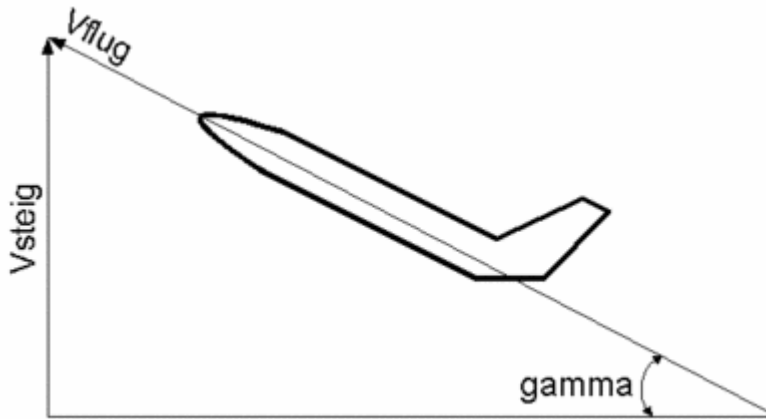


Effiziente Antriebsauslegung

1 Vortriebsleistung im Steigflug



Die benötigte Antriebsleistung eines Flugmodells ist abhängig vom Gewicht, der notwendigen Fluggeschwindigkeit und der gewünschten Steiggeschwindigkeit.

- $P_V [W] = V_{\text{flug}} [m/s] * \text{Schub} [N]$

2 Notwendige Fluggeschwindigkeit eines E-Seglers

Zur Berechnung benötigt man das Gewicht sowie den Flächeninhalt. Damit kann man die Fluggeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Auftriebsbeiwert C_A berechnen.

Flügelfläche $F [m^2]$.

Auftriebsbeiwert C_A ohne Dimension.

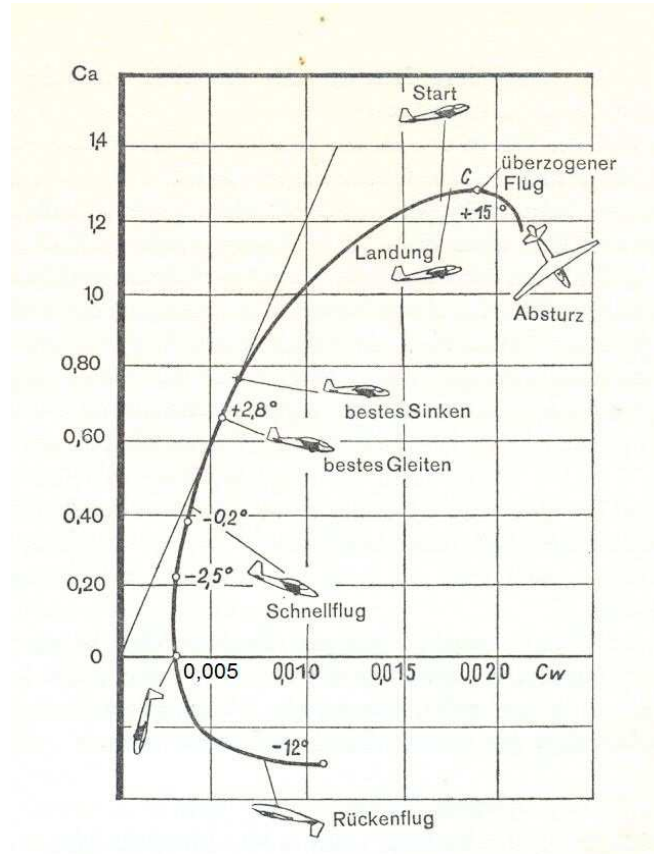
- $V_{\text{flug}} = 4 * \sqrt{((G_M / F) / C_A)}$

Typische Werte für C_A :

Fluggeschwindigkeit moderat (Thermiksegler): 0.5

Fluggeschwindigkeit schnellflug (Hotliner) : 0.3

Das folgende Bild zeigt ein typisches Polardiagramm mit C_A Werten und dessen Zuordnung.



3 Notwendiger Propeller Schub

Über das Verhältnis Steiggeschwindigkeit zu Fluggeschwindigkeit kann der Flugbahnwinkel γ bestimmt werden. Der Flugbahnwinkel γ ist für die Bestimmung der notwendigen Schubkraft notwendig.

- $\gamma = \arcsin(V_{\text{steig}} / V_{\text{flug}})$

Der Propeller muss mindestens folgenden Schub (vergl. Hangabtriebskraft) erzeugen.

- $F_{GH} = G_M \cdot g \cdot \sin(\gamma)$

mit Erdbeschleunigung $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

4 Notwendige Vortriebsleistung

Die Vortriebsleistung berechnet sich also wie folgt:

- $P_V = G_M \cdot g \cdot \sin(\gamma) \cdot V_{\text{steig}} / \sin(\gamma)$

Bisher wurden die Verluste durch den Luftwiderstand vernachlässigt. Die sind Proportional zum Quadrat der Fluggeschwindigkeit.

Die Leistungsverluste bedingt durch den Luftwiderstand berechnen sich wie folgt:

$$\bullet \quad P_W = (K_w * (V_{\text{steig}} / \sin(\gamma))^2) * V_{\text{steig}} / \sin(\gamma)$$

mit K_w als unbekannter modellspezifischer Widerstandskonstante

Die Gleichung für die Vortriebsleistung hat sich vereinfacht, ohne Berücksichtigung des Luftwiderstandes ist sie sogar unabhängig vom Flugbahnwinkel γ .

$$\bullet \quad P_V = G_M * g * V_{\text{steig}} + P_W$$

5 Notwendige elektrische Antriebsleistung vom Motor

Leider sind die Verluste durch den Luftwiderstand i.d.R. nicht bekannt. Abschlägig kann für ein Thermiksegler ein Wert von 0.5 m/s, für einen Allrounder ein Wert von 1 m/s als Sinkgeschwindigkeit angenommen werden. Damit ergibt sich die durch den Prop zu erbringende Leistung wie folgt:

$$P_{\text{Prop}} = G_M * g * (V_{\text{steig}} + V_{\text{sink}})$$

Angenommen wird jetzt ein Propellerwirkungsgrad von 60%. Die notwendige Wellenleistung des Motors ist jetzt

$$\bullet \quad P_{\text{Welle}} = P_{\text{Prop}} / 0.6$$

Für den Motor wird ein Wirkungsgrad von 80 % angenommen, für bessere brushless Motore ein typischer Wert. Damit ergibt sich die notwendige elektrische Eingangsleistung des Motors von

$$\bullet \quad P_{\text{in}} = P_{\text{Welle}} / 0.8$$

Beispiel:

$$G_M = 1.6 \text{ kg}$$

$$V_{\text{steig}} = 7 \text{ m/s}$$

$$V_{\text{sink}} = 0.5 \text{ m/s}$$

$$P_{\text{Welle}} = (1.6 \text{ kg} * 9.81 \text{ m/s}^2 * 7 \text{ m/s}) / 0.6$$

$$P_{\text{Welle}} = 183 \text{ W}$$

$$P_{\text{in}} = 183 \text{ W} / 0.8$$

Wir benötigen 229 W an elektrischer Leistung.

Als nächstes müssen wir einen geeigneten LiPo auswählen. In unserem Beispiel ist ein 3S LiPo eine gängige Wahl.

Angenommen wird eine Zellspannung des LiPo von 3.6 V pro Zelle unter Last. Mit P_{in} lässt sich der notwendige Motorstrom I wie folgt berechnen.

$$\bullet \quad I = P_{\text{in}} / (3 * 3.6 \text{ V}), \text{ also } 21 \text{ A.}$$

Der Drehzahlsteller und der LiPo sollte daher einen Dauerstrom von mindestens 21 A aushalten.

Beispiel Fluggeschwindigkeit:

$$F = 0.35 \text{ m}^2$$

$$C_A = 0.4$$

$$G_M = 1.6 \text{ kg}$$

$$V_{\text{flug}} = 4 * \sqrt{(1.6 / 0.35 / 0.4)}$$

$$V_{\text{flug}} = 13.5 \text{ m/s}$$

6 Propeller - und Motorauswahl

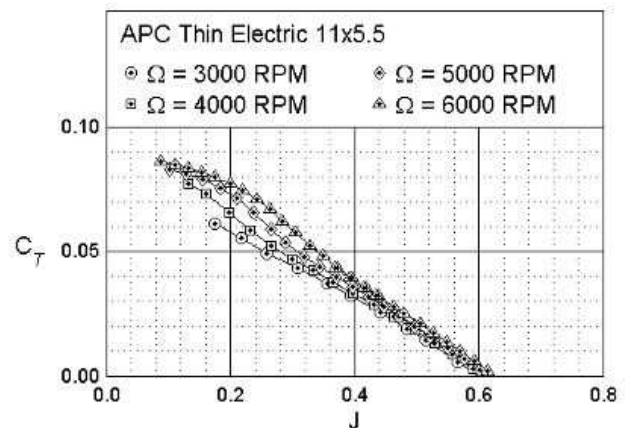
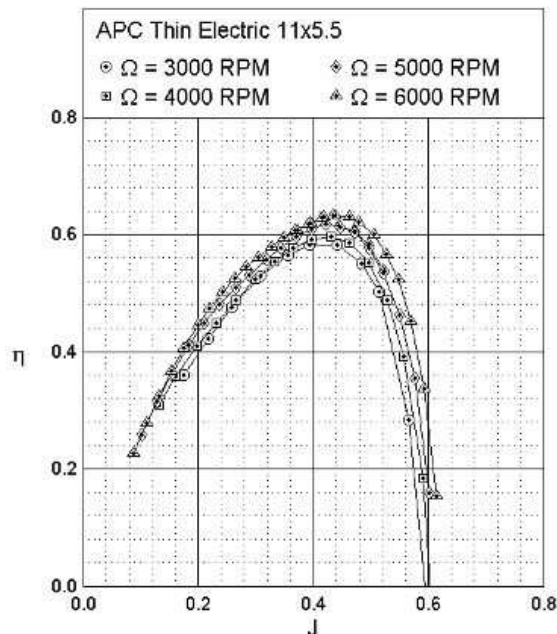
Mit der Steiggeschwindigkeit von 7 m/s sowie der Fluggeschwindigkeit von 13.5 m/s ergibt sich ein Steigwinkel von

$$\begin{aligned} \bullet \quad \sin(\gamma) &= V_{\text{steig}} / V_{\text{flug}} \\ &= 31^\circ \end{aligned}$$

Der Propeller muss jetzt bei einem G_M von 1.6 kg und dem Steigwinkel von 31° einen Schub von

$$\begin{aligned} \bullet \quad F_{GH} &= 1.6 \text{ kg} * 9.81 \text{ m/s} * \sin(31^\circ) \\ &= 8.1 \text{ N liefern} \end{aligned}$$

Schaut man sich die Propeller Schubbeiwerte über dem Fortschrittsgrad J an, dann liefert ein Propeller im Wirkungsgrad optimum etwa die Hälfte vom Standschub zur Verfügung (30° Flugbahnwinkel). Die Verhältnisse sind übrigens für alle Propeller ähnlich. Der Propellerwirkungsgrad steigt mit zunehmendem Ratio H/D . Der Schubbeiwert C_T steigt mit der 4. Potenz vom Durchmesser. Ideal sind also große Propeller mit großer Steigung an langsam drehenden Antrieben.



Weitere Beispiele für den Schubbeiwert C_T und Wirkungsgrad einiger Propeller sowie Formeln etc. siehe folgender Link.

<http://m-selig.ae.illinois.edu/props/propDB.html#MAS>

Ein effiziente Antriebsauslegung sollte daher die folgenden Randbedingungen erfüllen.

- Standschub ungefähr gleich dem Abfluggewicht vom E-Segler
- Motorstrom I bei Standschub etwa $1.2 \cdot I$ (berechneter Wert Flugfall)
- Steiggeschwindigkeit ungefähr 50% der Fluggeschwindigkeit
- P_{welle} wie berechnet
- Pitch Speed im Bereich $1.4 \cdot V_{\text{flug}}$ bei H/D Ratio < 0.5
- Pitch Speed im Bereich $1.3 \cdot V_{\text{flug}}$ bei H/D Ratio > 0.5

Als Antrieb verwende ich Inrunner mit Getriebe. Bei meinen E-Segler sind folgende Propellerdurchmesser und KV's in Anwendung.

Spannweite [m]	Propellerdurchmesser [Zoll]	KV [rpm/V]
1,5	11 - 12	760
2 – 2.8	13 - 16	410 - 600
3,3 - 4	17 - 18	330 - 640

7 Antriebsrechner MotCalc

Unter der nachfolgenden http kann man ein Motorberechnungsprogramm von mir herunterladen. Dieses Programm hab ich in TCL geschrieben und mit freewrap641 eine .exe erzeugt.

http://snoopy-schulz.square7.ch/motcalc_v6.exe

<http://snoopy-schulz.square7.ch/Propeller.ico>

Die Berechnung der n100 Propellerwerte basiert auf dem Dokument "Der Standschub von Propellern und Rotoren" von Helmut Schenk. Die Werte für das n100 von Propellern mit gleichem H und D verschiedener Hersteller können zudem signifikant abweichen.

http://www.rc-network.de/magazin/artikel_02/art_02-0037/Standschub.pdf

Die Grundlage der Motorberechnung hab ich vor einigen Jahren auf rcgroups gepostet.

<https://www.rcgroups.com/forums/showpost.php?p=24235690&postcount=6>

Mein MotCalc dient zur schnellen Abschätzung eines Antriebes. Dazu müssen das KV, Io und der Wicklungswiderstand vom Motor bekannt sein. Die berechneten Werte sind eine Abschätzung, die Werte können also durchaus einer größeren Abweichung unterliegen. In der Praxis sind die Ergebnisse bei vernünftigen Angaben vom Hersteller recht gut.

Mein Programm ersetzt natürlich nicht die Messung vom Motorstrom und Drehzahl.