

Windkanalmessungen an Profilen mit Klappen bei mittleren Reynoldszahlen

Dipl.-Phys. D. Althaus
Institut für Aero- und Gasdynamik der Universität Stuttgart

Vorgetragen am XII. OSTIV-Kongress in Alpine, Texas, USA (1970)

Zur Steuerung von Flugzeugen werden Klappen verwendet, durch deren Ausschlag die Profilwölbung verändert und eine Auftriebsänderung erzielt wird. Die damit verbundene Erhöhung des Profilwiderstands soll möglichst klein bleiben. Klappen finden i. a. Verwendung als Querruder, Höhenruder und Seitenruder. Sie arbeiten bei mittleren Reynoldsschen Zahlen.

Um den Konstrukteuren Richtwerte über die Wirksamkeit verschiedener Klappen in die Hand zu geben, soll hier über Windkanalmessungen an einigen gewölbten und symmetrischen Profilen mit Klappen berichtet werden. Als Ergebnis der Messungen an symmetrischen Profilen wird eine Betrachtung über den Einfluss der Profilpolaren und der Streckung auf den Widerstand von Höhenleitwerken angestellt*.

1. Gewölbte Profile mit Klappen

Als Querruder wird meist an dem im Tragflügelaussenteil verwendeten Profil eine Klappe angebracht. Da im allgemeinen keine Polarenmessungen dieses Profils mit Klappe vorliegen, soll hier an einigen Beispielen gezeigt werden, welche Einflüsse die Parameter Profiltyp, Klappentiefe, Klappenaufhängung, Profildicke, Klappenspalt, Klappenausschlag und Reynoldszahl auf die Wirksamkeit der Klappen ausüben. Durch einen Klappenausschlag bei festgehaltenem Anstellwinkel wird die Wölbung des Profils und damit seine Geschwindigkeitsverteilung geändert. An der dem Klappenausschlag entgegengesetzten Profilseite bildet sich am Klappenknick eine Geschwindigkeitsspitze mit nachfolgendem Druckanstieg aus. Gleichzeitig erhöht sich die Geschwindigkeit im Nasenbereich. Abhängig vom Anstellwinkel des Profils, können diese zwei Geschwindigkeitsspitzen den Grenzschichtumschlag

nach vorn ziehen und damit auch noch turbulente Ablösung verursachen oder, falls der Grenzschichtumschlag noch nicht erfolgt, laminare Ablösung der Grenzschicht bewirken. Dies wird besonders bei kleinen Reynoldszahlen und Klappen mit grosser Klappentiefe bzw. bei grossen Klappenausschlägen der Fall sein.

Der Einfluss der Klappe und des Klappenausschlags ist abhängig vom Typ des Profils:

Bei «Normalprofilen» liegt das Maximum der Geschwindigkeit auf beiden Profilseiten ziemlich weit vorn an der Nase (10–20 Prozent der Profiltiefe), dahinter folgt ein langer, flacher Druckanstieg. Beim Entwurfsauftriebsbeiwert c_{ai} kann die Grenzschicht bei mässigen Reynoldsschen Zahlen nur bis etwa 50 Prozent der Profiltiefe laminar bleiben. Mit wachsender Anstellung wandert der Umschlagspunkt auf der Oberseite stetig nach vorn und auf der Unterseite nach hinten. Wird nun am Profil eine Klappe mit einer relativ grossen Tiefe von 35 Prozent der Profiltiefe angebracht, so ist am Klappendrehpunkt die turbulente Grenzschicht schon relativ dick und neigt mit wachsendem Klappenausschlag infolge der dort entstehenden Geschwindigkeitsspitze mit anschließender Verzögerung zur Ablösung. Die durch den Klappenausschlag erzeugte Geschwindigkeitsspitze an der Nase bewirkt nur eine kleine Erhöhung des sowieso schon weit vorn liegenden Geschwindigkeitsmaximums, die keine wesentliche Veränderung der Grenzschichtumschlagslage zur Folge hat. Als Beispiel wurden am Profil FX 60-126, das an vielen Flugzeugen als Aussenprofil verwendet wird, Polarenmessungen mit Klappentiefen von 20, 25, 30 und 35 Prozent der Profiltiefe t durchgeführt. Diagramm 1 zeigt die Polarenmessungen an diesem Profil mit einer Klappentiefe von $t_r = 0,35 \times t$. Das Profil ist 12,6 Prozent dick. Bei allen an diesem Profil untersuchten Klappen liegt die Drehachse in der Mitte, die Klappen-nase ist kreisförmig abgerundet, die Spalte sind möglichst klein gehalten. Der Klappenausschlag β ist bei allen Messungen nach unten positiv, nach oben negativ bezeichnet.

Das Profil ist vom Typ der obengenannten Normalprofile. Es besitzt bei Klappenausschlag $\beta = 0^\circ$ eine Geschwindigkeitsverteilung, deren Maximum auf der Oberseite bei ungefähr 10, auf der Unterseite bei 20 Prozent der Profiltiefe liegt. Dahinter fällt die Geschwindigkeit gegen die Hinterkante stetig ab. Entsprechend ist der Verlauf der Umschlagspunktlage, der auf der rechten Hälfte des Diagramms gestrichelt in Abhängigkeit vom Auftriebsbeiwert c_a eingezeichnet ist. Die Lage der Umschlagspunkte wird mit einem Stethoskop bestimmt. Für Umschlagspunktmessungen im Fluge wurde eine spezielle Methode entwickelt [2]. Beim Entwurfsanstellwinkel liegt der Grenzschichtumschlag auf Ober- und Unterseite bei etwa 50 Prozent der Profiltiefe t . Mit wachsendem Anstellwinkel wandert er auf der Oberseite stetig nach vorn, auf der Unterseite wird die laminare Laufstrecke immer länger. In Diagramm 1 sind ferner eine Anzahl Polaren und $c_a(\alpha)$ -Kurven für verschiedene Klappenausschläge β und Reynoldssche Zahlen von 0,7 bzw. $0,5 \times 10^6$ eingetragen**.

Die Widerstandspolare für den Klappenausschlag $\beta = 0$ zeigt den für ein Normalprofil charakteristischen Verlauf. Er nimmt mit wachsendem c_a allmählich zu. Bei positiven Klappenausschlägen β verschieben sich zwar die unteren Aeste der Widerstandspolaren zu höheren c_a -Werten. Lediglich bei $\beta = +15^\circ$ wird auch der obere Ast der Widerstandspolaren angehoben. Wie die zugehörige $c_a(\alpha)$ -Kurve zeigt, tritt jedoch schon für $\alpha \leq 0$ Ablösung auf. Bei grösseren Anstellwinkeln α wird dies noch deutlicher. Bei negativen Klappenausschlägen ist bis $\beta = -15^\circ$ der Widerstandszuwachs erträglich. Bei -20° Klappenausschlag sind nur für kleine Anstellwinkelbereiche messbare Widerstände vorhanden.

In dem Diagramm sind zusätzlich noch Messungen für $Re = 0,5 \times 10^6$ bei dem Klappenwinkel $\beta = 0$ eingetragen. Der Minimalwert des Widerstands bleibt erhalten, jedoch steigt er mit wachsendem und fallendem c_a schneller an als bei $Re = 0,7 \times 10^6$. An dem Verlauf der $c_a(\alpha)$ -Kurve ist zu erkennen, dass die Ablösung der turbulenten Grenzschicht früher beginnt. Die Windkanalmessungen am Profil FX 60-126 mit den Klappentiefen 20, 25 und 30 Prozent ergaben im Bereich von $+10^\circ$ bis -15° Klappenausschlag ähnliche Widerstandspolaren.

* Die Windkanalmessungen wurden im Laminarwindkanal des Instituts für Aero- und Gasdynamik der Universität Stuttgart durchgeführt [1].

** Bemerkung: Die Zahl der gemessenen Punkte ist bei allen Polaren wesentlich grösser als die in den Diagrammen eingezeichneten. Der Uebersichtlichkeit wegen wurden nur wenige Punkte eingezeichnet.

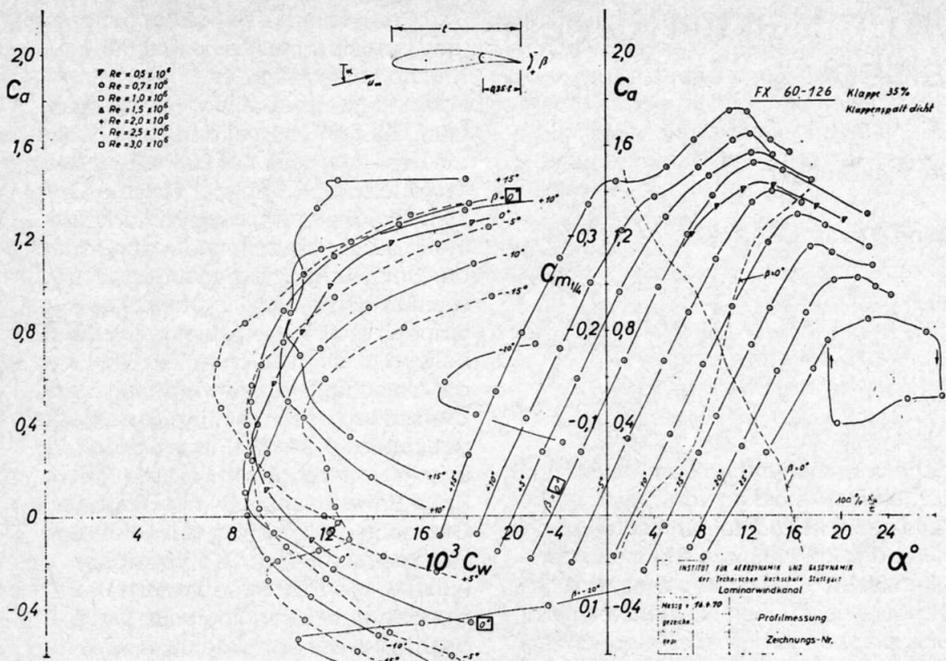


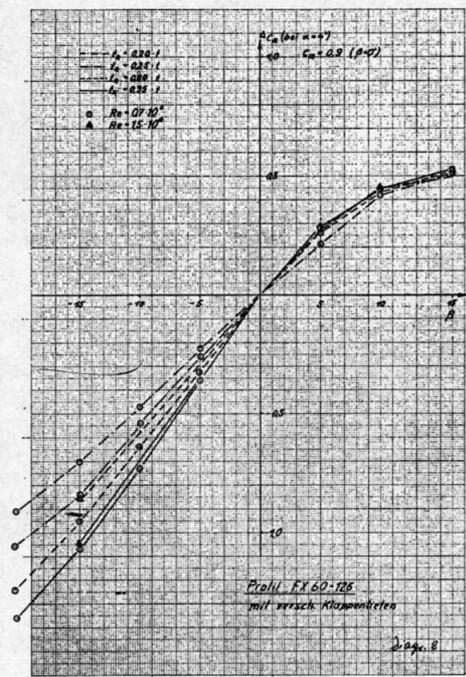
Diagramm 1

Wenn eine Klappe als Querruder verwendet wird, muss sie hauptsächlich im Langsamflug, also bei positiven Anstellwinkeln, wegen des geringen Staudrucks eine möglichst grosse Auftriebsänderung Δc_a durch Ausschlag der Klappe erzeugen. Bei einem Anstellwinkel $\alpha = +4^\circ$ bewirkt eine Vergrößerung des Klappenausschlags von $\beta = +10^\circ$ auf $\beta = +15^\circ$ keine wesentliche Auftriebserhöhung, dagegen aber einen grossen Widerstandszuwachs, da sich die turbulente Grenzschicht bereits abgelöst hat, wie die Widerstandspolare für $\beta = +15^\circ$ zeigt.

Im Diagramm 2 sind die durch den Klappenausschlag β bewirkten Auftriebsänderungen für den Anstellwinkel $\alpha = +4^\circ$ (oder $c_a = 0,9$ des Profils mit $\beta = 0^\circ$) aufgezeichnet. Bei positiven Klappenausschlägen β haben alle Klappen nahezu dieselbe Wirksamkeit. Bei Klappenausschlägen über $\beta = +10^\circ$ nimmt der Auftrieb nur noch gering, der Widerstand dagegen stark zu. Bei negativen Klappenausschlägen nimmt bei konstantem Klappenausschlag die Auftriebsdifferenz Δc_a mit wachsender Klappentiefe zu. Die im Diagramm als Kreise eingezeichneten Messpunkte entsprechen einer Reynoldsschen Zahl von $0,7 \times 10^6$, die Dreiecke sind Messungen bei $Re = 1,5 \times 10^6$. Die Klappenwirksamkeit nimmt mit wachsender Reynoldsscher Zahl offenbar nicht mehr zu. Zusammenfassend kann gesagt werden: Bei einem Normalprofil hat die Klappentiefe keinen wesentlichen Einfluss auf den Profilwiderstand. Bei positiven Ausschlägen bringen Klappen mit einer Klappentiefe von grösser als

25 Prozent der Profiltiefe keine grössere Auftriebsänderung. Bei negativen Klappenausschlägen nimmt die Auftriebsänderung mit wachsender Klappentiefe zu. Bei den meisten Messungen am Profil FX 60-126 mit Klappen war der Spalt zwischen Profil und Klappe abgedichtet worden. In einigen Fällen wurde mit offenem Spalt gemessen. Dabei konnten keine wesentlichen Änderungen

Diagramm 2



der Polaren festgestellt werden. Die sogenannten «Laminarprofile» repräsentieren den zweiten Profiltyp. Bei den zur oberen beziehungsweise unteren Ecke der Laminardelle gehörigen Anstellwinkeln sind bei diesem Profiltyp die Geschwindigkeiten bis etwa 60 bis 80 Prozent der Profiltiefe konstant. Dahinter folgt ein je nach Profildicke verschieden steiler Geschwindigkeitsabfall. Innerhalb des oben definierten Anstellwinkelbereichs sind die Umschlagspunkte durch den Beginn des Geschwindigkeitsabfalls auf der Ober- und Unterseite festgelegt, das heisst, sie wandern kaum mit Änderung des Anstellwinkels. Ausserhalb der Laminardelle wandern sie schnell nach vorn und verursachen eine beträchtliche Erhöhung des Widerstandes.

Wird nun ein Laminarprofil mit einer Klappe versehen, so kann der Klappen-drehpunkt vor dem Umschlagspunkt liegen und schon durch seinen Spalt ohne Ausschlag oder durch die vom Klappenausschlag verursachte Geschwindigkeitsspitze am Klappenknick den vorzeitigen Grenzschichtumschlag oder gar laminare Ablösung der Grenzschicht bewirken, und dies schon bei kleinen Anstellwinkeln. Da die Geschwindigkeitsverteilungen an den Ecken der Laminardelle konstant sind, wird hier durch einen kleinen Klappenausschlag durch die damit verbundene Geschwindigkeitsspitze der Grenzschichtumschlag nach vorn zur Nase gezogen. Es ist also zu erwarten, dass bei Laminarprofilen die Klappentiefe und der Klappenausschlag einen grösseren Einfluss auf den Profilwiderstand haben.

Als Beispiel sind in Diagramm 3 Messungen an einem Laminarprofil von 12,4 Prozent Dicke und der Klappentiefe von 36 Prozent beziehungsweise 20 Prozent der Profiltiefe aufgetragen. Das Profil besitzt eine relativ schmale Laminardelle, wie an der Widerstandspolare für $\beta = -20^\circ$ ersichtlich ist. Die Geschwindigkeitsverteilung der Profiloberseite für $\beta = 0^\circ$ ist konstant bis etwa 45 Prozent der Profiltiefe, dahinter fällt die Geschwindigkeit nahezu linear ab. Auf der Unterseite fällt die Geschwindigkeit von der Nase bis zur Hinterkante nur ganz gering ab. In Diagramm 3 sind für positive Klappenausschläge nur die oberen Ecken der Laminardelle angedeutet. Beim Profil mit der Klappentiefe von 36 Prozent (gestrichelte Polare) liegt der Klappenknick zu weit vorn, da bei kleinen Anstellwinkeln der Grenzschichtumschlag dahinter erfolgen würde. Es kommt zur laminaren Ablösung und damit zu einem grossen Widerstandsbeiwert. Bei der 20 Prozent tiefen Klappe (ausgezogene Polare) ist einmal die Saugspitze am Klappenknick wegen der geringeren Klappentiefe geringer; da der

Knick ausserdem 16 Prozent der Profiltiefe weiter hinten liegt, tritt der Umschlag der Grenzschicht vor dem Klappenknick ein. Die turbulente Grenzschicht kann den Druckanstieg an der Klappe überwinden.

Die Widerstandspolare für die 36 Prozent tiefe Klappe mit dem Klappenausschlag $\beta = +10^\circ$ (gestrichelt) zeigt einen eigenartigen Verlauf: Ab einem Auftriebsbeiwert $c_a = 1,0$, $\alpha = -2^\circ$ tritt am Klappenknick laminare Ablösung auf, der Widerstand nimmt mit wachsendem Anstellwinkel zu. Bei $c_a \sim 1,5$ beziehungsweise $\alpha \sim +3^\circ$ bildet sich die Geschwindigkeitsspitze an der Nase aus und zieht den Umschlag der Grenzschicht vor den Klappenknick; die turbulente Grenzschicht kann den Druckanstieg an der Klappe überwinden, der Widerstand wird wieder kleiner. Bei weiterer Erhöhung der Anstellung erfolgt turbulente Ablösung.

Beim Klappenausschlag $\beta = -20^\circ$ tritt an der Unterseite der 36 Prozent tiefen Klappe infolge der Geschwindigkeitsspitze laminare Ablösung am Klappenknick auf, da für die dazugehörigen Anstellwinkel $\alpha \geq 12^\circ$ auf der Unterseite Druckabfall bis zum Klappenknick bei 64 Prozent der Profiltiefe herrscht. Erst bei kleineren Anstellwinkeln kommt die Saugspitze auf der Unterseite der Profilnase zur Wirkung und zieht den Umschlag weiter nach vorn, so dass die turbulente Grenzschicht an der Klappe anliegend bleibt; der Widerstand wird kleiner. Beim Klappenausschlag $\beta = -20^\circ$ liegt die Delle der 36 Prozent tiefen Klappe im Anstellwinkelbereich von $\alpha = +8^\circ$ bis $\alpha = +14^\circ$, die Delle der 20 Prozent tiefen Klappe liegt im Bereich von $\alpha = +4^\circ$ bis $\alpha = +10^\circ$.

Bei den Messungen an der 36 Prozent tiefen Klappe ist der Klappenspalt zwischen Profil und Klappe abgedichtet, an der 20 Prozent tiefen Klappe dagegen offen. In Diagramm 3 ist noch eine Messung an der 20 Prozent tiefen Klappe für $\beta = +20^\circ$ mit dichtem Klappenspalt eingezeichnet (strichpunktiert). Der Widerstand ist etwa um 15 Prozent kleiner als beim offenen Spalt.

Das Diagramm 4 zeigt die Auftriebsänderung infolge des Klappenausschlags beim Anstellwinkel $\alpha = +5^\circ$ ($c_a = 1,2$ für $\beta = 0^\circ$) für die 20 Prozent und 36 Prozent tiefe Klappe. Bei positiven Klappenausschlägen ist die Wirkung der kurzen Klappe wesentlich grösser, bei negativen Klappenwinkeln wiederum geringer. Die kurze Klappe besitzt aber bei allen gemessenen Klappenstellungen brauchbare Widerstandspolaren. Aus diesen Messergebnissen kann gefolgert werden, dass bei Laminarprofilen die Klappentiefe wegen der weit hinten liegenden Umschlagspunkte nicht zu gross gewählt werden darf.

Im Diagramm 5 sind Messungen an einem älteren Laminarprofil FX 06-S-137 bei einer Reynoldsschen Zahl von $1,5 \times 10^6$ mit einer 30 Prozent tiefen Klappe eingetragen. Im Gegensatz zu den seither beschriebenen Klappenausführungen liegt der Klappendrehpunkt in der Profiloberseite; an der Profilunterseite besteht zwischen Profil und Klappe ein keilförmiger Spalt (vgl. Querruder am Segelflugzeug K6). Der Grenzschichtumschlag würde am Profil ohne Klappe auf der Unterseite ab $c_a > 0,4$ bei 100 Prozent der Profiltiefe liegen. Die ausgezogen gezeichneten Kurven

sind Messungen mit abgedichtetem Klappenspalt. Der Vergleich der Widerstandspolare des Profils ohne Klappe mit der Polare für den Klappenwinkel $\beta = 0^\circ$ zeigt, dass die Widerstandserhöhung infolge der Klappe etwa 10 Prozent beträgt. Der keilförmige Spalt zwischen Profil und Klappe scheint durch die Grenzschicht verschmiert zu werden, erst am unteren Eck der Delle macht er sich stärker bemerkbar (Widerstandszunahme 30 Prozent). Bei positiven Klappenausschlägen bis $\beta = +10^\circ$ verschiebt sich die Laminardelle bei geringem Widerstands-

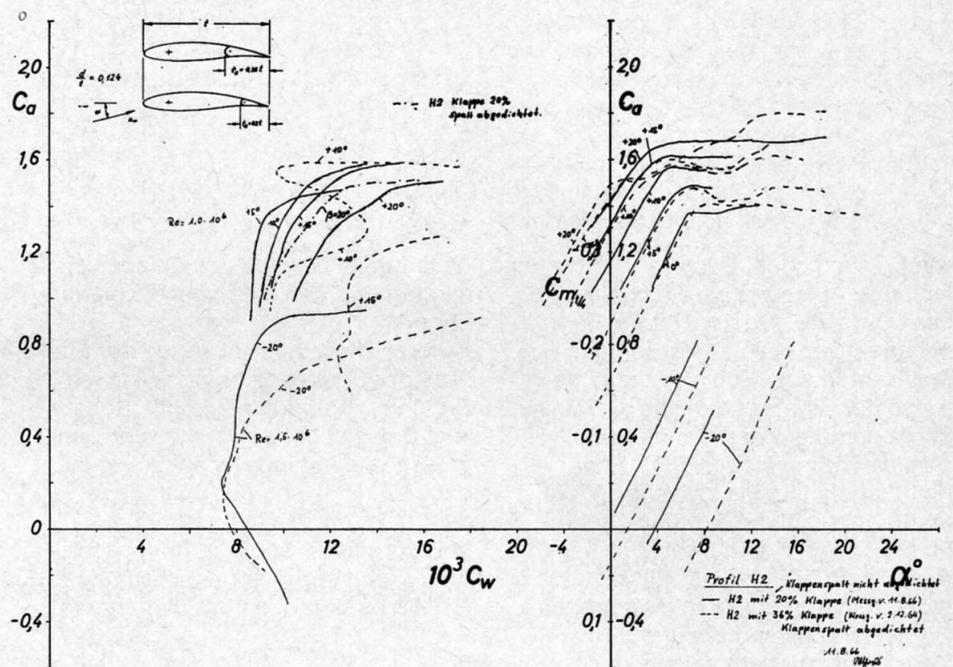
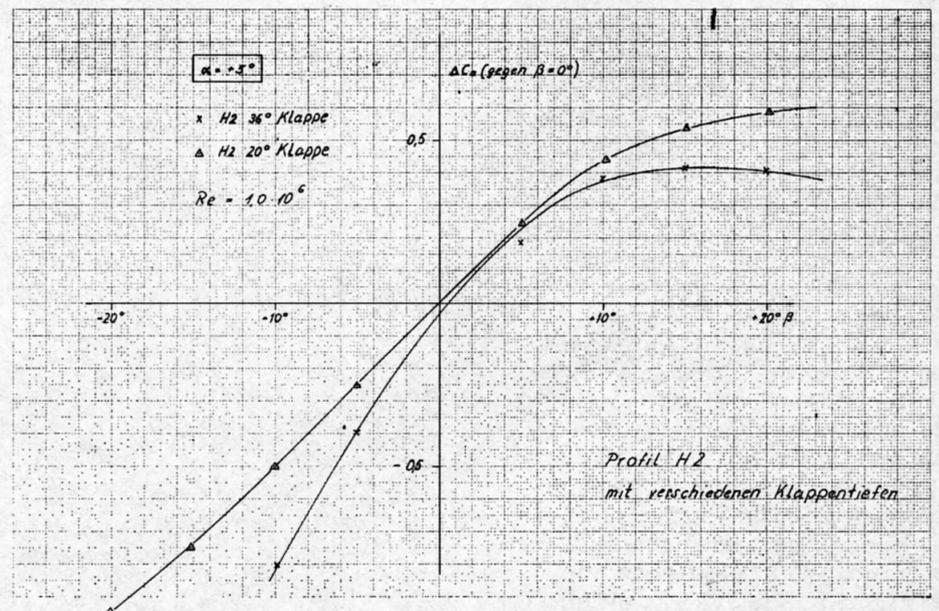


Diagramm 3

Diagramm 4



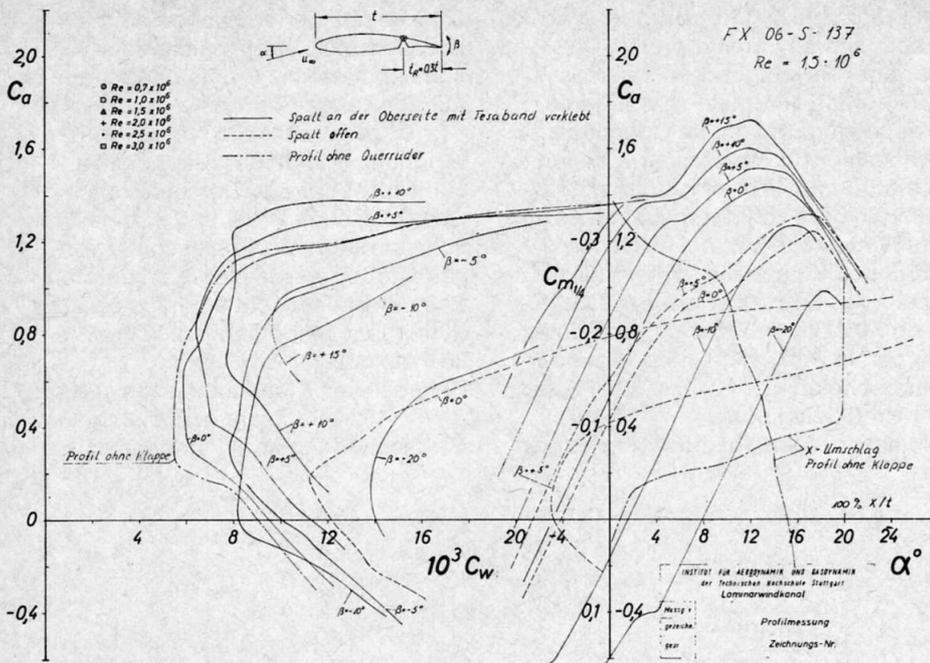


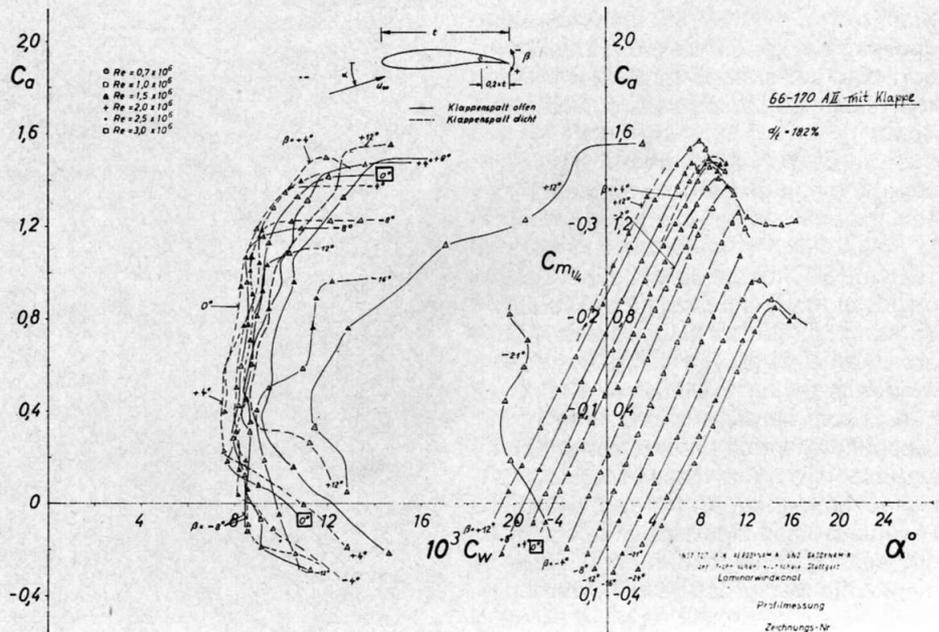
Diagramm 5

wachs nach oben. Bei $\beta = +15^\circ$ erfolgt laminare Ablösung am Klappenknick der Oberseite. Auf der Unterseite tritt bei negativen Klappenausschlägen an den Kanten des Profils beziehungsweise der Klappe Ablösung auf. Besonders bemerkenswert bei dieser Klappenausführung ist der Einfluss der Abdichtung des Spalts zwischen Profil und Klappe auf der Profilerseite: Im Diagramm 5 sind zwei Messungen $\beta = 0^\circ$ und für $\beta = +5^\circ$ mit nicht abgedichtetem Klappenspalt eingetragen. Die Widerstandspolare und die $c_a(\alpha)$ -Kurven (gestrichelt) zeigen, dass auf der Klappenober- und -unterseite im ganzen Anstellwinkelbereich die Grenzschicht an der Klappe abgelöst ist. Bei dieser Klappenausführung muss also der Spalt unbedingt abgedichtet werden.

Das Diagramm 6 zeigt Messungen an einem 18,2 Prozent dicken Profil mit einer 20 Prozent tiefen Klappe. Der Klappendrehpunkt liegt in der Mitte, die Klappennase ist rund. An den Widerstandspolaren ist zu sehen, dass sich die Delle bei positiven Klappenausschlägen nur wenig nach oben, bei negativen Klappenausschlägen etwas mehr nach unten verschieben lässt. Aus den $c_a(\alpha)$ -Kurven ist zu entnehmen, dass die Auftriebsänderungen durch Klappenausschlag bei dem 18,2 Prozent dicken Profil geringer sind als bei den seither behandelten Profilen mit etwa 13 Prozent Dicke. Bei dicken Profilen ist besonders auf der Profilerseite der Druckanstieg zur Profilhinterkante gross, die turbulente Grenzschicht ist stark belastet und wird schnell dick. Dadurch wird die effektive

Wölbung im Bereich der Klappe vermindert und der Auftriebsbeiwert verringert. Auch an diesem Profil wurde der Einfluss der Spaltabdichtung zwischen Profil und Klappe untersucht. So ist zum Beispiel bei $\beta = +12^\circ$ eine sehr grosse Widerstandsverringerng zu beobachten, wenn der Spalt abgedichtet ist (gestrichelte Kurve). In Diagramm 7 ist die Auftriebsänderung durch den Klappenausschlag β für alle gemessenen Profiltypen und

Diagramm 6



Klappenanordnungen zum Vergleich für $c_a = 0,9$ des Grundprofils eingezeichnet. Bei positiven Klappenausschlägen besitzen das Normalprofil FX 60-126 mit Klappentiefen von 20 bis 35 Prozent und das Laminarprofil H 2 mit einer Klappentiefe von 20 Prozent die beste Wirkung. Bei den Laminarprofilen FX 06-S-137 mit einer Klappentiefe von 30 Prozent und H 2 mit einer Klappentiefe von 36 Prozent wird bei Klappenausschlägen $\beta \geq +10^\circ$ infolge Grenzschichtablösung kein weiterer Auftriebsanstieg erzielt. Die Klappenwirksamkeit des 18,2 Prozent dicken Profils 60-17 A II mit einer Klappentiefe von 20 Prozent ist geringer als die der dünneren Profile.

Bei negativen Klappenausschlägen nimmt die Wirksamkeit der Klappen mit wachsender Klappentiefe zu. Hier ist die Wirksamkeit der Klappe des dickeren Profils 60-17 A II grösser als die der anderen Klappen mit gleicher Klappentiefe von 20 Prozent.

Zum Vergleich sind noch Messungen am speziell als Wölbklappenprofil entwickelten Profil FX 67-K-170 mit einer Klappentiefe von 18 Prozent eingezeichnet. Dieses Profil hat bei positiven Klappenwinkeln die beste Wirkung, bei negativen Winkeln besitzt es dieselbe Wirkung wie die anderen Profile mit Klappentiefen von 20 Prozent. Da bei Flugzeugen mit Wölbklappen die Klappen im Aussenbereich des Flügels zur Wölbung mitausgeschlagen werden, muss der zur Quersteuerung des Flugzeugs erforderliche Klappenwinkel noch überlagert werden. Ein als Querruder verwendetes Wölbklappenprofil muss daher auch bei sehr grossen positiven und negativen Ausschlägen

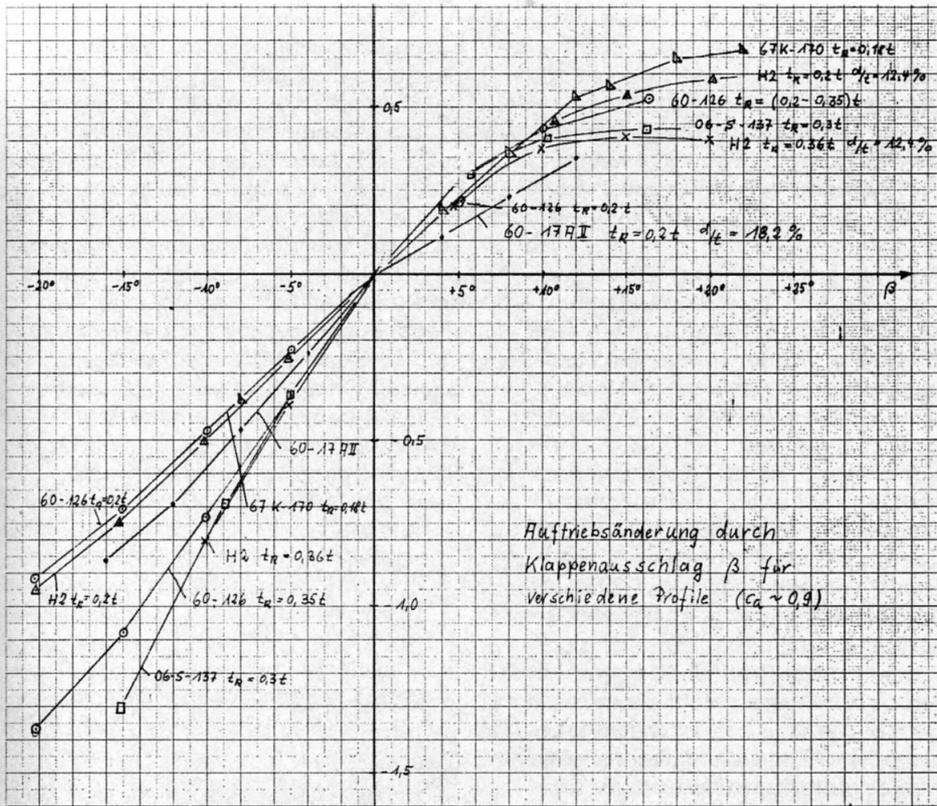


Diagramm 7

noch eine gute Wirksamkeit besitzen. Zusammenfassend können über eine als Querruder verwendete Klappe folgende Aussagen gemacht werden: Die **Tiefe der Klappe** kann an einem Normalprofil mit etwa 13 Prozent Profildicke bis zu 30 bis 35 Prozent der Profiltiefe betragen. An einem Laminarprofil sollte die Klappentiefe 20 Prozent der Profiltiefe nicht übersteigen, da sonst der Grenzschichtumschlag am Klappenknick erfolgt oder laminare Ablösungen auftreten.

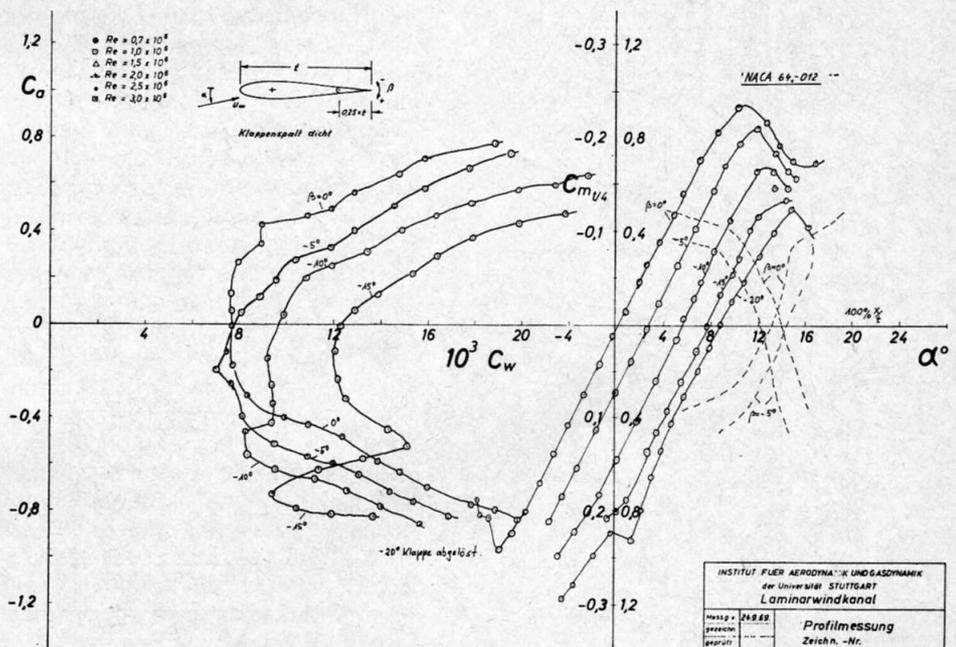
Der **zulässige Klappenausschlag** sollte bei positiven Klappenausschlägen Winkel von $+10^\circ$ nicht überschreiten, da sonst der Profilwiderstand stark ansteigt und ein grosses negatives Wenderollmoment erzeugt wird. Bei negativen Klappenausschlägen dagegen wird das negative Wenderollmoment durch den zusätzlichen Profilwiderstand vermindert, so dass in diesem Fall Ausschläge von $\beta = -15^\circ$ bis $\beta = -20^\circ$ ohne weiteres zulässig sind, was durch entsprechende Differenzierung der Querruderausschläge bewirkt werden kann.

Die Klappe kann mit dem Drehpunkt in der Mitte und kreisförmiger Klappen-nase ausgeführt sein. Eine Klappe mit dem Drehpunkt in der Profilunterseite und Abrundung an der Oberseite der Klappe bietet den Vorteil, dass bei negativen Klappenausschlägen die Widerstandserhöhung durch Ablösung am Klappenknick an der Unterseite

der Klappe das negative Wenderollmoment verringert.

Bei allen Klappen an Flugzeugen sollten die Spalte zwischen Profil und Klappe abgedichtet werden. Wie die gemessenen Beispiele zeigen, werden die Profilwiderstände durch offene Spalte im allgemeinen beträchtlich vergrößert.

Diagramm 8



2. Symmetrische Profile mit Klappen
Symmetrische Profile mit Klappen werden an Leitwerken verwendet. Leitwerkprofile arbeiten bei Re-Zahlen von etwa $0,5-0,7 \times 10^6$. Da bei diesen kleinen Reynoldszahlen wenig über das Verhalten von Profilen mit Klappen bekannt ist, wurden Windkanalmessungen an mehreren Profilen mit verschiedenen Klappentiefen durchgeführt. In Diagramm 8 sind Polarenmessungen am Profil NACA 64, 012 mit einer Klappentiefe von 25 Prozent der Profiltiefe für $Re = 0,7 \times 10^6$ für verschiedene Klappenausschläge eingetragen. Schon bei Klappenausschlägen von $\beta = -10^\circ$ erhöht sich der Profilwiderstand beträchtlich, da wegen der kleinen Reynoldszahl am Klappenknick eine laminare Ablöseblase entsteht, die bei $\beta = -15^\circ$ noch deutlicher hervortritt. Bei $\beta = -20^\circ$ hat sich die Grenzschicht an der Klappe vollkommen abgelöst. Die zugehörige $c_a(\alpha)$ -Kurve zeigt, dass die Auftriebsänderung gegenüber $\beta = -15^\circ$ nur noch gering ist.

An vielen Höhenleitwerken werden die Profildicken im Aussenteil des Leitwerkes geometrisch ähnlich verkleinert. Im Diagramm 9 sind zweidimensionale Polarenmessungen an Teilen von Originalleitwerken mit dem auf Profildicken von 10,9 Prozent und 8 Prozent ähnlich verkleinerten Ausgangsprofil 64, 012 für $Re = 0,7 \times 10^6$ und $\beta = 0^\circ$ aufgetragen. Mit abnehmender Profildicke werden die Laminardellen immer schmaler, der Maximalauftrieb und der Auftriebsanstieg $dca/d\alpha$ nehmen ebenfalls stark ab. Dies ist ein Beispiel dafür, dass man nicht ohne weiteres die Dicke eines Profils durch geometrisch ähnliche Verformung vari-

ieren kann. Vielmehr muss die Dickenänderung über eine geeignete Aenderung der Geschwindigkeitsverteilung am Originalprofil erfolgen.

An dem geometrisch ähnlich verdünnten Profil und i. a. bei allen Profilen mit einer Dicke ≤ 10 Prozent entsteht bei den hier vorliegenden kleinen Reynoldszahlen bereits bei kleinen Anstellwinkeln α eine laminare Ablöseblase an der Nase. Dahinter bildet sich eine relativ dicke turbulente Grenzschicht aus, die einen grossen Profilwiderstand zur Folge hat. Abbildung 10 zeigt den mit einem Petroleum-Russ-Gemisch sichtbar gemachten Verlauf der Umschlagslinie an einem Höhenleitwerk, bei dem das Profil 64₁ 012 geometrisch ähnlich verdünnt wird und das im unteren Teil das Profil 64₁ 012 mit auf 8 Prozent verkleinerter Dicke enthält. Die Abbildung zeigt die Oberseite des Leitwerks mit einem Anstellwinkel von $\alpha = +3,5^\circ$ und $\beta = 0^\circ$, bei $Re = 0,7 \times 10^6$.

Auf das weiss lackierte Profil wird eine Mischung aus Petroleum und Russ aufgebracht und der Windkanal eingeschaltet. Nach einer kurzen Blaszeit entsteht das im Diagramm sichtbare Bild. Im Gebiet laminarer Grenzschichtströmung ist die Wandschubspannung abgesehen von der Umgebung der Profilmase gering, das Petroleum-Russ-Gemisch wird nicht wegtransportiert. Die turbulente Grenzschicht besitzt eine wesentlich höhere Wandschubspannung, deshalb wird hinter dem Grenzschichtumschlag das schwarze Petroleum-Russ-Gemisch wegtransportiert, und die weisse Farbe des Profils kommt zum Vorschein.

Die Grenze zwischen Schwarz und Weiss markiert den Verlauf des Grenzschichtumschlags. Es ist klar zu erkennen, wie der Grenzschichtumschlag von etwa 45 Prozent der Profiltiefe im oberen Teil mit grösserer Profildicke auf etwa 5 Prozent der Profiltiefe im unteren Teil mit kleinerer Profildicke vorläuft.

Abbildung 11 zeigt einen Petroleum-Russ-Anstrich derselben Leitwerkoberseite bei $\alpha = +5^\circ$ und $\beta = -5^\circ$. Hier ist im unteren Teil eine dicke, parallel zur Profilmase verlaufende Linie von Petroleum-Russ-Gemisch zu beobachten.

Von dieser Linie löst sich die Grenzschicht laminar ab, es wird keine Schubspannung mehr zur Wand hin übertragen, das Petroleum-Russ-Gemisch bleibt liegen. Kurz hinter dem Ablösepunkt wird die abgelöste Grenzschicht turbulent und legt sich dann wieder an das Profil an. Da diese turbulente Grenzschicht eine grosse Schubspannung hat, wird das Petroleum-Russ-Gemisch hinter der «Blase» wieder abtransportiert, und die helle Farbe des Modells wird sichtbar. Die Abbildung 12 zeigt einen Petroleum-Russ-Anstrich an der Oberseite desselben Leitwerks bei $\alpha = -5^\circ$ und $\beta = +5^\circ$. Die Strömungsrichtung ist hier von rechts nach links. Obwohl der Anstellwinkel negativ ist, tritt an der zum Klappenausschlag entgegengesetzten Oberseite eine Geschwindigkeitsspitze auf, die auf der Klappe zu einer laminaren Ablöseblase (strichförmige Anhäufung von Petroleum-Russ-Gemisch) und darauffolgendem turbulentem Wiederanlegen der Grenzschicht führt.

Aus diesen Messergebnissen kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass man die Dicke von Profilen nicht durch geometrisch ähnliche Transformation verändern darf. Ausserdem sollte man bei kleinen Re-Zahlen keine Profile mit einer Dicke kleiner als 10 Prozent der Profiltiefe verwenden. Im Diagramm 13 ist die durch Klappenausschlag erzielte Auftriebserhöhung am Profil NACA 64₁ 012 mit einer Klappentiefe von 25 Prozent der Profiltiefe für $Re = 0,7 \times 10^6$ aufgetragen. Dazu sind noch Messungen desselben Profils mit einer Klappentiefe von 40 Prozent der Profiltiefe, das oft für Seitenleitwerke verwendet wird, für $Re = 1,0 \times 10^6$ und $1,5 \times 10^6$ enthalten.

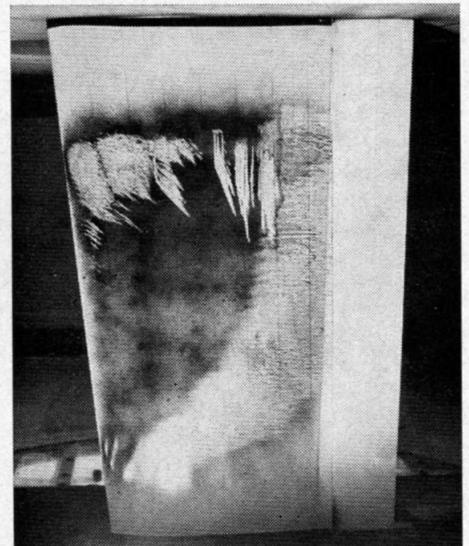


Abb. 10
Petroleum-Russ-Anstrich an einem Höhenleitwerk:
Oberseite, $\alpha = +3,5^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $Re \sim 0,7 \cdot 10^6$.

Diagramm 9

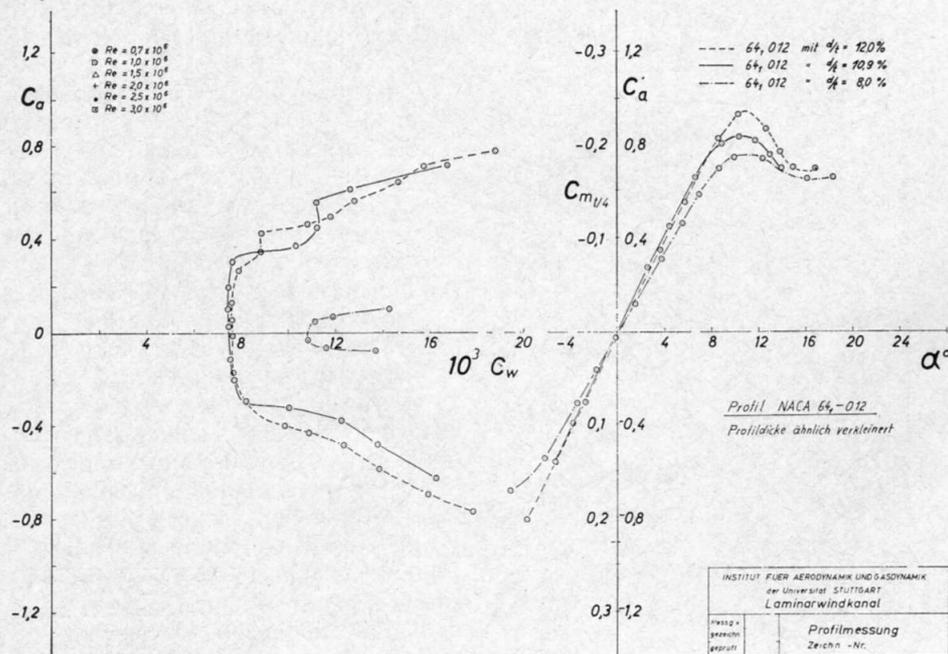
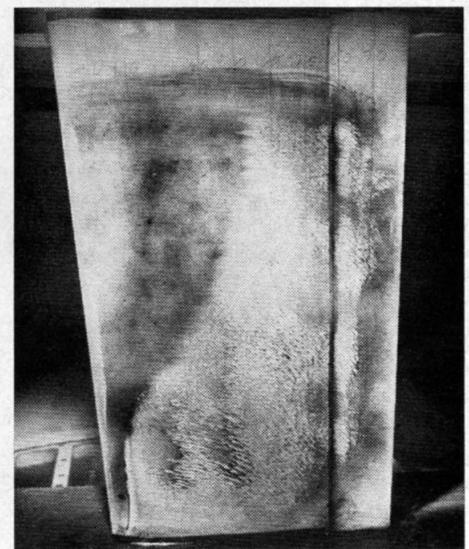


Abb. 11
Petroleum-Russ-Anstrich an einem Höhenleitwerk:
Oberseite, $\alpha = +5^\circ$, $\beta = -5^\circ$, $Re \sim 0,7 \cdot 10^6$.



Da Höhen- und Seitenleitwerke meist bei negativen Anstellwinkeln und positiven Klappenausschlägen oder umgekehrt arbeiten, ist die c_a -Erhöhung für positive Klappenausschläge bei einem negativen Anstellwinkel von $\alpha = -4^\circ$ ($c_a = -0,4$) aufgetragen. Die durch positiven Klappenausschlag erzielbare Auftriebsänderung ist bei negativen Anstellwinkeln natürlich grösser als bei positiven, da bei positiven α die Grenzschicht sich früher an der Klappe ablöst. Dies trifft hauptsächlich für das Profil mit einer Klappentiefe von 40 Prozent zu. Ein Seitenruder, dessen Klappenausschlag positiv ist, wird aber infolge der Drehung um die Hochachse mit negativem Winkel angeströmt. Dem Diagramm 13 ist zu entnehmen, dass das Profil mit 25 Prozent Klappentiefe und einer Dicke von 12 Prozent bei konstantem β eine grössere Wirkung besitzt als das Profil mit 8 Prozent Dicke. Vor allem ist auch sein Widerstand kleiner. Die Wirkung des Profils mit einer Klappentiefe von 40 Prozent ist sehr von der Re-Zahl abhängig. Bei einer Verringerung der Re-Zahl auf $Re = 0,7 \times 10^6$ dürfte kein Unterschied zum Profil mit 25 Prozent tiefer Klappe bestehen. Da aber Seitenleitwerke wegen ihrer grösseren Profiltiefe bei $Re = 1,0 - 1,5 \times 10^6$ arbeiten, können diese zweidimensionalen Messergebnisse zur Abschätzung der Wirkung von Seitenleitwerken mit 40 Prozent Klappentiefe verwendet werden. Im Diagramm 14 sind Messergebnisse für $Re = 0,7 \times 10^6$ am symmetrischen Profil L III-142 K mit einer Klappentiefe von 25 Prozent der Profiltiefe dargestellt. Der Minimalwiderstand dieses Profils ist wegen seiner Dicke von 14,2 Prozent grösser als der des Profils 641 012, gleichzeitig ist aber seine Laminardelle wesentlich breiter und der mit dem Klappenausschlag verbundene Widerstandsanstieg geringer. Im Diagramm 7 ist noch eine Widerstandspolare für $Re = 0,5 \times 10^6$ und $\beta = 0^\circ$ enthalten. Ferner ist noch eine Messung für $\beta = -15^\circ$ mit nicht abgedichtetem Klappenspalt eingezeichnet. Durch Abdichtung des Klappenspalt kann der Profilwiderstand beträchtlich verringert werden.

3. Der Einfluss der Profilpolaren und der Streckung auf den Widerstand von Höhenleitwerken an Flugzeugen
Höhenleitwerke arbeiten je nach Lage des Flugzeugschwerpunkts im Bereich von $c_{aH} \sim +0,2$ im Langsamflug bis $c_{aH} \sim -0,2$ im Schnellflug. Beim Höhenleitwerk mit Flosse und Ruder ist der Anstellwinkel im Langsamflug positiv ($+5^\circ$). Durch negativen Ruderausschlag muss sein Auftriebsbeiwert auf Werte $c_a = 0,2$ verringert werden. Für den Schnellflug mit $c_{aH} \sim -0,2$ und $\alpha_H \sim -5^\circ$ gilt das Um-

gekehrte. Ein Leitwerkprofil sollte also im Bereich von $c_a \sim \pm 0,25$ und Klappenausschlägen β bis zu $\pm 10^\circ$ einen kleinen Profilwiderstand besitzen. Um auch bei Anstellwinkeländerungen durch Böen keinen Leistungsverlust zu erleiden, sollten die Dellen etwa zwischen $c_a = +0,4$ und $c_a = -0,4$ liegen.

Im Diagramm 15 ist die Widerstandspolare und die $c_a(\alpha)$ -Kurve für ein Leitwerk mit rechteckigem Grundriss eingetragen. Der Widerstand setzt sich zusammen aus dem induzierten Widerstand c_{wi} und dem Profilwiderstand c_{wP} . Die $c_a(\alpha)$ -Kurve des Leitwerks wurde mit dem Traglinienverfahren nach Weissinger berechnet. Die mit $b = \infty$ bezeichnete Kurve ist der $c_a(\alpha)$ -Verlauf des zweidimensionalen Profils. Mit Δc_{wi} elliptisch wird die Differenz des induzierten Widerstands zum induzierten Widerstand einer elliptischen Auftriebsverteilung bezeichnet. Um den Einfluss der Leitwerksstreckung und der damit verbundenen Re-Zahl-Änderung auf den Leitwerks-widerstand festzustellen, wurden solche Rechnungen für fünf verschiedene Leitwerke mit demselben Profil durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Diagramm 16 zusammengestellt. Alle fünf Leitwerke besitzen dieselbe Fläche $F_{HL} = 1,3 \text{ m}^2$. Die Profiltiefe am Leitwerk 1 wurde so gewählt, dass bei einer Fluggeschwindigkeit von etwa 80 km/h die Reynoldszahl $Re = 0,7 \times 10^6$ beträgt. Bei derselben Geschwindigkeit wird am Leitwerk 3 mit entsprechend geringerer Profiltiefe $Re = 0,5 \times 10^6$ erreicht. Die Leitwerke 2 und 4 besitzen dieselbe mittlere Tiefe wie die Leitwerke 1 und 3, aber eine Zuspitzung von $\tau = 0,7$. Leitwerk 5 hat in der Mitte und aussen die Profiltiefen der Leitwerke 1 und 4. Es fliegt mit einer Re-Zahl von $0,6 \times 10^6$. Die sich damit ergebenden Spannweiten, Streckungen und Auftriebsanstiege für die einzelnen Leitwerke sind dem Diagramm zu entnehmen.

Für alle Leitwerke sind nun für $c_a = 0,4$ die Widerstände c_w eingetragen, die sich aus dem Profilwiderstand c_{wP} und dem induzierten Widerstand c_{wi} zusammensetzen. Der Anteil des induzierten Widerstands ist gering. Durch Erhöhung der Streckung von 4,3 auf 8,1 wird der induzierte Widerstand kaum vermindert. Wegen der gleichzeitigen Verkleinerung der Re-Zahl steigt aber der Profilwiderstand wesentlich stärker an. Auch wenn der Einfluss der Re-Zahl auf den Profilwiderstand geringer wäre, bliebe das Leitwerk 2 mit seiner kleinen Streckung überlegen. Der Auftriebsanstieg von Höhenleitwerken sollte sowieso nicht zu gross sein, da der durch Anstellwinkeländerung erzielte Auftrieb durch entgegengesetzten Klappenausschlag wieder auf das für den

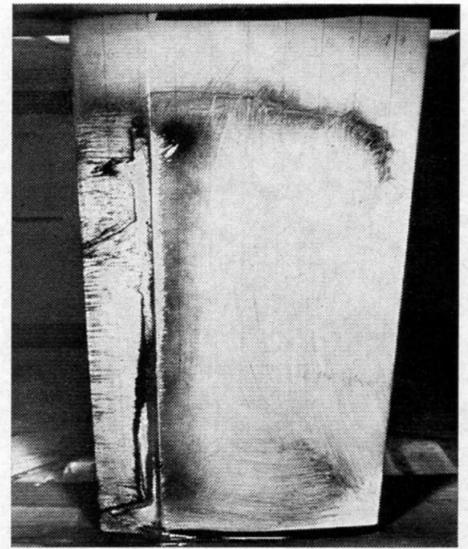


Abb. 12
Petroleum-Russ-Anstrich an einem Höhenleitwerk:
Oberseite, $\alpha = -5^\circ$, $\beta = +5^\circ$, $Re \sim 0,7 \cdot 10^6$.
(Strömungsrichtung von rechts nach links).

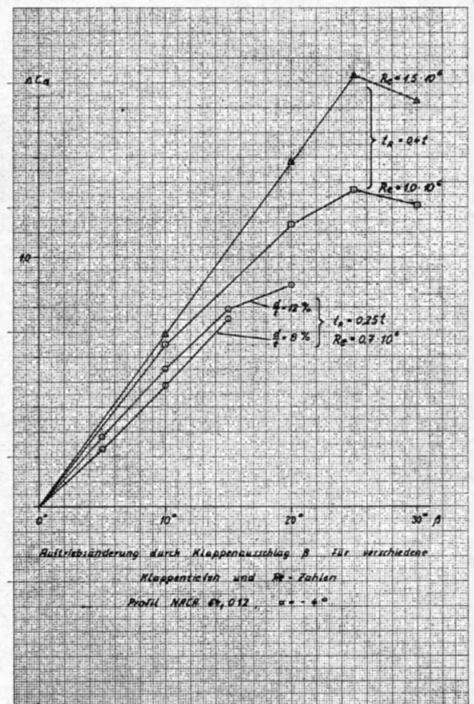
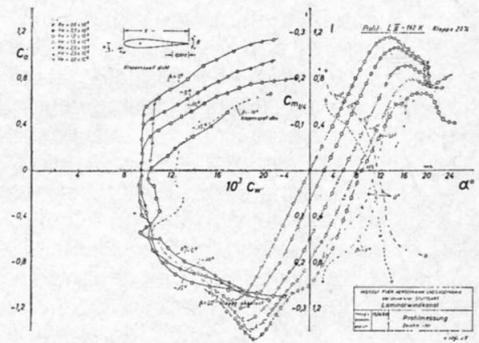


Diagramm 13

Diagramm 14



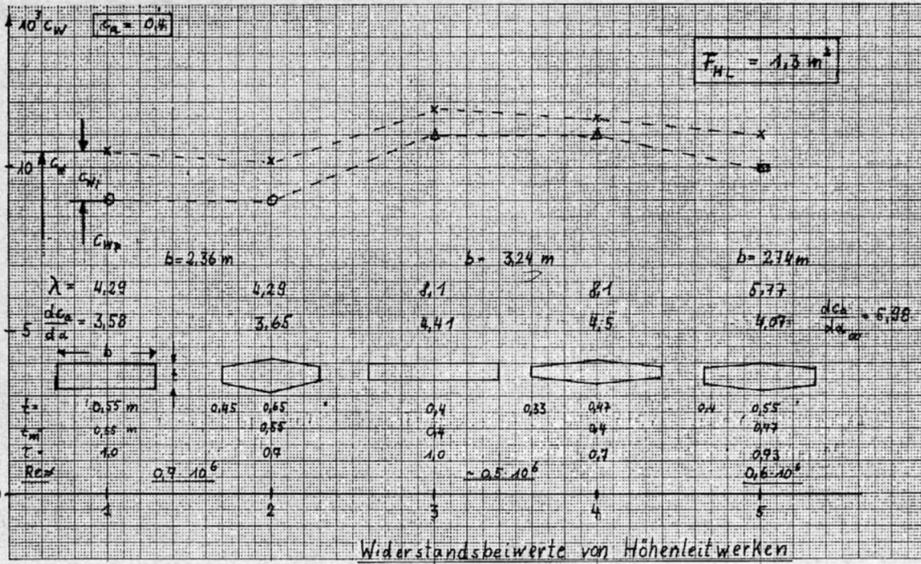
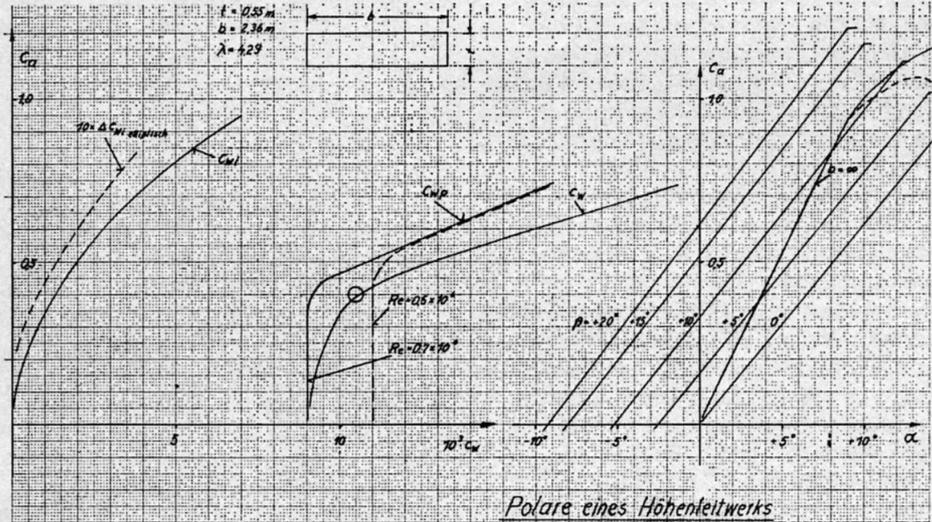


Diagramm 15

Diagramm 16



Momentenausgleich erforderliche Mass reduziert werden muss.

Da auch die Klappenwirkung bei grösseren Re-Zahlen besser ist, empfiehlt es sich, Leitwerke mit grosser Profiltiefe und kleiner Streckung zu bauen (vgl. Leitwerk 1). Eine Zuspitzung hat mehr optische als aerodynamische Vorteile. Die Profildicke sollte mindestens 12 Prozent betragen und darf keinesfalls geometrisch ähnlich verringert werden. Leitwerke mit kleiner Streckung und dickem Profil besitzen wahrscheinlich auch ein geringeres Bau-gewicht.

Solange sich der Dellenwiderstand eines Klappenprofils durch Klappen-ausschlag nicht erhöht, bringt ein Pendelruder aerodynamisch keinen Vorteil. Der Ausschlag eines Pendelruders im Bereich $c_{aH} \sim \pm 0,2$ be-trägt $\alpha_H \pm 3^\circ$. Um einen vernünftigen Massenausgleich zu erhalten, werden Pendelleitwerke oft stark gefeilt und zugespitzt. Diese starke Pfeilung dürfte sich bei kleinen Re-Zahlen nicht gün-stig auf die Grenzschicht auswirken, sie kann zu frühzeitiger Ablösung der Grenzschicht im Aussenteil führen. Bei Leitwerken mit Klappe sollte auf jeden Fall der Klappenspalt abgedich-tet werden.

Weitere Windkanalmessungen an Pro-filen mit Klappen sowie alle anderen Messungen, die bis jetzt im Laminar-windkanal des Instituts für Aerodyn-amik und Gasdynamik der Universität Stuttgart durchgeführt wurden, werden zurzeit zu einem Katalog zusammen-gefasst.

- 1 F. X. Wortmann und D. Althaus: Der Laminarwindkanal des Instituts für Aero- und Gasdynamik der Technischen Hochschule Stuttgart. - Zeitschrift für Flugwissenschaften 12: S. 129-134 (1964).
- 2 D. Althaus und M. Strunz: Eine Methode zur Bestimmung des Grenzschichtumschlags. - Zeitschrift für Flugwissenschaften 15: S. 197-202 (1967).