

Anhang zur Beschreibung des Programms *WinLaengs4*

Von Jörg Rußow und Dietrich Meissner

Anhang A: Aerodynamik und Flugmechanik

Was ist „Stabilität bezüglich eines Anströmwinkels“?

Betrachten wir zunächst eine Windfahne, Bild A1. Sie gibt uns ein Beispiel für ein stabiles Verhalten bezüglich eines Anströmwinkels.



Bild A1 : Windfahne

Eine Windfahne ist auf einer vertikalen Achse gelagert, um die sie sich beliebig drehen kann. Der Zeiger der Windfahne, in diesem Fall eine kleine Kugel, zeigt in die Richtung, aus der der Wind kommt, in diesem Fall nach rechts. Der aerodynamisch wirksame Teil der Windfahne ist eine vertikale Fläche, die in unserem Beispiel nach links zeigt, also in die Bewegungsrichtung der Luft. Bei dieser Windfahne befindet die aerodynamisch wirksame Fläche in Strömungsrichtung gesehen komplett hinter der Drehachse. Die Position der aerodynamisch wirksamen Fläche relativ zur Drehachse ist die entscheidende Größe, die man bei der Konstruktion einer funktionsfähigen Windfahne berücksichtigen muss.

Ändert der Wind seine Richtung, entsteht ein Winkel zwischen der momentanen Stellung der Windfahne und der neuen Windrichtung, der Schiebewinkel. Durch den Schiebewinkel entstehen Druckunterschiede zwischen den beiden Seiten der Fläche, hier in seitlicher also horizontaler Richtung. Diese Druckunterschiede erzeugen wiederum eine (horizontale) aerodynamische Kraft und durch den Hebelarm zwischen Kraft und Drehachse ein Drehmoment um die oben erwähnte vertikale Lagerachse. Die Windfahne dreht sich dadurch automatisch in die Windrichtung. Dieses Verhalten nennt man stabil, genauer: statisch stabil.

Bild A2 erklärt die Begriffe instabil, neutral und stabil für den Fall einer Kugel, die auf verschiedenen gewölbten Flächen liegt. Man beachte, dass alle drei Kugeln sich im Gleichgewicht befinden. Tritt nun eine Störung auf, z.B. ein kleiner seitlicher Stoß gegen die Kugel, dann zeigt nur die stabile Konfiguration die Tendenz, wieder die Ursprungslage einzunehmen. Kippt

man die Fläche, auf der sich die Kugel befindet, rollt die Kugel in eine neue Lage und bleibt dort liegen.

Bei der Kugel wird die rückführende Kraft nach einer Auslenkung durch eine seitliche Komponente der Kontaktkraft zwischen Kugel und Fläche im Zusammenspiel mit der Schwerkraft erzeugt. Die Kugel rollt zurück in Richtung Ruhelage, dann über diese hinaus und wieder zurück. Die Rollreibung wirkt dämpfend auf die Bewegung, so dass selbige nach einigen Schwingungen zur Ruhe kommt. Das bedeutet dann zusätzlich auch dynamische Stabilität.

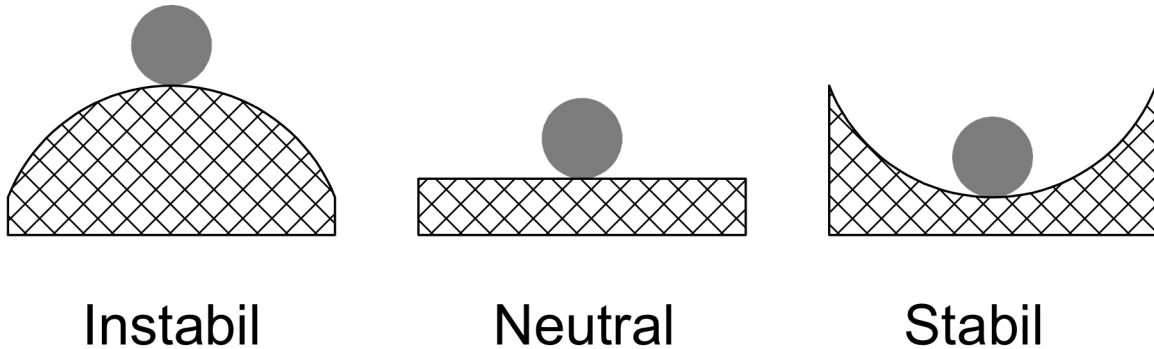


Bild A2: Stabilität

Bei der Windfahne besorgt die Aerodynamik ein Drehmoment, die Schwerkraft spielt hier keine Rolle. Wie anhand der Windfahne erläutert, muss ein Hebelarm mit dem richtigen Vorzeichen zwischen Kraftangriffspunkt und Drehachse vorhanden ist, damit ein entsprechendes Drehmoment entsteht, das die Fahne in die Strömung dreht. Das ist hier die Voraussetzung für ein stabiles Verhalten

Ist der Hebelarm gleich null, ist also die Drehachse mit dem aerodynamischen Kraftangriffspunkt identisch, entsteht kein aerodynamisches Moment (trotz der aerodynamischen Kraft). Das Verhalten ist neutral.

Ganz schlecht sieht es aus, wenn der Hebelarm das falsche Vorzeichen hat. In diesem Fall dreht sich die Windfahne nicht in die Strömung, sondern aus der Strömung. Das Verhalten wäre instabil. So eine Windfahne wäre nicht funktionsfähig.

Nur ein stabiles Verhalten ist für eine Windfahne ein sinnvolles Verhalten. Wie wir später noch sehen werden, ist das auch bei einem Flugzeug nicht grundsätzlich anders (von Ausnahmen abgesehen, die für den Modellflug zunächst nicht relevant sind).

Der Neutralpunkt

Der Angriffspunkt einer vom Anströmwinkel abhängigen aerodynamischen Kraft wird im Weiteren als Neutralpunkt (NP) bezeichnet, /5/. Der englische Begriff ist „Aerodynamic Center“, abgekürzt AC. Die „Neutralität“ bezieht sich darauf, dass in diesem Punkt das Nickmoment unabhängig vom Anstellwinkel ist.

Die Position des Neutralpunkts auf einer Fläche ist aber zunächst nicht bekannt. Es ist (bei Unterschallgeschwindigkeiten) nicht der Flächenmittelpunkt, wie man vermuten könnte. Der Neutralpunkt liegt deutlich weiter vorne bezogen auf die Anströmung. Bei aerodynamisch wirksamen Flächen mit großer Streckung (Spannweite groß gegenüber der Tiefe) befindet er sich bei etwa einem Viertel (25 %) der Tiefe. Bei der kleinen Streckung unserer Beispiel-Windfahne allerdings weiter vorne.

Bei der Beispiel-Windfahne in Bild A1 ist man ziemlich auf Nummer sicher gegangen, da die Drehachse in der Vorderkante der Fläche liegt. Der Neutralpunkt liegt damit auf jeden Fall hin-

ter der Drehachse. Das ergibt eine recht großes aerodynamisches Moment und damit eine große Stabilität. Man findet aber auch Wetterfahnen, bei denen ein (kleiner) Teil der aerodynamisch wirksamen Fläche vor der Drehachse angeordnet ist.

Bei einer Windfahne kann man im Zweifelsfall die Neutralpunktlage experimentell ermitteln. Dazu versetzt man die Drehachse solange nach hinten (in Strömungsrichtung), bis das Verhalten neutral oder bereits instabil wird und sich die Windfahne nicht mehr in die Strömungsrichtung dreht – der Neutralpunkt ist erreicht.

Wie viel Windfahne steckt in einem Flugzeug?

Bei einem Flugzeug haben wir zwei Anströmwinkel zu beachten. Das ist im Bild A3 dargestellt.

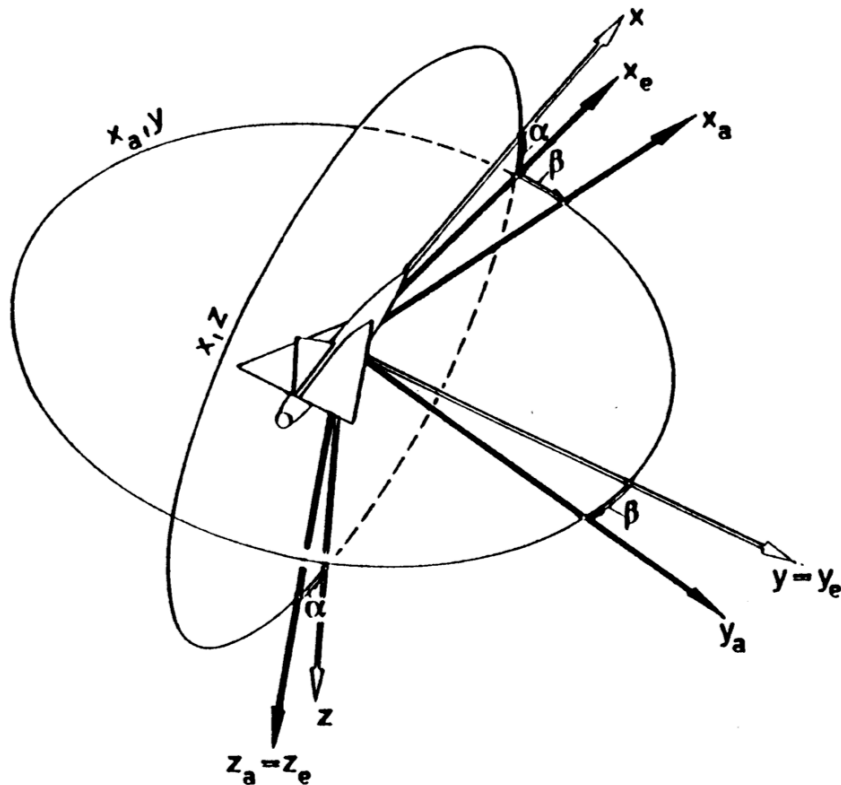


Bild A3: Anstellwinkel α und Schiebewinkel β

Der Pfeil x ist die (beliebig aber hoffentlich sinnvoll gewählte) Flugzeuglängsachse. Der Pfeil x_a zeigt in die Richtung der Fluggeschwindigkeit V , also in die Richtung, in die sich das Flugzeug gegenüber der umgebenden Luft bewegt. Man kann das auch gedanklich umdrehen und sagen, x_a zeigt in die Richtung, aus der die Anströmung durch den Fahrtwind kommt. In unserem Fall sieht das Flugzeug eine Anströmung etwas von unten rechts. Für diese Zusammenhänge ist die Lage des Flugzeugs im Raum nicht von Belang und im Bild nicht dargestellt!

Der erste der beiden Winkel ist der Schiebewinkel β , der sich ähnlich wie bei der Windfahne darstellt. Um den Schiebewinkel zu verringern und eine Drehung (gieren) um die im Normalflug vertikale Achse in die Anströmung sicher zu stellen, besitzt ein Flugzeug ein Seitenleitwerk. Auch bezüglich Schiebewinkels gibt es einen Neutralpunkt, der ebenfalls (wie der NP der Längsbewegung) hinter dem SP liegen muss. Die Schiebewinkelstabilität des Flugzeugs ist allerdings nicht der Fokus unserer Betrachtungen hier.

Stattdessen geht es bei *WinLaengs* um die Anstellwinkelstabilität. Der Anstellwinkel α ist der Differenzwinkel zwischen der Anströmrichtung und der Flugzeuglängsachse, er dürfte für die meisten Piloten ein bekannter Begriff sein, auch wenn er oft mit dem Längslagewinkel ver-

wechselt wird. Merke: den Längslagewinkel kann man auf Fotos messen, falls auch der Horizont zu sehen ist. Für den Anstellwinkel braucht man bewegte Bilder.

Ein statisch längsstabiles Flugzeug verhält sich bezüglich seines Anstellwinkels ähnlich wie eine Windfahne, die nun allerdings horizontal gelagert ist. Die relevante Kraft ist dabei die Auftriebskraft, die im Horizontalflug nach oben zeigt. Es gibt jedoch grundsätzliche Unterschiede:

1. Es gibt bei einem fliegenden Flugzeug keine erdfeste Drehachse wie bei der Windfahne. Die Drehungen werden hier um den Schwerpunkt ausgeführt und zwar für den Anstellwinkel um die Querachse und für den Schiebewinkel um die Hochachse.
2. Das stabilisierende aerodynamische Moment für den Anstellwinkel darf aus Gründen der Steuerbarkeit nicht beliebig groß sein. Man darf daher bei einem Flugzeug die Drehachse (also den Schwerpunkt) nicht beliebig weit vorne platzieren, d.h. keine übermäßig große Längsstabilität wählen.
3. Wir müssen gedanklich den durch die Wölbung von Flügel, HLW (und sonstige aerodynamisch wirksame Flächen) erzeugten Auftrieb ausblenden. Wir nehmen immer einen ausgetrimmten Flugzustand an, bei dem Momentengleichgewicht besteht. Ausgehend davon interessieren uns nur Änderungen der Auftriebskraft infolge eines (kleinen) zusätzlichen Anstellwinkels.

Anstellwinkelstabilität des Flugzeugs

Wir betrachten ein Flugzeug in einem ausgetrimmten Zustand, bei einem Motorflieger idealer Weise den stationären Horizontalflug und bei einem Segler einen entsprechenden stationären Bahnneigungsflug. Der Anstellwinkel eines Flugzeugs wird durch den Ausschlag des Höhenruders bzw. den Einstellwinkel des HLWs eingestellt (getrimmt). Soweit der Ausgangszustand, es ist ein momentenfreies Gleichgewicht und eine stationäre Bewegung.

Nehmen wir nun an, eine kleine Störung in der Längslage des Flugzeugs oder eine Böe würde den Anstellwinkel des Flugzeugs verändern. Als Reaktion auf eine Anstellwinkelvergrößerung soll das Flugzeug selbsttätig abnicken, also seine Längslage verkleinern (Drehung um die Querachse, in Bild A3 der Vektor y), was den Anstellwinkel verringert. Entsprechend umgekehrt bei einer Störung bedingten Anstellwinkelverkleinerung.

Um die Nickbewegung herbeizuführen, ist ein Moment erforderlich, das selbsttätig entstehen soll. Der stationäre Anstellwinkel eines Flugzeugs wurde vom Piloten durch das Höhenruder getrimmt, die nun erforderliche Stabilisierung dieses Zustands macht ein längsstabiles Flugzeug aber ohne Eingriff ins Höhenruder. Es dreht sich wie eine Windfahne in die Anströmrichtung. Man spricht dann von statischer Längsstabilität. Ohne diese statische Längsstabilität oder Anstellwinkelstabilität kann sich kein definierter Flugzustand einstellen, auch bei ruhiger Luft nicht.

Entscheidend für die Längsstabilität ist die Lage des Neutralpunkts (NP) des Flugzeugs zur Lage des Schwerpunkts (SP). Der NP ist definitionsgemäß der Punkt, an den die zusätzlichen aerodynamischen Kräfte infolge einer Anstellwinkeländerung angreifen. Aus den vorher genannten Aussagen lässt sich folgern, dass der SP vor dem NP liegen muss, damit statische Längsstabilität gegeben ist. Bei einer Böe entsprechend einer Anstellwinkelerhöhung führt der entstehende Zusatzauftrieb zu einem abnickenden Moment um den SP. Der Abstand bestimmt den Hebelarm der Luftkräfte. Ist er null (also SP gleich NP), ist auch die Stabilität null und es findet keine Drehung in Anströmrichtung statt.

Liegt der SP gar hinter dem NP, ergibt sich ein negativer Hebelarm und das Modell leitet bei der kleinsten Störung eine Nickbewegung ein, die den Winkel zur Anströmung weiter vergrößert. Ein instabiles Flugzeug muss laufend durch Höhenruderausschläge dazu überredet werden, seinen Anstellwinkel einzuhalten. Jeder, der einmal ein instabiles Flugzeug geflogen hat, weiß, wie schwierig das ist. Ein Freiflugmodell oder ein RC-Modell mit einem zu langsamen Piloten stürzen unweigerlich ab. Das entspricht dem Beispiel der Kugel auf dem Berg.

Eine ausreichende (aber nicht übertrieben große) statische Längsstabilität ist daher die erste Voraussetzung für gute Flugeigenschaften.

Die Suche nach einer sinnvollen SP-Lage ist daher zunächst eine Suche nach dem NP. Der zweite Schritt ist es dann festzulegen, wie weit der SP vor dem NP liegen soll. Je weiter vorne der SP liegt, umso größer ist die statische Längsstabilität. Allerdings ist es hier wie im richtigen Leben, dass viel nicht unbedingt viel hilft; es ist wichtig, das richtige Maß zu finden. Darauf kommen wir später noch zurück. Es lohnt sich also durchaus, etwas Aufwand zu investieren, damit unser neues Modell nicht kopflastig (SP weit vorn) oder gar schwanzlastig (SP weit hinten) ist.

Die Problematik lässt sich durch die folgenden Fragen ausdrücken:

1. Wo liegt der Neutralpunkt meines Flugmodells oder Flugzeugs?
2. Wie weit soll der Schwerpunkt vor diesem Neutralpunkt liegen?

Die „geometrische“ Suche nach dem Neutralpunkt

Die Lage des NP wird im Wesentlichen bestimmt der Geometrie und hier vor allem vom Grundriss, d.h. dem Aussehen aus der Vogelperspektive. Alle Bauteile des Flugzeugs tragen zur NP-Lage bei; neben Flügel und HLW auch der Rumpf, zumindest wenn er nicht gerade spindeldürr ist. Die Hochlage der Einzelteile hat ebenfalls einen Einfluss, allerdings ist dieser (meistens) zweitrangig. Die Dicke (also die Ausdehnung in Höhenrichtung) ist ebenfalls nicht entscheidend. Man kann sich einfach alles plattgedrückt vorstellen. Trotzdem, die Ermittlung des NP einer derartigen Konstellation ist nicht trivial, bei einem Nurflügler aber deutlich einfacher als z.B. bei einem Doppeldecker mit Höhenleitwerk, wie wir gleich sehen werden.

Schritt 1: Wir betrachten nur den Flügel

In der Vergangenheit wurden in den Modellflugzeitschriften alle Jahre wieder graphische Methoden vorgestellt, um die Neutralpunktlage von Einfach- oder Mehrfachtrapezflügeln zu ermitteln. Man vermisst den Grundriss des Flügels und zeichnet ihn dann maßstäblich auf. Die mittlere aerodynamische Flügeltiefe sowie der geometrische NP (das ist ein Punkt auf der 25 %-Linie) dieses Flügels ergibt sich dann nach etwas Zeichnerie. Natürlich kann man das auch in ein Programm füttern und berechnen lassen, dann erspart man sich das Zeichnen. Trotzdem bleibt es ein geometrisches Verfahren, da immer noch der geometrische NP ausgerechnet wird.

Für Flügel mit normal großer Streckung ist dieser geometrische NP tatsächlich fast identisch mit dem eigentlich gesuchten aerodynamischen NP (dieses isolierten Flügels). Für einen Nurflügler mit normal hoher Streckung, der nur aus diesem einen Flügel besteht, haben wir tatsächlich den relevanten NP ermittelt.

Jedoch bei stark gepfeilten Flügeln und/oder kleiner Streckung, wie bei Deltaflüglern oder der Concorde ähnlichen Konfigurationen, versagt das Verfahren, weil geometrischer und aerodynamischer NP nicht identisch sind. Dazu später mehr.

Für normale Flieger (Flügel-Leitwerk-Konfigurationen) wird meistens die Empfehlung gegeben, den SP etwas hinter diesen Flügel-NP zu legen, z.B. bei 30 % der Bezugstiefe. Man kann das machen, da man weiß, dass der Gesamt-NP (auf Grund des HLWs) weiter hinten liegt als der Flügel-NP. Wie weit er aber dahinter liegt, bleibt völlig offen, denn die Wirkung des HLW ist nicht wirklich berücksichtigt!

Schritt 2: Man fummelt das HLW dazu

Selbstverständlich kann man die gleiche Graphische Methode auch fürs Höhenleitwerk anwenden und erhält auch dessen NP-Lage. Aber wie kann man aus diesen beiden NP-Lagen nun zum Gesamt-NP des Flugzeugs kommen? Die Problematik ist die Folgende: Die aerodynamischen Eigenschaften der Einzelflächen ändern sich, wenn man sie in unmittelbare Nähe zueinander bringt. Es tritt eine gegenseitige Beeinflussung auf, man spricht von Interferenz. Voraus fliegende Flächen beeinflussen hinterher fliegende Flächen. Andersherum ist die Interferenz nicht so stark, aber auch vorhanden. Dabei beeinflussen sich nicht primär die Neutralpunktlagen, sondern vor allem die Auftriebsanstiege der Einzelflächen.

Bei einem konventionellen Flugzeug (genannt Drachen) ist der Flügel-NP ist meistens etwas vor dem SP und damit destabilisierend. Dagegen wirkt das HLW, das sich deutlich hinter dem SP befindet, stabilisierend. Allerdings kann es seine stabilisierende Wirkung nur zu einem gewissen Teil entfalten, da es sich im Abwind des Flügels befindet. Aus diesem Grund bleiben von der stabilisierenden Wirksamkeit eines typischen HLWs etwa 50 bis 80 % übrig. Zur Beschreibung dieses Abwindfaktors gibt es Formeln, die den Effekt annähern.

Frühere Versionen von *WinLaengs* und andere SP-Programme haben das genau so gemacht: Ermittle die geometrischen NPe der Einzelflügel und schätze die Lage des Gesamt-NP unter Berücksichtigung des Abwinds. Für die oben „Drachen“ genannten Konfigurationen mit genügend Streckung, wenig Pfeilung und HLW hinten führte das zu brauchbaren Ergebnissen.

Bei einer Ente ist das HLW durch seine Lage vor dem SP destabilisierend; dafür stabilisiert der Flügel hinter dem SP. Dabei ist unbedingt die Induktion in beide Richtungen zu berücksichtigen. Bei einem Doppeldecker wird es noch komplizierter. Auch hier gilt: Nur wenn die gegenseitigen Induktionen berücksichtigt werden, kann man den NP einer komplexen Konfiguration halbwegs präzise ermitteln. Und vergessen wir nicht den anderen Umstand: der geometrische NP eines Deltaflügels ist nicht identisch nicht dem aerodynamischen NP.

Für solche Konfigurationen (Deltas, Pfeilflügel, Enten) sind geometrische Verfahren nicht oder kaum geeignet, auch wenn unbelehrbare Programmierer das nicht deutlich sagen und/oder nicht wahrhaben wollen.

Die „aerodynamische“ Suche nach dem Neutralpunkt

WinLaengs4 soll möglichst alles können, deshalb lassen wir besser Physik und Mathematik ans Ruder (wie die Profis).

Gesucht ist ein Rechenverfahren, das Folgendes richtig berücksichtigen kann:

1. Den Einfluss einer kleinen Streckung und einer starken Pfeilung eines Flügels.
2. Die gegenseitige Induktion mehrerer Flügel aufeinander, egal wo sie sich befinden.

Für eine derartige Aufgabenstellung empfiehlt sich ein Wirbelleiter-Verfahren (Vortex Lattice Method), /6/. Alle Flügel werden in Teilflächen (Panel) aufgeteilt. In jedem Panel befindet sich ein Wirbel und ein Aufpunkt bzw. Kontrollpunkt. Aus der Geometrie ergibt sich, welchen Einfluss jeder Wirbel auf jeden Kontrollpunkt hat. Das führt auf ein lineares Gleichungssystem und das man wusste schon vor vielen Jahrhunderten zu lösen, wenngleich es früher nur „mit der Hand“ möglich war. Obwohl die Anzahl der Rechenoperationen zur Lösung des Gleichungssystems etwa mit n^3 zunimmt, ist das heute selbst bei $n = 1000$ (Panel) kein Problem mehr für einen handelsüblichen PC. Es dauert nur wenige Sekunden.

Für unsere Zwecke reicht ein einfaches Wirbelleiter-Verfahren, dass ohne Nachlaufiteration auskommt. Genaugenommen handelt es sich um die Lage bei NP bei kleinen bzw. bei normal großen Anstellwinkeln. Beim Überziehen kann der NP seine Position ändern, in der Regel verschiebt er sich nach hinten. Auch können Einflüsse des Widerstandes auf das Nickmoment vernachlässigt werden. Die treten allerdings nur bei nennenswerten Ablagen der Flügel in z-Richtung auf. Außerdem berechnet ein Wirbelleiter-Verfahren nur den induzierten Widerstand, es kennt keinen Widerstand infolge Reibung. Diese Einflüsse sind für „normale“ Flugzeuge nicht von Relevanz. Man sollte allerdings nicht versuchen, Hängegleiter oder Gleitschirme mit *WinLaengs4* zu berechnen.

Das Ergebnis der Berechnungen ist eine gute Näherung für die Position des (Gesamt-) NP des Modells, der sich aus Flügel-, Rumpf und HLW-Einflüssen zusammensetzt, bei normalen Flugzuständen. Und das ist genau, was wir brauchen.

Die Wahl der Schwerpunktlage

Wie oben begründet, wollen wir für unser Modell Längsstabilität sicherstellen. Sie ergibt sich aus der Lage des SP vor dem soeben berechneten NP. Es bleibt uns allerdings nicht erspart,

die Stabilität zu definieren, mit der wir fliegen wollen. Während die Berechnung des NP zwar aufwendig aber mathematisch recht klar definiert vor sich gehen kann und auch ein recht eindeutiges Ergebnis liefert, ist das bei der Wahl des Stabilitätsmaßes nicht ganz so.

Für die SP-Lage und somit auch die Längsstabilität jedes Flugmodells existiert immer ein sinnvoller oder (subjektiv) günstiger Bereich und nicht nur ein einziger Punkt, in dem sich vernünftige Flugeigenschaften ergeben. Der Bereich ist bei Flugzeugen mit konventionellem HLW (so genannte Drachenkonfiguration) deutlich größer als bei Enten (Höhenleitwerk vorn bzw. vorderer Flügel kleiner als hinterer). Das ist in Verbindung mit schlechteren Flugleistungen wegen eines größeren induzierten Widerstandes der Grund für die schlechtere Eignung von Enten als Transportflugzeug oder als Leistungssegler; demzufolge baut man so etwas auch nicht /2/, denn der sinnvolle SP-Bereich ist einfach zu klein. Auch bei Nurflüglern muss man genauer hinschauen.

Die statische Längs-Stabilität eines Flugzeugs lässt sich durch ein geometrisches Maß ausdrücken: Der SP liegt soundso viel Meter, Zentimeter oder Millimeter vor dem NP. Dieses Maß ist dann zwar zum Auswiegen nützlich, allerdings ist es keine maßstabsunabhängige Darstellung des Sachverhalts. Zur flugmechanischen Definition der Stabilität bezieht man sie daher meistens auf eine typische Länge des Flugzeugs. Üblich ist der Bezug auf die „mittlere aerodynamische Flügeltiefe“ l_μ , ein Wert, der von der Geometrie des Hauptflügels abgeleitet wird. (Es handelt sich nicht genau um die mittlere Flügeltiefe.)

Es bietet sich dann an, die Stabilität als einen Prozentsatz dieser Flügeltiefe anzugeben. Zur Veranschaulichung: 0 % bedeutet, dass keine Stabilität vorhanden ist, der Flieger ist indifferent (SP gleich NP). Ein negativer Wert bedeutet Instabilität (SP hinter NP), 30 % l_μ ist eine sehr (extrem) hohe Stabilität.

Der eine oder andere wird sich fragen, warum man keine möglichst hohe Längsstabilität wählt. Der Grund ist, dass (zu) viel Längsstabilität die Flugeigenschaften verschlechtert. Je nach Konfiguration wird die Anstellwinkelschwingung zu schwach gedämpft, die Phygoide (Modellfliegerlatein: das Pumpen) ebenfalls und der Langsamflug ist nicht mehr über vernünftige Höhenruderausschläge erreichbar. Die Verschlechterung in den Flugeigenschaften geht kontinuierlich, aber irgendwann bekommt man auch Probleme mit der Steuerbarkeit. Hier sind besonders Enten und Nurflügler im Nachteil, denn bei ihnen ist das HLW sehr stark aerodynamisch belastet bzw. gar nicht vorhanden. Bei entsprechenden Drachenkonfigurationen sind dagegen Längsstabilitäten von 30 % l_μ noch fliegbar, wenn auch nicht unbedingt sinnvoll.

Das Programm empfiehlt Stabilitätsmaße von 8 bis 16 % l_μ bei Modellen mit Flügel-HLW-Kombinationen; bei Nurflüglern dagegen 4 bis 8 % l_μ . Diese können als mittlere Stabilitätsmaße bezeichnet werden und lassen sich eigentlich bei jedem Flieger beherrschen und die Höhenruderwirksamkeit im Langsamflug ist bei normaler Auslegung auch kein Problem. Selbstverständlich kann es ein Ergebnis des Einfliegens sein, dass man später noch eine Verschiebung entsprechend der subjektiven Vorstellungen vornimmt. Besonders Seglerpiloten mögen gerne etwas weniger als 8 % l_μ . Daher kann man das Stabilitätsmaß im Programm bei Bedarf wählen.

Einige Bemerkungen zum Einfluss der Flügelprofile

Einige wird überraschen, dass keine Angaben über die verwendeten Profile an Flügel und HLW erforderlich sind. Das ist zunächst mal auch richtig so, denn alle Profile haben bei Anstellwinkeländerung etwa den gleichen Auftriebszuwachs, genannt Auftriebsanstieg. Nur auf diesen kommt es bei einer Stabilitätsrechnung an. Die Annahme bewirkt in der Abschätzung des günstigen Schwerpunktbereichs keine nennenswerte Ungenauigkeit /3/. Ausnahme: siehe nächstes Kapitel!

Allerdings ist das, was wir hier machen, keine vollständige flugmechanische Berechnung der Längsbewegung. Dazu gehört neben dieser vorgeführten Überprüfung der statischen Längsstabilität auch die der dynamischen Stabilität und der Steuerbarkeit. Der Aufwand dafür würde aber bei weitem den Umfang dieses Beitrags überschreiten und die erforderlichen Daten des Modells wären für kaum einen Modellflieger zu beschaffen. Glücklicherweise ist es aber nicht

unbedingt notwendig, diese zusätzlichen Untersuchungen durchzuführen, solange wir es mit normalen Konfigurationen von Flugzeugen zu tun haben.

Bei der Steuerbarkeit spielt die Profilierung und Verwindung von Flügel und HLW sehr wohl eine Rolle. Alle Nurflügler (also Flieger ohne Höhenleitwerk) haben entweder ein Flügelprofil mit positivem Nullmoment, oder einen gepfeilten und verwundenen Flügel, da sie sonst bei einer stabilen Schwerpunktlage keine ausgeglichene Momentenbilanz haben. Man sieht daran, dass bei negativem Nullmomentenbeiwert (also einem normal gewölbten Seglerprofil) kein beliebig kleines HLW verwendet werden kann oder dieses ganz weggelassen werden darf. Verwenden wir aber ein mindestens normal großes HLW (also mehr als etwa 8 % der Flügelfläche), sind dynamische Stabilität und Steuerbarkeit in aller Regel nicht mehr problematisch. Eine Berechnung der statischen Stabilität (also das, was wir hier machen) reicht dann aus, um den günstigen Schwerpunktbereich zu definieren, mit dem man das Einfliegen starten kann.

Es soll daher an dieser Stelle noch einmal ganz deutlich der landläufigen Meinung widersprochen werden, dass Modelle mit gewölbtem Flügelprofil (und daher negativem C_{m0}) grundsätzlich größere HLWs benötigen, um die statische Längsstabilität sicherzustellen. Ein Nullmoment geht in Stabilitätsrechnungen nicht ein.

Folgt man jedoch der oft gemachten Empfehlung, den SP in den Druckpunkt (nicht Neutralpunkt!) des Flügels zu legen, damit sich ein kräftefreies HLW (z.B. im Punkt des besten Gleitens) einstellt, ergibt sich bei einem betragsmäßig größeren C_{m0} ein weiter hinten liegender SP. Das wiederum erfordert eine Rückverlegung des NP, damit man genügend Stabilitätsreserve hat. Eine Rückverlegung des NP wird durch eine Vergrößerung des HLW erreicht. Leider wird dieser von-hinten-durch-die-Brust-ins-Auge-Zusammenhang in den meisten Modellflugartikeln und -büchern nicht schlüssig dargestellt (vielleicht weil er nicht verstanden wurde).

Ein weiterer Irrglaube ist es, dass das günstige Stabilitätsmaß vom C_{m0} des Flügels bzw. Flügelprofils abhängig ist, wie in /4/ dargestellt. Falls ein Modell im Schnellflug unterschneidet, liegt das möglicherweise an einem nicht biegesteifen Rumpfhinterteil oder nicht torsionssteifen Flügel. Man sollte da vielleicht seine Bauweise anpassen. Im Langsamflug ist das sowieso nicht relevant. Es bleibt bei den Ausführungen unklar, wieso die Profilwölbung Einfluss auf die Längsstabilität haben soll (wobei hier nur von nicht überzogenen Flugzuständen die Rede ist). Das beruht offensichtlich auf einem Missverständnis.

Auch Mr. Reynolds mischt manchmal mit

Bei langsam fliegenden kleinen Thermikseglern, Freiflugmodellen und Saalflugmodellen können sich allerdings Effekte einstellen, die ihre Ursache in Reynolds-Zahleinflüssen haben. Im Langsamflug kann es bei einer ungünstigen Profilwahl dazu kommen, dass die Umströmung "unterkritisch" wird. In diesem Fall steigt zum einen der Widerstand deutlich an, zum anderen kann es zu Unregelmäßigkeiten im Nickmomentenverlauf des Flügels bzw. des Gesamtflugzeugs kommen. Die Ursache kann der Flügel sein, aber auch ein ungeschickt gewähltes HLW-Profil würde durch ein nichtlineares Auftriebsverhalten über dem Anstellwinkel das Flugverhalten beeinträchtigen. Solche Nichtlinearitäten bei kleinen Reynolds-Zahlen sind

Man beobachtet z.B., dass das Modell bei einem normalen Langsamflug plötzlich etwas aufnickt und dadurch erst recht überzieht. Die Auswirkungen dieser Momentensprünge sind bei hinterer Schwerpunktlage (bzw. geringerer Längsstabilität) schwerwiegender als bei vorderer Schwerpunktlage.

Falls Sie so etwas bei einem Thermiksegler beobachtet, sollten Sie allerdings nicht unbedingt den SP verschieben, sondern versuchen, das Problem an der Wurzel zu packen. Hier gibt es die Möglichkeit, das Gewicht probeweise um ca. 10 bis 20 % durch Blei in SP-Nähe zu erhöhen, wodurch die Fluggeschwindigkeit um 5 bis 10 % ansteigt und damit auch die Reynolds-Zahl. Das könnte bereits reichen. Eine weitere Methode ist, die Flügelumströmung mit Hilfe von Turbulatoren überkritisch machen. Hier eignet sich z.B. Zackenband, das etwa 10 bis 20 % der örtlichen Flügeltiefe hinter der Flügelnase auf die Flügeloberseite geklebt wird. Freiflieger benutzen solche oder ähnliche Turbulatoren oft an ihren Modellen.

Wenn Ihnen ein Fliegerkollege den Tipp gibt, den SP nach vorn zu verlegen, weil Ihr Modell pumpt --- glauben Sie ihm nicht /1/! Überprüfen Sie zunächst, ob das Modell nicht zu hoch, also zu langsam, getrimmt ist oder ob der oben beschriebene Reynolds-Zahleffekt auftritt.

Literatur:

- /1/ K. Liese, J. Rußow, Flugmechanische Untersuchungen zum Pumpverhalten von Segelflugmodellen, *Flug- und Modelltechnik* 11/86, Verlag für Technik und Handwerk, Baden-Baden
- /2/ R. Eppler, Die Entwicklung der Tragflügeltheorie, Zeitschrift für Flugwissenschaft und Weltraumforschung (ZFW) 11 (1987), Seite 133-144
- /3/ J. Rußow, Das "tragende Höhenleitwerk" - oder, wie Missverständnisse entstehen, *Flug- und Modelltechnik* 2/88, Verlag für Technik und Handwerk, Baden-Baden
- /4/ F. Perseke, Das Segelflugmodell, Teil 3, S.113, Neckar-Verlag, Villingen-Schwenningen
- /5/ [https://de.wikipedia.org/wiki/Neutralpunkt_\(Strömungslehre\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Neutralpunkt_(Strömungslehre))
- /6/ https://en.wikipedia.org/wiki/Vortex_lattice_method

Ende Anhang A

Anhang B: Alles nicht so einfach!

Modell, Neckar-Verlag, Juni 2008



Alles nicht so einfach!

In **Modell 5** und **6/2007** stellten wir das Freeware-Programm WinLaengs4 vor, welches bei der Ermittlung des Schwerpunktbereichs hilft. In der Zwischenzeit sind einige Fragen aufgetreten, die die Macher des Programms an dieser Stelle einmal beantworten wollen.

Das Freeware-Programm WinLaengs4 hilft dem Modellflieger, wenn er einen Vorschlag für den Schwerpunktbereich für sein Modell sucht. Besonders bei gefeiltten Flügeln, bei schlanken Flügeln, bei Deltas, bei Doppeldeckern und bei Modellen mit breitem und nach vorne langem Rumpf fällt es schwer, den fürs Einfliegen erforderlichen sicheren Schwerpunktbereich mit Auge und/oder Daumen abzuschätzen. Hier hilft die Berechnung mittels WinLaengs4 weiter. Man muss das Modell dazu vermessen und die geometrischen Daten ins Programm eingeben. Durch die grafische Darstellung werden Eingabefehler meist gleich erkannt. Das Ergebnis ist die Lage des Neutralpunkts der Konfiguration und daraus lässt sich ableiten, in welchem Bereich der Schwerpunkt (SP) liegen sollte. Inzwischen wurden Fragen an die Autoren gestellt und in den Dis-

kussionsforen sind einige Threads zum Thema vorhanden. Daher sollen hier einige der Punkte aufgegriffen werden. Im Folgenden haben wir mal eine Diskussion nachgestellt, wie sie aus den gestellten Fragen hätte gut entstehen können:

Frage: Die Berechnung in WinLaengs4 stellt sicher nur eine Näherung dar, oder? Kann man sich auf das Ergebnis verlassen?

Antwort: Jeder Berechnung liegt ein mathematisches Modell zugrunde, das die physikalischen Vorgänge beschreibt; man muss die wichtigen Einflüsse berücksichtigen und lässt weniger wichtige weg. So auch bei WinLaengs4, das darin verwendete Wirbelleiter-Verfahren kennt z. B. keine Reibung und damit keine Reynoldszahl und keine überzogenen Flugzustände. Wenn man alles richtig eingegeben hat, dann bekommt man ein recht präzises Ergebnis für die Lage des

Neutralpunkts und einen sinnvollen Vorschlag für die zu wählende SP-Lage.

Frage: Ich verstehe nicht, warum man keine Profildaten eingeben muss? Nur die Grundrisse, also die Geometrie aus der Vogelperspektive, und die Höhenstaffelung der Flächen gehen in die Berechnung ein. Ist da nicht etwas Wichtiges vernachlässigt?

Antwort: Es wird lediglich mit der Annahme gearbeitet, dass der Auftriebsanstieg jedes Profils gleich ist. Das ist in guter Näherung auch der Fall, solange wir uns nicht in Bereiche geringer Reynoldszahlen oder in den Bereich nennenswerter Machzahlen begeben; Letzteres ist allerdings bei Modellflugzeugen weniger das Problem. Bei langsam fliegenden Freiflug- und insbesondere Saaf Flugmodellen ist die Neutralpunkt-Bestimmung möglicherweise ungenau, denn hier kann tatsächlich ein Einfluss der Reynoldszahl



vorhanden sein. Für normale und große RC-Modelle sind diese Einflüsse unerheblich. Die Autoren wünschen sich daher Rückmeldungen von Betreibern von Indoor- und Saalflugmodellen, ob diese auch mit der SP-Empfehlung von WinLaengs4 zufrieden sind.

Frage: Aber Profile sind doch verschieden stark gewölbt?

Antwort: Für die Bestimmung der Lage des Neutralpunkts (NP) spielt die Wölbung keine Rolle! Der NP ist der Angriffspunkt der anstellwinkelabhängigen Auftriebskräfte und das bestimmt die hintere sinnvolle SP-Lage. Wir müssen mit dem SP ein gewisses Stück vor dem NP bleiben, sonst ist unser Modell instabil in der Längsbewegung.

Die Wölbung an den Flügeln wäre wichtig bei der Bestimmung der vorderen möglichen SP-Lage. Das machen wir hier aber nicht! Wir wollen einen problemlosen SP-Bereich ermitteln und der liegt ein kleines Stück vor dem NP und niemals weit vorne, an der vorderen Grenze des Steuerbaren. Deshalb ist für uns die Wölbung der Profile unwichtig!

Frage: Das verstehe ich nicht. Wenn man bei meinem Segler das HLW mit einem tragenden Profil ausstattet, dann kann man doch den SP weiter nach hinten legen, als wenn das HLW ein symmetrisches Profil hat?

Antwort: Nein, kann man nicht. Das ist Unfug, der seit Jahrzehnten in Modellfliegerkreisen kursiert.

Frage: Aber das ist doch logisch. Wenn das Leitwerk Auftrieb beisteuert, dann kann der SP weiter hinten liegen.

Antwort: O. K., du redest von einer Trimmbedingung. Aber man kann (und muss) den Auftrieb am Leitwerk doch auch erhöhen, wenn man tief trimmt, also bei einem Klappenleitwerk die Klappe nach unten ausschlägt oder bei einem Pendelleitwerk mit symmetrischem Leitwerksprofil tief trimmt, also effektiv die EWD verkleinert. Das muss man nicht über die Wölbung des HLW-Profiles machen. Du hast insoweit Recht, dass wir das Modell so durchaus mit mehr Auftrieb am HLW wieder in ein Gleichgewicht bringen können und müssen, nachdem wir den SP nach hinten gelegt haben. Das Modell ist dann auch mit dieser weiter hinteren SP-Lage wieder ausgetrimmt.

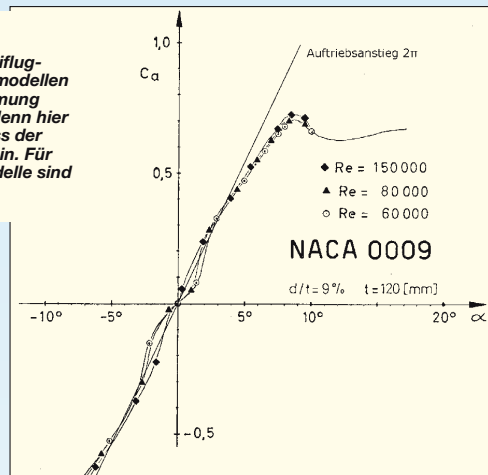
Nur, das löst nicht unser Problem! Das Fluggerät ist trotzdem instabil oder zumindest zu wenig stabil, weil ich das Stabilitätsmaß verkleinert habe, egal, was ich mit dem Profil am HLW mache. Wenn ich das zu weit treibe, dann habe ich den Fall der Kugel, die genau auf der Spitze eines Hügels liegt; tippe ich sie an, rollt sie weg.

Frage: Warum schreiben einige, dass man bei einem tragenden HLW-Profil den SP weiter nach hinten legen kann?

Antwort: Vielleicht, weil es ihnen logisch erschien und/oder weil sie es nicht besser wissen!? Welche Größen die Lage des NPs beeinflussen und dass der SP etwas davor liegen sollte, ist seit

Diagramm 1

Bei langsam fliegenden Freiflug- und insbesondere Saalflugmodellen ist die Neutralpunktbestimmung möglicherweise ungenau, denn hier kann tatsächlich ein Einfluss der Reynoldszahl vorhanden sein. Für normale und große RC-Modelle sind diese Einflüsse unerheblich



etwa 100 Jahren bekannt. Wenn sich diese Personen nicht informieren und stattdessen selbst eine „neue“ und falsche Flugmechanik erfinden, dann kann sie niemand daran hindern.

Frage: Dann ist ein tragendes HLW also Quatsch?

Antwort: Das habe ich nicht gesagt. Quatsch ist auf jeden Fall mal der Begriff „tragendes HLW“. Nur weil es nach oben gewölbt ist, erzeugt es noch lange keinen Auftrieb. Der richtet sich danach, welcher Auftrieb beim jeweiligen Flugzustand erforderlich ist und kann mal so rum und mal so rum sein. Ein gewölbtprofil am HLW kann durchaus Sinn machen. Es erlaubt aber nicht, den SP weiter nach hinten zu legen als bei einem symmetrischen Profil.

Frage: Wie ist das mit der Wahl der Längsstabilität? Die kann man vom Programm automatisch bestimmen lassen oder manuell eingeben. Damit komme ich aber nicht zurecht. Wann akzeptiere ich den automatischen Bereich und wann wähle ich selber einen Wert?

Antwort: Ja, das ist ein guter Punkt. Die Stabilitätsempfehlung in WinLaengs4 lautet 8 bis 16% I_{μ} Stabilität für einen Mehrflügler und 4 bis 8% I_{μ} für einen Nurfügler. Solange man nicht wirklich weiß, was man macht, sollte der jeweilige Bereich für den Beginn der Flugerprobung eingehalten werden. Auf die Berechnung des aerodynamischen Neutralpunkts hat das gewählte Stabilitätsmaß eh keinen Einfluss; es definiert lediglich, wie weit der SP vor dem berechneten NP liegen soll.

Frage: Das habe ich verstanden. Aber einige Modellfliegerkollegen sagen mir, die Empfehlung sei ihrer Erfahrung nach zu weit vorne. Sie fliegen mit weniger als 8% I_{μ} Stabilität, also mit dem SP weiter hinten bis kurz vor dem NP.

Antwort: Na prima, das können sie doch auch. Es ist trotzdem beim Einfliegen sinnvoll, vorsichtig zu sein. Beim Verschieben des SPs nach hinten entscheiden manchmal wenige Millimeter zwischen guten und schlechten Flugeigenschaften. Es ist daher geschickt, zunächst mit einer sicheren SP-Lage zu beginnen und dann seine subjektiv optimale SP-Lage zu erfliegen, die gerne etwas weiter hinten liegen kann. Für die meisten Modellflieger ist der automatische Bereich bereits das Richtige.

Frage: Das erscheint mir etwas Wischiwaschi! Warum kann man die richtige SP-Lage nicht gleich genau ausrechnen?

Antwort: Aus zwei Gründen: Erstens gibt es keine „richtige“ SP-Lage, denn die ist auch subjektiv bestimmt; zweitens muss die SP-Empfehlung etwas konservativ sein. Letzteres hängt mit den oben erwähnten Profileigenschaften zusammen, insbesondere bei langsamen Segelflugmodellen, denn hier schlägt Mr. Reynolds zu. Ideale Kurven für das Nickmoment und den Auftrieb laufen linear mit dem Anstellwinkel, solange wir das Profil nicht überziehen; diese Idealvorstellung ist in WinLaengs4 abgebildet. Im Langsamflug kann es aber zu Reynoldszahl-bedingten Problemen an Flügel und/oder HLW kommen, die sich durch unschöne Eigendynamiken des Fluggeräts bemerkbar machen. Je geringer die Längsstabilität, desto größer die Auswirkungen.

Schau dir mal das Diagramm an, das aus einer Profilvermessung in einem Windkanal stammt (Diagramm 1). Je nach Reynoldszahl entwickelt das Profil ein schwungvolles Eigenleben, anstatt sich an die „Idealkurve“ des Auftriebsanstiegs von 2π zu halten. Wenn man dieses Profil so am HLW einsetzt, wird man bei Flugzuständen mit geringer Geschwindigkeit und daher auch Reynoldszahl und bei HLW-Auftriebsbeiwerten um null herum möglicherweise diese Nichtlinearitäten bemerken. Am Flügel kann so etwas ebenfalls auftreten, wobei dort auch Schlenker in der Momentenkurve über dem Anstellwinkel Ärger bereiten können.

Frage: Kleine Reynoldszahlen also. Hmm, sollte man deswegen bei Thermikseglern grundsätzlich mehr Längsstabilität wählen als bei Hangflitzern?

Antwort: Nicht unbedingt. Solange der Thermiksegler garantiert im linearen Bereich betrieben wird, besteht keine zwingende Veranlassung zu mehr als etwa 8% I_{μ} Stabilität. Zeigt er aber die erwähnten Macken, sollte man zunächst



die Fluggeschwindigkeit durch Ballast im Schwerpunkt erhöhen oder einen Turbulator am Profil anbringen und nur notfalls den SP etwas nach vorne legen. Letzteres lindert zumindest das Problem, das durch die etwas unglückliche Auslegung, sprich Profilwahl, entsteht.

Aber auch ohne ernsthafte Probleme kann der subjektiv optimale SP durchaus eher bei 16% I_{ij} liegen. Beim Nachrechnen von drei Freiflugmodellen der Wettbewerbsklasse A2 mittels WinLaengs4 ergab sich mit der angegebenen SP-Lage eine Stabilität von 20 bis 25% I_{ij} . Man sollte allerdings dabei folgende Punkte bedenken: Erstens könnte die niedrige Reynoldszahl auch hier einen Einfluss haben und zwar dahingehend, dass der wirkliche aerodynamische NP etwas weiter vorne liegt (geschätzt 3 bis 4% I_{ij}), als ihn das (reibunglose) Wirbelleiterverfahren bestimmt. Zweitens würde man das gleiche Modell ferngesteuert vermutlich anders austrimmen und zwar mit etwas weniger Stabilität, also einen etwas weiter hinten liegenden SP wählen.

Frage: Bei großen Seglern und bei Hangflitzern sind diese Probleme also unwahrscheinlich und ich kann gleich weniger Stabilität einbauen?

Antwort: Nun, man wird sicher mit der hinteren SP-Empfehlung, also 8% I_{ij} Stabilität, bereits auf dem richtigen Pfad sein, auch wenn man letztlich vielleicht noch weniger einstellt, also den SP etwas weiter hinten als die Empfehlung von WinLaengs4 wählt. Voraussetzung für gute Flugeigenschaften bei geringer Längsstabilität ist allerdings ein einwandfrei neutralisierendes und leichtgängiges Höhenruder ohne Spiel. Sonst wird man nicht glücklich.

Frage: Wie ist das mit dem Einstellwinkel der Flügel sowie deren Differenz zueinander, also der EWD. Warum muss man das nicht eingeben oder bekommt die erforderliche EWD bei der Berechnung heraus?

Antwort: Nun, die EWD beeinflusst gar nicht die Stabilität, sondern sorgt lediglich für den richtigen Trimpunkt, also die gewünschte Fluggeschwindigkeit bei Neutralstellung des Höhenruders. Wenn die eingebaute EWD nicht stimmt, steht das Höhenruder nach dem Austrimmen (auf die Normalgeschwindigkeit des Modells) nicht auf „null“. Sicher, es wäre nicht schlecht, auch die „richtige“ EWD vor dem Einfliegen zu kennen, insbesondere bei einem Freiflugmodell. Um diese zu ermitteln wäre allerdings die Eingabe von wesentlich weiter gehenden Daten des Modells erforderlich. Dafür ist WinLaengs4 nicht eingerichtet. Sorry, also keine EWD!

Frage: Bei meinem Modell sind die Flügel an den Rumpf gesteckt. Ich habe dann die Flügel so vermaßt, wie sie tatsächlich sind, d. h. die Wurzelrippe liegt nicht in der Symmetrieebene des Modells, sondern um die halbe Rumpfbreite weiter außen. Wenn ich das so eingabe, erscheint die Warnung vor einer Lücke im Flügel.

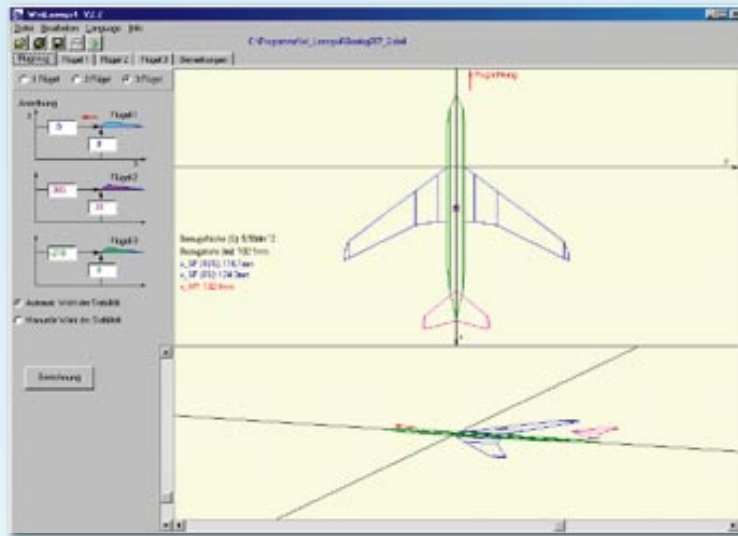


Bild 1: WinLaengs4 gibt die Möglichkeit, den Rumpf als weitere Fläche zu beschreiben. Hier ein Beispiel, bei dem der Rumpf weitgehend realistisch beschrieben ist

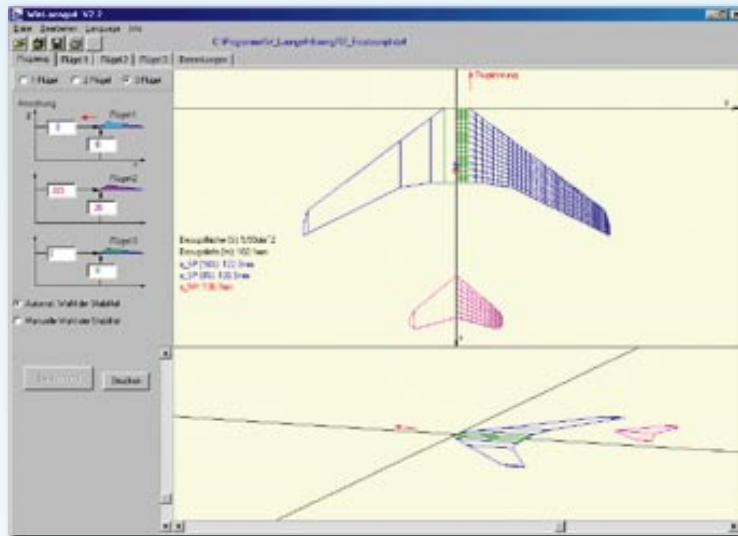


Bild 2: In diesem Fall wurde nur die Lücke im Flügel durch ein entsprechendes Rechteck geschlossen – genauso gut hätte man auch den Flügel durchstraken können. Man erkennt einen gewissen Einfluss auf die berechnete NP-Lage

Antwort: Das soll daran erinnern, dass man in diesem Fall nicht vergessen darf, den Rumpf auch als Fläche zu beschreiben. Er befindet sich genau in dieser Lücke zwischen den Wurzelrippen. In den meisten Fällen wird man auf einen Rumpf verzichten können und man strakt den Flügel bis zur Symmetrieebene durch, ohne eine Lücke! Es liegen Beispieldatensätze bei, bei denen das Dazwischenfummeln eines Rumpfs zwischen die auseinandergezogenen Flügelwurzeln ausgeführt ist.

Frage: Wie ist das mit dem Teil des Flügels, der innerhalb des Rumpfs liegt? Trägt der genauso, als wenn der Rumpf

nicht da wäre? Woher weiß ich denn, ob ich den Flügel durchstraken kann oder ob ich den Rumpf als extra Fläche modellieren muss?

Antwort: Das ist so nicht in einem Satz zu beantworten. Im Zweifelsfall rechnet man alle Varianten, dann erkennt man den Einfluss. An folgendem Beispiel lässt sich der Einfluss ablesen (siehe Bild 1 bild 3):

Im ersten Bild ist der Rumpf weitgehend realistisch beschrieben, im zweiten ist nur die Lücke im Flügel durch ein entsprechendes Rechteck geschlossen – genauso gut hätte man auch den Flügel durchstraken können. Man sieht einen

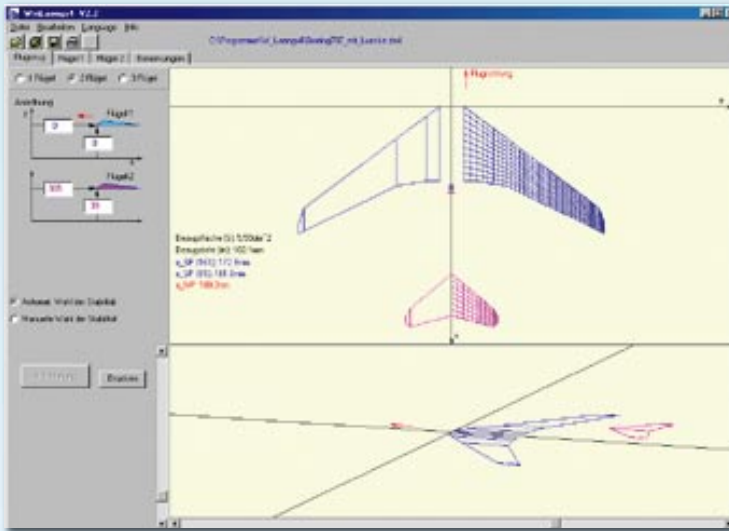


Bild 3: Dieses Bild zeigt, was man auf keinen Fall machen darf: Wenn eine Lücke zwischen den Flügeln klafft, kommt nur Unsinn raus

gewissen Einfluss auf die berechnete NP-Lage. Was man aber auf keinen Fall machen darf, ist in Bild 3 gezeigt. Wenn man die Lücke offen lässt, kommt nur Unsinn raus.

Frage: O. K., ich verspreche, niemals eine Lücke im Flügel zu lassen, ohne sie durch ein Rumpfstück zu schließen! Ich

habe aber bemerkt, dass WinLaengs4 „eigenmächtig“ die Höhenposition der eingegebenen Flügel ändert.

Antwort: Ja, das passiert, allerdings nur dann, wenn man in den Eingabedaten hintereinander herfliegende Flügel genau oder fast genau auf gleicher Höhe platziert. Dieser Fall muss ausgeschlossen

werden, denn er würde unter Umständen zu numerischen Problemen bei dem zugrunde liegenden Berechnungsverfahren führen. Liegt das HLW bei deinem Modell zufällig auf gleicher Höhe wie der Flügel, dann berechne einfach den Fall bei einem anderen Anstellwinkel. Bei mehr angestelltem Modell liegt das HLW (bzw. der hintere Flügel) weiter unten und bei weniger Anstellung weiter oben. In den meisten Fällen ist der Einfluss auf die Lage des Neutralpunkts gering und beträgt nur wenige Millimeter.

Schluss

So weit also diese imaginäre Diskussion mit dem Autor. Sie soll zeigen, wo den interessierten Modellflieger ohne wissenschaftliche Bildung auf dem Gebiet Flugphysik erfahrungsgemäß der Schuh drückt. Vielleicht sollte man bei Gelegenheit das Thema „tragendes HLW“ noch einmal systematisch ausführen. Nicht, dass sich der Autor einbilden würde, das Thema und die obskuren Ansichten darüber wären dann ein für alle Mal vom Tisch. Allerdings ist es eine Möglichkeit für den an Flugmechanik interessierten Leser, etwas dazuzulernen. Der Autor verspricht, das zeitnah nachzuschreiben. Leider ist dieses Beispiel mit dem „tragenden HLW“ nur ein Beispiel von vielen. Es gäbe noch einiges mehr geradezurücken.

Ende Anhang B

Anhang C: Mythos EWD

Modell, Neckar-Verlag, November 2010

Modell BLICKPUNKT

Was EWD und Schwerpunkt bewirken – und was nicht



Jörg Rußow

Mythos EWD

Kaum ein anderes Thema aus dem Bereich Flugphysik und Flugmechanik wird unter Modellfliegern auf den Plätzen und im Internet so ausgiebig diskutiert wie die (richtige) Schwerpunktlage und was damit zusammenhängt. Inzwischen sind mehrere PC-Programme verfügbar, die dem interessierten Modellflieger den Weg zum sinnvollen Schwerpunktbereich weisen, und manche geben auch Hinweise auf die einzustellende Einstellwinkeldifferenz (EWD). Dabei wird gelegentlich der Eindruck erweckt, beide Werte – also SP-Lage einerseits und EWD andererseits – hätten die gleiche Relevanz für die Flugeigenschaften. Um genau dieses Missverständnis geht es nachfolgend.

Um einen aus Flugeigenschaftssicht sinnvollen SP-Bereich zu ermitteln, bedient man sich am besten des PCs. Ausgerüstet mit der richtigen Software lässt sich das in wenigen Sekunden ausrechnen, wenngleich das Ausmessen der Geometrie des Flugmodells, je nach Komplexität, eine Weile dauern kann. Aus der Zusammenarbeit von Dietrich Meissner und dem Autor stammt eins dieser Längsstabilitätsprogramme; es ist in der Windows-Version als WinLaengs4 frei erhältlich und kann jeweils in der aktuellen Version von Dietrich Meissners Homepage http://home.arcor.de/d_meissner/schwerp.htm oder direkt auf der Seite des Neckar-Verlags unter www.neckar-verlag.de geladen werden.

WinLaengs4 berechnet aus der Geometrie des Modells den Neutralpunkt (NP) und schlägt dann einen sinnvollen Bereich für die Lage des Schwerpunkts, relativ zu diesem NP, vor. Bekanntlich muss der SP vor dem NP liegen, um die statische Längsstabilität (d. h. Anstellwinkelstabilität) sicherzustellen. Bei (zu



Hallo Herr Rußow,
 ich habe da mal eine Frage an Sie.
 Ich habe den Schwerpunkt eines »Bergfalke Mü 13e« mit WinLaengs4 berechnet. Ich nehme an, dass das Programm auch mit vorgepfeilten Tragflächen zurechtkommt.
 Jetzt stellt sich noch die Frage, welche EWD eingestellt werden soll. Momentan sind 2,4° EWD auf der »Mü 13e«, das scheint mir ein wenig zu viel. Der Vorbesitzer meinte auch, dass der »Bergfalke« sehr »stumpf« fliegt. Ich würde die EWD auf 1,5° zurücknehmen und für den Erstflug den Schwerpunkt auf eine Stabilität bei 12% einstellen. Für die 12% habe ich 600 g Blei aus dem »Bergfalken« genommen, das irritiert mich nun doch ein wenig.
 Nun meine Frage an Sie: Der Schwerpunkt ist doch von der EWD abhängig? Wie kann ich den Schwerpunkt ohne Eingabe der EWD berechnen? Setzt das Programm einen Standardwert fest oder kann ich die EWD auch eingeben?
 Im Voraus schon mal besten Dank.
 Fredi Flieger

wenig statischer Längsstabilität lässt sich das Modell nicht sauber fliegen und man hat u. a. Probleme mit einem „Eierflug“ oder mit unterschneiden im Schnellflug.

Ein (zu) hohes Stabilitätsmaß ist allerdings auch nicht so toll. Zwar führt es zu einem schnellen Ausgleich des Anstellwinkelfehlers, aber auch zu einer (zu) schlechten dynamischen Stabilität, denn die Größen „Bahnwinkel“, „Längslage“ und „Geschwindigkeit“ sind auch noch da. Bis sich die Chose wieder beruhigt hat, dauert es eine Weile. Das kann zum „Pumpen“ führen, zumindest bei einem Thermiksegler. Ergo sucht man sich eine SP-Lage im mittleren Bereich, bei der man die Flugeigenschaften subjektiv am besten findet.

Noch einmal zur Erinnerung: Die SP-Lage bestimmt die Flugeigenschaften und beeinflusst die Trimmung des Flugzustands, die EWD dagegen dient lediglich zur Trimmung. Die SP-Lage ist daher nach Flugeigenschaftskriterien zu wählen, denn die Trimmung kann man anschließend immer noch über die EWD oder ersatzweise durch einen Höhenruderausschlag in Ordnung bringen. Dazu später mehr.

WinLaengs4 schlägt also einen SP-Bereich vor, macht aber keinerlei Aussage über die einzustellende EWD. In welcher Form, das zeigt eine typische Zuschrift, basierend auf einer „true story“!

Für jede Frage eine Antwort

Gehen wir diese Anfrage einmal Stück für Stück durch.

Zitat: Ich habe den Schwerpunkt eines »Bergfalke Mü 13e« mit WinLaengs4 berechnet. Ich nehme an, dass das Programm auch mit vorgepfeilten Tragflächen zurechtkommt.

Antwort: Pfeilungen werden bei WinLaengs4 berücksichtigt, ebenso wie der Einfluss der Zuspitzung und alle anderen relevanten geometrischen Größen. Es gibt ein paar Einschränkungen bei kleinen Reynolds-Zahlen; das spielt in diesem Fall aber keine Rolle.

Zitat: Jetzt stellt sich noch die Frage, welche EWD eingestellt werden soll. Momentan sind 2,4° EWD auf der »Mü 13e«, das scheint mir ein wenig zu viel. Der Vorbesitzer meinte auch, dass der Bergfalke sehr »stumpf« fliegt. Ich würde die EWD auf 1,5° zurücknehmen und für den Erstflug den Schwerpunkt auf eine Stabilität bei 12% einstellen. Für die 12% habe ich 600 g Blei aus dem »Bergfalken« genommen, das irritiert mich nun doch ein wenig.

Antwort: Nun, bei vielen Seglern ist laut Plan der SP ziemlich weit vorne ausgewiesen, ohne dass das wirklich so sein muss. Das Programm WinLaengs4 stellt (bei richtiger Anwendung) sicher, dass die SP-Lage und damit die Längsstabilität in einem sinnvollen Bereich liegt. Bei Verwendung der Automatik in WinLaengs4 wird ein Bereich von 8 bis 16% Stabilität empfohlen, da liegen die von Ihnen gewählten 12% mittendrin. Mit einer SP-Lage in diesem Bereich muss das Modell auf jeden Fall vernünftig fliegen. So würde ich auch anfangen und anschließend stufenweise weiter mit dem SP nach hin-

ten gehen, bis sich die Flugeigenschaften subjektiv verschlechtern. Ich habe noch nie den Fall gehabt, dass ein RC-Segler bei mehr als 12% Längsstabilität am besten flog, aber durchaus den Fall, dass die Flugeigenschaften bei weniger als 10% subjektiv als optimal empfunden wurden.

Zitat: Nun meine Frage an Sie. Der Schwerpunkt ist doch von der EWD abhängig?

Antwort: Nun, es ist andersherum. Die SP-Lage (relativ zum NP) bestimmt die Längsstabilität. Das ist der wichtige Wert, nicht die EWD! Bei Ihrer Aussage wackelt der Schwanz mit dem Hund!

Die EWD brauchen wir nur zum Austrimmen auf die gewünschte Flugeschwindigkeit (bzw. den Anstellwinkel und damit den CA-Wert). Abhängig davon, welche SP-Lage man wählt, muss man die EWD anpassen. Bei vorderer SP-Lage (15 bis 25% Stabilität) braucht man mehr EWD als bei hinterer (2 bis 10%), damit das Modell auf die gleiche Geschwindigkeit ausgetrimmt ist. Die EWD ist also von der gewählten SP-Lage abhängig. Man passt sie einfach an, wie man es braucht.

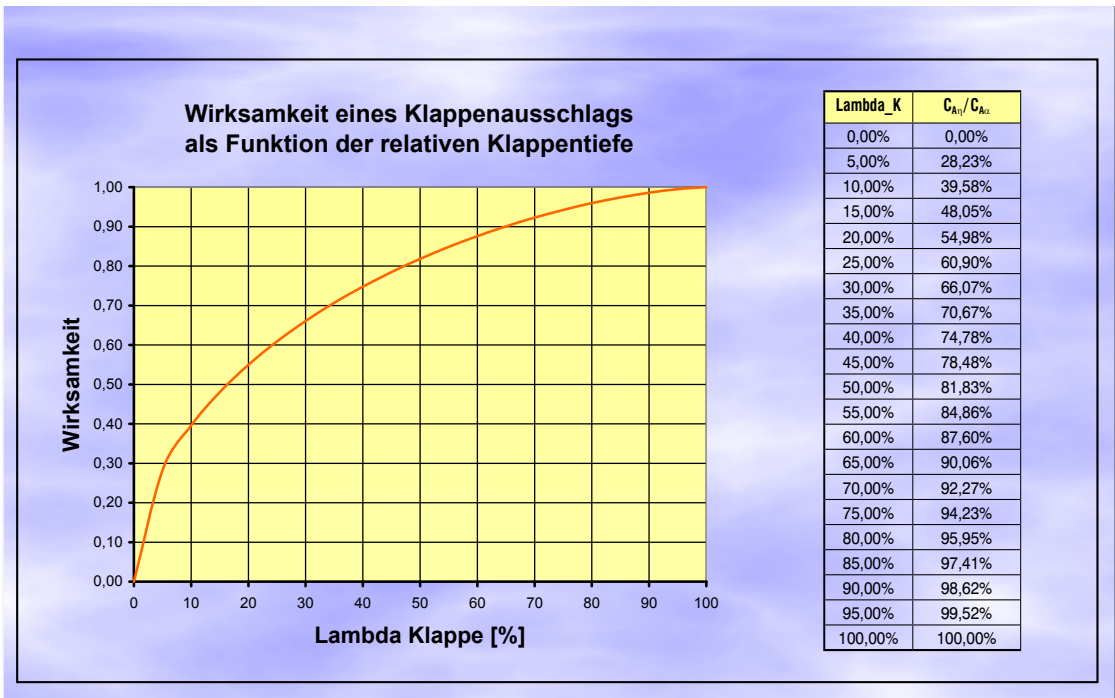
Zitat: Wie kann ich den Schwerpunkt ohne Eingabe der EWD berechnen? Setzt das Programm einen Standardwert fest oder kann ich die EWD auch eingeben?

Antwort: Weder noch, es ist keinerlei Vorgabe der EWD erforderlich, um den sinnvollen SP-Bereich abzuschätzen. Welche EWD das Modell wirklich braucht, stellen Sie am besten beim Einfliegen fest. Wenn die EWD nicht stimmt, müssen Sie beim Erstflug nach dem Abheben bzw. Handstart gleich mal zur Höhentrimmung greifen. Nach dem Eintrimmen steht das Ruder nicht mehr gerade. Falls das nur wenig ist, könnte man das auch so lassen. Bei größeren Abweichungen des Klappenwinkels von Neutral wird man den Einstellwinkel der Höhenflosse (oder des Flügels) korrigieren, sodass die Höhenruderklappe im Normalflugfall wieder auf Neutral steht. Eine EWD-Anpassung sollte man aber erst machen, nachdem man sich auf eine SP-Lage festgelegt hat! Die Größe der EWD in Grad ist eigentlich völlig egal! Wenn der »Bergfalke« »stumpf« fliegt, dann nicht wegen einer falschen EWD, sondern wegen einer falschen (vermutlich zu weit vorne liegenden) SP-Lage.

Die Hintergründe

So weit zu den Fragen des Anwenders des Längsstabilitätsprogramms WinLaengs4 und den gegebenen Antworten. Das Programm beschäftigt sich ausschließlich mit der Frage der Längsstabilität und nicht mit Fragen der Trimmbarkeit; Letztere wird vorausgesetzt.

Für die Berechnung der „richtigen“ EWD bzw. der Trimmbedingung wären zusätzliche Eingabegrößen erforderlich: das C_{m0} der Flügel- und HLW-Profilen und die Verwindungen oder Profilverläufe der Flügel. Das zu ermitteln ist deutlich aufwändiger als die Größen für die NP-Bestimmung. In WinLaengs4 ist konsequent

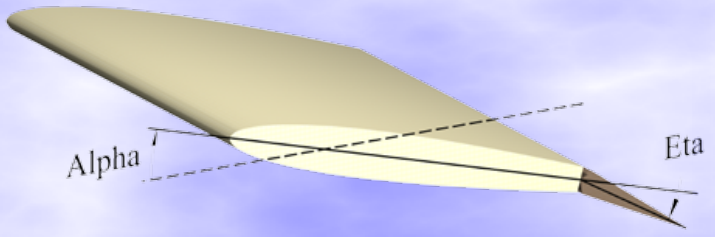


alles weggelassen, was nur Einfluss auf die Trimmung hat. Die Stabilität steht im Vordergrund.

Nun ist zwar die SP-Lage entscheidend für die Flugeigenschaften, trotzdem – es gibt zwei rein praktische Gründe, warum man die richtige EWD gerne vor dem Einfliegen wissen und in das Modell einbauen will. Hier soll am Beispiel einer zu groß gewählten EWD besprochen werden, was das für Auswirkungen hat; entsprechend andersherum verhält es sich bei zu kleiner EWD.

1. Bei zu großer EWD (für die gewählte SP-Lage) wird das Modell gleich beim Abheben oder Wegwerfen auf „Hoch“ weggehen und benötigt einen – je nach Größe des EWD-Fehlers – beherzten Eingriff des Piloten in Richtung „drücken“. Anschließend wird man den Trimmzieher bemühen und das Höhenruder des ausgetrimmten Modells dauerhaft in Richtung „Tief“ verstellen. Eine richtige EWD vereinfacht also das Einfliegen, weil weniger gesteuert und getrimmt werden muss; und das schont die Nerven.
2. Das Höhenruder steht nach dem Einfliegen auf „Tief“; das ist auf jeden Fall ein Schönheitsfehler. Einfluss auf die Flugeigenschaften hat das zunächst nicht.

Nur wenn die EWD (zufällig) genau stimmt, wird das Höhenruder nach dem Einfliegen immer noch exakt gerade stehen. Bei habhaften Abweichungen von der Nullstellung könnte man bestrebt sein, die EWD anzupassen. Aus der folgenden Formel kann man näherungsweise ermitteln, um wie viel die Flosse verstellt werden muss, um den Ausschlag des Höhenruders zu kompensieren:



Definition von Flossenstellwinkel Alpha und Höhenruderklappenwinkel Eta

$$\frac{C_{A\eta}}{C_{A\alpha}} = \frac{\arcsin \sqrt{\lambda_k} + \sqrt{\lambda_k + (1 - \lambda_k)}}{\arcsin(1)}$$

Dabei sind α = Anstellwinkel der Flosse, η = Ausschlagwinkel der Klappe und λ_k = relative Klappentiefe. Die meisten relativen Klappentiefen λ_k betragen 0,2 bis 0,5 bzw. 20 bis 50%. Ein λ_k von 1 bzw. 100% bedeutet ein Pendelruder.

Ein Pendelruder bzw. eine Verstellung der Flosse (mit daran befestigtem Ruder) ist, bezogen auf den gleichen Ausschlagwinkel, am wirksamsten. Andererseits hat ein Höhenleitwerk mit einer Ruderklappe von nur 16% relativer Tiefe bereits eine Wirksamkeit von 50% verglichen mit einem Pendelruder gleichen Verstellwinkels.

Betrachten wir die Sache doch etwas genauer und sehen uns die Verhältnisse bei einem praxisnäheren Klappenverhältnis von $\lambda_k = 0,3 = 30\%$ an. Das HLW besteht also aus Höhenflosse und Höhenruder im Verhältnis 70 zu 30% der

Tiefe des Höhenleitwerks. Hier beträgt die Wirksamkeit bereits 66% von der eines Pendelruders mit gleichem Ausschlagwinkel, ebenfalls aus der Tabelle zu ersehen.

Was will uns das sagen?

Wäre die EWD dieses Modells beispielsweise um 1° zu groß (also in Richtung „ziehen“), muss man das durch einen entgegengesetzten Höhenruderausschlag von $1^\circ/0,66 = 1,5^\circ$ in Richtung „drücken“ kompensieren. Entsprechendes gilt im umgekehrten Fall: Wäre die EWD um 1° zu klein, braucht man $1,5^\circ$ Klappenausschlag in Richtung „ziehen“.

Dieser Zusammenhang zwischen EWD bzw. Flosseneinstellung und Höhenruder(trimm)ausschlag ist in folgenden Bildern dargestellt. Es handelt sich um ein und dasselbe Höhenleitwerk, bei dem die Höhenflosse mit drei verschiedenen Einstellwinkeln angebaut ist. Damit man das im Bild gut sichtbar darstellen kann, sind die Winkel um den Faktor 5 vergrößert gewählt.

Beim ersten Fall ist der Einstellwinkel um 5° zu klein und damit die EWD um eben diesen Betrag zu groß, beim zweiten ist es gerade richtig und beim dritten ist die EWD 5° zu klein. Bei dem HLW mit „falscher“ Einstellung muss die Wirkung der Flosse durch einen gegensätzlichen Ausschlag des Ruders kompensiert werden, in diesem Fall ein Betrag von $7,5^\circ$. Dadurch wird von allen drei HLWs die gleiche Auftriebskraft erzeugt und diese ergibt mit dem Hebelarm zum SP ein Nickmoment.

Anmerkung: Der kleine Anteil des HLW-Nullmoments beim Klappenausschlag ist hier vernachlässigt; es wird davon ausgegangen, dass das vom HLW erzeugte Nickmoment nur aus dem Auftrieb des HLWs resultiert. Der von den drei unterschiedlich eingestellten HLWs erzeugte Auftrieb muss auch nicht notwendigerweise null sein. Wichtig ist nur, dass in allen drei Fällen die gleiche Auftriebskraft erzeugt wird.

Das einzige sinnvolle Kriterium dafür, ob die gewählte und eingebaute EWD „richtig“ oder „falsch“ gewählt wurde, ist die Abweichung der Trimmstellung des Höhenruders von der Neutralstellung! Selbstverständlich ist ein Beispiel mit 1° realistischer als die für die Abbildung 1 gewählten 5° Fehlwinkel der EWD. Und der für diesen kleineren EWD-Fehler von 1° ermittelte Höhenruderausschlag von $1,5^\circ$ ist nicht in einer Größenordnung, dass man ihn unbedingt durch eine Verstellung der Flosse eliminieren muss! Nur eine grob falsche EWD würde sich in den Flugeigenschaften bemerkbar machen, weil das Ruder bereits für den Normalflug recht weit ausgeschlagen ist. Dann ist mit erhöhtem Widerstand zu rechnen, vor allem aber könnte das HLW nicht mehr in der Lage sein, die erforderlichen Auf- und Abtriebe zu liefern, wenn man es zusätzlich in dieser Richtung weiter ausschlägt. Es könnte überziehen. Bei Höhenruderausschlägen wegen falscher EWD in der Größe von einem oder zwei Grad tritt dieser Fall nicht ein.

Ein so verstelltes HLW ist vergleichbar mit einer Tragfläche, die nur mit ausgeschlagenen Querrudern geradeaus fliegen will. Sie hat einen Verzug und/oder die Flächenhälften haben unterschiedliche Einstellwinkel. Auch hier wird man bestrebt sein, den Verzug zu beseitigen, um die Querruder wieder auf Neutral zu bringen, falls sie deutlich ausgeschlagen werden müssen. Ausschläge in Größe der Hinterkantendicke des Ruders sind nicht von Bedeutung. In dieser Größen-

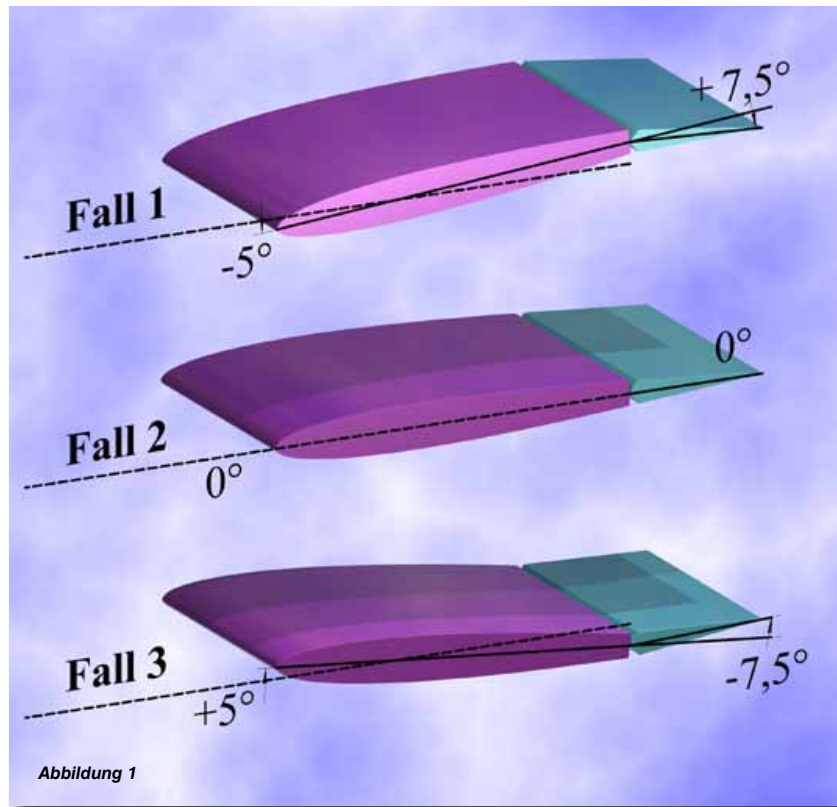


Abbildung 1

ordnung ändert sich bereits die Höhenruderstellung, wenn man bei einem Segler von der Fahrt des geringsten Sinkens auf die Fahrt des besten Gleitens umtrimmt – ganz zu schweigen von einer Trimmung für den Schnellflug. Nur in einem Betriebspunkt kann das Ruder wirklich auf null stehen, in den anderen ist es leicht ausgeschlagen. Man könnte eine Philosophiefrage daraus machen, bei welchem Betriebspunkt das der Fall sein sollte.

Völlig unsinnig wäre es allerdings, die SP-Lage zu verändern, damit diese zur (möglicherweise falschen, sprich ungeschickt gewählten) EWD passend gemacht wird. Wie bereits bei der Anwendungsfrage gesagt: Da wackelt der Schwanz mit dem Hund. Die SP-Lage bestimmt die Flugeigenschaften und beeinflusst die Trimmung, die EWD dient lediglich zur Trimmung. Die SP-Lage ist daher nach Flugeigenschaftskriterien zu wählen.

Ofť hört man Aussagen wie: „Ich musste im Rückenflug nur wenig drücken, also ist die gewählte EWD korrekt.“

Was man sagen sollte, ist: „Ich musste im Rückenflug nur wenig drücken, folglich habe ich keinen unnötig weit vorne liegenden SP gewählt.“

Also, weisen wir der EWD den richtigen Stellenwert zu und dichten ihr keinen Einfluss auf die Flugeigenschaften an.

Zum Schluss

sei noch eine Bemerkung zu einem Artikel von Gerd Wöbbecking in FMT 6/2007 erlaubt. Dort wurde (neben einigen anderen Dingen) behauptet, WinLaengs4 sei nur für symmetrische Höhenleitwerksprofile geeignet. Nun, das ist falsch! Die Wölbung der Profile an Flügel und HLW sind für die NP-Berechnung unwichtig, solange es sich um sinnvolle Profile eingesetzt in einem sinnvollen Re-Zahlbereich handelt. Nur bei kleinen Re-Zahlen, wie sie bei Saal- und kleineren Freiflugmodellen vorkommen, wird die Genauigkeit der Berechnung abnehmen. Für den „normalen“ RC-Bereich spielt das keine Rolle.

Ende Anhang C