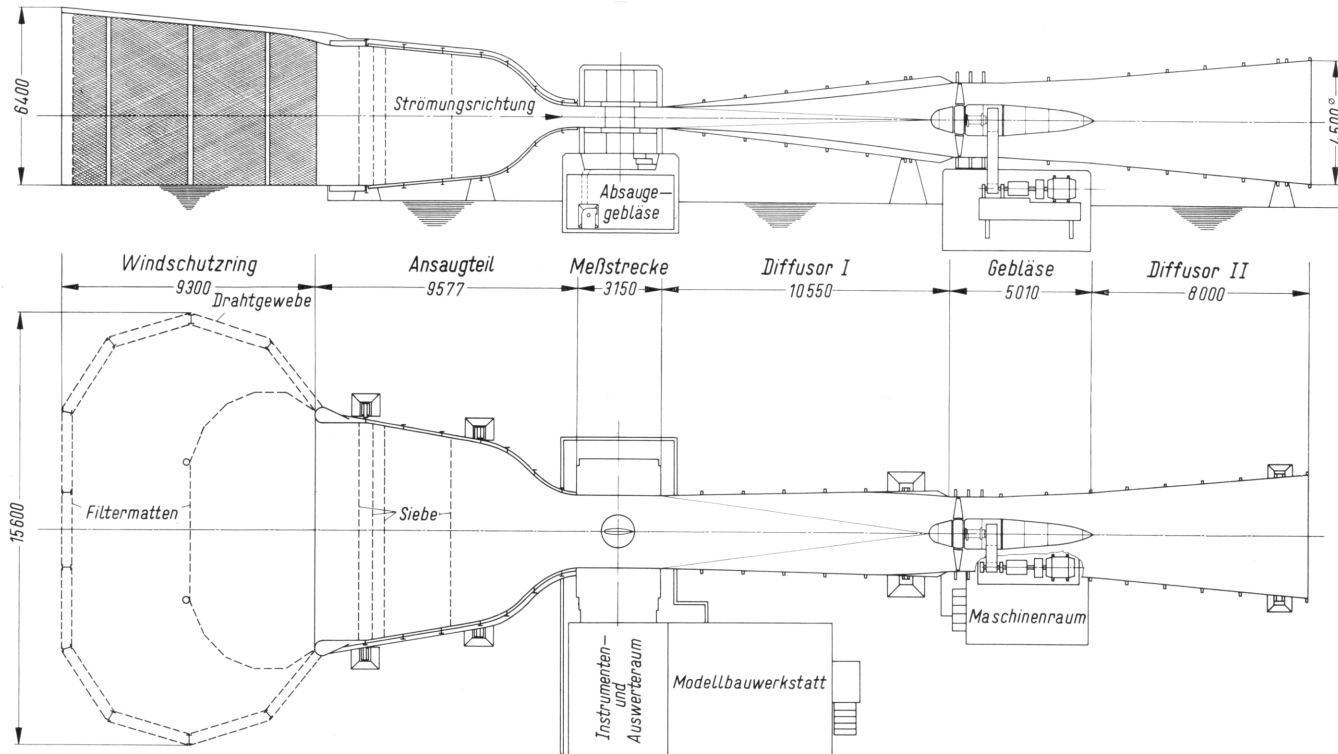


Bild 2. Übersichtszeichnung des Laminarwindkanals

rigem Polyamidfilz und ist in ihrer Lage durch ein straff gespanntes Gitter aus Edelstahl draht von 2 mm Durchmesser fixiert. Der Widerstandsbeiwert dieser Matte sinkt bei Maximalgeschwindigkeit etwa auf den Wert 100. Da die Mattenfläche fast 90 mal so groß wie der Meßstreckenquerschnitt ist, bleibt der Strömungsverlust mit  $100 \cdot (1/90)^2 = 1,24 \%$  der Meßstreckenleistung recht gering. Bei niedrigeren Geschwindigkeiten steigt der Widerstand der Matte wegen der laminaren Umströmung der feinen Fasern beträchtlich an. Wegen des absolut kleineren Leistungsbedarfs spielt das jedoch keine Rolle, im Gegenteil, die größere Schutzwirkung ist bei niedrigeren Geschwindigkeiten sehr erwünscht.

Der äußeren Filtermatte, die auch Staub- und Insekten fernhält, folgen im Innern des Schutzringes eine zweite Filtermatte und im Ansaugteil des Kanals noch vier weitere Siebe. Diese Matten und Siebe, die alle aus Kunststoffasern bestehen, haben den Zweck, restliche Ungleichmäßigkeiten der Strömung, die durch Unvollkommenheiten und Nahtstellen der Matten verursacht werden, auszuglätten. Aus diesem Grund ist auch der Widerstandsbeiwert der Matten und Siebe in der Reihenfolge 100, 10, 4, 2, 1,5, 0,7 abgestuft. Der gesamte Leistungsverlust dieser Einbauten beträgt bei Maximalgeschwindigkeit etwa 2,6 % der Meßstreckenleistung.

Die zweite Baugruppe, die den Ansaugteil, die Meßstrecke mit der umgebenden Druckkammer und den ersten Diffusor umfaßt, ist durchweg als Stahlblechkonstruktion ausgeführt<sup>1)</sup>. In der leicht konischen Beruhigungsstrecke des Ansaugteils klingt die vom letzten Sieb ausgelöste Feinturbulenz ab. Um konvektive Sekundärströmungen durch Sonnenstrahlung zu vermeiden, sind die Außenwände mit Aluminiumblech abgedeckt.

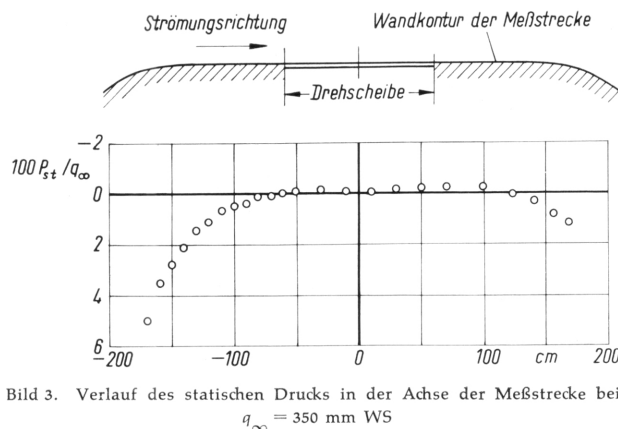


Bild 3. Verlauf des statischen Drucks in der Achse der Meßstrecke bei  $q_{\infty} = 350 \text{ mm WS}$

Die Düse vermittelt den Übergang in die Meßstrecke, die 3,15 m lang, 0,73 m hoch und 2,73 m breit ist. Sie ist aus Stahlträgern und 10 mm starken Stahlblechen zusammengeschraubt. Restliche Unebenheiten wurden nach dem Zusammenbau des gesamten Kanals dadurch beseitigt, daß ebene Glasplatten auf optisch kontrollierte Höhenmarken gelegt und der Zwischenraum mit Epoxyharz ausgegossen wurde. Boden und Decke sind genau parallel, die Seitenwände divergieren leicht, um den Einfluß der Wandgrenzschichten auf den Druckverlauf etwas zu kompensieren. Den Verlauf des statischen Druckes in der Meßstreckenachse zeigt Bild 3. Das Druckgefälle im

Bereich der Modellaufhängung ist sehr gering und bleibt unter etwa 0,2 % pro Meter.

In Boden und Decke der Meßstrecke sind zwei zum Teil transparente Drehscheiben von 1,2 m Durchmesser bündig eingelassen. Der elektrische Antrieb der synchron drehenden Scheiben steuert gleichzeitig eine pneumatische Dichtung des Ringspaltes zwischen Wand und Scheibe. Tragflügelmodelle werden normalerweise bündig zwischen die Drehscheiben eingepaßt. Um den störenden Einfluß der Wandgrenzschichten zu mildern, bestehen die Drehscheiben zum Teil aus porösen Flächen, die am Absaugegebläse angeschlossen sind.

Die gesamte Meßstrecke ist mit einer begehbaren Unterdruckkammer umgeben, deren Druck durch ein im Keller installiertes Gebläse im allgemeinen unter den statischen Druck in der Meßstrecke abgesenkt wird, damit Beobachtungsöffnungen und mögliche Undichtigkeiten die Strömungsvorgänge möglichst wenig stören.

Der an die Meßstrecke geflanschte vordere Diffusor besteht aus einem geschweißten Stahlrohr. Die Innenflächen, die den Übergang vom Rechteck auf den Gebläsering herstellen, sind aus glatten und nahezu wellenfren Holzspanplatten geformt. Der Verlauf der Querschnittsfläche entspricht etwa dem eines Kreiskegels von  $6^\circ$  Gesamtöffnungswinkel. Bild 4 zeigt eine Innenansicht dieses Diffusors.

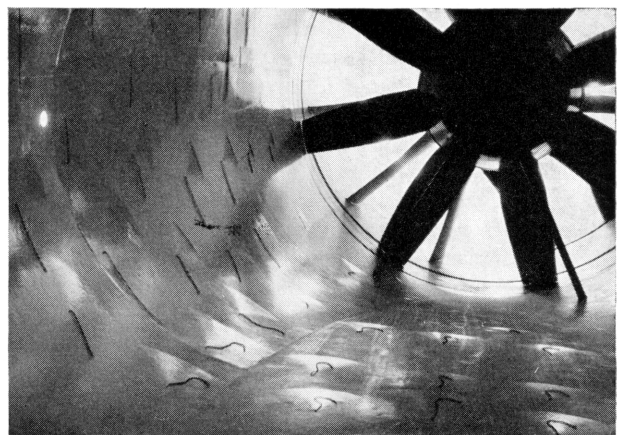


Bild 4. Blick in den ersten Diffusor gegen das stillstehende Gebläse. Die von den Wollfäden gezeichneten Bewegungsfiguren lassen das Anliegen der Strömung erkennen

Die dritte Baugruppe umfaßt das Axialgebläse mit der Antriebsanlage und dem zweiten Diffusor. Das achtblättrige Gebläse mit 2,7 m Durchmesser erreicht eine maximale Umfangsgeschwindigkeit von 86,5 m/sec, so daß die Geräuschbildung gering bleibt. Die Blätter sind im Stillstand gemeinsam verstellbar. Die Antriebsanlage mit einem 180 kW Drehstrommotor, einer hydraulischen Kupplung und einem zweistufigen Getriebe ist neben dem Kanal auf einem gemeinsamen und verstellbaren Fundament montiert. Ein Flachriemen verbindet Gebläse und Antriebsanlage miteinander. Die Drehzahl wird mit Hilfe der hydraulischen Kupplung eingestellt. Das Getriebe und die Blattverstellung erweitern den nutzbaren Regelbereich, so daß Staudrucke von 25 bis 500 mm WS mit guter zeitlicher Konstanz gefahren werden können. An das Gebläse schließt sich noch ein zweiter Diffusor an, der den Austrittsverlust auf etwa 1,2 % der Meßstreckenleistung herabsetzt. Die gesamte

<sup>1)</sup> Die Konstruktion der zweiten und dritten Baugruppe sowie des Gebläses lag in den Händen der Firma Dingler, Zweibrücken.

Antriebsanlage wird von einer Schalttafel in der Unterdruckkammer gesteuert.

**3. Leistungen und Wirkungsgrad**

Die Geschwindigkeit des leeren Kanals erreicht bei 10 % Überlast 91 m/sec. Beim Einbau sehr widerstandsarmer Modelle, wie z. B. bei Laminarprofilen und bei Absaugmodellen, sinkt dieser Wert kaum, so daß bei einer Bezugslänge von 1 m eine *Reynoldssche* Zahl von  $6,6 \cdot 10^6$  realisiert werden kann. Die nutzbare Modelllänge kann für den Fall, daß nur kleine Anstellwinkelbereiche interessieren, z. Z. bei Flügelmodellen etwa 1,8 m betragen. Für größere Anstellwinkel bis zu etwa  $\pm 20^\circ$  muß die Modelllänge auf etwa 1 m beschränkt bleiben, wenn die gemessenen Auftriebswerte noch zuverlässig sein sollen.

In diesen Fällen bleibt die maximale *Reynoldssche* Zahl knapp unter  $Re = 6 \cdot 10^6$ , was ausreichend erscheint, da sich z. B. das Hochauftriebsverhalten von Flügelprofilen oberhalb  $Re = 6 \cdot 10^6$  im allgemeinen nur noch unwesentlich ändert [2].

Von der Motorleistung werden über Kupplung, Getriebe, Riemen und Gebläse etwa 68 % an den Luftstrom abgegeben. Die Strahlleistung in der leeren Meßstrecke ist 6,75 mal größer als die vom Gebläse abgegebene Leistung.

**4. Meßeinrichtungen**

Auftrieb und Widerstand eines ebenen zweidimensionalen Tragflügelmodells werden in üblicher Weise [1, 3] aus der Druckverteilung an den Kanalwänden und im Nachlauf des Modells ermittelt, wobei die Mittelwerte der Druckverteilungen experimentell gewonnen werden. Durch einen pneumatischen Umschalter kann man jedoch auf die Integration verzichten und die Einzeldrücke auf einem Vielfachmanometer messen. Aus den gemittelten Differenzdrücken im Nachlauf und an den Kanalwänden lassen sich, wenn man noch den ungestörten Staudruck und im Nachlauf den statischen Druck und den maximalen Gesamtdruck mißt, die bezogenen Auftriebs- und Widerstandswerte einschließlich aller Korrekturen ermitteln.

Die mühevollen Meß- und Auswertearbeit wird durch eine automatische Datenverarbeitung außerordentlich reduziert. Es stehen fünf kraftkompensierte Druckwandler <sup>2)</sup> zur Verfügung, deren elektrische Ausgangswerte in drei einfachen Analogrechnern <sup>2)</sup> verarbeitet und schließlich auf einem X, Y-Schreiber <sup>3)</sup> als bezogene Auftriebs- und Widerstandswerte ausgegeben werden. Da auch der Nachlaufrechen nach Lage und Richtung automatisch in die Nachlaufdelle fährt, ist für eine Profilmessung lediglich eine Variation des Anstellwinkels erforderlich.

Eine vollständige Profilpolare für eine *Reynoldssche* Zahl läßt sich in ungefähr 5 Minuten gewinnen. Um die Meßgenauigkeit zu erhöhen, haben wir die Linearität der Druckwandler durch eine besondere Kompensation erhöht und passen die Wandler zusätzlich an die stark veränderlichen Drücke an. Die Anlage kann stufenweise und in ihrer Gesamtheit durch hochpräzise Eichdruckgeber, die nach dem Tauchglockenprinzip arbeiten [4], geeicht und geprüft werden. Die Gesamtkontrolle wird bei jeder Polarenmessung wiederholt.

<sup>2)</sup> CMR-Druckmeßumformer und CMR-Analogrechnergeräte der Firma Hartmann & Braun, Frankfurt am Main.

<sup>3)</sup> X and Y Co-ordinate Plotting Table. Bryans Aeroequipment, Ltd. (Format DIN A 3).

Neben dieser Anlage stehen Kraftwaagen für Zwei- und Dreikomponentenmessungen zur Verfügung, die teils mit Dehnungsmeßstreifen, teils mit induktiven Weggebern arbeiten. Die Meßdaten werden im allgemeinen auch in den Analogrechnern dimensionslos gemacht und mit dem X, Y-Schreiber ausgegeben.

**5. Eich- und Kontrollmessungen**

Die Staudruckverteilung quer zur Strömungsrichtung über einem mittleren Querschnitt der Meßstrecke ist außerordentlich gleichmäßig. Die Abweichungen sind geringer als  $\pm 0,025 \%$ . Die zeitlichen Schwankungen

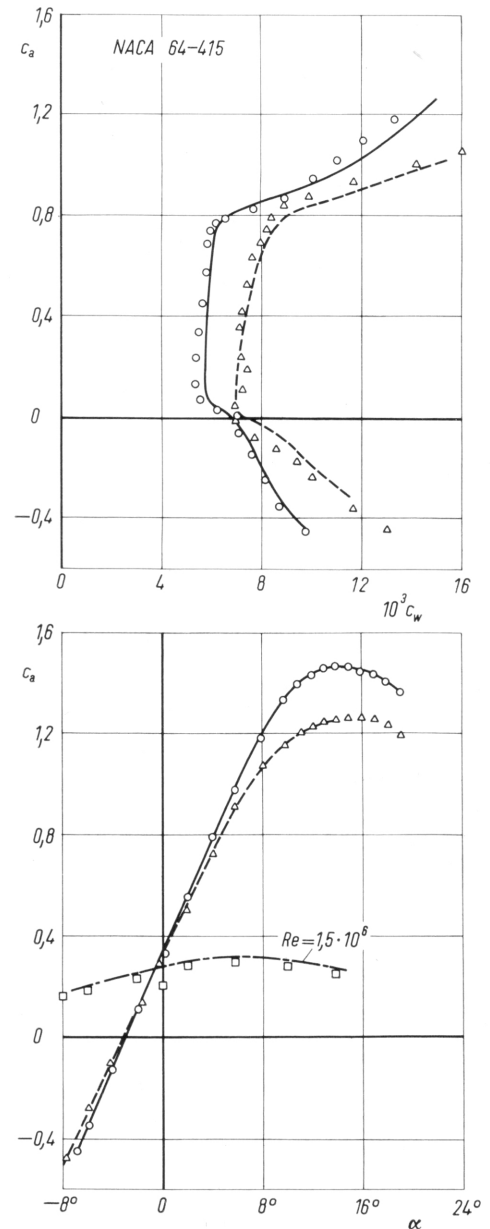


Bild 5. Vergleich eigener Messungen mit NACA-Messungen [1] am Profil NACA 64-415 bei den *Reynoldsschen* Zahlen  $Re = 1,0 \cdot 10^6$  bzw.  $1,5 \cdot 10^6$  und  $Re = 3,0 \cdot 10^6$

	<i>Re</i>	
—	$3,0 \cdot 10^6$	NACA
- - -	$1,0 \cdot 10^6$	NACA
○	$3,0 \cdot 10^6$	TH Stuttgart
△	$1,0 \cdot 10^6$	TH Stuttgart



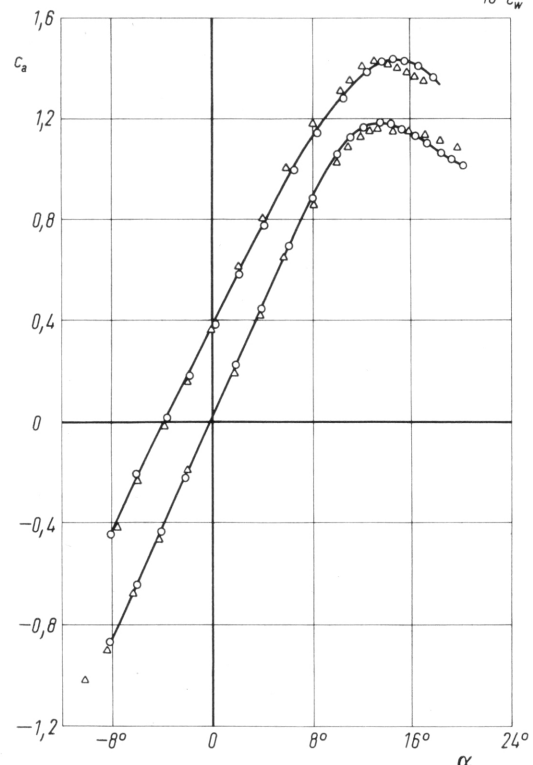
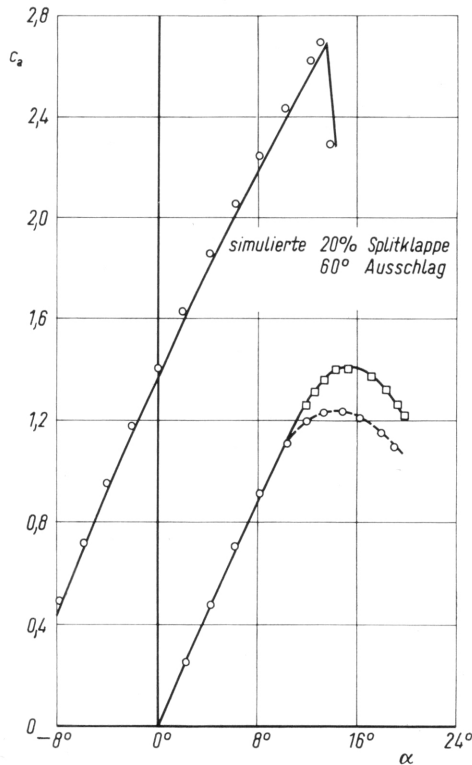
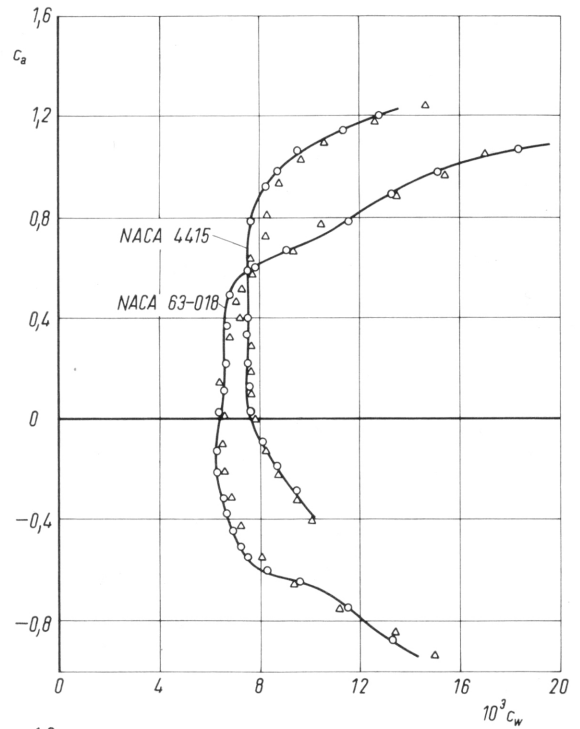
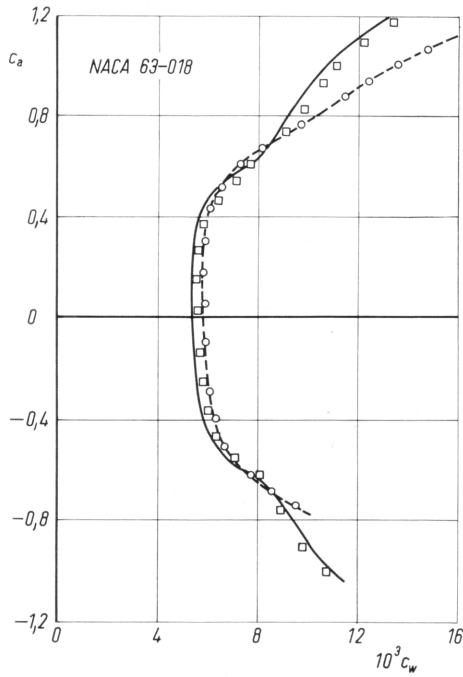


Bild 6. Vergleichsmessungen wie in Bild 5 am Profil NACA 63-018 z. T. mit einer 60° ausgeschlagenen Splitklappe, Profiltiefe  $t = 1,0$  m

	Re	
—	$6 \cdot 10^6$	NACA
- - -	$3 \cdot 10^6$	NACA
□	$6 \cdot 10^6$	TH Stuttgart
○	$3 \cdot 10^6$	TH Stuttgart

Bild 7. Messungen an zwei NACA-Profilen mit zwei verschiedenen Profiltiefen  $t = 0,5$  m und  $t = 1,0$  m bei gleicher Reynoldsscher Zahl  $Re = 2,0 \cdot 10^6$

	t [m]
○	1,0
△	0,5

des Staudruckes sind sehr langsam und überschreiten auch bei windigem Wetter kaum  $\pm 1\%$ .

Um die Eignung des Kanals für Profilmessungen zu prüfen, wurden mehrere Profilmodelle bekannter NACA-Profilen mit Profiltiefen von 0,5 und 1,0 m gebaut und gemessen. Die Bilder 5, 6 und 7 zeigen einen Ausschnitt

dieser Messungen und einen Vergleich mit den Ergebnissen, die in dem bekannten Low Turbulence Tunnel (Langley Field) des früheren NACA gewonnen wurden [3]. Die Übereinstimmung der Profilverläufe ist ungewöhnlich gut, wenn man in Betracht zieht, daß bereits geringe Differenzen in der Lage des Umschlages beträchtliche Widerstandsänderungen hervorrufen. Die beobachteten

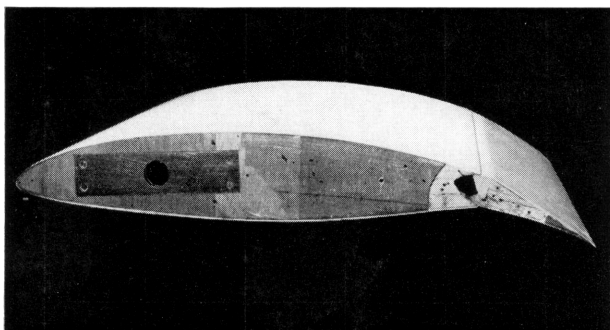


Bild 8. Windkanalmodell des Profils FX 62-K-153 [8], Profiltiefe 0,7 m

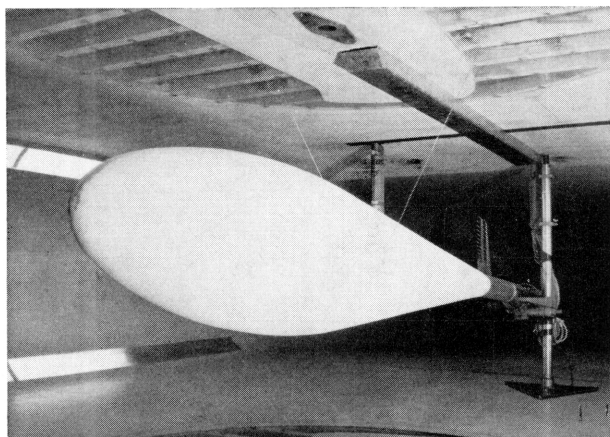


Bild 9. Ein Rumpfmodell mit 1,5 m Länge im Innern der Meßstrecke

Differenzen zeigen gegenüber den NACA-Messungen keine systematische Tendenz und sind vermutlich durch Modellungenauigkeiten bedingt.

Die Vergleichsmessungen der Modelle mit 0,5 und 1,0 m Profiltiefe (vgl. Bild 7) lassen erkennen, daß der Einfluß der Wandgrenzschichten bei den großen Modellen, die bislang gemessen wurden, noch nicht stark ins Gewicht fällt.

Bild 8 zeigt das Modell eines Laminarflügels. Bild 9 gibt einen Eindruck von der Meßstrecke, in die ein Rumpfmodell eingebaut ist.

Der Kanal wurde inzwischen zu einigen Untersuchungen über Verbesserungsmöglichkeiten von NACA-Profilen [5] und der Weiterentwicklung spezieller Laminarprofile [6, 7, 8] herangezogen. Die Mittel für den Bau der Anlage und die instrumentelle Ausrüstung stellte die Deutsche Forschungsgemeinschaft, Bad Godesberg, zur Verfügung.

## 6. Schrifttum

- [1] I. H. Abbott, A. E. von Doenhoff, L. S. Stivers: Summary of airfoil data. NACA Rep. 824 (1945).
- [2] L. K. Loftin, Jr. and W. J. Bursnall: The effects of variations in Reynolds number between  $3.0 \times 10^6$  and  $25.0 \times 10^6$  upon the aerodynamic characteristics of a number of NACA 6-series airfoil sections. NACA TN 1773 (1948). – NACA Rep. 964 (1950).
- [3] A. E. von Doenhoff and I. H. Abbott: The Langley two-dimensional low-turbulence pressure tunnel. NACA TN 1283 (1947).
- [4] a) W. von Genderen: Micro-manometers for low-speed work at the N. L. L. In: Short notes contributed to the pressure measurements meeting, sponsored by the AGARD Wind Tunnel and Model Testing Panel. AGARD Rep. 163 (1958), S. 79–83. –  
b) G. Bauer: Eine Eichwaage zur Druckmessung nach dem Tauchglockenprinzip. Studienarbeit am Institut für Aerodynamik und Gasdynamik der TH Stuttgart (1962).
- [5] F. X. Wortmann und D. Althaus: Messungen an drei Flügelprofilen des Segelflugzeuges Ka 6. Schweiz. Aero Revue 36 (1961), S. 573 und OSTIV-Publikation VI.
- [6] F. X. Wortmann: Eine Möglichkeit zur Vermeidung der Insektenrauhigkeit an Flugzeugen. Luftfahrttechnik-Raumfahrttechnik 9 (1963), S. 272–274.
- [7] F. X. Wortmann und K. Schwoerer: Einfluß der Profilpolaren auf die Flugleistungen von Segelflugzeugen. Schweiz. Aero Revue 38 (1963), S. 527 und OSTIV-Publikation VII.
- [8] F. X. Wortmann: Einige Laminarprofile für Segelflugzeuge. Schweiz. Aero Revue 38 (1963), S. 647 und OSTIV-Publikation VII.

(Eingegangen am 13. 1. 1964)