

Zur Optimierung von Klappenprofilen

Von Prof. Dr. Ing. F. X. Wortmann¹

Vorgetragen am XI. OSTIV-Kongress in Leszno, Polen, im Juni 1968

1. Einleitung

Das traditionelle Mittel zur Auftriebsänderung eines Flügels bei gleichbleibender Anstellung sind Klappen an der Flügelhinterkante. Sie vergrössern oder verkleinern die Wölbung und damit den Auftrieb eines Flügels. Man benutzt sie deshalb zur Steuerung eines Flugzeuges und zur Vergrösserung seiner Geschwindigkeitspanne. Auch bei anderen Anwendungen ist man sehr daran interessiert, die mit einem Klappen ausschlag verbundene Widerstandszunahme möglichst klein zu halten. Besonders wichtig ist dies für Segelflugzeuge und wegen der dabei auftretenden mässigen Reynoldszahlen besonders schwierig zu erfüllen. Profile, die diesem Verwendungszweck entgegenkommen, sind vom Verfasser vor einiger Zeit publiziert worden (1). Sie besitzen jedoch einige Nachteile:

Einerseits sind die Profildicken besonders im Klappenbereich oft zu gering, andererseits nimmt die zu einem bestimmten Klappen ausschlag gehörende Einzelpolare eine typische Dellenform an, deren Breite mit wachsendem Klappen ausschlag und abnehmender Reynoldszahl mehr und mehr zusammenschrumpft. Schliesslich gibt es bei einem Klappenwinkel von etwa $15-20^\circ$ nur noch einen einzigen Anstellwinkel, bei dem ein geringer Widerstand möglich ist. Zwar kann die Hüllkurve der Einzelpolaren noch immer einen vergleichsweise günstigen Verlauf zeigen, aber es liegt auf der Hand, dass man die optimalen Werte der Windkanalmessungen in der Praxis um so weniger ausnutzen kann, je schmäler die «Dellenbreite» der Einzelpolaren wird.

Wünschenswert wären deshalb Klappenprofile, deren Einzelpolaren auch bei ausgeschlagener Klappe möglichst breit bleiben. Damit wird nicht nur die Hüllpolare verbreitert, sondern vor allem sichergestellt, dass sie auch im Flug realisiert werden kann.

2. Grenzschichtentwicklung am Klappenprofil

Bevor man daran denkt, bessere Profile zu entwerfen, muss man sich über die Ursachen der bislang beobachteten Nach-

teile klar werden. Dazu genügt es, bei festgehaltenem Anstellwinkel die zum Klappen ausschlag entgegengesetzte Profilseite zu betrachten, weil sich hier an der Profalnase und am Klappenknick zwei charakteristische Geschwindigkeitsspitzen ausbilden. Bei mässigen Reynoldszahlen in der Grössenordnung von einer Million zeigt die Profilgrenzschicht hinsichtlich dieser Geschwindigkeitsverteilung folgende Eigenschaften:

1. Die erste Geschwindigkeitsspitze erzeugt i. a. bereits an der Profalnase eine turbulente Grenzschicht, die sich stromab der zweiten Geschwindigkeitsspitze früher oder später ablöst und einen entsprechend grossen Widerstand hervorruft.
2. Durch Anstellwinkelverkleinerung kann die Geschwindigkeitsspitze an der Nase reduziert oder auch gänzlich vermieden werden. Der Umschlag kann zurückwandern, und optimale Bedingungen werden erreicht, wenn die laminare Grenzschicht kurz vor oder am Klappenknick turbulent wird. Die «junge» turbulente Grenzschicht kann den steigenden Druckanstieg zwischen Klappenknick und Hinterkante ohne Ablösung überwinden, und das Profil erreicht nun einen minimalen Widerstand.
3. Bei weiterer Anstellwinkelverminderung wird sich jedoch die laminare Grenzschicht am Klappenknick ablösen und normalerweise so spät turbulent werden, dass sie sich nicht mehr an die Klappenoberfläche anlegen kann.

Beiderseits eines gewissen optimalen Anstellwinkels droht also Strömungsablösung, und die Gefahr ist um so ausgeprägter, je grösser der Klappenwinkel und je niedriger die Reynoldszahl ist.

3. Optimierung von Klappenprofilen

Die unter 1. erwähnte Ablösung der turbulenten Grenzschicht am Klappenknick lässt sich hinauszögern, wenn man die Geschwindigkeitsspitze an der Nase nicht nur durch An-

¹ Institut für Aerodynamik und Gasdynamik der Universität Stuttgart.

stellwinkeländerung, sondern durch geeignete Formgebung des Profils abbaut. Die Aufgabe hat eine gewisse Verwandtschaft mit dem Entwurf eines Laminarprofils, bei dem man mittels einer speziellen Formgebung dafür sorgt, dass bei Anstellung keine vorzeitigen Geschwindigkeitsspitzen an der Profilnase auftreten. Bei einer bestimmten Anstellung muss dann die Geschwindigkeitsverteilung gerade konstant werden.

Dasselbe lässt sich auch bei einem Klappenprofil durch einen Iterationsprozess erreichen, wenn man einen Teil der Profilform, nämlich die Klappentiefe und den Klappen ausschlag, fest vorgibt. Von einem Grundprofil ausgehend wird die Geschwindigkeitsverteilung mit ausgeschlagener Klappe zu einer geeigneten Anstellung berechnet und längs einer bestimmten, vom jeweiligen Entwurf abhängigen Länge passend modifiziert. Daraus ergibt sich ein neues Grundprofil, dessen Geschwindigkeitsverteilung bei ausgeschlagener Klappe im Korrekturbereich annähernd die Sollverteilung besitzt. Ein weiterer Iterationsschritt genügt im allgemeinen, um die Geschwindigkeitskonstanz auch im Nasenbereich zu erreichen.

Die Lösung der skizzierten Entwurfsaufgabe durch numerische Rechnungen soll hier als Optimierung bezeichnet werden.

Bei unsymmetrischen Profilen kann man die Optimierung für entgegengesetzte Klappen ausschläge für jede Profilseite gesondert wiederholen. Natürlich ist eine Optimierung nur innerhalb gewisser Grenzen möglich, die hauptsächlich von der Profildicke und dem Klappenwinkel abhängen.

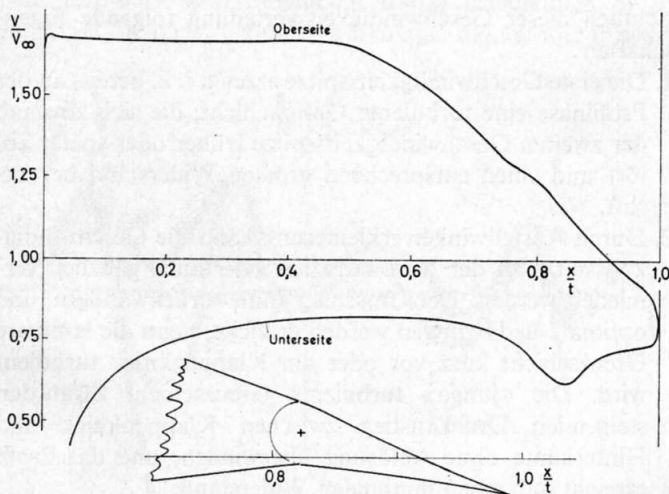


Abb. 1 – Reibungsfreie Geschwindigkeitsverteilung des Profils FX 67-K-170 bei einem Klappen ausschlag von $+10^\circ$, Klappentiefe 17%, $\alpha = 4,2^\circ$; $C_a = 1,69$; $C_{m_{t/4}} = -0,24$

Abbildung 1 und Abbildung 2 zeigen die Geschwindigkeitsverteilungen des Profils FX 67-K-170 nach der Optimierung. Die 17% tiefe Klappe ist um 10° nach unten bzw. nach oben ausgeschlagen. Man erkennt, dass trotz des Klappen ausschlags die Geschwindigkeitsverteilungen jeweils einer Profilseite praktisch konstant sind. Jede weitere Vergrößerung des Klappen ausschlags oder der Anstellung wird den Umschlagspunkt nach vorn ziehen, den Widerstand vergrößern und sekundär Ablösungen an der Klappe hervorrufen. Die Auftriebsändernde Wirkung der Klappe erreicht für die in Abbildung 1 und 2 dargestellten Grenzfälle ihre maximale Wirkung. Die Form des Profils ist in Abbildung 3 wiedergegeben. Verschiedene durchgerechnete Beispiele las-

sen vermuten, dass bei der Optimierung unter den genannten Bedingungen Klappentiefen von 15–30% praktisch gleichwertig sind. Man hat damit die Freiheit, die Klappentiefe auf das Grundprofil abzustimmen, was im folgenden noch kurz erläutert sei.

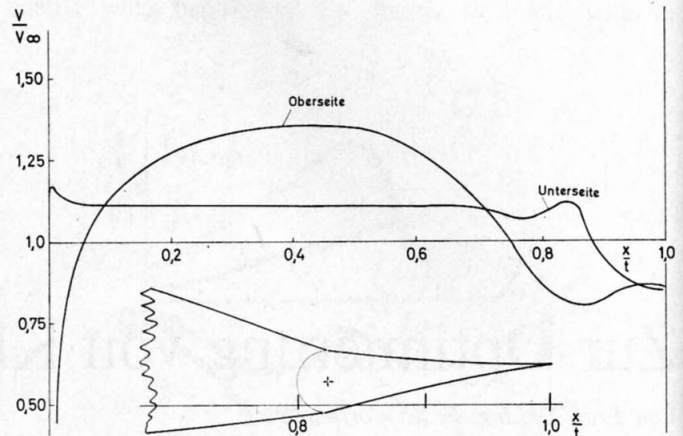


Abb. 2 – Reibungsfreie Geschwindigkeitsverteilung des Profils FX 67-K-170 bei einem Klappen ausschlag von -10° ; $\alpha = 1,3^\circ$; $C_a = 0,149$; $C_{m_{t/4}} = -0,007$

In Abbildung 2 ist die Geschwindigkeitskonstanz der Unterseite nur bis zu 65% der Tiefe gefordert worden. Das anschließende kleine «Tal» in der Geschwindigkeitsverteilung, das aus dem Zusammenwirken von Klappe und Grundprofil resultiert, soll den Umschlag vor dem bei 83% der Tiefe liegenden Klappenknick fixieren. Da beim C_a -Wert von 0,15 aus flugmechanischen Gründen die Reynoldszahl hoch ist, dürfte dazu ein geringer und kurzer Druckanstieg genügen. In diesem Fall ist also die Klappentiefe sorgfältig auf die Geschwindigkeitsverteilung des Grundprofils abgestimmt, um der unter 3. erläuterten Gefahr zu entgehen.

Auf der Profiloberseite besteht eine derartige Abstimmung hinsichtlich der Klappentiefe nicht. Der Umschlag ist bereits durch das Grundprofil ungefähr bei 50% der Tiefe fixiert. Nur im Bereich des Klappenknicks hat die Geschwindigkeitsverteilung des Grundprofils eine konkave Form. Dadurch wird der Knick in der Kontur bei einem Klappen ausschlag nach unten abgerundet und die Geschwindigkeitsspitze abgebaut. Dass nun bei entgegengesetztem Klappen ausschlag der Knick verstärkt wird, macht nicht viel aus, weil ein konkaver Knick in der Kontur immer harmloser ist als ein konvexer und gleichzeitig auch noch mit höheren Reynoldszahlen gekoppelt ist.

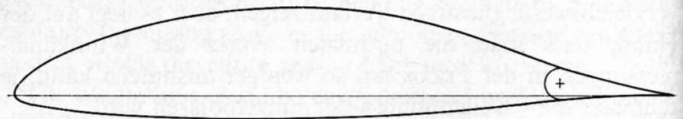


Abb. 3 – Form des 17% dicken Profils FX 67-K-170

Man erkennt also, dass man die Geschwindigkeitsverteilung auch im Bereich des Klappenknicks durch Abstimmung auf das Grundprofil und Berücksichtigung der verschiedenen grossen Reynoldszahlen in gewisser Weise «optimieren» kann. Die Zusammenhänge sind im Bereich der Klappe allerdings so einfach, dass man sie fast «von Hand» in einen Entwurf einbauen kann.

4. Windkanalmessungen

Die Abbildungen 4, 5, 6 und 7 enthalten die Windkanal-ergebnisse der beiden optimierten Klappenprofile FX-67-K-170 und FX-67-K-150¹. Die Koordinaten dieser Profile sind in Abbildung 9 angegeben. Die beiden Profile unterscheiden sich nur durch ihre relative Dicke. Die Klappentiefe ist in beiden Fällen 17%.

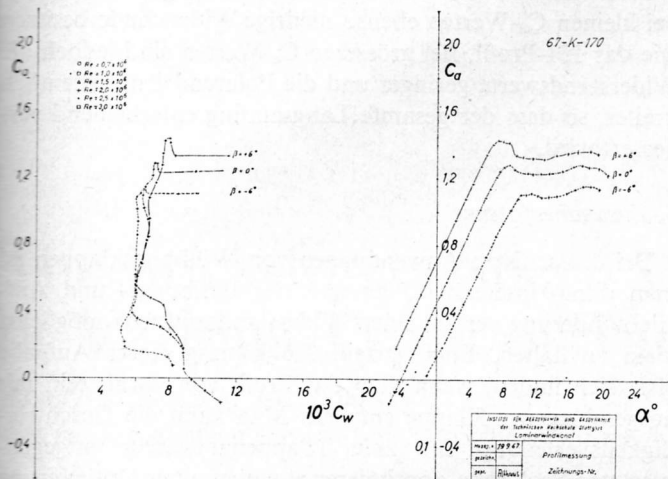


Abb. 4 – Polaren und $C_a(\alpha)$ -Kurven des Profils FX 67-K-170 für drei Klappenwinkel bei einer Reynoldszahl von $2 \cdot 10^6$

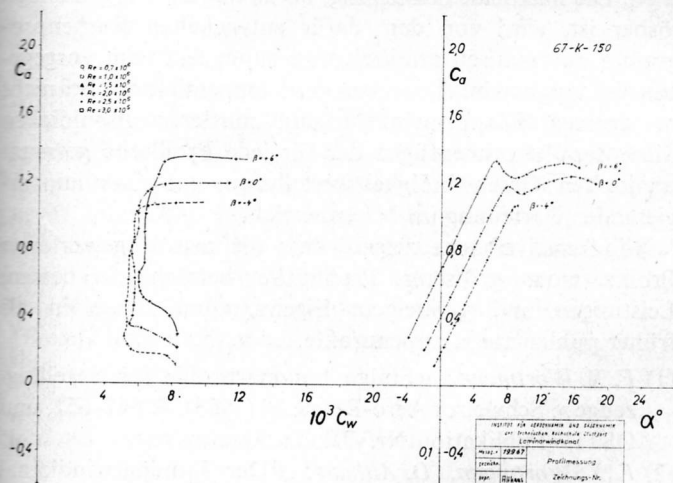


Abb. 5 – Polaren und $C_a(\alpha)$ -Kurven des Profils FX 67-K-150 für drei Klappenwinkel bei einer Reynoldszahl von $2 \cdot 10^6$

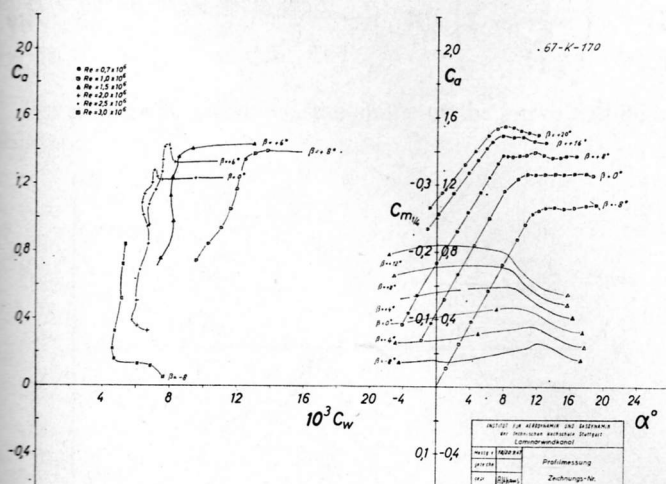


Abb. 6 – Polaren, $C_a(\alpha)$ und $C_m(\alpha)$ -Werte des Profils FX 67-K-170 für verschiedene Re-Zahlen und Klappenwinkel

Abbildung 4 und 5 zeigen, dass die ursprüngliche Breite der Polarendelle durch einen Klappenwinkel von $\pm 6^\circ$ praktisch nicht geändert wird. In Abbildung 6 und 7 sind die unteren

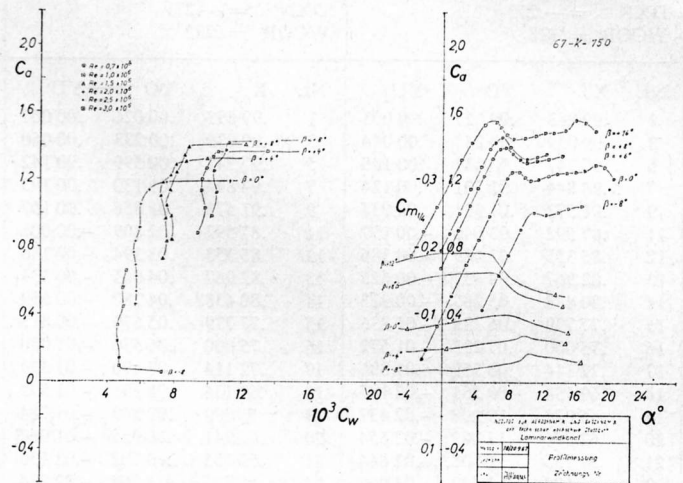


Abb. 7 – Polaren, $C_a(\alpha)$ und $C_m(\alpha)$ -Werte des Profils FX 67-K-150 für verschiedene Re-Zahlen und Klappenwinkel

bzw. oberen Grenzen der Polarendellen für verschiedene Reynoldszahlen dargestellt. Aus dem rechten Teil dieser Abbildungen ersieht man auch, dass die $C_a(\alpha)$ -Kurven jenseits des $C_{a_{max}}$ -Wertes ein recht gutartiges Verhalten besitzen

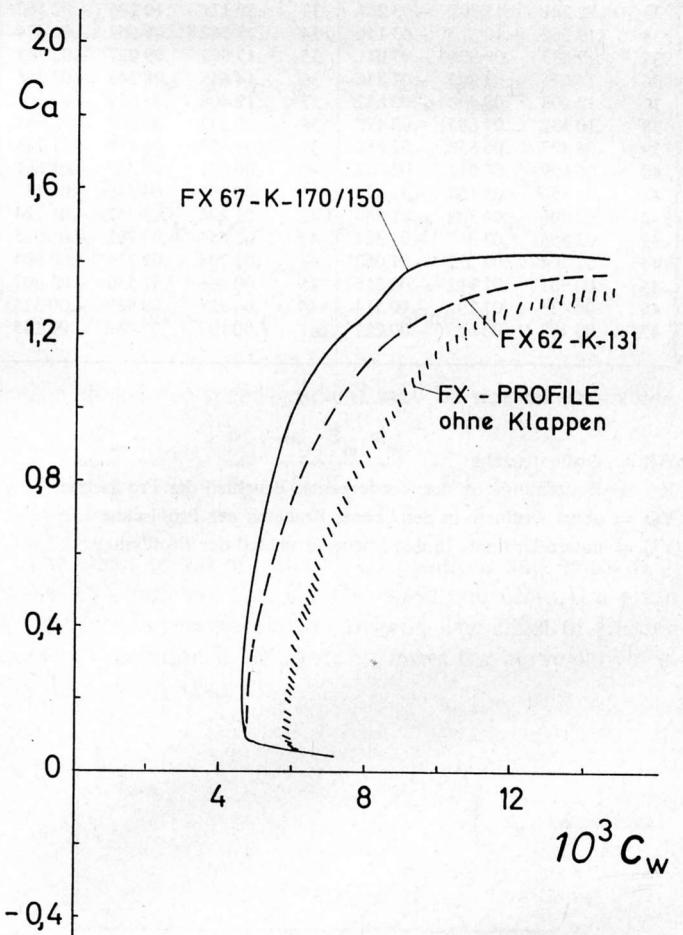


Abb. 8 – Hüllkurven der Profile FX 67-K-170/150 und FX 62-K-131 sowie einer Gruppe von Profilen ohne Klappe (1). Die Hüllkurven enthalten bereits den Einfluss der mit C_a -variablen Reynoldszahl

¹ Die Messungen verdanke ich wieder Herrn Dipl.-Phys. D. Althaus, der sie mit der verbesserten Version einer vollautomatischen Messanlage im Laminarwindkanal unseres Instituts gewonnen hat (2).

Klappenprofil FX 67-K-170				Klappenprofil FX 67-K-150			
RO = .007				RO = .003			
DMAX = .170				DMAX = .150			
DCA = 1.116				DCA = 1.100			
DXN = -.273				DXN = -.271			
WCOR = .328				WCOR = .282			
Nr.	X	YO	YU	Nr.	X	YO	YU
1	.99 983	.00 027	.00 005	1	.99 893	.00 026	.00 007
3	.99 039	.00 243	.00 044	3	.99 039	.00 233	.00 060
5	.97 347	.00 631	.00 105	5	.97 347	.00 599	.00 142
7	.94 844	.01 201	.00 124	7	.94 844	.01 130	.00 193
9	.91 573	.01 991	.00 037	9	.91 573	.01 856	.00 157
11	.87 592	.03 040	-.00 197	11	.87 592	.02 809	-.00 006
12	.85 355	.03 689	-.00 386	12	.85 355	.03 394	-.00 148
13	.82 967	.04 437	-.00 625	13	.82 967	.04 065	-.00 334
14	.80 438	.05 287	-.00 913	14	.80 438	.04 287	-.00 559
15	.77 779	.06 229	-.01 236	15	.77 779	.05 670	-.00 813
16	.75 000	.07 233	-.01 572	16	.75 000	.06 570	-.01 080
17	.72 114	.08 259	-.01 896	17	.72 114	.07 490	-.01 339
18	.69 134	.09 263	-.02 187	18	.69 134	.08 395	-.01 575
19	.66 072	.10 208	-.02 437	19	.66 072	.09 249	-.01 784
20	.62 941	.11 063	-.02 654	20	.62 941	.10 025	-.01 967
21	.59 755	.11 808	-.02 844	21	.59 755	.10 702	-.02 130
22	.56 520	.12 429	-.03 012	22	.56 526	.11 269	-.02 274
23	.53 270	.12 919	-.03 155	23	.53 270	.11 716	-.02 399
24	.50 000	.13 274	-.03 272	24	.50 000	.12 041	-.02 504
25	.46 730	.13 490	-.03 365	25	.46 730	.12 239	-.02 588
26	.43 474	.13 571	-.03 435	26	.43 474	.12 318	-.02 653
27	.40 245	.13 526	-.03 480	27	.40 245	.12 285	-.02 698
28	.37 059	.13 370	-.03 501	28	.37 059	.12 152	-.02 724
29	.33 920	.13 119	-.03 499	29	.33 928	.11 928	-.02 730
30	.30 866	.12 783	-.03 474	30	.30 866	.11 619	-.02 717
31	.27 886	.12 365	-.03 425	31	.27 886	.11 230	-.02 684
32	.25 000	.11 870	-.03 354	32	.25 000	.10 771	-.02 632
33	.22 221	.11 305	-.03 261	33	.22 221	.10 246	-.02 562
34	.19 562	.10 677	-.03 146	34	.19 562	.09 663	-.02 474
35	.17 033	.09 994	-.03 011	35	.17 003	.09 027	-.02 368
36	.14 645	.09 263	-.02 856	36	.14 645	.08 348	-.02 246
37	.12 408	.08 490	-.02 682	37	.12 408	.07 629	-.02 107
38	.10 332	.07 685	-.02 490	38	.10 332	.06 882	-.01 995
39	.08 427	.06 856	-.02 282	39	.08 427	.06 110	-.01 788
40	.06 699	.06 011	-.02 062	40	.06 699	.05 327	-.01 661
41	.05 156	.05 158	-.01 827	41	.05 156	.04 536	-.01 422
42	.03 806	.04 309	-.01 580	42	.03 806	.03 752	-.01 224
43	.02 656	.03 487	-.01 321	43	.02 653	.02 992	-.01 015
44	.01 704	.02 722	-.01 057	44	.01 704	.02 284	-.00 804
45	.00 961	.01 912	-.00 815	45	.00 961	.01 556	-.00 607
46	.00 428	.01 292	-.00 514	46	.00 428	.00 989	-.00 375
47	.00 107	.00 653	-.00 217	47	.00 107	.00 462	-.00 145

Abb. 9 – Koordinaten

NR = Ordinatenzahl

X = Entfernung von der Vorderkante, Bruchteil der Profilsehne

YO = obere Ordinate in der Ebene, Bruchteil der Profilsehne

YU = untere Ordinate in der Ebene, Bruchteil der Profilsehne

und der C_m -Wert zum Beispiel für die nicht ausgeschlagene Klappe deutlich niedriger liegt als bei den in (1) publizierten Klappenprofilen. Die Koordinaten der neuen Profile 170 und 150 sowie eines Zwischenprofils von 16% relativer Profildicke sind in der Tabelle angegeben.

Abbildung 8 zeigt den Vergleich der Hüllkurven der neuen Profile mit dem älteren Profil FX-62-K-131 und einer Gruppe von Profilen ohne Klappen (1).

Man erkennt, dass die neuen Profile trotz grösserer Dicke bei kleinen C_a -Werten ebenso niedrige Widerstände besitzen wie das 131-Profil. Bei grösseren C_a -Werten sind jedoch die Widerstandswerte geringer und die Polarendellen wesentlich breiter, so dass der gesamte Langsamflug entscheidend verbessert wird.

5. Zusammenfassung

Bei den meisten Anwendungen von Wölbungsclappen ist man daran interessiert, den mit der Wölbungs- und Auftriebsänderung verbundenen Widerstandszuwachs möglichst klein zu halten. Eine vorteilhafte Lösung dieser Aufgabe lässt sich finden, wenn man das Profil von vornherein mit ausgeschlagener Klappe entwirft. Man kann die Geschwindigkeitsverteilung der zum Klappenausschlag entgegengesetzten Profilseite «optimieren», wobei unter Optimierung einfach die Beseitigung der Geschwindigkeitsspitzen im kritischen Nasenbereich und am Klappenknick verstanden wird. Die maximale Anstellung, bis zu der die Aufgabe noch lösbar ist, wird von dem dafür entwickelten Rechenprogramm automatisch ermittelt und hängt fest vom vorgegebenen Klappenwinkel und von der Klappentiefe ab. Bei nicht zu grossen Klappenwinkeln und mittleren Profildicken führt das Zusammenfügen der für jede Profilseite getrennt ermittelten Geschwindigkeitsverteilungen zu einer konvergierenden Verteilung im Nasenbereich.

Windkanalversuche zeigen, dass die neu entworfenen Profile trotz grösserer Profildicke beträchtlich bessere Leistungen und gutartigere Eigenschaften aufweisen als früher publizierte Klappenprofile.

- (1) F. X. Wortmann: «Einige Laminarprofile für Segelflugzeuge», Schweizer Aero-Revue 38 (1963), S. 647–651, und OSTIV-Publikation Nr. VII.
- (2) F. X. Wortmann, D. Althaus: «Der Laminarwindkanal des Instituts für Aero- und Gasdynamik der TH Stuttgart», Zeitschrift für Flugwissenschaft 12 (1964), S. 129–134.

Schweizer Aero-Revue 2/1969