

# EVOLUTIONSSTRATEGISCHES DESIGN VON TRAGFLÜGELSPITZEN

M. Stache

Technische Universität Berlin, Bionik und Evolutionstechnik  
Ackerstraße 71-76, D-13355 Berlin

## ÜBERSICHT

Es soll der Aufgabe einer optimalen Gestaltung von Tragflügelspitzen nachgegangen werden. Insbesondere den induzierten Strömungswiderstand beeinflusst die Flügelspitzengestalt beträchtlich. Im Flugzeugbau werden daher verschiedenste Arten von Winglets eingesetzt, die meisten Landsegler spreizen ihre Handschwingen vertikal auf, Fig 1. Der induzierte Widerstand hat bekanntermaßen im Reiseflug eines Verkehrsflugzeugs einen Anteil am Gesamtwiderstand von einem Drittel bis zur Hälfte, im Steigflug sogar einen noch deutlich höheren.



FIG 1. Vertikal aufgespreizte Handschwingen eines Milans (Foto: I. Rechenberg).

Die Strategie der biologischen Evolution wird nachgeahmt, um den Strömungswiderstand eines Tragflügels zu minimieren, virtuell in simulierter Strömungsmechanik auf dem Computer (und auch im realen Windkanal). Sind die jeweils optimalen Zirkulationsverteilungen der nichtplanaren Konfigurationen durch die evolutionsstrategische Optimierung bestimmt, werden die verschiedenen Flügelspitzen-Konzepte vergleichend gegenübergestellt. Das strömungsphysikalische Modell zur Bewertung der Varianten basiert auf der Prandtl'schen Traglinientheorie, der Reibungswiderstand wird durch das Modell der ebenen Platte bestimmt. So gelingt es, das Potenzial unterschiedlicher Konzepte einzuschätzen.

Abhängig von der neu eingeführten Profilwiderstandszahl, die von elementaren Größen der Flügelgeometrie und des Flugzustands abhängt (Flügelstreckung, Reynolds-Zahl, Auftriebsbeiwert), kann das Potenzial von nichtplanaren Flügelstrukturen abgeschätzt werden. Allgemein gilt, je größer die Profilwiderstandszahl ist, d. h. je größer der Anteil des Profilwiderstands am Gesamtwiderstand ist, um so weniger Widerstand-

minderung ist durch nichtplanare Flügelspitzen möglich – Flügelspitzen können auch den Widerstand erhöhen. Eine Verminderung des induzierten Widerstands durch nichtplanare Flügelspitzen muss mit einem erhöhten Profilwiderstand aufgrund der erhöhten umspülten Fläche erkauft werden.

Ein Vergleich unterschiedlicher Konfigurationen wie die Aufspreizung (Lösung der Vögel), die Winglets (Standard im Flugzeugbau) und der Loopflügel (vergleichsweise neue Entwicklung) zeigen, dass die Widerstandsverminderung vor allem von der Strukturhöhe abhängt und weniger von der Art der Konfiguration.

## 1. STRÖMUNGSWIDERSTANDVERMINDERUNG

Der Strömungswiderstand ist eines der entscheidenden Kriterien zur Bewertung eines Tragflügels. Der Strömungswiderstand eines Tragflügels unendlicher Spannweite wird als sein Profilwiderstand bezeichnet. Der Profilwiderstand wird größtenteils durch die „viskose“ Reibung verursacht. Beim Tragflügel endlicher Spannweite kommt noch der induzierte Widerstand hinzu. Hier herrscht gegenüber dem unendlichen Flügel eine veränderte Druckverteilung. Somit ist der induzierte Widerstand auch ein Druckwiderstand. Er wird aber weder als Druckwiderstand bezeichnet noch dem Druckwiderstand des unendlichen Flügels hinzuaddiert.



FIG 2. Randwirbel am Tragflügel (Foto: I. Rechenberg)

Ursächlich für den induzierten Widerstand sind die Randwirbel, Fig. 2. Randwirbel sind eine unvermeidliche Begleiterscheinung des dynamischen Auftriebs am Tragflügel. Die zurückgelassene kinetische Energie der freien Wirbelschicht hinter dem Flügel ist äquivalent

zur Widerstandsarbeit, die vom Flugobjekt „geleistet“ werden muss.

Der induzierte Widerstand hat beim Reiseflug einen erheblichen Anteil am Gesamtwiderstand eines Verkehrsflugzeugs. Etwa 30 bis 50 % des Triebwerkshubs wird zur Überwindung des induzierten Widerstands benötigt. Zur Verminderung des induzierten Widerstands sind Tragflügel großer Spannweite vorteilhaft. Daher besitzen Seevögel und Segelflugzeuge eine im Verhältnis zu ihrer Flügelfläche große Spannweite. Allerdings wird die Spannweite begrenzt durch die Forderung nach einer geringen mechanischen Belastung. Auch bei der Handhabung sind große Spannweiten hinderlich. Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung des induzierten Widerstands sind die nichtplanaren Flügelenden. Hierzu gehören die vertikal gespreizten Handschwingen der Landsegler und die Winglets an Flugzeugen.

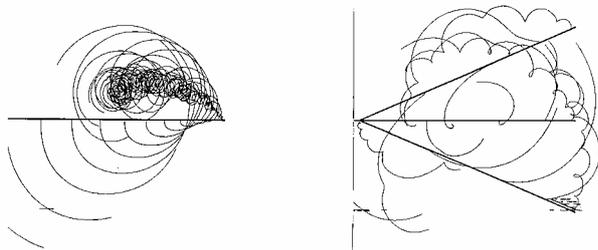


FIG 3. Vergleich der Randwirbelentstehung bei einem planaren Flügel (links) mit einer dreifach gespreizten Flügelspitze (rechts). Erkennbar die hohe Zirkulationsdichte beim planaren Flügel und die vertikal verteilte Randzirkulation beim Spreizflügel mit einer deutlich geringer Wirbeldichte. Durch entgegengesetzt wirkende Induktionen ist der Energieinhalt beim Spreizflügel geringer und damit der induzierte Strömungswiderstand kleiner.

Zwei Effekte erklären den Mechanismus der Widerstandsverminderung nichtplanarer Konfigurationen. Zu einem wird die Randzirkulation vertikal verteilt, Fig 3. Hierdurch verringert sich die kinetische Energie der Randzirkulation, da die Induktionen verstärkt entgegengesetzt wirken, also Geschwindigkeit abgemindert wird. Man betrachte einen Doppeldecker, um den Effekt leichter zu verstehen. Beiden Decks mögen die gleiche Nachlaufzirkulation besitzen. Genau zwischen den beiden Decks heben sich die induzierten Geschwindigkeiten gerade auf.

Zum anderen ist die widerstandsminimale Zirkulationsverteilung einer nichtplanaren Konfiguration völliger als die elliptische Zirkulationsverteilung, die ja im planaren Fall den geringsten Widerstand erzeugt, d. h. die Zirkulation ist mehr zu den Spitzen hin verschoben. Folglich ist die Zirkulation in der Flügelmitte (gleich der Randzirkulation) bei gleichem Auftrieb geringer, und damit ist auch die kinetische Energie der Randzirkulation kleiner.

## 2. EVOLUTIONSSTRATEGIE ALS ENTWICKLUNGSWERKZEUG

Die belebte Natur mit ihren Strukturen, Funktionen und Verhaltensweisen zeigt sich aus ingenieurtechnischer Sicht als ein Pool voll an phantastischen Lösungen. Diese sind Ergebnis eines Evolutionsprozesses. In einer zeitlichen Abfolge kleiner Variationen von Generation zu Generation erfolgt eine Entwicklung – ein stetiges Verbessern der Leistungsfähigkeit oder ein Anpassen an sich veränderte Lebensbedingungen.

Durch die biologische Evolution sind leistungsfähige Prinzipien zur Lösung komplexer Aufgaben entwickelt worden, die in vielen Fällen ingenieurtechnischen Ansätzen überlegen sind. Somit liegt es nahe, auch die biologische Methode der Evolution als Vorbild für technische Anwendungen zu nutzen. Evolutionsstrategie ist ein Optimierungsverfahren, das die Mechanismen der biologischen Evolution mathematisch formuliert und in ein Optimierungsverfahren umsetzt. Wie die biologische Evolution beruht sie vor allem auf zwei Prinzipien: Variation und Selektion.

Für die Durchführung des Variations-/Selektionsprozesses werden bei der Evolutionsstrategie die Variablen des Elternindividuums variiert, d. h. mutiert und gegebenenfalls auch rekombiniert. Mit dem variierten Variablensatz wird das Individuum realisiert, dann bewertet. Die Besten werden zu den Eltern der nächsten Generation erklärt.

Kern der Evolutionsstrategie ist eine Selbstanpassung der Mutationsrate. Nur wenn sich die Mutationsrate innerhalb des Evolutionsfensters befindet, arbeitet eine Evolutionsstrategie mit einer zufriedenstellenden Fortschrittsgeschwindigkeit. Bei zu kleiner Mutationsrate gibt es nur wenig Fortschritt, bei zu großer kommt es im Mittel zu einem Rückwärtsschreiten. Die Leistungsfähigkeit einer Evolutionsstrategie steht und fällt demnach mit der Adaptation der Mutationsrate, Fig 4. Die richtige Mutationsrate (Lage des Evolutionsfensters) ist u. a. abhängig von der Entfernung vom Optimum. Ist das Optimum noch in weiter Ferne, so ist die richtige Mutationsrate meist höher als in der Nähe des Ziels.

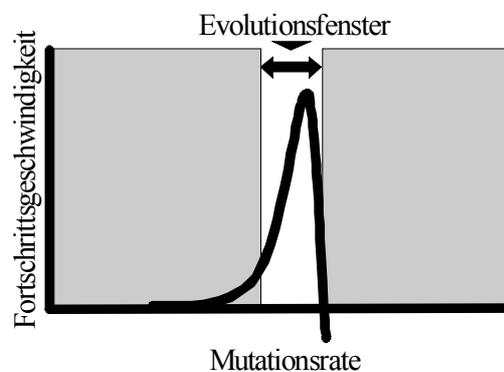


FIG 4. Evolutionsfenster (nach I. Rechenberg).

Zum Optimieren mit der Evolutionsstrategie ist es notwendig, die Nachkommen zu bewerten oder wenigstens eine Rangfolge anzugeben. Die Bewertung kann experimentell am realen Objekt oder durch Simulation auf dem Computer bestimmt werden. Am einfachsten ist es, wenn jedem Nachkommen eine Zahl, die so genannte Qualität zugewiesen werden kann. Die Qualität erlaubt es dann, das Individuum mit anderen zu vergleichen, sodass der bessere selektiert werden kann.

Eine weitere Voraussetzung für die Optimierung ist die Bereitstellung einer variierbaren Beschreibung des zu optimierenden Systems. Beispielsweise können entsprechende Prototypen angefertigt werden, die eine einmalige Bewertung zulassen oder man verwendet einstellbare Systeme. Bei Computermodellen lassen sich die Variationen häufig problemlos durchführen.

Die Evolutionsstrategie wird in der Industrie vielfach angewendet, beispielsweise zum Kostenoptimieren von Fertigungsabläufen, beim Entwickeln von Reifenprofilen, für das Auffinden leistungsfähigerer Stahllegierungen, in der Strömungstechnik zur Optimierung von Gasturbinenschaufeln.

### 3. EVOLUTION IM WINDKANAL

Die Evolution einer vogelähnlichen Flügelauflage soll im Windkanal „nachgespielt“ werden. Biegsame Bleistreifen am Übergang zwischen dem Basisflügel und den aufgespreizten Flügelenden bilden ein Gelenk und machen den Flügel mutierbar. In einer speziellen Einstellvorrichtung lassen sich die Anstell- und Spreizwinkel nach Vorgabe des evolutionsstrategischen Computerprogramms einstellen. Die Evolutionsstrategie gibt in diesem Fall 12 variierte Spreizflügelvarianten aus, die am Modell eingestellt und im Windkanal vermessen werden. Die 4 besten Nachkommen (mit dem größten Verhältnis Auftrieb zu Widerstand) werden zu den Eltern der nächsten Generation. Die Evolutionsstrategie mutiert und rekombiniert die Eltern und so werden 12 Nachkommen erzeugt. Der Generationszyklus wiederholt sich.

Als Ergebnis nach 19 Generationen zeigt sich ausgehend von einer nicht aufgespreizten Konfiguration eine Aufspreizung, die ähnlich aussieht, wie die des Vogels, Fig 5. Im Vergleich zu einem nicht gespreizten Flügel gleichen Grundrisses, ist die im Windkanal evolvierte Aufspreizung um etwa 10 % strömungsgünstiger.

### 4. EVOLUTION IM COMPUTER

Es werden mit der Evolutionsstrategie die Zirkulationsverteilungen unterschiedlicher Konfigurationen optimiert. Die Evolutionsergebnisse ermöglichen dann eine Interpretation und Bewertung biologischer und technischer Tragflügelenden.

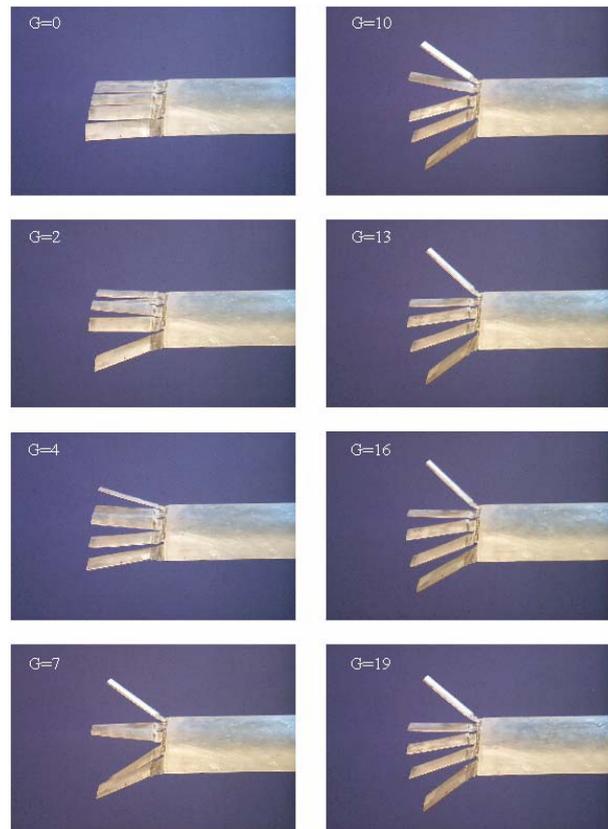


FIG 5. Evolutionsverlauf der aufgespreizten Flügelenden im Windkanal. Die Generation ist jeweils links oben angegeben. Das Ergebnis der 19. Generation ähnelt der Aufspreizung am Vogelflügel.

#### 4.1. Modellierung des Tragflügels

Das verwendete Modell zur Beschreibung der Strömungsvorgänge basiert auf der Prandtl'schen Traglinientheorie. Dabei wird der induzierte Widerstand nicht anhand der üblichen Betrachtung des induzierten Abwinds berechnet, sondern über die kinetische Energie der Wirbelschicht hinter dem Flügel: Die Wirbelschicht wird zu einzelnen Längswirbeln gleicher Zirkulation diskretisiert und deren kinetische Energie mit der Kirchhoff-Routh-Funktion berechnet. Der induzierte Widerstand lässt sich also aus den Koordinaten der Längswirbel berechnen.

Auch der Profilwiderstand und das Wurzelbiegemoment können wie der induzierte Widerstand aus der Zirkulationsverteilung bestimmt werden. Somit kann man sich bei der gesamten Optimierung auf die Betrachtung der Zirkulationsverteilung beschränken. Die Berechnung des Profilwiderstands basiert auf dem Modell der turbulent längsangeströmten dünnen Platte. Die Abschätzung des Flügelgewichts erfolgt anhand des Wurzelbiegemoments.

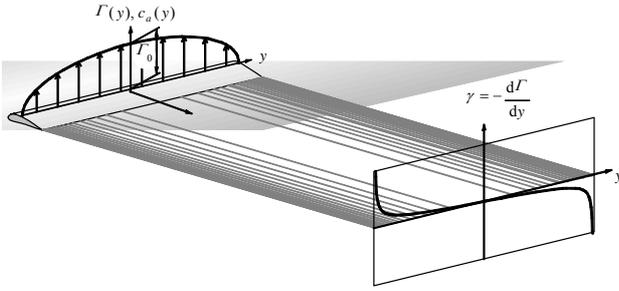


FIG 6. Tragflügel mit entlang der Spannweitenrichtung veränderlicher Zirkulation und der dazugehörigen als starr angenommenen Wirbeldichteverteilung hinter dem Flügel.

Der Berechnungsablauf kann hier nur grob skizziert werden, ausführlich wird er in meiner Dissertation beschrieben [1]. Aus der Zirkulationsverteilung entlang der Traglinie wird die Wirbelschicht hinter dem Flügel ermittelt, die durch  $n = 300$  Längswirbel pro Flügelhälfte repräsentiert ist, Fig 6. Alle Längswirbel haben betragsmäßig die gleiche Zirkulation. Die kinetische Energie aller Wirbel wird mit der Kirchhoff-Routh-Funktion [2] berechnet, womit sogleich der induzierte Widerstand  $F_{W,indu}$  bekannt ist,

$$(1) \quad F_{W,indu} = -\frac{\rho \Gamma_0^2}{4\pi n^2} \left( \sum_{i=-n}^n \sum_{\substack{j=-n \\ j \neq i}}^n \frac{ij}{|ij|} \ln \frac{|r_i - r_j|}{s_{ell}} - 2n \ln s_{ell} \right),$$

mit der Dichte des Strömungsmediums  $\rho$ , der Zirkulation des „gebundenen“ Wirbels in der Flügelmitte  $\Gamma_0$ , dem Abstand zwischen dem  $i$ -ten und  $j$ -ten Längswirbel  $|r_i - r_j|$  und als beliebige Normierungslänge die Halbspannweite  $s_{ell}$  des Vergleichsflügels. Die Zirkulation in der Flügelmitte  $\Gamma_0$  wird zum Vergleich unterschiedlicher Flügelkonfigurationen derart angepasst, dass jede Konfiguration den gleichen Auftrieb wie der Vergleichsflügel erzeugt. Der Vergleichsflügel ist ein planarer Flügel elliptischer Zirkulationsverteilung. Er ist charakterisiert durch die Referenz-Halbspannweite  $s_{ell}$ , die Flügelfläche  $A_{ell}$ , den Auftrieb  $F_A$ , die Anströmgeschwindigkeit  $v_\infty$  und durch die Eigenschaften des Strömungsmediums. Aus diesen Referenzgrößen kann durch Umstellen des Kutta-Joukowsky'schen Auftriebssatzes die Referenz-Zirkulation in der Flügelmitte  $\Gamma_{0,ell}$  berechnet werden,

$$(2) \quad \Gamma_{0,ell} = \frac{2F_A}{\pi \rho s_{ell} v_\infty},$$

die für die Normierung des Widerstands von zentraler Bedeutung ist. Es erweist sich als zweckmäßig, den induzierten Widerstand auf das Quadrat der Referenz-Zirkulation  $\Gamma_{0,ell}$  und die Dichte des Strömungsmediums  $\rho$  zu beziehen sowie zusätzlich mit  $\pi$  zu multi-

plizieren, womit man den dimensionslosen Widerstand

$$(3) \quad F_W^* = \frac{F_W}{\rho \Gamma_{0,ell}^2 / \pi}$$

erhält. Auch der Profilwiderstand soll in Abhängigkeit von der Zirkulationsverteilung dargestellt werden, d. h. die Profilform soll nicht in die Berechnung eingehen. Wie beim induzierten Widerstand gilt es, sich bei der Modellierung auf die maßgebenden Effekte zu fokussieren. So basiert die Berechnung des Profilwiderstands auf dem Modell der längsangeströmten dünnen Platte. Für Platten, die von der Vorderkante an turbulent sind, gilt nach V. M. Falkner [3]

$$(4) \quad c_f = \frac{0,0303}{\sqrt[3]{Re_l}}.$$

Unter der Voraussetzung eines längs der Spannweitenachse konstanten Auftriebsbeiwerts, der auch gleich dem Auftriebsbeiwert des Vergleichsflügels sein soll und unter Einbeziehung eines von E. Truckenbrodt vorschlagenden Korrekturterms zur Berücksichtigung des durch die Profildicke verursachten Druckwiderstands [4], erhält man nach einigen Rechenschritten den dimensionslosen Profilwiderstand

$$(5) \quad F_{W,p}^* = 0,0663 \frac{\pi^2}{2} \frac{\sqrt[3]{\Lambda_{ell}^8}}{\sqrt[3]{Re_s} c_a^2} \sum_{i=1}^n \sqrt[3]{\Gamma_i^{*6}} \frac{\Delta \tilde{y}_i}{s_{ell}} \dots$$

mit der Flügelstreckung des Vergleichsflügels  $\Lambda_{ell}$ , der auf die Halbspannweite des Vergleichsflügels bezogene Reynolds-Zahl  $Re_s$ , der normierten Zirkulation des  $i$ -ten Flügelabschnitts  $\Gamma_i^* = \Gamma_i / \Gamma_{0,ell}$  und der Breite des Flügelabschnitts  $\Delta \tilde{y}_i$ . Die Profilwiderstandszahl  $\Omega$  charakterisiert nur Größen des Vergleichsflügels. Betrachtet man den normierten Gesamtwiderstand, der sich additiv aus induziertem Widerstand und Profilwiderstand zusammensetzt, so heißt der Grenzwert  $\Omega = 0$  nur induzierter Widerstand,  $\Omega = \infty$  nur Profilwiderstand.

## 4.2. Der Optimierkreis

Es wird die Frage nach der Gestaltung von Flügelspitzen als Optimierungsproblem betrachtet. Eine Grundvoraussetzung für eine Optimierung ist das Vorhandensein eines Bewertungskriteriums. In der hier beschriebenen evolutionsstrategischen Tragflügeloptimierung werden die Flügel nur nach ihrem Strömungswiderstand bewertet. Die restlichen vielfältigen Anforderungen finden keine Berücksichtigung. Eine weitere Voraussetzung für die Optimierung ist die Bereitstellung einer variierbaren Beschreibung des Tragflügels, die

durch einen reellwertigen Variablensatz (Vektor der Objekt- oder Entscheidungsvariablen) beschrieben werden kann. Man kann den Variablensatz auch als Eingangsgrößen des Systems bezeichnen. Mit dieser Beschreibung sollen möglichst alle Konfigurationen realisiert werden können.

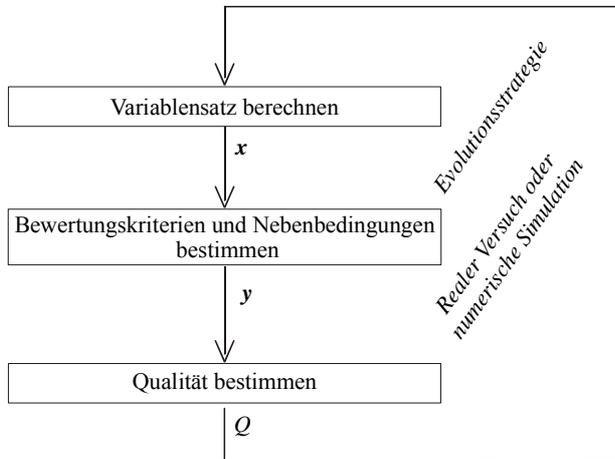


FIG 7. Der Optimierkreis des evolutionsstrategischen Optimierens

Letztlich erfordert eine Optimierung einen Optimierer, in der vorliegenden Aufgabe ist dies die Evolutionsstrategie [5]. Die Evolutionsstrategie hat sich als universelles Optimierungsverfahren beim Experimentieren im Labor und beim Simulieren auf dem Computer bewährt und wird hier zur Klärung der Frage nach einer optimalen Gestaltung der Flügelspitzen eingesetzt.

Fig 7 zeigt den Ablauf des Optimierens. Die Evolutionsstrategie gibt den Variablensatz  $x$  aus (Vektor der Objektvariablen). Veränderungen am Variablensatz verändern das virtuelle Objekt, das durch ein numerisches Modell bewertet wird. Der Variablensatz besteht aus 28 Komponenten, die die Zirkulationsverteilung längs der Spannweitenachse bestimmen. Aus der Simulation auf dem Computer erhält man den Ausgangsgrößenvektor  $y$  (im vorliegenden Fall enthält dieser neben induzierten Widerstand und Profilwiderstand auch das Wurzelbiegemoment).

Aus den Ausgangsgrößen wird in einem weiteren Schritt ein einziger Qualitätswert  $Q$  ermittelt (hier der Gesamtwiderstand). Mit dem Qualitätswert oder kurz der Qualität wird der Nachkomme bewertet. Der Ausgangsvektor kann auch genutzt werden, um vorgegebene Nebenbedingungen zu prüfen.

### 4.3. Potenzial von Winglets

Es wird ein Flügel mit senkrechten Winglets betrachtet. Fig 8 zeigt für verschiedene Höhen der Winglets den Gesamtwiderstand  $F_w^*$  über der Profilwiderstandszahl  $\Omega$ . Bei niedrigen Profilwiderstandszahlen sind bei einer Winglethöhe  $h^* = 0,1$  Widerstandsvermindernun-

gen bis etwa 10 % verglichen mit einem planaren Flügel möglich, bei  $h^* = 0,2$  bis etwa 20 %. Wie erwartet nimmt die Widerstandsverminderung durch Winglets mit steigender Profilwiderstandszahl ab. Mit anderen Worten: Die Überlegenheit bei der Widerstandsverminderung gegenüber einem planaren Flügel, die bei niedrigen Profilwiderstandszahlen große Winglethöhen haben, schwächt sich ab. Bei einer Profilwiderstandszahl  $\Omega = 8,7$  wird bei einer Winglethöhe  $h^* = 0,4$  gegenüber einem planaren Flügel keine Widerstandsverminderung erreicht. Bei kleineren Winglethöhen kommt es bei etwas höheren Profilwiderstandszahlen zum Ausgleich von Profilwiderstandserhöhung und Verminderung des induzierten Widerstands. Bei noch größeren Profilwiderstandszahlen ist der Widerstand der Winglettflügel jeweils etwas größer als beim planaren Flügel.

Es zeigt sich ein Wechselspiel zwischen dem induzierten Widerstand und dem Profilwiderstand. Im allgemeinen vermindern nichtplanare Flügelendkonfigurationen wie Winglets den induzierten Widerstand. Allerdings wird durch die zusätzlich umspülte Oberfläche der Profilwiderstand erhöht. Dominiert der induzierte Widerstand, so sind nichtplanare Konfigurationen besonders vorteilhaft. Hat hingegen der induzierte Widerstand nur geringen Anteil am Gesamtwiderstand, so wird der Vorteil des verminderten induzierten Widerstands einer nichtplanaren Konfiguration durch einen erhöhten Profilwiderstand ganz oder teilweise kompensieren. Es hängt von der Profilwiderstandszahl ab, ob die zusätzliche umspülte Oberfläche der Winglets insgesamt einen Vorteil bringt. Auch ist unbedingt zu beachten, dass Flügel mit Winglets ein größeres Wurzelbiegemoment verursachen, also eine höhere Strukturbelastung verursacht. Dieser Zusammenhang gilt für alle nichtplanaren Flügelkonfigurationen.

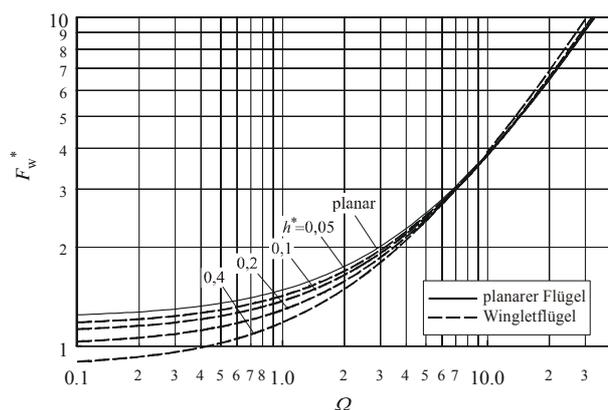


FIG 8. Gesamtwiderstand  $F_w^*$  eines Flügels mit senkrechten Winglets Höhen  $h^*$  über der Profilwiderstandszahl  $\Omega$  im Vergleich zum planaren Flügel. Je höher die Profilwiderstandszahl ist, umso geringer ist das Potenzial durch nichtplanare Flügelspitzen den induzierten Widerstand zu vermindern.

#### 4.4. Fallstudie Boeing 737 / Weißstorch

Es sollen verschiedene Konzepte zur Gestaltung der Flügelenden exemplarisch an zwei Flugobjekten verglichen werden. Betrachtet wird der Fall einer Profilwiderstandszahl  $\Omega = 3,9$ . Diese charakterisiert etwa für den Reiseflug einer Boeing 737 oder den eines Weißstorchs. Beim elliptischen planaren Flügel (Vergleichsflügel) mit  $\Omega = 3,9$  besteht der Gesamtwiderstand ungefähr aus 54,2 % induzierten Widerstand und 45,8 % Profilwiderstand.

Es werden drei nichtplanare Strukturen verglichen. Dies sind der zweifach gespreizte Flügel, der Flügel mit senkrechten Winglets und der Loopflügel, Fig 9. Beim Spreiz- und beim Loopflügel ist die Halbspannweite des nichtplanaren Flügelbereichs (Basisflügel) gleich der Höhe der Flügelstruktur gewählt,  $s_b^* = 1 - h^*$ .

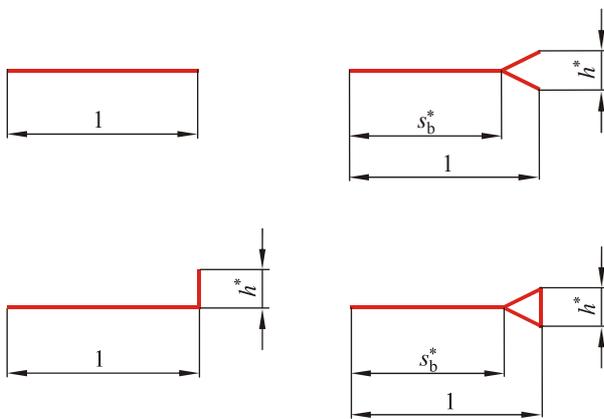


FIG 9. Flügelstrukturen: Planarer Flügel, zweifach gespreizter Flügel, Flügel mit senkrechten Winglets und Loopflügel.

Fig 10 zeigt den Gesamtwiderstand verschiedener nichtplanarer Flügelstrukturen über der Höhe der Struktur. Auch sind die Verläufe des induzierten Widerstands und des Profilwiderstands gezeigt. Gesamtwiderstand, induzierter Widerstand und Profilwiderstand sind jeweils auf die entsprechenden Widerstände des planaren Ellipsenflügels bezogen dargestellt.

Erwartungsgemäß vermindert sich mit zunehmender vertikaler Strukturhöhe der Gesamtwiderstand, wobei die Kurve der Widerstandsverminderung mit wachsender Höhe immer flacher wird, d. h. die Widerstandsverminderung pro Höhe nimmt mit steigender Höhe ab. Bei allen drei Strukturen ist die Verminderung des Gesamtwiderstands bei gleicher Höhe ähnlich groß. Beispielsweise vermindert bei einer Höhe  $h^* = 0,2$  der Loopflügel den Widerstand um 6,6 %, der Wingletflügel um 6,2 % und der Spreizflügel um 5,9 %. Alle diese Werte sind wesentlich kleiner als die Verminderung des induzierten Widerstands, die zwischen 13,8 % und 17,3 % liegt, da die nichtplanaren Strukturen gegenüber dem planaren Flügel eine größere umspülte

Oberfläche besitzen, wodurch sich im Wesentlichen die Erhöhung des Profilwiderstands um bis zu 6,9 % erklärt, d. h. die Verminderung des induzierten Widerstands wird mit einem höheren Profilwiderstand erkauft. Den geringsten Profilwiderstand im Vergleich der drei nichtplanaren Strukturen hat der Spreizflügel.

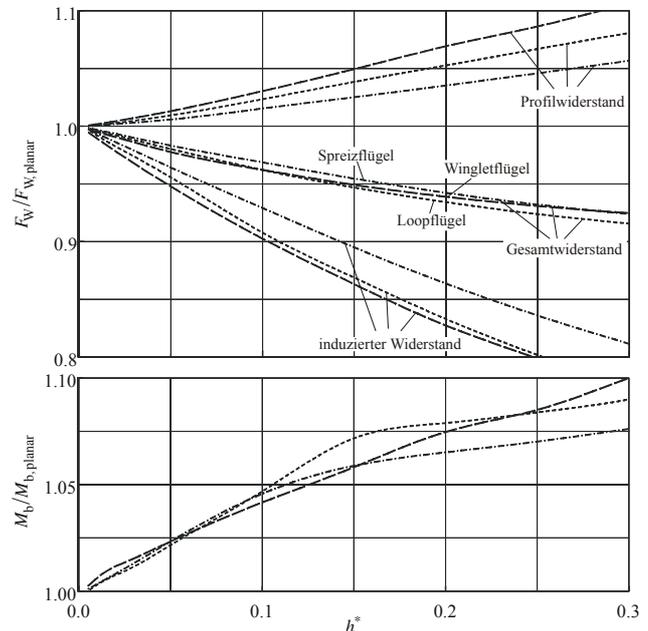


FIG 10. Gesamtwiderstand, induzierter Widerstand und Profilwiderstand sowie Wurzelbiegemoment über der Strukturhöhe.

Bei den Loopflügeln sind die widerstandsmminimalen Konfigurationen durch einen teilweise „wegevolutivierten“ vertikalen Steg charakterisiert, siehe auch weiter unten. Hierdurch wird zwar nicht der geringste induzierte Widerstand erzielt, aber der Gesamtwiderstand wird minimal, da durch den Wegfall umspülter Oberfläche der Profilwiderstand mehr verringert wird, als der induzierte Widerstand erhöht wird.

Bei Strukturhöhen bis  $h^* = 0,1$  hat der Wingletflügel den geringsten Gesamtwiderstand, bei größeren Höhen ist der Loopflügel am widerstandsgünstigsten. Ab  $h^* = 0,3$  hat der Wingletflügel im Dreiervergleich den größten Widerstand. Prinzipiell sind die Verläufe der betrachteten Flügelstrukturen ähnlich. Wieder wird deutlich, dass eine Verminderung des induzierten Widerstands durch ein nichtplanares Flügelende mit einem erhöhten Profilwiderstand erkauft werden muss.

Fig 11 zeigt einen Vergleich verschiedener Flügelkonfigurationen bei einer Höhe  $h^* = 0,2$ . Dargestellt sind die optimalen Zirkulationsverteilungen mit den dazugehörigen Gesamtwiderständen und Wurzelbiegemomenten. Verglichen werden Wingletflügel, Loopflügel, zwei- und vierfacher Spreizflügel. Die Zirkulationsverteilung aller nichtplanaren Konfigurationen sind zur Spitze hin völliger, als die (elliptische) Optimalverteilung des planaren Flügels.

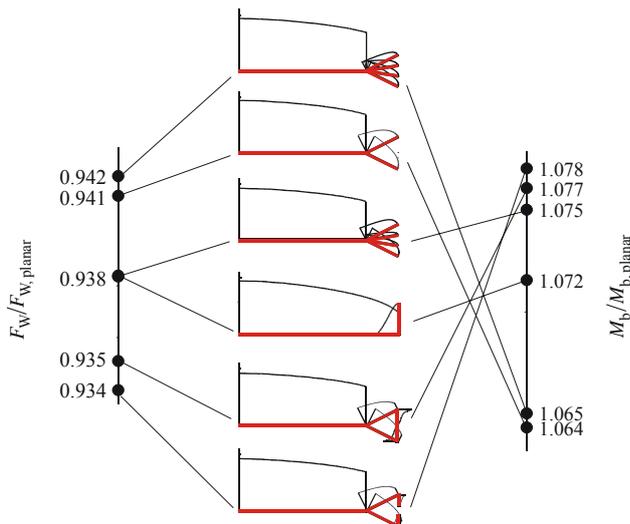


FIG 11. Zirkulationsverteilung, Gesamt Widerstand und Wurzelbiegemoment verschiedener Flügelstrukturen mit der Strukturhöhe  $h^* = 0,2$ .

Typisch für den Loopflügel ist, dass sich ein Teil des vertikalen Stegs wegevolutioniert. Der Gewinn an induzierten Widerstand ist kleiner als der Verlust durch den zusätzlichen Profilwiderstand. Um die Frage zu beantworten, wie sich demgegenüber ein Loopflügel mit durchgehendem Steg verhält, wurde dieser durch eine entsprechende Straffunktion erzwungen. Beim Gesamt Widerstand ist der Loopflügel mit Steg kaum schlechter als der ohne Steg (6,5 zu 6,6 %), wobei sich beide Varianten im induzierten Widerstand nur wenig unterscheiden, die Widerstandsdifferenz also überwiegend durch den höheren Profilwiderstand begründet ist.

Bei dem vierfach gespreizten Flügel zeigt sich eine ungleiche Verteilung der Zirkulation auf die einzelnen Flügelfinger am widerstandsgünstigsten, wie auch beim Mehrdecker mit dem alleinigen Kriterium des induzierten Widerstands beobachtet wurde [6]. Die größte Zirkulation weisen der oberste und unterste Flügelfinger auf. Jeweils 35,2 % der am Spreizpunkt anliegenden Zirkulation des Basisflügels setzen sich entlang dem oberen und unteren Flügelfinger fort. Auf die beiden mittleren Flügelfinger entfallen jeweils 14,8 % der Zirkulation.

Die Lösung der biologischen Evolution am Objekt der Vögel zeigt dagegen eine ziemlich gleichmäßige Verteilung der Zirkulation auf die einzelnen Handschwingen. Ein Hinweis auf eine gleichmäßig verteilte Zirkulation sind die ähnlich großen Flächen der Handschwingen [1]. Die „scheinbare Inkonsistenz“ zwischen den Ergebnissen der biologischen Evolution und der evolutionstrategischen Optimierung wird durch einen Vergleich der widerstandsminimalen Verteilung mit einer gleichmäßig auf die vier Flügelfinger verteilten Zirkulation ein wenig aufgelöst, Fig 11. Die gleichmäßige Verteilung wurde durch einen entsprechenden

Strafterm in der Qualitätsfunktion erreicht. Zwar ist der gleichmäßig verteilte Spreizflügel im Widerstand schlechter (5,8 zu 6,2 %), doch hat er einen Vorteil durch ein geringeres Wurzelbiegemoment. Bei der Interpretation der Widerstandswerte ist auch zu beachten, dass Zusatzwiderstände, die im Übergang von Basisflügel zu den vier Flügelfingern entstehen, im Berechnungsmodell unberücksichtigt bleiben. Hier könnte eine gleichmäßige Verteilung gegenüber der ungleichmäßigen einen geringeren Zusatzwiderstand verursachen.

Wie gesagt, im Wettbewerb des geringsten Gesamt widerstands schneidet der vierfach gespreizte und gleich verteilte Spreizflügel am schlechtesten ab. Er verursacht im Vergleich zu dem planaren Vergleichsflügel einen 5,8 % geringeren Widerstand, der Loopflügel als bester schafft eine Verminderung um 6,6 %, legt man Wert auf einen geschlossenen Loop, sind es 6,5 %. Doch man beachte wieder eine Unzulänglichkeit der strömungsmechanischen Modellierung. Knick in der Traglinie oder Bögen mit kleinem Radius verursachen im Allgemeinen einen zusätzlichen Widerstand. Dieser fällt besonders groß aus, wenn der Knickwinkel groß ist, wie beim Loop- und auch beim Wingletflügel. In der Modellierung bleibt dieser Aspekt unberücksichtigt. So ist zu erwarten, dass bei einer realistischeren Modellierung der Loop- und der Wingletflügel etwas schlechter abschneiden würden.

**FAZIT.** Es wurden unterschiedliche Konzepte zur Gestaltung der äußeren Flügelenden eines Tragflügels bei gegebener Spannweite verglichen. Die Randbedingungen, die den Flugzustand und das Strömungsmedium charakterisieren, werden durch die Profilwiderstandszahl beschrieben. In dem vorgestellten Beispiel ist es die Profilwiderstandszahl, mit der unter anderem ein Weißstorch im Reiseflug fliegt. Es zeigt sich eine starke Abhängigkeit des Gesamt widerstands von der Strukturhöhe. Mit wachsender Strukturhöhe sinkt der Gesamt widerstand und steigt das Wurzelbiegemoment. Die Verminderung des Gesamt widerstands wird durch einen geringeren induzierten Widerstand erzielt, wobei ein Teil der Verminderung durch einen erhöhten Profilwiderstand kompensiert wird. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Flügelstrukturen sind moderat. Bei kleinen Strukturhöhen ist der Wingletflügel am widerstandsgünstigsten, bei größeren der Loopflügel. Der Wingletflügel überzeugt durch seinen einfachen Aufbau und die Möglichkeit, Klappen problemlos bis in den Bereich der äußeren Flügelenden integrieren zu können. Der mehrfach gespreizte Flügel mit gleichmäßig auf die Handschwingen verteilter Zirkulation glänzt durch sein geringes Wurzelbiegemoment.

Die Auslegung einer Flügelspitze ist findet in einem Spannungsfeld zwischen Strömungswiderstand, Wurzelbiegemoment und geometrischer Ausdehnung in vertikaler sowie horizontaler Richtung statt. Zukünftig

sollte daran gearbeitet werden, nichtplanare Konzepte auch für Klappensystem zu entwickeln. Bei Steigflug ist zwar die unmittelbare Treibstoffersparnis bedeutungslos, aber die Möglichkeit die Triebwerke entsprechend schwächer auszulegen, erscheint ziemlich lukrativ.

## 5. LITERATUR

- [1] Stache, M.: „Entwicklung von Tragflügelenden nach dem Vorbild des Vogelflügels.“ Diss. TU Berlin, Bionik und Evolutionstechnik (in Vorbereitung).
- [2] Staufenbiel, R. W.: „Structure of Lift-Generated Rolled-Up Vortices“. J. Aircraft. Vol. 21, No. 10, (October 1984), 737-744.
- [3] Truckenbrodt, E.: Fluidmechanik. 2 Bde. 2. Aufl. Berlin : Springer-Verlag, 1980 und 1969.
- [4] Truckenbrodt, E.: „Die Berechnung des Profilwiderstandes aus der vorgegebenen Profilform“. Ing.-Arch. 21 (1953), S. 176-186.
- [5] Rechenberg, I.: Evolutionsstrategie '94. Stuttgart : frommann-holzboog, 1994.
- [6] Prandtl, L.: „Tragflügeltheorie: I. und II. Mitteilung“. In: Prandtl, L.; Betz, A.: Vier Abhandlungen zur Hydrodynamik und Aerodynamik. Göttingen : Im Selbstverlag des Kaiser Wilhelm - Instituts für Strömungsforschung, 1927.