

EX 76 - GA - 20 / 170 / 30

ZUM ENTWURF EINES TRAGFLÜGELPROFILS MIT SPALTKLAPPE

F.X. Wortmann  
Professor  
Institut für Aerodynamik und Gasdynamik  
Universität Stuttgart

EINLEITUNG

Bei Flugzeugen, die dem Bereich der allgemeinen Luftfahrt zugeordnet werden, begnügt man sich oft damit, zur Auftriebssteigerung eine einzelne Klappe vorzusehen.

Es soll in dieser Arbeit gezeigt werden, daß das System Grundprofil und Klappe bislang ungenutzte Möglichkeiten für recht fühlbare Verbesserungen bietet, wenn man im Gegensatz zur üblichen Praxis das Vorhandensein einer Klappe schon beim Entwurf des Profils berücksichtigt.

KONZEPT

Ein Tragflügelprofil besitzt für bestimmte Auftriebs- oder Anstellwinkelbereiche ein mehr oder minder ausgeprägtes Widerstandsminimum. Fällt dieses Minimum z.B. in den Bereich des Reiseflugs, ist man daran interessiert, den Auftrieb für Start und Landung durch eine Klappe, d.h. durch eine variable Wölbung zu steigern.

Üblicherweise werden jedoch die Möglichkeiten der variablen Wölbung nur einseitig genutzt; wesentlich attraktiver ist es, die Klappe sowohl zur Auftriebssteigerung als auch zur Auftriebsminderung heranzuziehen, weil der mit einem Klappenausschlag

verbundene Zusatzwiderstand bei kleinen Winkeln von 10 bis 15° praktisch vernachlässigbar ist.

Man kann dann das Grundprofil stärker wölben, was natürlich dem Langsamflug zugute kommt und trotzdem im Reise- oder Schnellflug dank der negativ ausgeschlagenen Klappe mit kleinem Widerstand und kleinem Nickmoment fliegen. Entwurfstechnische Details dieses Grundgedankens, der sich im Segelflugzeugbau bewährt hat, sind in (2) und (3) erläutert worden und werden hier auf den Fall mit Landeklappe übertragen. Für die dabei notwendige Teilaufgabe, Profilformen aus vorgelegten Geschwindigkeitsverteilungen zu berechnen, wird die von E.Truckenbrodt entwickelte Methode (1) wegen ihrer Einfachheit und Flexibilität bevorzugt.

### ENTWURFSZIELE

Die Auslegung eines Profilsystems ist nicht allein von aerodynamischen Überlegungen abhängig, sondern steht in enger Wechselwirkung mit strukturellen Erfordernissen. Es ist deshalb unmöglich, eine für alle Fälle passende und optimale Lösung anzugeben. Der hier beschriebene Entwurf kann deshalb nur das Grundsätzliche herausstellen.

Dabei werden folgende Ziele als wünschenswert angesehen:

- 1) Bei Reynoldszahlen von etwa  $5 \cdot 10^6$  sollte der Maximalauftrieb des Profils bei eingefahrener Klappe Werte von etwa 2 und bei ausgefahrener Klappe Werte von etwa 3,5 erreichen.
- 2) Das Überziehverhalten soll in beiden Fällen gutartig sein.
- 3) Der Widerstand soll im Reiseflug gering bleiben. Im Steigflug sollen die Gleitzahlen deutlich über 100 liegen.
- 4) Auch bei ausgefahrener Klappe soll der Widerstand mäßig bleiben, um die Durchstartfähigkeit des Flugzeugs nicht zu beeinträchtigen.
- 5) Das Nickmoment bezüglich der t/4-Achse soll im Reiseflug unter 0,1 bleiben.

Zusätzlich werden folgende Annahmen gemacht:

- 1) Die Oberfläche des Profils kann im Nasenbereich bis zu 20% der Tiefe glatt gebaut und unterhalten werden.
- 2) Die maximale Machzahl bleibt unter 0.68 und die maximale Rey-

noldszahl unter  $3 \cdot 10^7$ .

- 3) Die Klappe wird durch Rotation um einen unterhalb der Klappe liegenden Drehpunkt ausgefahren und angestellt.

### GRENZSCHICHTSTEUERUNG

Die Lage des Umschlags hat auf alle Profileigenschaften einen primären Einfluß. Diese Tatsache wird jedoch oft genug verdrängt mit dem Hinweis, daß die Anforderungen an die Oberflächenqualität bei  $Re > 10^7$  zu hoch seien und eine Laminarhaltung der Grenzschicht damit "unpraktisch" wäre. Ein anderes oft vorgebrachtes Argument lautet: Ein für die Laminarhaltung geeignetes Profil hat schlechtere Hochauftriebseigenschaften als ein konventionelles Profil.

Beide Argumente sind jedoch in dieser verallgemeinernden Weise nicht haltbar. Zumindest im Bereich der Nase eines Profils kann man die Chance einer teilweisen Laminarhaltung ohne irgendeine Einbuße nutzen. Im Gegenteil: in den ersten fünf Prozent der Oberseite des Profils muß man die Chance nutzen, will man nicht sehr drastische Verluste an Maximalauftrieb in Kauf nehmen.

Wird die Umschlagsposition durch eine konstruktionsbedingte Rauigkeit, z.B. einen Blechstoß, fixiert, kann man den Widerstand praktisch nur noch durch abnehmende Profildicke vermindern. Dieser Spielraum ist jedoch gering: das hier vorgelegte Profil mit 17% Dicke hat bei einer Umschlagsposition von 20% einen geringeren Widerstand als ein vollturbulentes Profil mit 10% Dicke.

Die Druckverteilung des hier beschriebenen Entwurfs bei eingefahrener Klappe ist in Abb.1 für den Auftriebswert  $c_a = 0,5$  dargestellt. Die entsprechende Profilform ist in Abb.2, oben, dargestellt und ist gegenüber einem früher vorgelegten Entwurf (6) modifiziert. Die Koordinaten des Grundprofils und der Klappe sind in Tab.1 angegeben.

Die starken Geschwindigkeitsgradienten bis zu etwa 20% der Tiefe stabilisieren die Grenzschicht genügend, sodaß sie bei glatter Oberfläche mit Sicherheit laminar bleibt, selbst wenn die Reynoldszahl an  $3 \cdot 10^7$  herangeht.

Wird andererseits die Grenzschicht durch Rauigkeiten bereits an der Nase turbulent, ist der Profilwiderstand nicht größer als bei anderen gleich dicken Profilen mit gleicher Umschlagslage. Es ist

also lediglich eine Frage der Sorgfalt, ob man beim Hersteller oder Nutzer die gegenüber einem vollturbulenten Profil mögliche Widerstandersparnis nutzt oder nicht.

Es sei ausdrücklich betont, daß die hier getroffene Annahme eines Umschlags bei 20% der Tiefe willkürlich ist. Bei Bauweisen, die eine glatte Oberfläche sichern und bei nicht zu hohen Reynoldszahlen ist der vorgelegte Entwurf hinsichtlich seines Widerstands nicht optimal.

Die Bedeutung einer teilweisen Laminarhaltung ist beim Maximalauftrieb noch drastischer: wird der Umschlag, der bei hohen Anstellwinkeln bei 5 bis 7% der Profiltiefe liegt, z.B. durch Rauigkeiten bis zur Vorderkante vorgezogen, vermindert sich der Maximalauftrieb normalerweise um mehr als 30%. (Messungen, die mit einem einzelnen schmalen Rauigkeitsstreifen bei 8% der Tiefe durchgeführt werden, zeigen das natürlich nicht, weil der Umschlag auch bei völlig glatter Fläche in diesem Bereich liegt.)

#### AUFTRIEB

Da bei festgelegter Umschlagslage und Profildicke der Widerstand eines Profils für den Reise- und Steigflug praktisch fixiert ist, möchte man den Maximalauftrieb möglichst groß machen. Eine wichtige Möglichkeit dazu besteht darin, den Umschlag bei großen Anstellwinkeln so zu steuern, daß keine ausgeprägten dicken Ablöseblasen der turbulenten Grenzschicht vorangehen.

Man muß sich also darum bemühen, sowohl die Saugspitzen an der Nase als auch die nachfolgenden Druckgradienten über einen kurzen Bereich, d.h. bis etwa 5% der Tiefe so abzumildern, daß die laminare Grenzschicht ohne große Ablösungen turbulent werden kann. Sowohl die Druckverteilungen als auch die Verteilung der Krümmungsradien zeigen dann auf der Oberseite keinen monotonen Verlauf, sondern bilden, wie in Abb.3 gezeigt ist, bei 3 bis 6% einen kleinen Höcker. Die Wirksamkeit dieser an sich alten Idee hat der Verfasser in <sup>(4)</sup> demonstriert.

#### ÜBERZIEHVERHALTEN

Die Druckverteilungen in Abb.1 besitzen auf der Oberseite bei 70% der Tiefe eine ausgeprägte Knickstelle. Bei höheren Anstellwinkeln wird die Ablösung der turbulenten Grenzschicht im Be-

reich des steilen Druckgradienten vor der Hinterkante verhältnismäßig schnell nach vorn wandern, bis die 70%-Position erreicht wird. Bei noch größerer Anstellung bleibt jedoch die Ablösestelle relativ unverändert. Der Ablösewinkel, der das Totwasser zwischen Strömung und Profiloberfläche eingrenzt, wächst jedoch weiter an und wirkt wie eine negativ nach oben ausschlagende Klappe. (5). Die "flüssige" Klappe ändert ihrerseits die Druckverteilung an der Nase derart, daß der Verteilungstyp auch bei steigender Anstellung im großen und ganzen unverändert bleibt. Die Wechselwirkung des in der Tiefenausdehnung begrenzten Ablösegebietes mit der Druckverteilung an der Nase sorgt erfahrungsgemäß für ein gutmütiges Verhalten beim Überziehen des Profils.

#### KLAPPENSYSTEM

Legt man den Drehpunkt der Klappe etwa eine Klappentiefe unterhalb der Klappe, kann man mit dem Klappenausschlag auch eine fühlbare Flächenvergrößerung verbinden. Erforderlich sind allerdings besondere Lagerarme, die die Luftkräfte der Klappe auf den Hauptflügel übertragen. Trotz der damit verbundenen Zusatzwiderstände wird diese kinematisch einfache Lösung neuerdings bei einigen Flugzeugen bevorzugt.

Wenn man für den Steigflug gute Gleit- und Steigzahlen anstrebt, besteht die beste Lösung darin, den Bereich geringen Widerstands, der beim Grundprofil etwa im Bereich  $0,3 \leq c_a \leq 0,8$  liegt, mit Hilfe der Klappe auf  $c_a \approx 1,2$  zu schieben. Dabei sollte allerdings kein Schlitz und keine Stufe zwischen Grundprofil und Klappe entstehen (vgl. Abb.2, Mitte). Mit anderen Worten: die Profilform der Klappe muß, soweit sie unter das Hauptprofil reicht, für Schwenkwinkel von 10 bis 15° kreisbogenförmig sein. Die damit festgelegte Druckverteilung bei voll ausgefahrener Klappe hat einen ungünstigen Verlauf, was aber im Hinblick auf die simple Kinematik und wegen der guten Gleitzahlen im Steigflug in Kauf genommen wird. Die kinematische Forderung einer an der Klappenoberseite entlangleitenden Profilzunge legt in gewissem Umfang auch die maximale Dicke und Tiefe der Klappe oder den Keilwinkel der Zunge am Hauptprofil fest. Da die Form der Klappenunterseite bereits durch das Grundprofil vorgegeben ist,

bleibt im wesentlichen nur noch die Form der Klappennase offen. Die Klappentiefe wurde hier mit 30% der Tiefe des Grundprofils gewählt.

Eine geometrische Bedingung für die Klappennase besteht darin, daß bei vollem Klappenausschlag ein Spalt von etwa 1% der Profiltiefe entstehen soll, durch den die Unterseitengrenzschicht des Grundprofils abströmen kann. Die Klappe bekommt dadurch eine stark heruntergezogene Nase, was wiederum die Geschwindigkeitsspitzen auf der Klappenoberseite herabsetzt. Der Klappenwinkel und die Spaltgeometrie sind bei dieser einfachen Kinematik gekoppelt.

Da die Reynoldszahl der Klappe wesentlich niedriger ist als beim Grundprofil, gewinnt auch hier die Frage der Umschlagssteuerung an der Klappe erhöhte Bedeutung. Die Wechselwirkung zwischen Klappenposition und Umschlag ist wohl noch nicht untersucht worden. Eine große Spalthöhe vermindert zweifellos den Einfluß, den die turbulente Grenzschicht der Unterseite des Grundprofils auf den Umschlag der Klappenoberseite haben kann. Andererseits vergrößert eine zunehmende Spalthöhe die Geschwindigkeitsspitzen auf der Klappennase und zieht auf diese Weise Umschlag und Ablösung nach vorn.

Ohne sorgfältige experimentelle Messungen unter realistischen Bedingungen muß das Optimum der Spalthöhe zunächst offen bleiben. Bei allen diesen Überlegungen ist natürlich vorausgesetzt, daß die Grenzschicht auf der Unterseite des Hauptprofils sich nicht ablöst. Beim vorliegenden Entwurf ist dies durch eine mäßige Profildicke bei 65% der Tiefe und eine sanfte Ausrundung der Kontur an dieser Stelle sichergestellt.

Die in Abb.2 dargestellte Klappe erreicht ihre optimale Position bei einem Winkelausschlag von etwa  $40^{\circ}$ . Dies dürfte gleichzeitig die Grenze sein, bei der die Klappenströmung noch anliegend gehalten werden kann, sodaß ein Durchstarten mit eingeschränkter Motorleistung noch möglich ist. Wird die Klappe noch weiter ausgefahren, muß der Widerstand sehr schnell ansteigen. Ob diese Möglichkeit für den Landevorgang genützt werden kann, bleibt abzuwarten.

Naturgemäß ist die in Abb.2, unten, dargestellte Geometrie für den Hochauftrieb günstig. Es ist aber offen, ob die mit der

sanften Ausrundung der Unterseite des Hauptprofils in Abb.2, oben; verbundene Widerstandserhöhung im Schnellflug tragbar ist. Es ist sehr wahrscheinlich, daß kein wirklich akzeptabler Kompromiß existiert, bei dem die Art der Ausrundung weder auf den Widerstand noch auf den Maximalauftrieb drastisch einwirkt. Eine weitere, aber aufwendigere Möglichkeit besteht darin, der Flügelschale die Form der Hochauftriebskontur zu geben und im fraglichen Bereich der Unterseite ein zusätzliches elastisches Hautstück durch Stoßstangen mit der Klappendrehung zu koppeln. Dieses Hautstück würde dann für eine glatte Kontur in den beiden Extremlagen der Klappe sorgen.

#### ZUSAMMENFASSUNG

Es werden einige Entwurfsüberlegungen für ein Profil mit einer ausfahrbaren Schlitzklappe dargestellt und an Hand eines Entwurfsbeispiels erläutert. Charakteristisch für diesen Entwurf ist die große Wölbung des Grundprofils, die für den Schnellflug durch einen negativen Klappenausschlag teilweise kompensiert wird, um den Widerstand und das Nickmoment für den Schnellflug klein zu halten. Weitere Überlegungen beziehen sich auf die Grenzschichtsteuerung an der Profilnase und Klappe, um hohe Auftriebe und ein gutmütiges Überziehverhalten beim Grund- und Klappenprofil zu erzielen. Windkanalversuche mit dem gezeigten Entwurfsbeispiel sind in Vorbereitung.

#### LITERATUR

- (1) Truckenbrodt, E., Ing.-Archiv, 19, 365, (1951).
- (2) Wortmann, F.X., OSTIV-Kongreß 1972, Schweizer Aero-Revue 48, 147, (1973) und OSTIV-Publication XI.
- (3) Wortmann, F.X., OSTIV-Kongreß 1968, Schweizer Aero-Revue 44, 89, (1969) und OSTIV-Publication IX.
- (4) Wortmann, F.X., AGARD CP-102, (1972).
- (5) Jungclaus, G., ZfW 5, 172, (1957).
- (6) Wortmann, F.X., Short Course on "Optimum Design of Airfoils" University of Texas in Arlington, 5.-7.April 1976.

## Grundprofil

	x	y <sub>o</sub>	y <sub>u</sub>	NR	X/T	Y <sub>0</sub> /T	Y <sub>U</sub> /T
				1	1.00000	0.00000	0.00000
				2	0.99893	0.00079	0.00011
				3	0.99572	0.00121	-0.00067
				4	0.99039	0.00174	-0.00151
				5	0.98296	0.00259	-0.00197
				6	0.97347	0.00376	-0.00307
				7	0.96194	0.00516	-0.00386
				8	0.94844	0.00696	-0.00527
				9	0.93301	0.00892	-0.00634
				10	0.91573	0.01124	-0.00800
				11	0.89668	0.01367	-0.00929
				12	0.87592	0.01641	-0.01107
				13	0.85355	0.01920	-0.01237
				14	0.82967	0.02226	-0.01403
				15	0.80438	0.02538	-0.01517
				16	0.77779	0.02880	-0.01663
				17	0.75000	0.03247	-0.01755
				18	0.72114	0.03674	-0.01870
				19	0.69134	0.04163	-0.01920
				20	0.66072	0.04774	-0.01999
				21	0.62941	0.05514	-0.02013
				22	0.59755	0.06377	-0.02049
				23	0.56526	0.07263	-0.02009
				24	0.53270	0.08111	-0.01993
				25	0.50000	0.08837	-0.01906
				26	0.46730	0.09478	-0.01866
				27	0.43474	0.09989	-0.01759
				28	0.40245	0.10413	-0.01709
				29	0.37059	0.10698	-0.01603
				30	0.33928	0.10904	-0.01570
				31	0.30866	0.10969	-0.01477
				32	0.27886	0.10982	-0.01470
				33	0.25000	0.10846	-0.01401
				34	0.22221	0.10645	-0.01412
				35	0.19562	0.10314	-0.01363
				36	0.17033	0.09925	-0.01394
				37	0.14645	0.09413	-0.01361
				38	0.12408	0.08857	-0.01404
				39	0.10332	0.08182	-0.01379
				40	0.08427	0.07469	-0.01432
				41	0.06699	0.06628	-0.01411
				42	0.05156	0.05759	-0.01460
				43	0.03806	0.04826	-0.01424
				44	0.02653	0.03950	-0.01452
				45	0.01704	0.03059	-0.01363
				46	0.00961	0.02301	-0.01280
				47	0.00428	0.01559	-0.00937
				48	0.00107	0.00930	-0.00618
				49	0.00000	0.00000	0.00000
6	.901	.0330	.0330				
7	.899	.0340	.0333				
8	.896	.0335	.0343				
9	.889	.0375	.0360				
10	.881	.0400	.0375				
11	.870	.0432	.0397				
12	.855	.0480	.0415				
13	.838	.0535	.0430				
14	.820	.0590	.0440				
15	.798	.0657	.0436				
16	.775	.0730	.0415				
17	.751	.0808	.0380				
18	.724	.0885	.0315				
19	.691	.0989	.0201				
20	.660	.1064	.0100				
21	.629	.1133	.0015				
22	.597	.1192	-.0045				
23	.565	.1243	-.0084				
24	.53270	.12862	-.01233				
25	.50000	.13234	-.01555				
26	.46730	.13496	-.01873				
27	.43474	.13678	-.02220				
28	.40245	.13755	-.02561				
29	.37059	.13749	-.02916				
30	.33928	.13641	-.03254				
31	.30866	.13448	-.03587				
32	.27886	.13156	-.03886				
33	.25000	.12785	-.04160				
34	.22221	.12316	-.04373				
35	.19562	.11785	-.04513				
36	.17033	.11175	-.04492				
37	.14645	.10507	-.04407				
38	.12408	.09781	-.04263				
39	.10332	.08996	-.04061				
40	.08427	.08179	-.03827				
41	.06699	.07306	-.03538				
42	.05156	.06406	-.03238				
43	.03806	.05439	-.02877				
44	.02653	.04498	-.02527				
45	.01704	.03519	-.02119				
46	.00961	.02630	-.01744				
47	.00428	.01770	-.01251				
48	.00107	.01032	-.00773				

DICKE/T... = 0.125 RUECKLAGE/T = 0.339  
 WOELBUNG/T = 0.048 RUECKLAGE/T = 0.279  
 PROFILTIEFE... = T

Tabelle 1. Profilkordinaten von Grund- und Klappenprofil FX 76-GA-20/170/30  
 Tiefe = 1.0

FX 76-GA-20/170/30

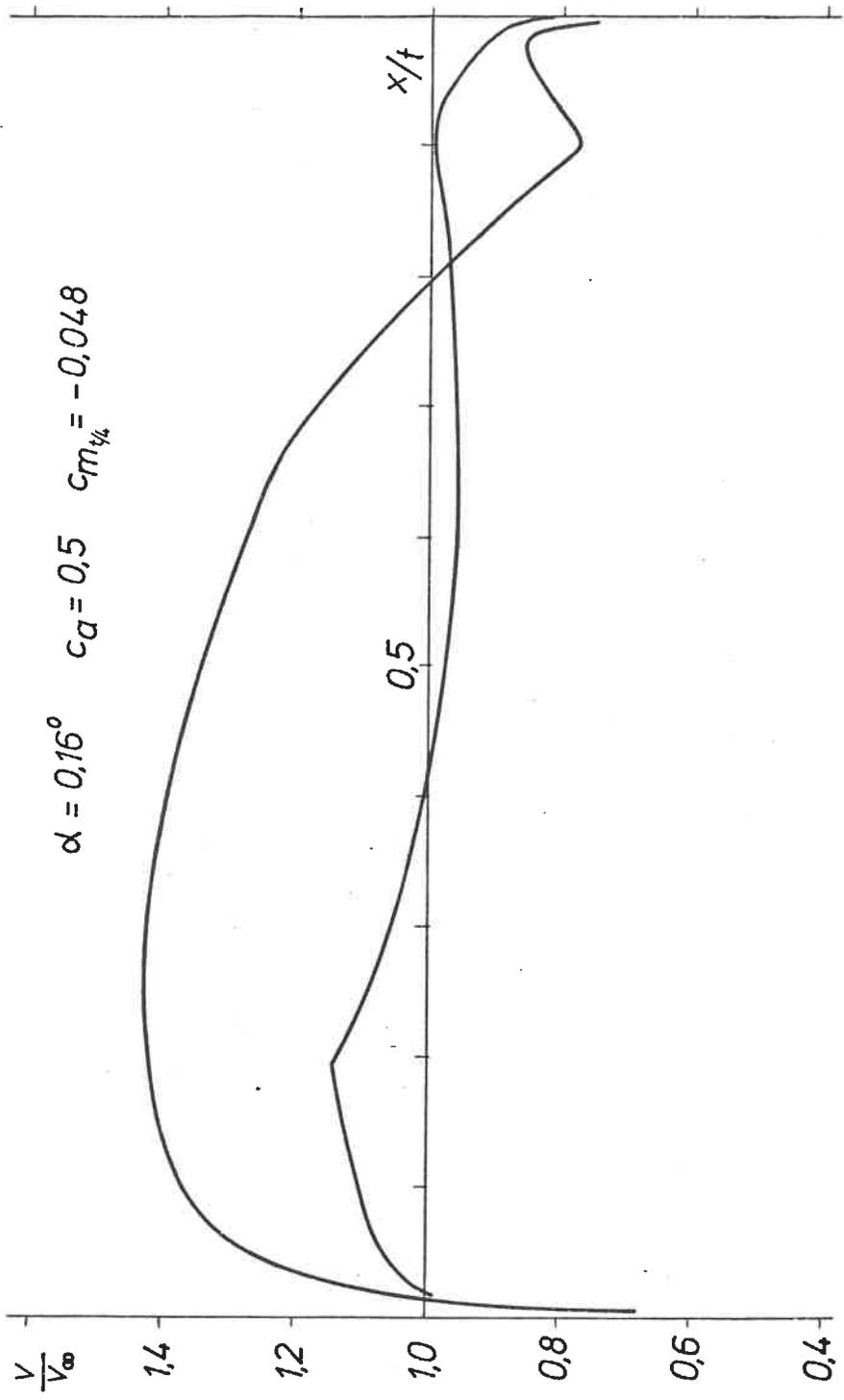


Abb.1 Geschwindigkeitsverteilung des Profils 76-GA-20/170/30 mit eingefahrener Klappe

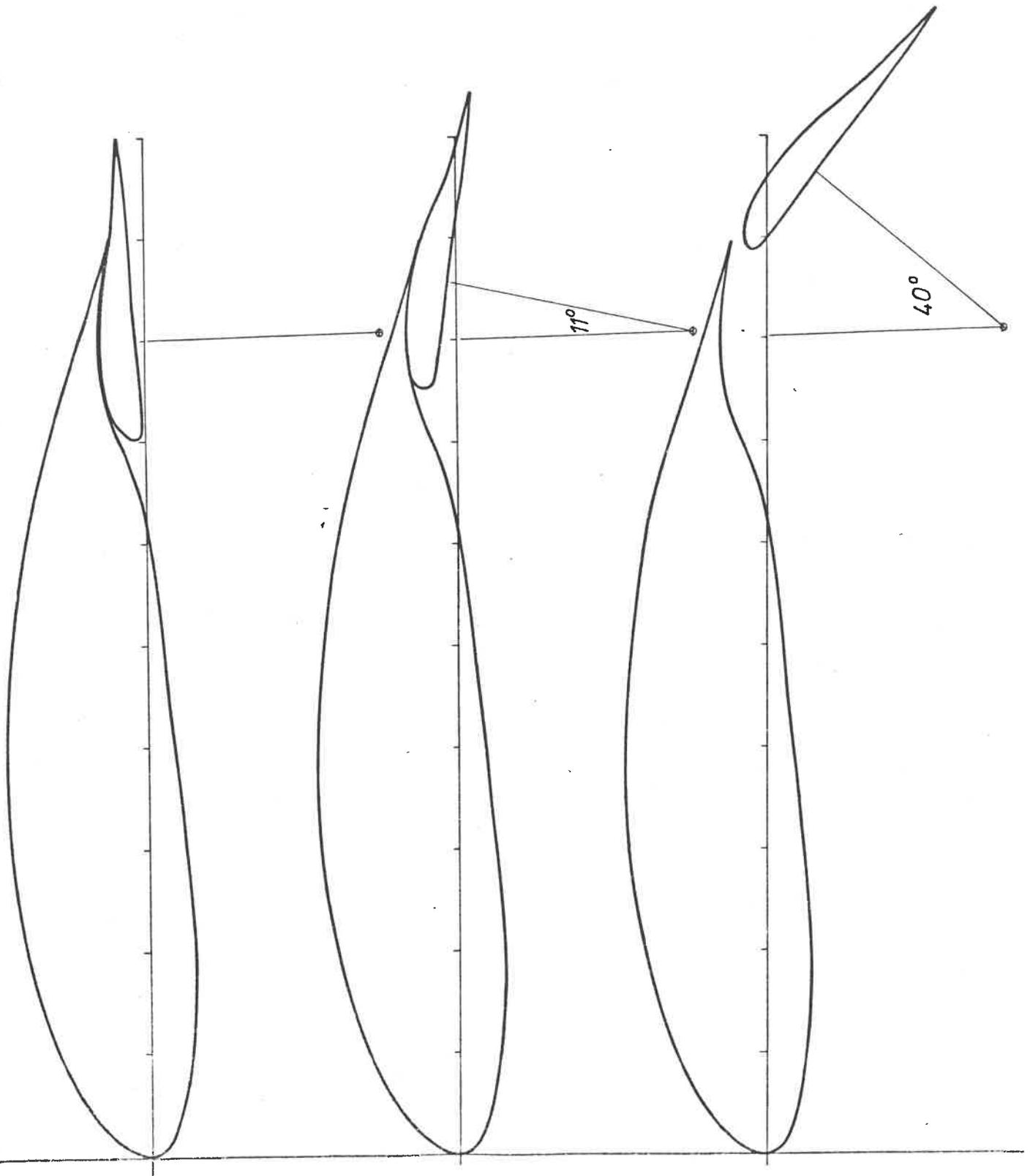


Abb. 2 Profilform FX 76-GA-20/170/30 für den Reiseflug (oben), Steigflug (mitte) und Landung (unten)

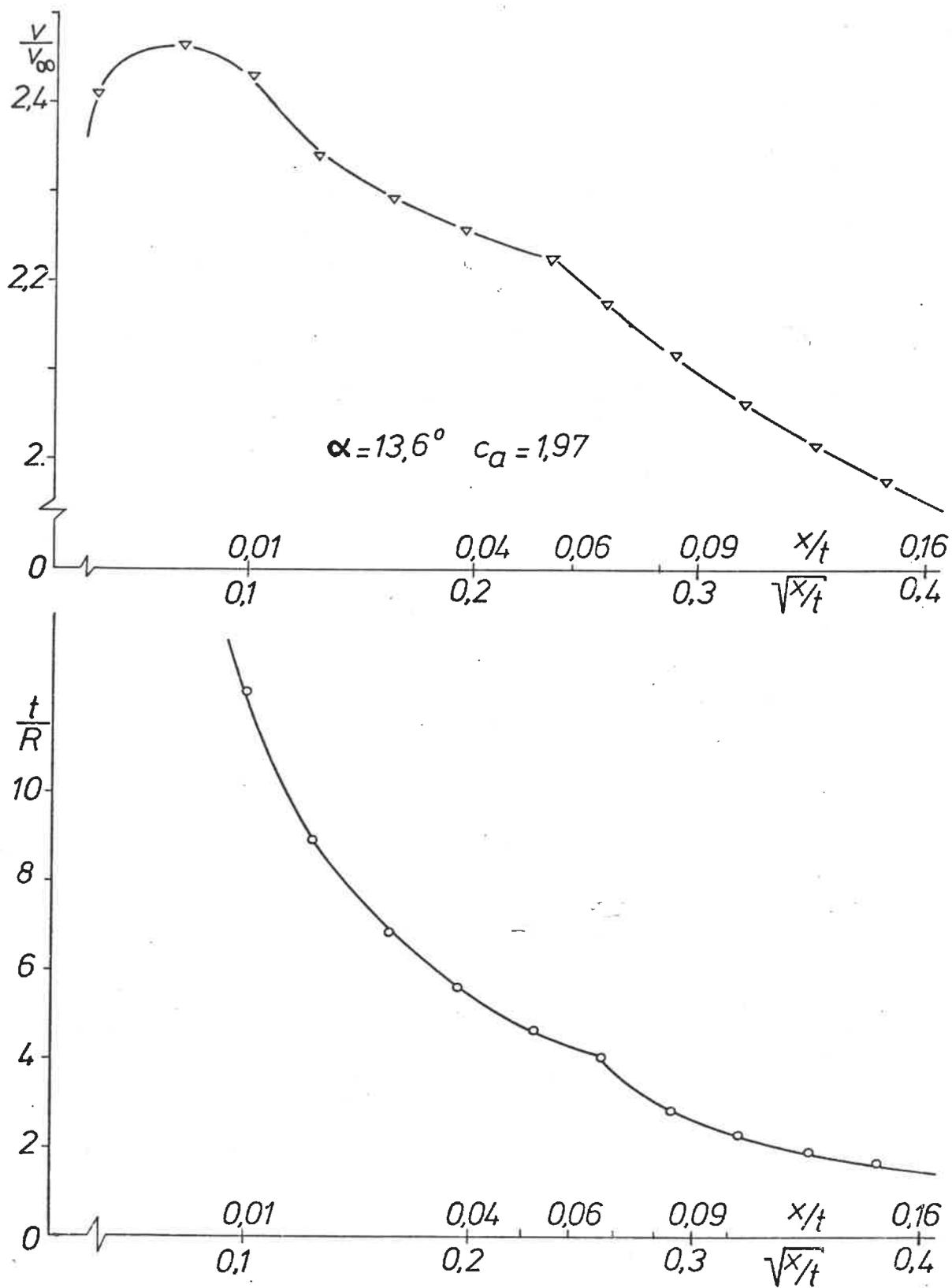


Abb.3 Geschwindigkeits- und Krümmungsverteilung an der Profilnase des Profils FX 76-GA-20/170/30