

EWD, Längs-Stabilität und all das

...ein nicht endendes Thema.

Teil 4: Wie zuverlässig sind die Ergebnisse?

Zunächst einmal erfordert es eine gewisse Menge Mut, sich mit dem spitzen Bleistift, dem Taschenrechner, oder, Gipfel der *<Hmmm, das Wort hierfür fehlt mir noch>*, mit dem Computer einen Schwerpunkt auszurechnen, und mit diesem Resultat dann das Ergebnis vieler Stunden Arbeit und oft auch eine nicht geringe Menge Investitionen **fliegen zu lassen**. Haben die Rechenresultate so viel mit der Realität zu tun, daß das Flugzeug sich in etwa wie erwartet verhält? Gehen wir einmal denkbare Fehlerquellen durch und klopfen sie auf deren Einflüsse auf das Rechenergebnis ab:

Vereinfachungen:

Im ganzen Aufsatz ist immer wieder die Aussage zu finden: "...wird vernachlässigt...". Das kann natürlich nicht die Genauigkeit der Rechenergebnisse verbessern. Sehen wir uns einmal an, was denn da alles vernachlässigt wird:

- Wir setzen bei den Eigenschaften des Ersatzbildes von Profil und Tragflügel **lineares Verhalten** an. In der Nähe des Grenzbereiches (Stall) trägt der Tragflügel weniger als angenommen; wenn für das HLW genug Reserven da sind, wird das Flugzeug abwärts nicken, sich also sicher verhalten. Bei Canards wird man, wie schon angemerkt, darauf achten, daß das HLW eher in den Abriß-Bereich kommt als der Tragflügel.
- Nickmomente, die aufgrund von Widerständen entstehen, sind ausdrücklich beiseite gelassen worden. Ihre Werte sind sehr klein gegenüber den anderen Nickmomenten und außerdem schwer erfaßbar (wer kennt schon die Wahrheit über die Widerstände an seinem Modell?)
- Das Nickmoment des HLWs (sofern es kein symmetrisches Profil hat) wird nicht berücksichtigt. Es ist verschwindend gering.
- Antriebe: Ein "ganz normales" Motorflugzeug mit einem Propeller (vorne) hat wenig genug "Macken", sodaß es mit den hier vorgestellten Rechnungen wenigstens zum Fliegen gebracht werden kann. Jedoch ist die Umströmung des Leitwerkes durch den Propellerstrahl rechnerisch mit einfachen Mitteln nicht zu erfassen; man baut den Motor mit etwas Seitenzug ein (Erfahrungswerte) um dies zu kompensieren.
- Man nimmt (mit ausreichender Genauigkeit) an, daß der Propeller exakt in seiner Drehachse auf das Flugzeug wirkt; wenn diese nicht durch den Schwerpunkt des Flugzeuges verläuft wird ein parasitäres Nickmoment erzeugt. Kompensation: Den Motor mit Sturz, also etwas geneigt (meistens nach unten) einbauen.
- Hochdecker, Tiefdecker: Wenn der Schwerpunkt des Flugzeuges nennenswert über oder unter den Tragflächen (und damit dem Druckpunkt) liegt, dann wirkt dies zusätzlich als ganz normales Pendel: beim Tiefdecker destabilisierend und beim Hockdecker stabilisierend (die Hängegleiter und ähnliche Geräte nützen dies aus). Selten macht sich ein Flugmodellbauer die Mühe und mißt aus, wie hoch der Schwerpunkt des Modelles unter/über den Tragflächen liegt; damit und mit dem Gewicht könnte man das (de)stabilisierende Nickmoment berechnen, das auf das Modell einwirkt sobald es die waagrechte Fluglage verläßt. Beispiel (siehe Abb.18 - hierbei wurde die Auftriebskraft gleich mit dem Widerstand addiert, so daß eine zur Gewichtskraft parallele Resultierende entsteht): Ein Tiefdecker wiege $G = 2.5$ kg und der Schwerpunkt liege $h = 30$ mm über der Tragfläche. Bei einem Abwärtsnicken um den Nickwinkel θ "wandert" der Schwerpunkt um $x_{\theta} = h \cdot \sin(\theta)$ nach vorne; bei 5° Nickwinkel sind das immerhin $x_{\theta} \approx 2.5$ mm. $x_{\theta} \cdot G \approx 0.06$ Nm ist dann das destabilisierende (weil das Abwärtsnicken verstärkende) Nickmoment. Es verstärkt sich mit der Neigung der Flugbahn, kann in die hier vorgestellte Rechnung also nicht einbezogen werden. Man wird für Tiefdecker eine stabilere Schwerpunktlage vorsehen als für ansonsten gleiche Hochdecker.

Diese Liste kann keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben, ich weiß ja auch nicht alles und außerdem gibt's Flugzeuge (und Modelle davon), das glaubt man garnicht und keiner kann sagen, wie sich die eine oder andere ganz besondere Eigenart so eines eigenartigen Bauwerkes auf die Flugstabilität auswirkt, ohne je in einer Rechnung erschienen zu sein.

Systematische Fehler:

- Das Schwerpunkt-Verfahren zur Bestimmung des Flügel-Neutralpunktes berücksichtigt nicht den Auftriebsabfall am Flügel-Ende. Qualität und "Vorzeichen" des resultierenden Fehlers im Ergebnis habe ich schon ganz grob (ganz besonders grob) angedeutet: Bei positiv (nach hinten) gepfeilten Flächen ist der reale Flügel-Neutralpunkt weiter vorne als die Berechnung ergibt; und: der Fehler ist "im Normalfall nicht groß". Naja, manchmal wünscht man sich schon mal etwas präzisere Angaben... Man kann nun theoretische Untersuchungen über die Fehlerschranken anstellen, jedoch ist das eine große Menge Arbeit und meine aerodynamische Ausbildung (ich bin Amateur) reicht dazu bei weitem nicht aus (und meine Freude an solchen Tätigkeiten schon gleich garnicht 😊). Aber ich habe mal den Begriff "Normalfall" ein wenig präzisiert und wenigstens einige Vergleichsrechnungen angestellt, die dem interessierten Amateur helfen könnten, sich ein Bild von den Fehlern zu machen.



Abb.18



Abb.19

Der **Normalfall** (Abb.19) ist die Trapezfläche mit geringer Pfeilung. Die Streckung hat, solange sie groß genug ist, wenig Einfluß auf den Fehler (nur bei großer Pfeilung). Ferner ist natürlich der relative Fehler unabhängig von der absoluten Größe des Tragflügels.

Nun habe ich ein paar Vergleiche gerechnet mit Trapezflügeln: Die eine Rechnung erfolgte mit dem EXCEL-Sheet (das auch das zeichnerische Verfahren, Win-Schwer und, in Maßen, A.C.Calculator repräsentiert), die Vergleichsrechnung habe ich mit AZTEC gemacht. Die Beispiele umfassen verschiedene Zuspitzungen ($\lambda=1$ ist das Rechteck, $\lambda=0$ wäre das Dreieck) und verschiedene Pfeilungen (φ_{25}). Interessant, weil "modern", sind natürlich Geometrien mit gerader Hinterkante; hier liegen die Fehler zwischen 0 und +1%.

Abb.20 gibt für verschiedene Zuspitzungen und Pfeilwinkel (an der 25%-Linie) den relativen Fehler der einfachen geometrischen Rechnungen gegenüber AZTEC an; die Kurven geben im Bereich großer Pfeilung Trends an, nicht exakte Ergebnisse. "+2% Fehler" bedeutet, daß der mit AZTEC berechnete Neutralpunkt um 2% von I_{μ} weiter vorne liegt als der mit dem EXCEL-Sheet berechnete.

Wenn die Flächengeometrie "normaler" ist als das einfache Trapez (also näher an der elliptischen Auftriebsverteilung), dann stellen die angegebenen Fehler Obergrenzen dar.

Ein generelles Problem ist hierbei, daß AZTEC auch nicht unbedingt 100%ig richtige Ergebnisse liefert; das Programm berücksichtigt zwar den Auftriebsabfall und Winglets, aber es werden nur 10 Streifen pro Fläche benützt und das Wirbelgitter-Verfahren hat auch seine Grenzen, aber ich möchte hier die Vermutung anstellen, daß die Fehler von AZTEC in dieser Diskussion bestimmt "deutlich kleiner" sind als die der Schwerpunkt-Verfahren. Die Verwendung von AZTEC verbot auch das Rumrechnen an Dreiecken (Deltas) und bei allzu großen Pfeilungen.

- Die Abwindformeln sind mehr oder weniger ausführliche Regressionen ("hineingelegte Kurven") über einem Satz von Messergebnissen. Hier spricht es sehr für den Entwickler der Formel, wenn er angibt, auf welchen Messungen die Regressionen beruhen, welche Dinge berücksichtigt wurden (z.B. berücksichtigen nur die DATCOM-Formeln die Höhe des Höhenleitwerkes über der Tragfläche), oder generell den Gültigkeitsbereich der Formel und die festgestellten Abweichungen der Messungen von der Formel. Solche Informationen liegen mir leider nicht vor (vielleicht schaffe ich es doch noch mal, wenigstens die DATCOM-Schinken in die Finger zu bekommen, ohne als Flugzeug-Hersteller auftreten und viel Geld ausgeben zu müssen...).

Wie schon angemerkt wäre es kein ernstes Problem, durch gerinfügige Änderungen die verschiedenen Formeln halbwegs deckungsgleich zu bekommen, das kann aber nicht Sinn dieses Aufsatzes sein. Vergleichsrechnungen mit AZTEC haben die geringsten Abweichungen zur DATCOM-Formel geliefert; ich würde dieser Formel also am ehesten "vertrauen".

Die Russow-Formel liefert größere Abwind-Winkel, macht das HLW also weniger wirksam und führt daher zu relativ weit vorne liegenden Flugzeug-Neutralpunkten; ihr Einsatz ist also insofern "ungefährlich" (vorsichtig) als sie kein instabiles Modell verursacht: Das Modell wird stabiler sein als berechnet. Da die gleiche Abweichung mit dem richtigen Vorzeichen auch die EWD "trifft" wird das Modell mit dem vielleicht zu weit vorne liegenden Schwerpunkt richtig etwas stärker aufwärts nickend getrimmt.

- Das Rechenverfahren ist "empfindlich": Kleine Meßfehler können große Fehler in den berechneten Ergebnissen verursachen. Es sollte schon klar sein, daß man nicht unnötig Fehler in die Rechnungen einbringen sollte, allein durch - Verzeihung - schlampige Messungen. Kontrollieren Sie sich doch einmal selbst: Wie genau können Sie die Pfeilung der Tragfläche Ihres Modelles messen? Versuchen Sie's mal an verschiedenen Tagen hintereinander und evtl. mit verschiedenen Meßmethoden! Kommen Unterschiede von mehr als 1cm vor? Das wäre nicht selten!
Ein Trick: Messen Sie die Rücklagen der Trapez-Eckpunkte wie in Abb.21 angedeutet an einer geraden Wand; dabei kann es sinnvoll sein, das Modell auf den Rücken zu legen. Die Rücklage des gemessenen Punktes wird dann mit $(r_1 + r_r)/2 - r_m$ berechnet. Ein Meßfehler in der Pfeilung wirkt sich mit bis zur Hälfte seiner Größe auf den berechneten Schwerpunkt aus!

Andere Fehler:

- Programmfehler kommen leider immer vor: Auch oft und sorgfältig getestete Programme liefern gelegentlich absurde Ergebnisse oder, schlimmer, irgendwie plausible, aber dennoch falsche Ergebnisse. Hmmm, das kann ärgerlich werden. Ein gewisses Maß an Skepsis gegenüber den Rechenergebnissen ist natürlich immer angebracht, manche Amateure rechnen ein Flugmodell mit mehreren Methoden nach und machen sich dann Gedanken über die Differenzen in den Ergebnissen...
- Rundungsfehler: Die hier beschriebenen Rechenverfahren sind *nicht* empfindlich gegen Rundungsfehler.

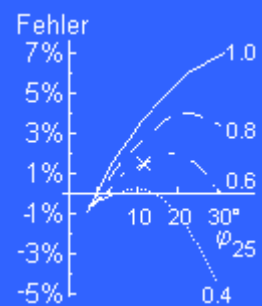


Abb.20

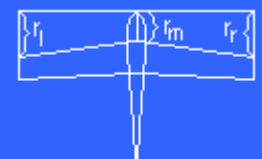


Abb.21