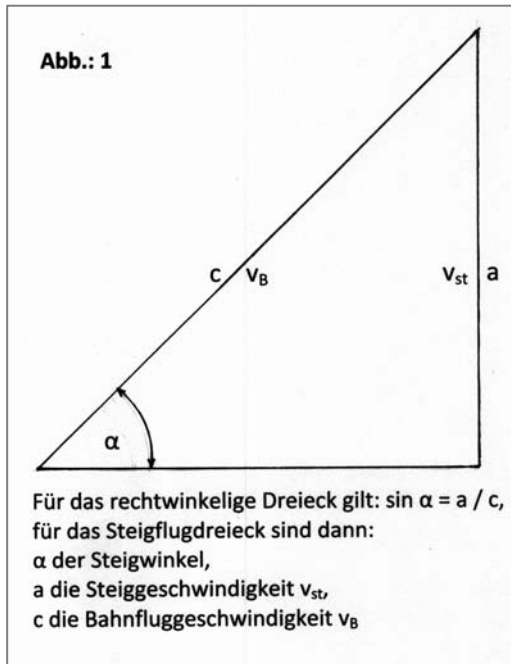


Der Steigflug eines RC- Elektro-Motorseglers

Den Steigflug bestimmen zwei Komponenten, eine vertikale und eine zur Horizontalen geneigte (siehe Abb. 1). Die vertikale ist die **Steiggeschwindigkeit** v_{st} . Man kann sie errechnen oder von einem



Variometer ablesen. Ihre Dimension ist (m/s), mit m als Flughöhe und s der Zeit. Ihre Formel lautet: $v_{st} = (P_p / G) - v_y$ (1). Darin wird die Propellerleistung P_p mit der Dimension (Watt), durch das Gewicht G (N) des Modells dividiert und vom Quotient dann noch die Sinkgeschwindigkeit v_y (m/s) des Modells abgezogen. Werden z. B. 4,6 Meter Steigen in der Sekunde errechnet, sagt dies aus, dass das Flugmodell in einer Sekunde eine **Höhe** von 4,6 m erreichen kann.

Für die horizontal geneigte Komponente steht die Bahnfluggeschwindigkeit v_B . Sie kann ebenfalls errechnet oder vom Fahrtenmesser abgelesen werden. Oder man ermittelt per Stoppuhr die Zeit, in welcher ein Flugmodell die unter einem Bahnneigungswinkel geflogene Strecke zurücklegt. Ihre Dimension ist auch (m/s), doch bedeutet das Symbol m hier Strecke. Eine Bahnfluggeschwindigkeit v_B von 7,0 m/s sagt aus, dass das Flugmodell im Steigflug in einer Sekunde **eine Strecke** von 7,0 m, oder in 10 Sekunden 70 m zurücklegt.

Aufgabe dieser Studie ist es herauszufinden, ob die errechnete Flughöhe aus der Formel für v_{st} (m/s) in der Flugpraxis auch tatsächlich erreicht wird, so wie die Zusammenhänge von Propellerleistung, Steigwinkel und Bahnfluggeschwindigkeit.

Welch beträchtlichen Unterschied und welche Wichtigkeit der Steigwinkel bei **gleicher** Steiggeschwindigkeit v_{st} von 3,5 m/s aber **unterschiedlichen** Bahnfluggeschwindigkeiten einnimmt, sei gleich an zwei Beispielen aufgezeigt: Um auf Höhe zu kommen, steigt eine **Cessna (bemannt)** mit der Bahnfluggeschwindigkeit von 150 km/h also fast **42 m/s**. Sie erreicht damit in **10 s die 35 m Höhe nach 420 m** Strecke. Dabei ist ihr Steigflugwinkel der Sinus aus Höhe und Strecke = $35 / 420 = 0,0833 = 4,78$ Grad. Leistungsbedarf: 67 kW = 67000 W!

Das wesentlich langsamer fliegende **Flugmodell** mit der Bahnfluggeschwindigkeit von **7,0 m/s** muss zur Erfüllung dieser Flugaufgabe einen beträchtlich steileren Steigflugwinkel wählen: es erreicht in 10 Sekunden die 35 m Höhe, nach einer Strecke von **70 m**, unter einem Steigwinkel von **30 Grad**. Hier ist schon erkennbar, dass die Bahnfluggeschwindigkeit vom Bahnneigungswinkel bestimmt wird. Leistungsbedarf: 40 Watt!

Zur praktischen Umsetzung:

Wie hoch die Steigrate (Ausdruck für v_{st} in der Fliegersprache) ist, bestimmt vorerst das Temperament des jeweiligen Modellfliegers. Der Vergnügliche wird die stromsparende, flachsteigende Variante mit einem Leistungs/Gewichtsverhältnis (W/N) von vielleicht 4 für sein 1 kg-Modell wählen. Sein Motor zieht dabei 80 Watt aus dem Akku, was ihm neben einem Steigen von 3,6 m/s auch viele Steigflüge beschert. Der auf action bedachte, wählt das doppelte P/G-Verhältnis von 8. Unter Verlust einiger Steigflüge, bedient sich sein Motor beim Akku nun mit mindestens 160 Watt. Dafür steigt sein Modell aber mit 7,6 m/s.

Zur Berechnung der Formel (1): Der erste Wert in der Formel ist die Propellerleistung P_p (W), nicht die Motorausgangsleistung P_w ! Diese zu finden, ist leider etwas langwierig. Zunächst mißt man mit den dazu erforderlichen Messgeräten die Motoreingangsleistung $P = A * V$. Immerhin erhält man bei fachgerechter Messung keinen Schätz- sondern einen Echtwert, inkl. Akkueffizienzgrad. Ab hier sind sämtliche Antriebsverluste herauszufinden. Das sind der Reihe nach die Verluste bei Motor, (Getriebe/Regler, Kabel) und schließlich bei der Luftschraube.

Zwischen Motoreingangs- P und Motorausgangsleistung P_w verbirgt sich der Motorwirkungsgrad. Gleich vorweg: Zur Bestimmung des Motorwirkungsgrades bedarf es aufwendiger Messvorrichtungen. Daher ist man meist auf bestehende Messdaten angewiesen. Eine wirkliche Hilfe ist dabei der „Drive Calculator“. Im Web kostenlos unter www.drivecalc.de zum herunterladen!

Zur Zeit der Bürstenmotoren waren Untersetzungs**getriebe** gang und gebe. Mit ihnen erzielte man nicht nur gute Motor- **und** Propellerwirkungsgrade, auch die Motorlaufzeiten erlangten beträchtliche Verlängerungen.

Mit dem Erscheinen der „Bürstenlosen“ auf dem Markt, waren Ihre Vorteile, kleiner leichter, besseres Drehmoment, keine Entstörfiler augenscheinlich. Insbesondere wurden ihre niedrigen spez. Leerlaufdrehzahlen angepriesen, mit dem Nebensatz, dass nun wirkungsgradfressende Getriebe überflüssig seien. Die Motorkennlinien zeigen jedoch, dass das Wirkungsgrad-Optimum bei **niedriger Belastung** erreicht wird. Gleich darauf geht es bei **zunehmendem** Strom aber schon wieder bergab. Im praktischen Betrieb werden die angepriesenen 75 - 80 % Wirkungsgrad daher nur bei geringer Belastung erreicht. Mit höheren Strömen nähern sie sich bedenklich schnell der 60%. Kein Wunder also, dass auch wieder Außenläufer mit Getriebe angeboten werden, um mögliche, hohe Wirkungsgrade auch bei höheren Belastungen mit entsprechenden Motoren einer Serie zu erreichen. Als Beispiel: Der AXI 2217-20 erreicht im Direktantrieb mit einer 10x6 Luftschaube sein Wirkungsgradmaximum von knapp 80% bei 6,5 A. Die Type 2217-12 mit Getriebe 3,1 : 1 hingegen, erzielt mit einer 14x11! Luftschaube den nahezu gleichen Wirkungsgrad bei 14,8 A.

Wichtig: Angaben über Motor-Wirkungsgrade in Prospekten und Katalogen sollten für die Eingabe in Formeln nicht einmal als Anhaltswerte in Betracht gezogen werden. Aber wie erwähnt, es gibt ja den „Drive Calculator“.

Aus der Luftschaubenforschung ist hinlänglich bekannt: **Hohe Luftschauben-Wirkungsgrade kann man nur mit hohem H/D erreichen.** H und D sind die Größenangaben auf kommerziellen Luftschauben, mit H der Steigung und D dem Durchmesser. H/D ergibt ihre Verhältniszahl. Mit schnell drehenden Normalluftschauben (9x4, H/D = 0,44) erreicht man bestenfalls Wirkungsgrade um die 60%. Erst bei Herabsetzung der Drehzahl (durch Getriebeuntersetzungen) sind bei gleichbleibender Stromentnahme (oder gar noch weniger), hohe H/D-Werte (0,9 = 73%) und durch die Durchmesserergrößerung, aerodynamisch effizientere, hochwirksame Propeller zu erwarten (Schubvergrößerung mit der 4. Potenz vom Durchmesser). Ausführliche Angaben darüber in **prop** 2/1998 oder www.czepa.at, „Die verfluchte Luftschaubenanpassung“. Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse, kann auch hier der „Drive Calculator“ mit über 100 Propellern (Ifd. neue Updates), sehr hilfreich sein.

Weiters ist das Gewicht des Modells zu ermitteln und der kg-Wert mit 9,81 zu multiplizieren, um ihn in Newton (N) zu verwandeln.

Schlussendlich bestimmt man den Wert der Sinkgeschwindigkeit des Modells. Ist man nicht in der Lage, sie zu errechnen, geht man nicht fehl, für Segler, je nach Güte, 0,3 -0,5 m/s einzusetzen.

Für Überschlagsrechnungen geht das alles natürlich auch mit *Pi mal Daumen*: besteht der Antrieb nicht aus groben Fehlanpassungen von Motor und Luftschaube (Fehlgriffe bei Motor und Luftschaube), dann kommen, sehr optimistisch gewählt, bei Verwendung eines Brushless und dessen Motoreingangsleistung von 100 Watt (gemessene Volt x Ampere zwischen Akku und Motor), am Ende *bestenfalls* 50% aus dem Propeller heraus, falls der Steller nicht auch noch etwas Appetit hat. Die Rechnung dazu: 100 W x 0,70 Motorwirkungsgrad x 0,70 Propwirkungsgrad = 49 Watt P_p.

Zur Flugüberprüfung der Steigflug-Leistungsfähigkeit eines Modells mit oben genannter Formel für v_{st} , bedarf es eines Beispielmotors: es soll 1 kg ~ 10 N wiegen, sein Sinken v_y sei 0,4 m/s und die Propellerleistung beträgt 50 Watt. Dann ist die Steiggeschwindigkeit $v_{st} = (50/10)-0,4 = 4,6$ m/s. Falls richtig gemessen und gerechnet wurde bedeutet dies, dass das Modell mit 10 Sekunden Motorlauf eine Höhe von 46 m erreichen müsste. Was aus diesem Ergebnis nicht hervorgeht und dem Piloten überlassen wird, ist, unter welchem **Steigflugwinkel** und mit welcher **Bahnfluggeschwindigkeit** man diese Höhe überhaupt erreicht.

Die größte Geschwindigkeit erreicht das Modell bei Vollgas im Horizontalflug. Dabei stellt sich ein Kräftegleichgewicht von Modellgewicht und Auftrieb ein. Doch schon beim geringsten Steigflug, also dem Beginn des Bahnfluges, vergrößert sich mit jedem Grad die Gewichtskomponente und verkleinert sich der Auftriebsanteil und das Modell verliert mit jedem Grad mehr an Geschwindigkeit.

Aus der Zeit der Hochblüte des Freiflugs wird in einer Arbeit der einstigen deutschen Modellfluggröße Hans Neelmeijer, Neuhausen-Erzgebirge, eine Methode gezeigt, wie mit der einfachen Formel $v_B = \sqrt{1 - \sin \alpha} * v_H$, **Verhältniszahlen** für die Bahnfluggeschwindigkeit v_B und damit schließlich der **optimale Steigwinkel** gefunden werden kann (Abb. 2). Allerdings mit der Einschränkung, dass auf

allen Flugbahnen das Gewicht G den gleichen Wert wie die Zugkraft einnimmt. Das Modell sollte also mit soviel Power ausgerüstet sein, dass es imstande ist, in senkrechter Lage zu verweilen (hovern). Für

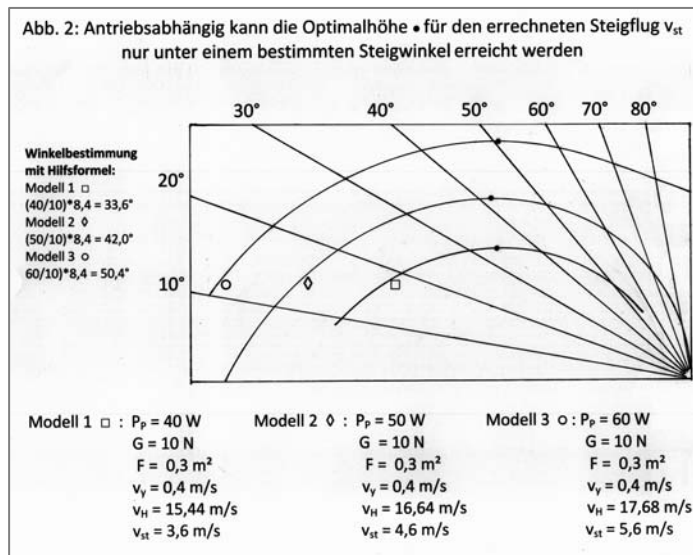


Abb. 2 sind auch zwei Antriebsvarianten \circ \square berechnet, die dieser Forderung nicht entsprechen. Bei Modell 1 fehlen zum Hovern 10 Watt, das Modell 3 dagegen, ist um 10 Watt überpower. Daraus ergeben sich leicht divergierende Verschiebungen der optimalen Steigwinkel zu Modell 2.

Zur Vereinfachung und schnellen Findung des optimalen Steigwinkels wurde hier eine Faustformel erstellt, deren Ergebnisse der Realität sehr nahe kommen. Man muss lediglich das Leistungs-Gewichtsverhältnis eines Modells mit 8,4 multiplizieren, also $P_p / G \cdot 8,4$ (2)

Dazu ein Rechenbeispiel mit den Werten des Modells 2 aus Abb. 2: Das W / N – Verhältnis ist

$50 : 10 = 5 \cdot 8,4 = 42,0$ Grad. Der Sinus davon = 0,6691. Die Steiggeschwindigkeit v_{st} zu diesem Modell wurde mit 4,6 m/s errechnet. Das ergibt eine Bahnfluggeschwindigkeit $v_B = 4,6 / 0,6691 = 6,87 \text{ m/s}$. Bei einem Steigflug von 10 Sekunden entspricht dies einer Höhe von 46 m und einer Bahnlänge von 68,7 m. Dividiert man zur Probe $46 / 68,7$ ergibt dies 0,6691 und dies ist der \arcsin von = $42,0^\circ$.

Bei einem kürzlich vermessenen Solarflugmodell beträgt das P_p / G -Verhältnis $7,57 / 3,7 = 2$ und mit 8,4 multipliziert ist das Produkt $16,8^\circ$. Bei der errechneten Steigrate von 1,73 m/s und mit der gemessenen Bahnfluggeschwindigkeit von 6,0 m/s, stellt sich der nahezu gleiche Bahnneigungswinkel ein $1,73/6=0,2883$. Davon ist der $\arcsin = 16,75^\circ$.

Diese Schnellmethode (Formel 2) ermöglicht nun, für jedes x-beliebige Modell aus dem Leistungs-Gewichtsverhältnis den optimalen Steigwinkel zu errechnen. (Anm.: Wegen völlig unterschiedlicher Leistungs-/Gewichtsverhältnisse bemannter Sportflugzeuge, gegenüber Flugmodellen, kann diese Hilfsformel jedoch nur im Modellflugbereich Anwendung finden).

Weitaus komplizierter erscheint es, diesen Winkel in der Praxis auch zu „erfliegen“. Theoretisch gibt es bei konstanter Propellerleistung ja nur einen einzigen optimalen Bahnneigungswinkel. Fliegt man zu flach, schießt das Modell förmlich über das Ziel hinaus. Es verliert Zeit, weil es statt Höhe, Strecke erflogen hat. Bei zu steilem Steigflug wird der Antrieb überlastet, das Modell fliegt zu langsam und kann in festgesetzter Zeit die Höhe nicht erklimmen. Halbwegs routinierte Piloten merken sofort, wenn das Modell überlastet wird, aber auch, ob es zu flach und schnell steigt. Eines Tages aber kommt sicher ein Autopilot für Flugmodelle, der den vorher eingegebenen Bahnneigungswinkel stur fliegen wird.

Sind wir also dankbar, bereits im Zeitalter des Fernsteuervarios gelandet zu sein. Zeigt nach vorherigem Beispiel der Höhenmesser nach 10 Sekunden Steigflug 46 m am Variodisplay an, kann man sich wirklich gratulieren. Dazu bedarf es nur lediglich eines Helfers mit Stoppuhr und eben des Höhenmessers. Wird die erforderliche Höhe in 10 Sekunden nicht erreicht, sind die Wirkungsgrad-Annahmen von Motor und Propeller einer Korrektur zu unterziehen. Auch ein falscher Bahnneigungswinkel kann die Ursache dafür sein. Hauptursache schlechter Ergebnisse ist meist eine falsch gewählte Luftschraube. Zur Messtechnik: der 10-Sekundensteigflug wurde wegen der einfachen Rechnung gewählt. Längere Steigflüge wären zwar besser, führen jedoch zu allzu großen Höhen. Was die Genauigkeit der Variomesswerte betrifft: ein bißchen Vertrauen in die Technik ist schon erforderlich. Vergleiche lohnen.

Andere Wege: erst fliegen, dann rechnen

Während der Teststeigflüge zu dieser Studie kam sehr bald der Gedanke auf, das Pferd doch von hinten aufzuzäumen. Mit dem Wissen des optimalen Steigwinkels und der Möglichkeit der Feststellung der Flughöhe mittels Vario und Stoppuhr in beliebiger Zeit, kann die wahre Leistungsfähigkeit eines Antriebes von vornherein nach einer Steigflug- Höhenmessung ermittelt werden.

Bei möglichst ruhigem Wetter sind dann mehrere 10 Sekundensteigflüge im empfohlenen Steigwinkelbereich erforderlich. Wurde so ein Höhenmittel von z. B. 80 m erfliegen, kann eine sichere Steiggeschwindigkeit von $v_{st} = 8,0$ m/s als realistisch angenommen werden.

Danach bestimmt man mit den übrigen Werten obigen Modells, Gewicht $G = 10$ N und Sinken $v_y = 0,4$ m/s, sehr leicht, statt der **errechneten**, die **wahre** Propellerleistung P_p . Nach Umstellung der v_{st} – Formel (1) für die Propellerleistung ergibt sich für $P_p = (v_y + v_{st}) * G$ und für das Beispielmodell ist dann $P_p = (0,4 + 4,6) * 10,0 = 50,0$ Watt. Es ist also nurmehr erforderlich festzustellen, ob P_p - Rechen- und Flugwert übereinstimmen. Einziger Wermutstropfen: hinter diesem P_p -Realwert verbergen sich allerdings die vorher genannten Einzelwirkungsgrade von Motor und Luftschraube. Sie bei divergierenden Werten herauszufinden und eventuell zu korrigieren, ist dann mit oben beschriebenen Möglichkeiten eine schöne Hausaufgabe.

Am einfachsten: Ist man genügsam und will man sich auch noch die Zeitmessung ersparen, dann liest man während des Steigfluges vom Display des Variometers die Steiggeschwindigkeit v_{st} in m/s ab (also nicht die Höhenangabe in Meter) und vergleicht, ob das errechnete Steigen erreicht wurde.

Resümee: Bei allen hier beschriebenen Versuchen und Berechnungen, die dem Zweck dienen herauszufinden, ob die errechnete Steiggeschwindigkeit mit der Realität des Fluges übereinstimmt, endeten in der Erkenntnis, dass vor allem der optimale Steigwinkel gefunden werden muss. Als Ausgangspunkt dafür wurde die Horizontalgeschwindigkeit v_H eines bestimmten Modells herangezogen. Doch darf nicht übersehen werden, dass aerodynamisch bessere Modelle, bei gleicher Antriebsleistung, Größe und Gewicht, eine höhere Geschwindigkeit erzielen werden, oder umgekehrt. Zudem wird immer eine konstante Leistung angenommen. Die liefern aber Akkus nicht. Dies bedeutet, dass alle hier gewonnenen Erkenntnisse lediglich dazu dienen, noch vor dem ersten Kraftflug darüber informiert zu sein, was man vom jeweiligen Modell erwarten darf. Exakte Ergebnisse könnten bestenfalls mit dem Messaufwand zustande kommen, der bei Olympiaden oder Weltmeisterschaften betrieben wird.

© Oskar Czepa