

Fortschrittsgrad & Co

Dieses Script wurde in erster Linie verfasst, um Benutzern von „PropCalculator“ Fachbegriffe zum Propeller zu erläutern und etwas Hintergrundinformation zur Funktion des Programms zu geben. Es eignet sich aber auch als einführender „Crashkurs“ in die Propellertheorie.

An einigen Stellen waren Vereinfachungen notwendig; es wurde aber darauf geachtet, daß keine Übereinfachungen entstanden, die zu falschen Vorstellungen führen könnten.

Tragflügel und Profil

Es ist hilfreich, zuerst ein paar Grundlagen aus der Tragflügeltheorie zu wiederholen. Ein Versuchsflügel wird im Windkanal mit der Fluggeschwindigkeit v angeströmt; seine Enden sollen an die Kanalwände anliegen, sodaß keinerlei Randeffekte auftreten. Er ist gegenüber der Anströmung unter dem *Anstellwinkel* α angestellt (Bild 1). Es entsteht eine *Luftkraft* L , die üblicherweise in die Komponenten *Auftrieb* A (senkrecht zur Anströmrichtung) und *Widerstand* W (in Anströmrichtung) zerlegt wird.

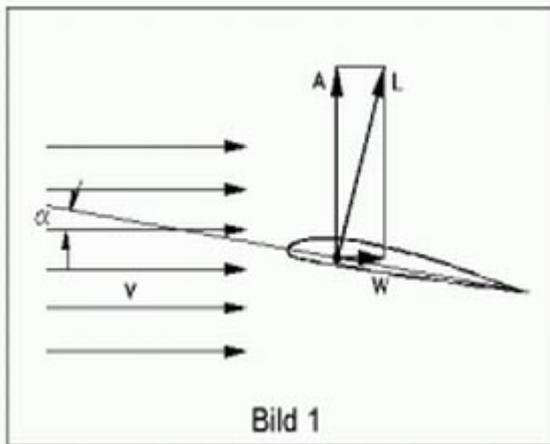


Bild 1

Von Auftrieb und Widerstand weiß man, daß sie auf Grund von physikalischen Gesetzen proportional dem *Flächeninhalt* F des Flügels und dem *Staudruck* $q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$ sind. (hierin ρ = Luftdichte)

Damit der Auftrieb unabhängig von der Größe des Flügels und des Staudrucks wird, dividiert man ihn durch diese beiden Größen. Übrig bleibt dann ein „spezifischer Auftrieb“, der als *Auftriebskoeffizient* oder *Auftriebsbeiwert* C_A bezeichnet wird und (abgesehen von der Profilform selbst und der Re-Zahl) nur noch vom Anstellwinkel α abhängt:

$$C_A = \frac{A}{\rho/2 \cdot v^2 \cdot F} \quad (1)$$

Beim Widerstand geht man genauso vor und erhält dann den *Widerstandsbeiwert* C_W :

$$C_W = \frac{W}{\rho/2 \cdot v^2 \cdot F} \quad (2)$$

Die beiden Beiwerte werden in Diagrammen dargestellt, abhängig von Anstellwinkel α (Bild 2).

Bild 2a zeigt die meistverwendete *Polardiagramm*-Darstellung nach Lilienthal. Hierbei wird in das Diagramm mit den Achsen C_W und C_A für jeden Anstellwinkel der zugehörige Punkt C_A, C_W eingetragen, und das zugehörige α wird neben den betr. Punkt geschrieben. Die Punkte werden dann durch Geradenstücke oder eine geeignete Kurve verbunden. Mit etwas aerodynamischen Kenntnissen kann man aus diesem Diagramm sehr viel über die Eigenschaften des betreffenden Flügelprofils herauslesen. Bild 2b und 2c zeigen die sog. *aufgelöste Polare*, hier werden einfach C_A und C_W über α aufgetragen. Für manche Zwecke (z.B. für Propellerberechnungen) ist diese Form zweckmäßiger.

Im PropCalculator besteht die Möglichkeit, die Polaren der Profile anzusehen, die in der Datenbank gespeichert sind. Zu jedem Profil sind dort mehrere Polaren für verschiedene Re-Zahlen abgelegt. Das Programm kann damit in gewissen Grenzen durch Inter- und Extrapolation den Re-Einfluß berücksichtigen.

Es soll noch besonders darauf hingewiesen werden, daß C_A und C_W *dimensionslose*, reine „Zahlenwerte“ sind, mit

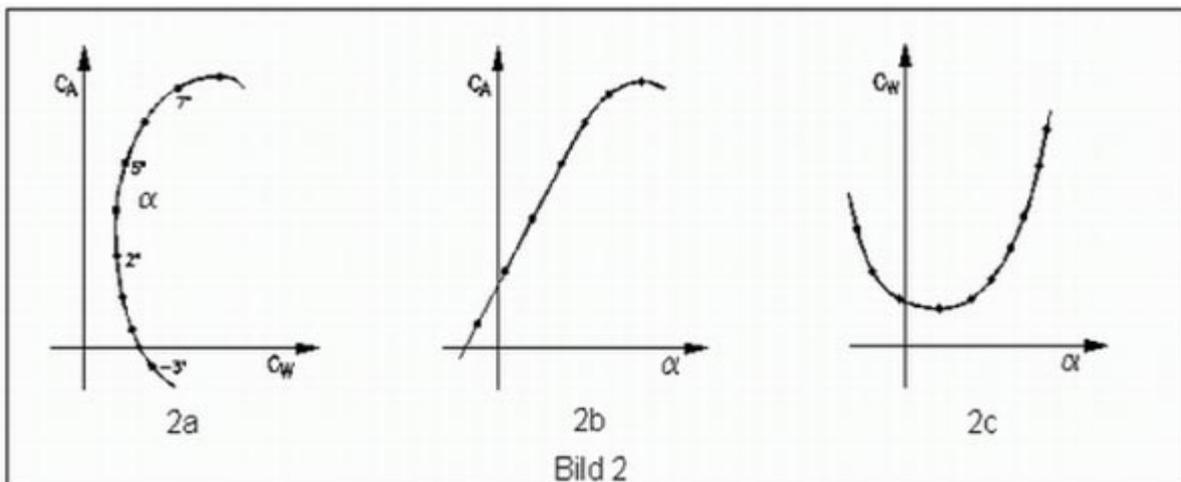


Bild 2

keiner Maßeinheit behaftet und nur von α (bzw. erweitert noch von Re) abhängig. Wollen wir Auftrieb und Widerstand für ein anderes Flügelstück mit dem Flächeninhalt F bei der Geschwindigkeit v wissen, dann müssen wir nur die obigen Formeln umstellen:

$$A = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot F \cdot C_A \quad (3)$$

bzw.

$$W = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot F \cdot C_W \quad (4)$$

Die Beiwerte C_A und C_W werden dazu für den gewünschten Anstellwinkel aus der Polare abgelesen.

Nach dieser Erinnerung nun zum Propeller

Für Propeller hätte man natürlich gerne auch eine so einfache Darstellung seiner Eigenschaften wie bei einem Tragflügel bzw. Flügelprofil. Leider haben wir hier kompliziertere Verhältnisse; wir werden aber sehen, daß es große Ähnlichkeiten gibt.

Trotzdem es manchmal anders zu lesen ist: Propeller sind keine Luft-„Schrauben“, die sich in die Luft „hineindrehen“ wollen. Spätestens beim Anblick eines im Stand laufenden Propellers sollte klar sein, daß hier nichts „geschraubt“ wird und es für die Schraube (auch im Flug) kein „Gegengewinde“ gibt. Die oft gebrauchte Erklärungskrücke „Schlupf“ erklärt in Wirklichkeit überhaupt nichts. PropCalculator beruht auf der sog. *Blattelement-Theorie*, bei der Propellerblätter als rotierende Tragflügel behandelt werden. Diese erzeugen „Auftrieb“, von dem der Großteil in axiale Richtung fällt und dann *Vortrieb* oder *Schub* genannt wird. Und sie haben einen „Widerstand“, zu dessen Überwindung eine *Tangentialkraft* bzw. ein *Drehmoment* erforderlich ist. Letzteres ergibt -multipliziert mit der Drehzahl- die erforderliche *Antriebsleistung*.

PropCalculator ist kein eigentliches Optimierungsprogramm für Propeller. Es macht fast dasselbe wie die reale Messung eines „gegebenen“ Propellers im Windkanal, und es liefert die Ergebnisse in derselben Form. Wir können aber den „virtuellen Propeller“ sehr leicht und schnell ändern, und durch gezieltes Probieren lässt sich auch gfls. ein Optimum finden.

Schauen wir uns nun die Anströmung eines Propellers an (Bild 3). Er bewegt sich geradlinig mit der Fluggeschwindigkeit v und dreht sich gleichzeitig mit der Drehzahl n . In jeden Schnitt durch ein Propellerblatt treten daher 2 Geschwindigkeiten auf, nämlich die Fluggeschwindigkeit v , und eine von der Drehung herrührende Tangentialgeschwindigkeit v_t ; die Letztere berechnet sich einfach als Drehzahl*Abstand von der Drehachse (Bild 3a).

Der Anschaulichkeit halber werden wir im Folgenden immer den Propeller stillstehen und dafür die Luft zuströmen und rotieren lassen, was an den Verhältnissen nichts ändert; außer daß jetzt die Pfeile in die umgekehrte Richtung zeigen.

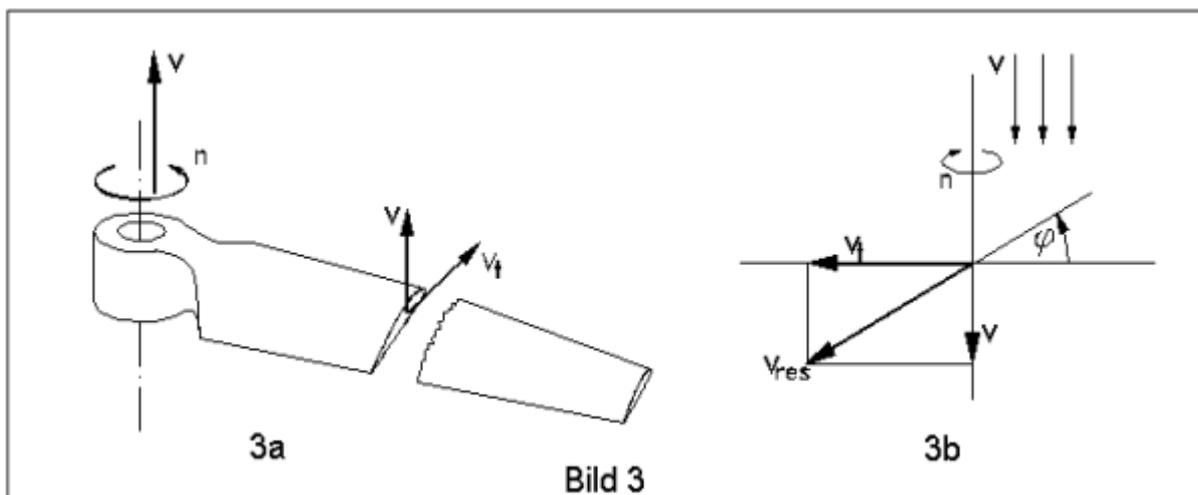
Die 2 Geschwindigkeiten v und v_t setzen sich zu einer resultierenden Geschwindigkeit v_{res} zusammen, die Luft tritt unter dem *Zuströmwinkel* φ (phi) in die Drehebene ein (Bild 3b). Diese resultierende Geschwindigkeit samt Winkel φ müssen wir uns jetzt genauer ansehen (Bild 4).

Je weiter wir am Propellerblatt nach außen gehen, desto größer wird die Tangentialgeschwindigkeit v_t ; die Geschwindigkeit v bleibt jedoch stets dieselbe. Daher wird der Winkel φ umso kleiner, je weiter wir nach außen gehen, im Bild ist $\varphi_1 < \varphi_2 < \varphi_3 < \varphi_4$.

Damit sind wir aber noch nicht am Ende. Wenn sich die Fluggeschwindigkeit v ändert, dann ändern sich damit natürlich ebenfalls die Geschwindigkeitsdreiecke und damit die Zuströmwinkel. Dasselbe ist der Fall, wenn sich die Drehzahl n ändert.

Dies ist in Bild 5 nochmal dargestellt. Wird die Drehzahl erhöht, dann steigt die Tangentialgeschwindigkeit und der Zuströmwinkel wird kleiner, und umgekehrt (Bild 5a). Dasselbe ist natürlich der Fall, wenn man weiter weg von der Drehachse geht. Steigt die Fluggeschwindigkeit, dann wird das Geschwindigkeitsdreieck steiler, der Zuströmwinkel wird größer, und umgekehrt.

Allgemein gilt also, daß der Zuströmwinkel von der Größe der Geschwindigkeiten v und v_t abhängt; genauer gesagt, von deren Verhältnis v/v_t . Solange dieses sich nicht ändert, bleibt auch der Zuströmwinkel gleich. Beispiels-



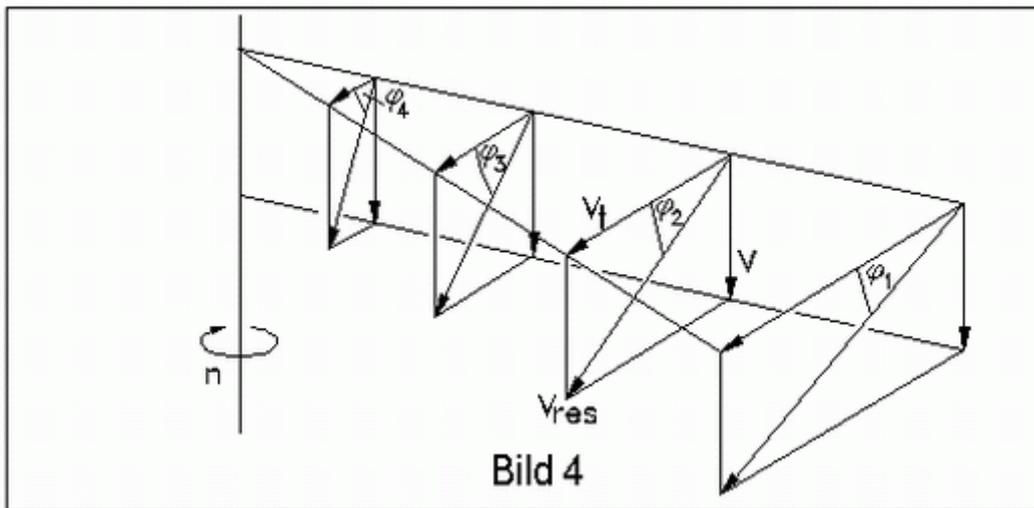


Bild 4

weise wäre dies der Fall, wenn sich sowohl Drehzahl als auch Fluggeschwindigkeit verdoppeln.

Formelmäßig ausgedrückt:

$$v_{res} = \sqrt{v^2 + v_t^2} \quad (5)$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{v}{v_t}\right) \quad (6)$$

Wenn wir nun annehmen, daß der Zuströmwinkel φ bekannt ist, dann brauchen wir „nur noch“ das Blattprofil an der jeweiligen Radiusstelle um einen Anstellwinkel α gegenüber dem Zuströmwinkel anzustellen (Bild 6) *. Aus dem Polardiagramm können wir dazu wie bei einem Tragflügel den Auftriebs- und Widerstandsbeiwert an dieser Stelle entnehmen.

Der Blattwinkel β ergibt sich dann als Summe von Zuström- und Anstellwinkel:

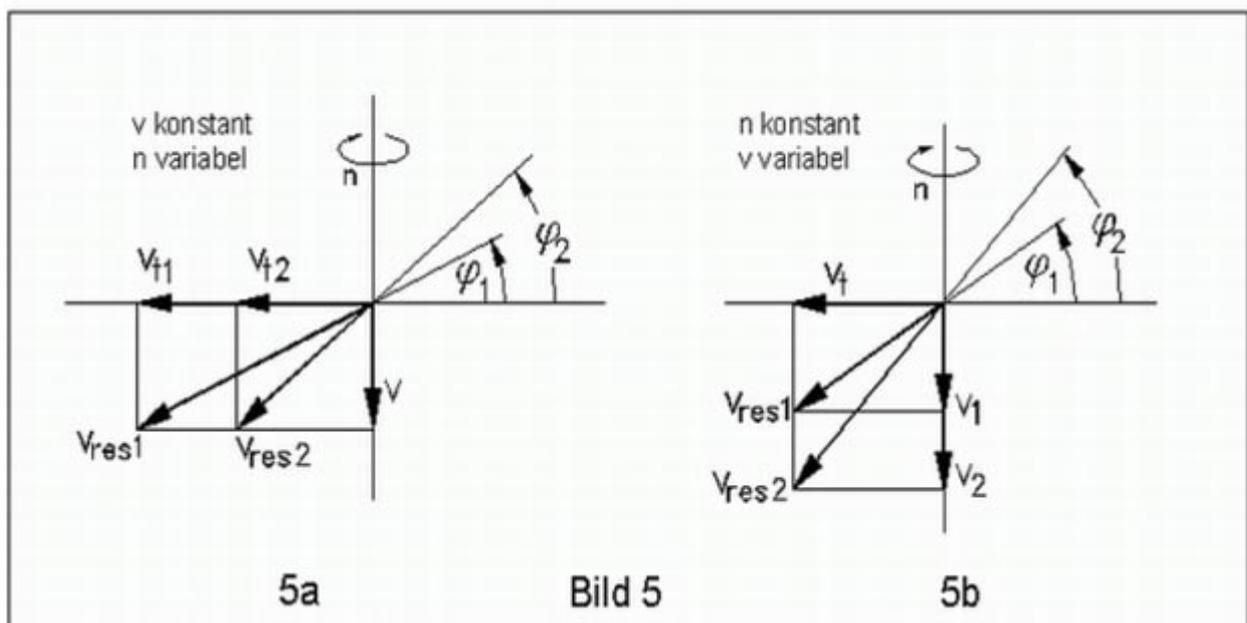
$$\beta = \varphi + \alpha \quad (7)$$

Im PropCalculator wird diese Gleichung in umgestellter Form verwendet; es ist der Blattwinkel β gegeben, und damit wird dann **

$$\alpha = \beta - \varphi \quad (8)$$

Da wir es nicht nur mit einer einzigen Stelle im Blatt zu tun haben, muß β über den gesamten Blattradius bekannt sein. Dazu dient die sog. Blattwinkelverteilung (Diagramm, Bild 7); darin ist durch hinreichend viele gemessene Stellen eine Kurve gezeichnet. In der Datenbank des PropCalculators sind für alle aufgenommenen Propeller solche Blattwinkelverteilungen abgelegt.

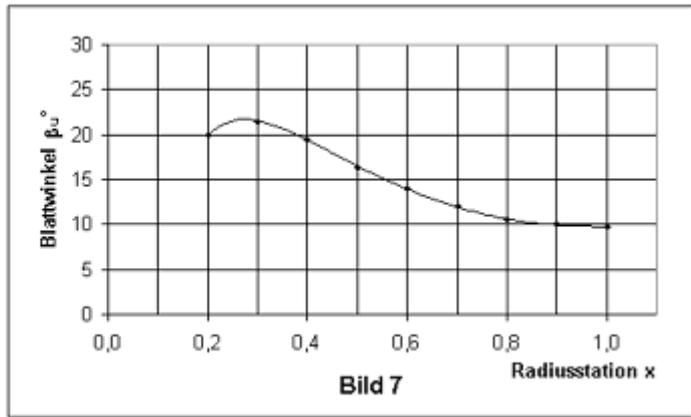
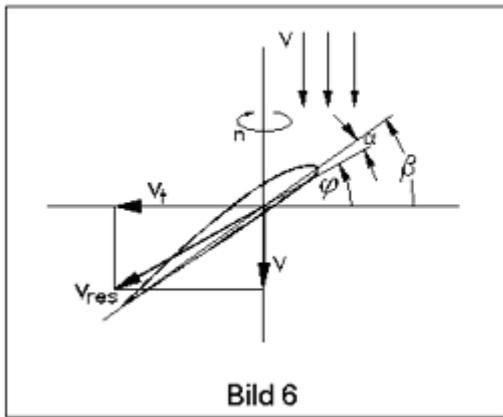
In Bild 7 bedeutet die Bezeichnung „ β_u “ nur, daß der Blattwinkel (mit Winkelmesser) gegen die Blattunterseiten-Tangente gemessen worden ist. Da die Anstellwinkel in den Polardiagrammen normalerweise auf die Profilschnecke bezogen sind, muß zu diesem β_u noch ein geringer Differenzwinkel „ $\Delta\beta$ “ addiert werden, um den Blattwinkel zu erhalten. Diese profilspezifischen $\Delta\beta$ sind ebenfalls in der Datenbank gespeichert und werden vom Programm automatisch berücksichtigt.



5a

Bild 5

5b



Es ist zweckmäßig und üblich, daß man alle „Verteilungen“ nicht über dem *absoluten Blattradius* (in mm, cm o.ä) aufträgt, sondern bezogen auf den Blattspitzenradius R bzw. den halben Propellerdurchmesser $D/2$. Die dimensionslosen *Radiusstationen* sind dann einfach $x = r/R$ (Bild 7). Eine solche Darstellung ist unabhängig vom verwendeten Maßsystem und von der Propellergröße im Einzelfall; durch Multiplizieren von x mit dem Blattspitzenradius erhält man immer die absoluten Maße.

Zurück zu unserem Zuströmwinkel ϕ und dem Verhältnis v/v_t . Wir haben gesehen, daß dieses Verhältnis das eigentliche Maß für den Zuströmwinkel und als Folge auch für den Anstellwinkel α ist. Wenn wir nun die Blattspitze betrachten, dann wird aus der Tangentialgeschwindigkeit v_t deren Spezialfall *Umfangsgeschwindigkeit* v_u .

Die Tangentialgeschwindigkeit wächst linear mit dem Abstand zur Drehachse (vgl. Bild 4), unter Verwendung des dimensionslosen Blattradius x ist einfach

$$v_t = x \cdot v_u \quad (9)$$

Daher genügt es, wenn wir uns nachfolgend auf die Umfangsgeschwindigkeit beschränken; wir erhalten daraus immer leicht die Tangentialgeschwindigkeit an jeder anderen Stelle.

Der Fortschrittsgrad

Als Maß für den Zuströmwinkel haben wir jetzt das Verhältnis v/v_u . Dieses Verhältnis Fluggeschwindigkeit zu Umfangsgeschwindigkeit wird (zunächst allgemein, s.u.) als sog. *Fortschrittsgrad* bezeichnet; es kennzeichnet die Anströmungsverhältnisse am Propeller.

Wenn man v/v_u durch Einsetzen für v_u noch weiterentwickelt, ergibt sich die Formel

$$\frac{v}{v_u} = \frac{v \cdot 60}{n \cdot D} \cdot \frac{1}{\pi} \quad (10)$$

Anmerkungen:

*

Ganz so einfach ist es in Wirklichkeit leider nicht. Es müssen gewisse Gesetze beachtet werden, damit am Ende ein guter Propeller entsteht. Dies erfolgt in der sog. „Entwurfsrechnung“. Das ist analog zu Tragflügeln, bei denen auch Gesetze zur Formgebung beachtet werden müssen, damit der *induzierte Widerstand* minimal wird. Hierbei spielt dann die Verteilung der Blattiefe über den Radius eine Rolle. Aber auch im PropCalculator wird die Blattiefeverteilung gebraucht; daher ist sie ebenfalls in der Datenbank gespeichert.

**

Auch hier ist die Sache in Wirklichkeit erheblich komplizierter. Weil die Strömungsgeschwindigkeit in der Propellerebene zunimmt, tritt eine sog. „induzierte“ Zusatzgeschwindigkeit auf, die den geometrischen Anstellwinkel α um einen sog. „induzierten Anstellwinkel“ auf den „effektiven“ Anstellwinkel verringert. Dies muß in der genauen Rechnung natürlich berücksichtigt werden, bzw. ist sogar einer der Hauptpunkte. Im Rahmen dieser Arbeit spielen solche Details jedoch keine Rolle.

Als reine Maßzahl für den Fortschrittsgrad ist es nicht notwendig, hiervon den Teilausdruck $1/\pi$ „mitzunehmen“ (in Rechnungen muß man ihn natürlich berücksichtigen). Man definiert willkürlich, aber natürlich zweckmäßig als Fortschrittsgrad im „engeren Sinn“

$$J = \frac{v \cdot 60}{n \cdot D} \quad (11)$$

PropCalculator verwendet diese, auf das ehemalige NACA zurückgehende Definition für den Fortschrittsgrad. Die Fluggeschwindigkeit v wird darin in [m/s] eingesetzt, die Drehzahl n in [U/min], und der Prop-Durchmesser D in [m]. Der Faktor 60 rührt davon her, daß in der ursprünglichen NACA-Definition die Drehzahl in [U/s] eingesetzt wurde. Der Fortschrittsgrad ist eine dimensionslose Zahl und daher unabhängig vom Maßsystem. In der Praxis kann er Werte zwischen 0 (Stand, $v = 0$) und max. etwa 2 annehmen; bei den meisten Modellpropellern liegt der max. vorkommende Wert unter 1.

Der Fortschrittsgrad ist ein einfaches und eindeutiges Maß für den Anström- bzw. Betriebszustand eines Propellers. Daher werden Propellerdaten stets in Abhängigkeit vom Fortschrittsgrad berechnet und dargestellt, beispielsweise Schub- und Leistungsbeiwert (s.u.) und Wirkungsgrad.

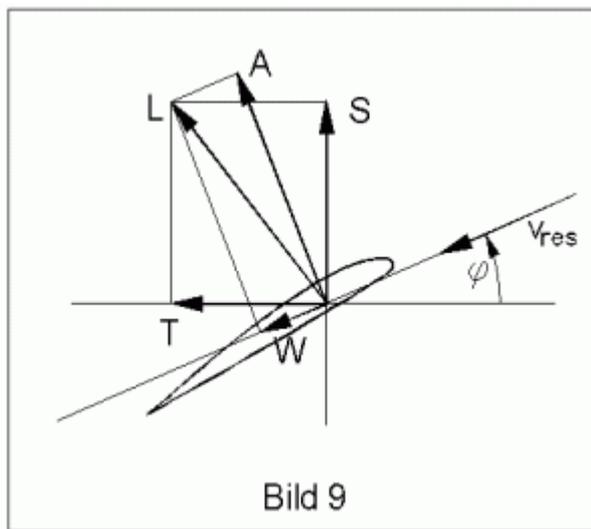
Bei allem, was mit Propellern zu tun hat, taucht früher oder später der Fortschrittsgrad auf. Er spielt bei Propellern etwa dieselbe Rolle wie der Anstellwinkel bei einem Tragflügel. Auch PropCalculator verwendet den Fortschrittsgrad an wichtigen Stellen. Wer mit Propellern zu tun hat, sollte sich diesen Begriff aneignen.

Wenn die Fluggeschwindigkeit steigt, dann wächst der Fortschrittsgrad. Dadurch wächst der Winkel ϕ (Bild 6). Der Blattwinkel β ist aber vorgegeben und ändert sich

nicht. Damit wird zwangsläufig der Anstellwinkel α am Blatt kleiner, und der Schub wird kleiner. Ähnlich ist es mit der Antriebsleistung.

Die Kräfte und Propellerbeiwerte

Am Blattprofil tritt wie bei einem Tragflügel eine Luftkraft auf, die wir hier aber in eine Schubkraft S (in Achsrichtung) und eine Tangentialkraft T (\Rightarrow Drehmoment, in Drehrichtung) zerlegen (Bild 9). Dabei ist ein kleiner Umweg nötig, weil man aus dem Polardiagramm ja nur die Auftriebskraft A bzw. C_A (senkrecht zur Anströmgeschwindigkeit v_{res}) und die Widerstandskraft W bzw. C_W (in Anströmrichtung) entnehmen kann. Die Umrechnung wird natürlich vom Programm erledigt; daneben summiert es diese Kräfte in den einzelnen Schnitten über das gesamte Blatt auf.



Bei genauerem Studium von Bild 9 ist zu erkennen, daß die Anteile der Widerstandskraft W den Schub S vermindern und die Tangentialkraft T erhöhen. Aber selbst wenn wir in Gedanken den Idealfall annehmen, daß das Profil völlig reibungslos umströmt würde ($W = 0$), verschwindet die Tangentialkraft nicht, und es ist auch dann ein Antriebsdrehmoment notwendig.

Das rührt davon her, daß die Auftriebskraft A unvermeidlich gegenüber der Drehachse nach hinten geneigt ist und damit eine Komponente in Tangentialrichtung hat. Dieser Mindestverlust ist der Preis, den wir für die Schuberzeugung „zahlen“ müssen. In den von PropCalculator erstellten Diagrammen sind die Kurven für den „Idealfall“ mit eingezeichnet. Man kann dadurch sehen, wieviel Leistung für die Überwindung des Luftwiderstands aufgewendet werden muß.

Wir haben anfangs gesehen, daß man bei Tragflügeln Auftrieb und Widerstand in die dimensionslose Beiwertform (C_A , C_W) bringt, um vom Einzelfall unabhängige Daten zu erhalten. Genauso verfährt man bei Propellern. Der gemessene oder berechnete Schub S eines Propellers wird dazu durch eine Bezugsfläche und einen Staudruck dividiert. Was dazu verwendet wird, ist wieder einmal reine Definitionssache. PropCalculator verwendet auch hier die NACA-Definition.

Der *Bezugsstaudruck* wird gebildet mit der Geschwindigkeit $(n/60) \cdot D$ und der Luftdichte ρ (ohne den sonst üblichen Faktor $1/2$); als *Bezugsfläche* dient ein Quadrat mit der Seitenlänge D .

Der *Schubbeiwert* heißt C_T , herrührend von der englischen Bezeichnung „Coefficient of Thrust“. Das ergibt dann die Formel

$$C_T = \frac{S}{\rho \cdot \left(\frac{n}{60}\right)^2 \cdot D^4} \quad (12)$$

Daß C_T in Abhängigkeit vom Fortschrittsgrad angegeben wird, ist nach dem weiter oben Gesagten eigentlich selbstverständlich.

Ähnlich wird mit dem Drehmomentbeiwert C_Q verfahren (Q rührt vom englischen „Torque“ her). Da es sich um ein Drehmoment (Kraft*Hebelarm) handelt, muß gegenüber C_T (eine Kraft) noch durch einen „Bezugshebelarm“ dividiert werden; dafür nimmt man wieder den Prop-Durchmesser D . Dann wird

$$C_Q = \frac{M}{\rho \cdot \left(\frac{n}{60}\right)^2 \cdot D^5} \quad (13)$$

Als Letztes wird noch der sog. Leistungsbeiwert C_P berechnet („P“ stammt vom englischen „Power“). Da es sich hierbei um eine Leistung (Drehmoment*Drehzahl) handelt, muß gegenüber dem Drehmomentbeiwert zusätzlich noch durch eine Drehzahl dividiert werden, damit der Beiwert dimensionslos wird. Hierfür verwenden wir natürlich wieder die Drehzahl $n/60$. Es ist dann

$$C_P = \frac{P}{\rho \cdot \left(\frac{n}{60}\right)^3 \cdot D^5} \quad (14)$$

Bei Antriebsrechnungen erweist sich der Leistungsbeiwert C_P besser geeignet als C_Q . Daher wird in der Praxis (nicht nur vom PropCalculator) fast ausschließlich C_P verwendet. Dieser Beiwert wird ebenfalls wieder über dem Fortschrittsgrad aufgetragen.

Der Propeller-Wirkungsgrad

Als letzte wichtige Größe bleibt jetzt noch der Wirkungsgrad zu berechnen. Er ist definitionsgemäß

$$\eta = \frac{\text{Nutzleistung}}{\text{zugeführte Leistung}} = \frac{S \cdot v}{P} \quad (15)$$

In diese Gleichung kann man die o.g. Ausdrücke für die Beiwerte einsetzen, und nach einigem Rechnen ergibt sich für den Wirkungsgrad die einfache Formel

$$\eta = \frac{C_T}{C_P} \cdot J \quad (16)$$

Er wird ebenfalls wieder über dem Fortschrittsgrad aufgetragen.

PropCalculator zeigt den Verlauf von C_T vs. J , C_P vs. J und η vs. J in einzelnen Diagrammen. Man könnte die 3

Kurven auch in einem einzigen Diagramm mit 3 verschiedenen y-Achsen darstellen; das sieht dann typisch wie in Bild 10 aus:

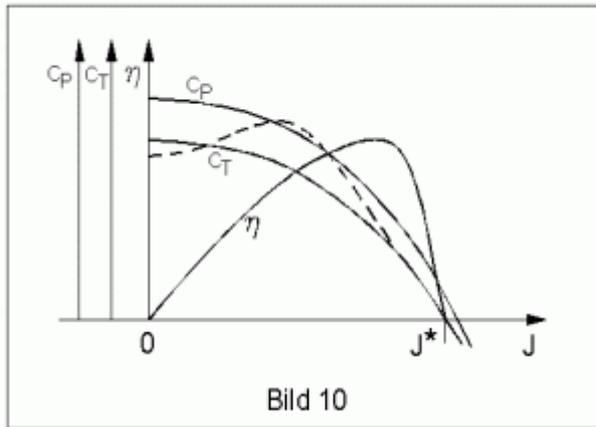


Bild 10

C_T und C_p fallen von ihren Standwerten aus mit zunehmendem Fortschrittsgrad zuerst schwach, dann immer stärker. Bei einem bestimmten Fortschrittsgrad J^* wird C_T (d.h. der Schub) zu Null. Bei diesem Fortschrittsgrad ist aber C_p noch nicht Null, da noch Leistung zur Überwindung der Reibungsverluste gebraucht wird.

Erst bei einem noch etwas höheren Fortschrittsgrad wird auch C_p gleich Null; der Schub ist in diesem Punkt schon negativ, der Propeller bremst. Bei noch höheren Fortschrittsgraden wird aus dem Propeller eine Windmühle (Schub und Leistung negativ).

Bei Propellern mit hohen Blattwinkeln kann auch der gestrichelte Verlauf eintreten. In diesem Fall ist im Stand die Strömung in Teilbereichen des Blattes abgerissen. Mit zunehmender Geschwindigkeit wird der Zuströmwinkel größer, der Anstellwinkel am Blatt kleiner, die Strömung legt sich an und der Schub wächst. PropCalculator zeigt auch solche Fälle.

Der Wirkungsgrad erreicht sein Maximum erst bei relativ hohen Fortschrittsgraden, bei denen C_p und damit der Leistungsdurchsatz schon deutlich abgesunken ist. Man fliegt daher oft nicht beim Fortschrittsgrad des besten Wirkungsgrads, sondern bei einem etwas kleineren (auf der linken Seite vom η -Maximum) mit höherer Leistung.

Die Sache mit der Steigung

Wer bis hier durchgehalten hat, hat sich vielleicht gewundert, daß von der sog. *Propellersteigung* noch keine Rede

war. Wir haben sie nicht gebraucht, da wir von einem Propeller mit einer Blattwinkelverteilung ausgegangen sind, bei welcher der Blattanstellwinkel auf die Verteilung der Anströmgeschwindigkeiten „aufsetzt“. PropCalculator geht von solchen „gegebenen“ Verteilungen aus.

Berechnete oder experimentell gefundene *Optimalpropeller* zeigen selten Blattwinkelverteilungen, die eine konstanter Steigung („Schraubenfläche“) aufweisen. Man gibt daher eine „Nenn-Steigung“ (in der Regel bei $x = 0.7$, da hat ein Propeller seinen „aktivsten“ Bereich) an, welche den Prop charakterisiert. Propeller mit über den Blattradius konstanter Steigung sind nur ein Sonderfall von allgemeineren Blattwinkelverteilungen. Trotzdem soll noch kurz auf diesen Fall eingegangen werden.

Beim Propeller mit konstanter Steigung H nimmt der Blattwinkel entsprechend einer Schraubenfläche zur Nabe hin zu (Bild 11); für den Blattwinkel gilt, abhängig von der x -Station :

$$\beta = \arctg \left(\frac{H}{D} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{x} \right) \quad (17)$$

Bild 12 zeigt den Verlauf des Blattwinkels für ein Verhältnis $H/D = 0,5$.

Speziell für die Blattspitze ($x = 1$) gilt

$$\beta_{Tip} = \arctg \left(\frac{H}{D} \cdot \frac{1}{\pi} \right) \quad (18)$$

Damit ist eine einfache Abschätzung des Fortschrittsgrads J^* möglich, bei dem der Schub zu Null wird. Gemäß Formel (6) für den Zuströmwinkel gilt speziell für die Blattspitze

$$\varphi_{Tip} = \arctg \left(J \cdot \frac{1}{\pi} \right) \quad (19)$$

Wir nehmen nun zur Vereinfachung an, daß der Propeller ein symmetrisches Profil ohne zusätzlichen Anstellwinkel aufweist. Dann wird sein Schub zu Null werden, wenn Zuströmwinkel φ_{Tip} gleich dem Blattwinkel β_{Tip} wird. Dann sind auch die rechten Seiten von (19) und (20) gleich, und es ist

$$J^* = \frac{H}{D} \quad (20)$$

Da ein realer Propeller nur selten ein symmetrisches Profil besitzt, das Profil auch noch etwas angestellt sein wird, und die Steigung auch oft nicht konstant ist, stellt diese Formel nur eine Näherung dar. Die Praxis zeigt, daß der

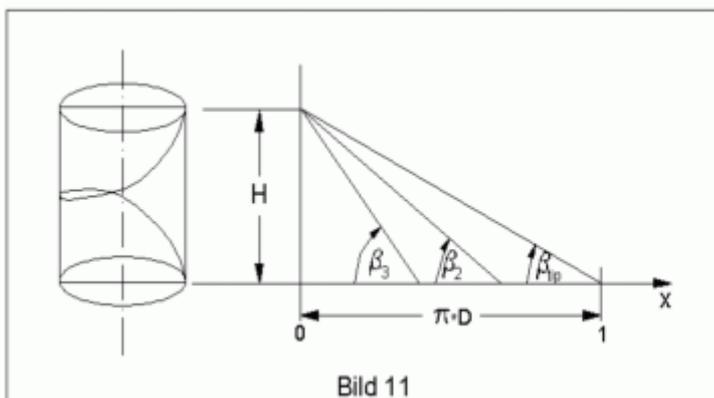


Bild 11

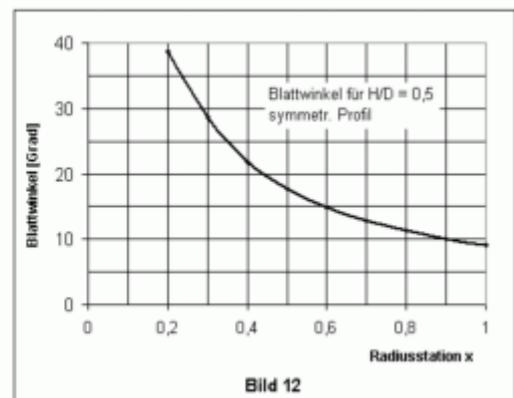


Bild 12

reale Fortschrittsgrad für verschwindenden Schub fast immer etwas höher ist, es ist etwa

$$J^* \approx 1,05 - 1,15 \cdot \frac{H}{D} \quad (21)$$

Absolutwerte von Schub und Leistung

Für den praktisch tätigen Anwender sind dies die wichtigsten Daten. Hier soll nur zum besseren Verständnis der Weg dazu beschrieben werden; PropCalculator macht das alles von allein.

Um Schub und Leistungsbedarf zu berechnen, muß man neben den Propellerdaten selbst (Durchmesser, Form und Anzahl der Blätter usw.) immer Fluggeschwindigkeit v und Drehzahl n angeben, d.h. den sog. *Betriebspunkt* des Propellers; ohne diese Daten geht es nicht.

Der erste Schritt ist dann die Berechnung des Fortschrittsgrad nach Formel (11)

$$J = \frac{v \cdot 60}{n \cdot D} \quad (22)$$

Für diesen Fortschrittsgrad kann man jetzt aus Tabellen oder Diagrammen des betr. Propellers die C_T - und C_P -Werte entnehmen.

Danach müssen wir in die nach S und P aufgelösten Formeln (12) und (14) einsetzen:

$$S = \rho \cdot \left(\frac{n}{60} \right)^2 \cdot D^4 \cdot C_T \quad (23)$$

$$P = \rho \cdot \left(\frac{n}{60} \right)^3 \cdot D^5 \cdot C_P \quad (24)$$

Der Wirkungsgrad ist dann mit Formel (16)

$$\eta = \frac{C_T}{C_P} \cdot J \quad (25)$$

Wie schon gesagt, der PropCalculator führt diese Rechnungen selbständig durch; er macht das auch nicht nur für einen einzigen Betriebspunkt, sondern über den gesamten sinnvollen Bereich von Fluggeschwindigkeiten. Die Vorgabe einer (sinnvollen) Drehzahl ist auch hier zwingend.

Der Rechner nimmt zuerst eine sehr kleine Geschwindigkeit an (Berechnung im Stand ist aus technisch/mathematischen Gründen nicht möglich). Damit führt er sämtliche o.e. Berechnungen aus und speichert die Ergebnisse. Danach erhöht er die Geschwindigkeit um einen gewissen Betrag und führt die Berechnung erneut aus.

Dies wird so oft wiederholt, bis schließlich die Geschwin-

digkeit so groß ist, daß der Schub Null wird; dann bricht die Rechnung ab und das Ergebnis wird in einem Diagramm dargestellt. Dieses sieht im Prinzip genauso aus wie das Bild 10, nur daß hier dann Schub, Leistungsbedarf und Wirkungsgrad über der Fluggeschwindigkeit aufgetragen sind.

Kritische Anwender werden einwenden, daß die Vorgabe einer Drehzahl unrealistisch ist, da diese bekanntlich im Flug mehr oder weniger zunimmt (der Motor wird „entlastet“ - C_P wird kleiner).

Dazu hier schon die Antwort:

1.

Diese Drehzahlzunahme kann prinzipiell nicht berechnet werden, solange nicht Daten des Motors bekannt sind. Ein hochwertiger, „drehzahlsteifer“ Motor hat eine kleinere Drehzahlzunahme zur Folge als ein einfacher. Die Annahme einer konstanten Drehzahl entspricht dem Verhalten eines „echt“ Drehzahl-geregelten Motors.

Eine Berücksichtigung von Motordaten würde auch den jetzt schon nicht geringen Umfang von PropCalculator stark vergrößern und die Bedienbarkeit erschweren.

2.

Beim PropCalculator kann die Drehzahl sehr schnell und komfortabel geändert werden, sodaß man das Verhalten bei geänderten Drehzahlen leicht studieren kann.

3.

Die von PropCalculator berechneten Daten können in eine Datei (*.csv, EXCEL-kompatibel) gespeichert werden. Diese Daten können dann in einem (zukünftigen) Programm mit Daten eines Motor-Berechnungsprogramms zusammengeführt werden; damit ist dann die Aufgabe der Motor-/Propeller-Anpassung (und damit auch das Drehzahlverhalten um Flug) lösbar.

4.

Seit einiger Zeit gibt es Telemetriegeräte oder Datenlogger, mit deren Hilfe man Drehzahl und Geschwindigkeit im Flug messen kann. PropCalculator eignet sich ideal zur Auswertung solcher Daten.

Allen PropCalculator-Anwendern wünsche ich viel Freude und Erfolg.

