

# Leistungsvergleich von Segelflugzeugen mit im Fluge veränderlicher Flächenbelastung

Von F. Thomas und U. Wieland  
Institut für Aerodynamik der DFVLR und Akaflieg Braunschweig

Vortrag auf dem XIII. OSTIV-Kongress in Vršac, Jugoslawien (1972)

## 1. Einleitung

Der Ueberlandflug von Segelflugzeugen unter Ausnutzung des thermischen Aufwindes setzt sich zusammen aus dem Steigflug im Aufwind und dem Gleitflug zwischen den Aufwinden. Die Aufgabe des Entwurfingenieurs besteht darin, ein Flugzeug zu entwerfen, welches unter der Annahme bestimmter meteorologischer Bedingungen dem Piloten die Möglichkeit gibt, eine vorgegebene Strecke bei gleicher Flughöhe am Anfang und Ende derselben in einer minimalen Zeit zurückzulegen, oder mit anderen Worten, eine möglichst hohe mittlere Ueberlandflugreisegeschwindigkeit zu erzielen. Diese Aufgabe verlangt ein Flugzeug, welches beim Kreisflug im Aufwind eine hohe Steiggeschwindigkeit erzielen kann, und welches gleichzeitig in der Lage ist, die gewonnene Höhe in einem möglichst flachen Gleitflug bei möglichst hoher Fluggeschwindigkeit in Strecke umzusetzen. Die rechnerische Behandlung dieses Problems wurde eingehend von A. Quast und F. Thomas [1] beschrieben (siehe auch [2]).

Die Anforderungen an das Flugzeug sind im Steigflug und im Gleitflug sehr verschieden und zum Teil sogar einander widersprechend. So verlangt der Steigflug eine niedrige Flächenbelastung und Profile für hohe Steigzahlen, während für den Gleitflug eine hohe Flächenbelastung und Profile mit geringem Minimalwiderstand vorteilhaft sind.

Die Entwicklung der modernen Profile trägt dieser Forderung insofern Rechnung, als sie für breite Laminardellen ausgelegt sind, wie zum Beispiel die Profile FX 61-184 und FX 61-163. Fast alle modernen Standardklassenflugzeuge sind heute mit Profilen dieser Art ausgerüstet. Durch die Entwicklung von Laminarprofilen mit Wölbklappen, wie zum Beispiel FX 62-K-131, kann man die Profilform den Erfordernissen des Steig- und Gleitfluges im Fluge jeweils anpassen. Die modernen Flugzeuge der offenen Klasse nutzen fast alle diese Möglichkeit der Leistungssteigerung. Eine weitere erhebliche Leistungssteigerung liesse sich erreichen, wenn auch die Flächenbelastung während des Fluges variabel wäre, so dass im Steigflug mit niedriger, im Gleitflug jedoch mit hoher Flächenbelastung geflogen werden kann.

## 2. Methoden der variablen Flächenbelastung

In neuerer Zeit sind eine Reihe verschiedener Vorschläge in dieser Richtung gemacht worden, wie zum Beispiel der Fowlerflügel (siehe F. X. Wortmann [3]), das Klappen-segel (siehe F. X. Wortmann [4]) und der Teleskopflügel. In der vorliegenden Arbeit soll untersucht werden, welches dieser drei Konzepte für die Erzielung einer möglichst grossen mittleren Ueberlandflugreisegeschwindigkeit am geeignetsten ist.

Die Aenderung der Flächenbelastung im Fluge kann prinzipiell auch durch Aenderung des Fluggewichtes erfolgen. Eine Aenderung des Fluggewichtes durch Abwerfen von Wasserballast ist bereits weitverbreitet, doch ist mit dieser Methode nur eine einmalige Aenderung der Flächenbelastung während eines Fluges möglich. Um die Anpassung an Steigflug und Gleitflug jederzeit durchführen zu können, ist folglich eine Aenderung der Flügelfläche während des Fluges erforderlich. Man unterscheidet dabei grundsätzlich die folgenden Möglichkeiten (Bild 1):

- Flächenänderung in Profiltiefenrichtung (Fowlerklappe, Klappen-segel)
  - Flächenänderung in Spannweitenrichtung (Teleskopflügel)
- Beide Arten der Flächenänderung führen zwangsläufig zu einer Aenderung weiterer Flügelparameter. Beim Fowlerflügel und beim Klappen-segel wird mit dem Ausfahren der

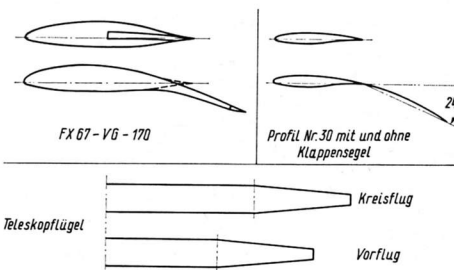


Bild 1: Fowlerklappe, Klappen-segel u. Teleskopflügel

Klappe die Flügelfläche, die Reynoldszahl und die Profilwölbung vergrössert und die Flügelstreckung verkleinert. Beim Teleskopflügel wird durch Ausfahren des Flügelaussenteils die Flügelfläche und die Flügelstreckung vergrössert, während die Profilgeometrie und Reynoldszahl unverändert bleiben.

Welcher der beiden Lösungen der Vorzug zu geben ist, hängt davon ab, ob die Vergrösserung der Profilwölbung oder die Vergrösserung der Flügelstreckung die grösseren Vorteile bringt.

## 3. Der Fowlerflügel

Fowlerflügel sind seit langem als Landehilfen in Gebrauch. Sie sind meist als Spaltklappen ausgebildet und besitzen daher neben ihrer flächenvergrössernden Wirkung ein sehr hohes  $c_{a, max.}$ . Sie haben sich wegen ihres hohen Widerstandes für die Zwecke des Segelfluges in dieser Form nicht bewährt. Für den Segelflug sind nur solche Fowlerflügel geeignet, die sowohl bei eingefahrener wie ausgefahrener Klappe eine bis zur Hinterkante glatte und stetige Oberfläche aufweisen, welche lange Laminarstrecken zulässt. Das bisher in dieser Hinsicht einzige befriedigende Profil wurde von F. X. Wortmann [3] entwickelt und hat die Bezeichnung FX 67-VG-170 (siehe Bild 2). Es wurde bei dem britischen Sigma-Projekt verwendet. Bezogen auf das Grundprofil hat dieses Profil 17%

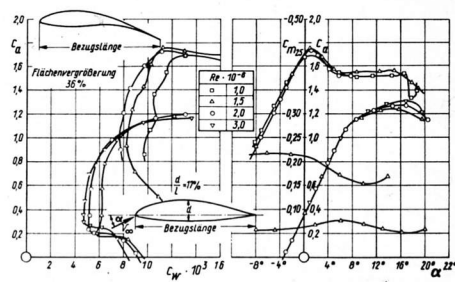


Bild 2: Aerodynamische Bewertete des Fowlerklappenprofils FX 67-VG-170

Dicke, 43% Wölbungsrücklage und 36% Flächenvergrösserung. Die letzten 10% der Flügeltiefe sind auf der Klappe als zusätzliche Wölbungs-klappe ausgebildet, die sowohl zur Verschiebung der Laminardelle als auch zur Rollsteuerung benutzt werden kann. Dieses Profil lässt nur eine geringe Tiefe für den Torsionskasten zu. Da gerade das Fowlerprofil starke Momente erzeugt, ist es ausserordentlich schwierig, einen hinreichend steifen Flügel ohne zu hohes Strukturgewicht zu realisieren. Als Alternativlösung wurde daher von U. Wieland im Rahmen einer Diplomarbeit ein Profil mit geringerer Klappentiefe und grösserem Wölbklappenanteil untersucht, welches zudem noch bessere Schnellflugeleistungen hat. Als Ausgangsprofil wurde das Profil FX 62-K-131 benutzt, welches von J. Laude für die in [5] beschriebenen Untersuchungen als Windkanalmodell gebaut worden war. Dieses Modell wurde mit einer 28,2% tiefen Fowlerklappe nach Bild 3 ausgestattet und im  $2,8 \times 3,6$  m<sup>2</sup>-Windkanal der DFVLR Braunschweig untersucht. Trotz eines relativ hohen Turbulenzgrades des

Windkanals lagen die Ergebnisse, wie Vergleiche gezeigt haben, nahe denen, die in der freien Atmosphäre erzielt wurden.

In den Vergleich wurde noch das von Wortmann [4] untersuchte Klappensegel mit 100% Flächenvergrößerung einbezogen (Bild 4).

#### 4. Der Teleskopflügel

Während der Fowlerflügel die Flächenveränderung in Profiltiefenrichtung vornimmt, wird beim Teleskopflügel entsprechend Bild 5 die Fläche in Spannweitenrichtung verändert. Der Teleskopflügel hat gegenüber dem Fowlerflügel eine Reihe deutlicher Vor- und Nachteile:

Die Vorteile sind:

- a) Die Flügelstreckung ist im Langsamflug gross und im Schnellflug relativ klein. Beim Fowlerflügel ist dies umgekehrt.
- b) Der Flügelneutralpunkt wird beim Ein- und Ausfahren nicht verschoben.
- c) Die Tiefe des Torsionskastens ist nicht durch Klappen beschränkt. Die aerodynamischen Momente sind vergleichsweise gering.

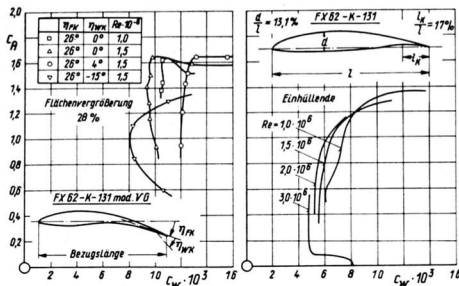


Bild 3: Aerodynamische Beiwerte des Profils FX 62-K-131 mod YG

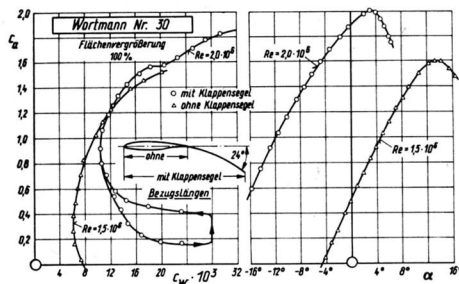


Bild 4: Aerodynamische Beiwerte des Klappensegels

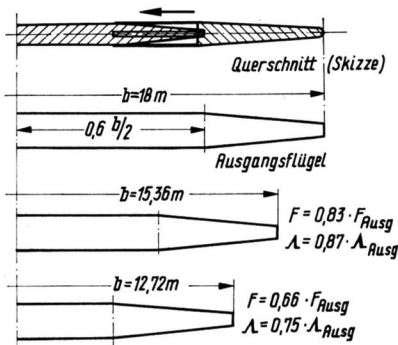


Bild 5: Funktionsschema und Geometrie des Teleskopflügels

d) Die Reynoldszahl wird durch das Einfahren der Flächenaussenteile nicht vermindert.

Die Nachteile sind:

- a) Es können aus konstruktiven Gründen nur Starrprofile benutzt werden.

Die Laminardelle und das  $c_{d, \max}$  sind im Vergleich zum Fowlerflügel sehr klein.

- b) Die konstruktive Realisierung des Teleskopflügels ist noch ungelöst. Es ist noch ungewiss, ob ein hinreichend geringes Flügeltgewicht realisierbar ist.

#### 5. Vergleich der mittleren Reisegeschwindigkeiten

Da der Aufwand für die technische Realisierung jedes der drei angesprochenen Konzepte ausserordentlich hoch ist, ist es zweckmässig, sich durch einen Vergleich der erreichbaren mittleren Reisegeschwindigkeiten einen Ueberblick darüber zu verschaffen, welche technische Lösung die grössten Erfolgsaussichten hat. Der Vergleich wird unter Annahme der Thermikverteilungen von Carmichael nach dem erweiterten Verfahren von Quast und Thomas [1] ausgeführt.

Auf die Einzelheiten der Durchführung der Rechnungen soll hier nicht näher eingegangen werden. Es sollen hier nur die verglichenen Flügelgeometrien und die Ergebnisse der Rechnung beschrieben werden. Als Eingabedaten für die Profileigenschaften werden Messergebnisse von F. X. Wortmann bzw. im Falle des Fowlerprofils FX 62-K-131 mod VG solche von U. Wieland bei den jeweils vorliegenden tatsächlichen Reynoldszahlen benutzt. Die Berücksichtigung der tatsächlichen Reynoldszahlen hat einen grossen Einfluss auf die Ergebnisse (siehe auch [6]).

Bei dem durchgeführten Vergleich sind eine Reihe von Parametern festgehalten worden. Ausgangsflügel ist jeweils die Kreisflugversion mit voll ausgefahrenen Klappen bzw. Flügelaussenteilen. In dieser Konfiguration haben alle Flugzeuge eine Spannweite von 18 m und eine Flächenbelastung von 25 kp/m<sup>2</sup>. Die Widerstandsfläche von Rumpf und Leitwerk wird konstant mit  $W = 50 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$  angenommen. Die Ausgangsflügelstreckung ist bei den Klappenflügeln  $\lambda = 18$ , beim Teleskopflügel  $\lambda = 20$ . Diese relativ bescheidenen Flügelstreckungen und -spannweiten wurden für den Vergleich nicht zuletzt auch deshalb gewählt, weil bei den ersten Entwürfen dieser Art sonst mit nicht beherrschbaren strukturellen Problemen bzw. Gewichtsproblemen gerechnet werden muss.

Für die Flächenänderung werden in den untersuchten Fällen folgende Verkleinerungen angenommen (bezogen jeweils auf die entstehende kleinere Fläche):

Fowlerflügel: 20, 28, 36, 44%

Klappensegel: 40, 70, 100%

Teleskopflügel: 0, 20, 50%

Als Profile wurden benutzt: je ein Fowlerflügel mit FX 67-VG-170 und FX 61-K-131 mod VG, das Klappensegelprofil nach [4] und je ein Teleskopflügel mit Starrprofil FX 61-184 und Wölbungsflügelprofil FX 62-K-131. Als Flügelgrundriss wird für den Fowlerflügel ein Trapezflügel mit einer Zuspitzung von  $\lambda = 0,5$ , beim Teleskopflügel ein Rechtecktrapezflügel mit  $\lambda = 0,4$  angenommen.

Im Kreisflug ist bei nahezu gleicher Reynoldszahl und Streckung der Fowlerflügel wegen seines sehr hohen  $c_{d, \text{Niveaus}}$  dem Teleskopflügel deutlich überlegen. Auch dem Klappensegel gegenüber hat der Fowlerflügel wegen seines wesentlich geringeren Widerstandes deutliche Vorteile. Die Kreisflugpolaren sind in Bild 6 miteinander verglichen.

Durch Verkleinerung der Flügelfläche erzielen alle drei Konzepte im Schnellflug klare Gewinne. Dabei zeigt sich, dass die durch Einfahren der Klappe verminderte Reynoldszahl den Profilwiderstand ansteigen lässt, während beim Teleskopflügel durch verminderte Streckung der induzierte Widerstand ansteigt. Bei der Gesamtbilanz ergibt sich, dass die Verluste beim Teleskopflügel stärker ins Gewicht fallen, da die Streckungsverminderung bei vorgegebener Flächenänderung zu gross ist. Die einhüllenden Geschwindigkeitspolaren in Bild 6 zeigen dieses Ergebnis recht eindeutig. Auch die in Bild 7 gewählte Darstellung der Widerstandsbeiwerte über der Flächenveränderung zeigt das gleiche Ergebnis. Das Ansteigen des Gesamtwiderstandsniveaus

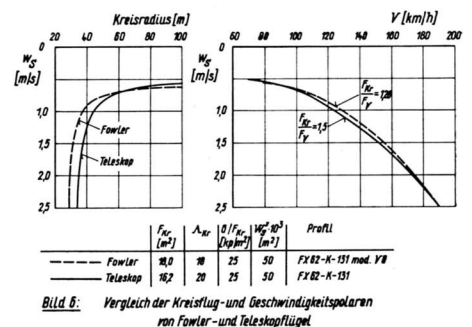


Bild 6: Vergleich der Kreisflug- und Geschwindigkeitspolaren von Fowler- und Teleskopflügel

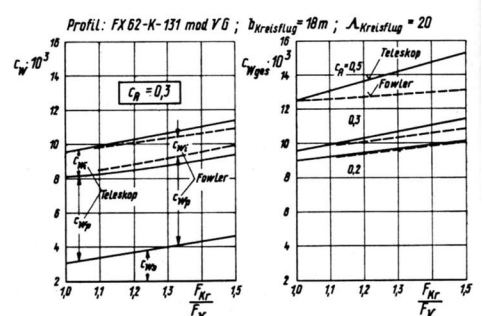


Bild 7: Einfluss der Verkleinerung der Tragfläche auf den Widerstand von Fowler- und Teleskopflügel

mit der Flächenverkleinerung ist zu einem wesentlichen Teil auf die veränderte Bezugsflügelfläche zurückzuführen. Insbesondere die konstant angenommene schädliche Widerstandsfläche ist hierfür verantwortlich.

Rechnet man nun die erzielbaren mittleren Reisegeschwindigkeiten aus, so zeigt sich für alle drei Thermikarten entsprechend Bild 8, dass der Teleskopflügel den Klappenflügelkonzepten unterlegen ist. Das gilt auch dann, wenn man annimmt, dass es möglich wäre, einen Teleskopflügel mit Wölbklappenprofilen zu bauen. Das Ergebnis kann sich jedoch unter Umständen zugunsten des Teleskopflügels verschieben, wenn es gelingen sollte, Teleskopflügel mit wesentlich grösserer Spannweite zu realisieren.

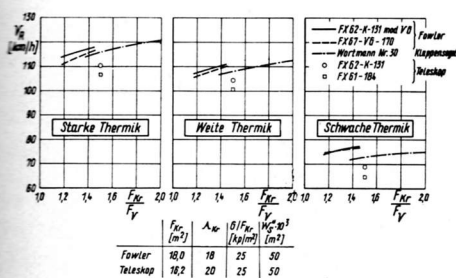


Bild 8: Mittlere Reisegeschwindigkeit in Abhängigkeit v.d. Flächenänderung

Das Klappensegel liegt zwischen Teleskopflügel und Fowlerflügel, allerdings muss hier berücksichtigt werden, dass man bei der praktischen Realisierung des Klappensegels vermutlich nicht ohne hier nicht berücksichtigte, erhebliche zusätzliche schädliche Widerstände bei der Klappenhalterung auskommen wird, die die Reisegeschwindigkeit noch erheblich verschlechtern werden. Die beiden untersuchten Fowlerklappenentwürfe erweisen sich bezüglich der Reiseleistung als nahezu gleichwertig.

## 6. Auslegung eines Hochleistungssegelflugzeugs

Aus den Vergleichen zeigt sich, dass für den Entwurf eines Hochleistungssegelflugzeugs mit Flächenveränderung im Fluge das Fowlerklappenkonzept am besten geeignet ist. Die Zunahme an Reisegeschwindigkeit nimmt dabei deutlich mit der Grösse der Flächenänderung zu. Weitere Rechnungen zeigten, dass eine Vergrößerung der gewählten Ausgangsstreckung keine weiteren Vorteile mehr bringt. Bezüglich der Flächenbelastung wäre für starke und weite Thermik eine höhere Flächenbelastung von etwa 30 kp/m<sup>2</sup> im Kreisflug, für schwache Thermik eine solche von etwas unter 25 kp/m<sup>2</sup> am günstigsten. Zwecks Anpassung an verschiedene Wetterlagen wäre eine erhebliche Zuladefähigkeit von Wasserballast sehr vorteilhaft.

Vergleicht man einen optimalen Fowlerklappenentwurf mit dem bekannten Flugzeug D-36, so ergeben sich sowohl im Kreisflug als auch im Gleitflug erhebliche Leistungsgewinne (Bild 9). Unter der Annahme, dass die Verbesserung im Kreisflug in den Carmichael'schen Thermikmodellen voll ausgenutzt werden kann, erhält man gegenüber der D-36 die folgenden theoretischen Verbesserungen in der Reiseflugleistung:

- schwache Thermik 37%
- weite Thermik 9%
- starke Thermik 19%

## 7. Schlussfolgerung

Zusammenfassend lässt sich damit sagen, dass durch eine im Fluge veränderliche Flügelfläche ganz erhebliche Leistungsgewinne gegenüber den zurzeit üblichen Wölbklappenflugzeugen erzielt werden. Bei der Abwägung der aerodynamischen und konstruktiven Gesichtspunkte erweist sich der Fowlerklappenflügel mit Profilen von der Art des FX 67-VG-170 dem

Teleskopflügel und dem Klappensegel deutlich überlegen. Die Leistungsgewinne, die sich aus der Rechnung ergeben, sind so erheblich, dass sie selbst dann, wenn sie in der Praxis nur zum Teil realisiert werden können, den zweifellos sehr hohen konstruktiven Aufwand für den Bau derartiger Flugzeuge rechtfertigen. Der Bau eines Fowlerklappenflügels ist nur dann sinnvoll, wenn es gelingt, eine hinreichend hohe Torsionssteifigkeit zu erzielen

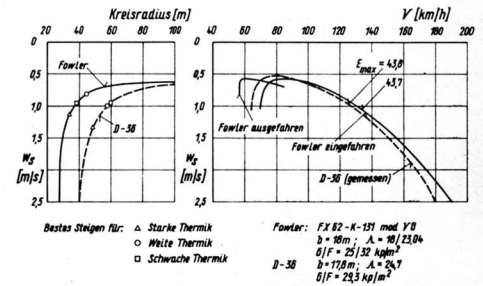


Bild 9: Vergleich eines Fowlerklappenflugzeuges mit der D-36

ohne dass dabei das Strukturgewicht übermässig ansteigt. Wird nach den beim Bau der SB 10 gesammelten Erfahrungen der Torsionskasten des Flügels in Kohlefaserbauweise gebaut, so lässt sich diese Forderung ohne weiteres erfüllen.

## Literatur

- [1] A. Quast und F. Thomas: Einfluss der Flügelauslegung auf die Flugleistungen von Segelflugzeugen. Z. Flugwiss. 15 (1967), S. 386-392
- [2] F. Thomas: Der Einfluss der aerodynamischen Entwurfsgrößen auf die Leistungen von Segelflugzeugen. Dt. Aerokurier 15 (1971), S. 846-849
- [3] F. X. Wortmann: Airfoils for the Variable Geometry Concept. OSTIV Publikation XI 1970
- [4] F. X. Wortmann: The Sailplane. OSTIV Publikation XI 1970
- [5] F. Thomas und J. Laude: Vergleichsmessungen an Laminarflügeln mit starrer und flexibler Wölbklappe. OSTIV Publikation X, 1968
- [6] F. Thomas: Einfluss der Reynoldszahl auf die optimale Streckung und Grundrissform von Segelflugzeugtragflügeln. Vortrag auf dem 26. Euromech. Kolloquium, Oberwolfach, Juli 1971