

Propeller SearchWing – PropCalc, Selig, Motor

Friedrich Beckmann, 25.2.2021

PropCalc

ist ein Programm von Helmut Schenk zur Berechnung von Propellerkurven (Schub, Effizienz vs. Drehzahl und Fluggeschwindigkeit) auf Basis der Propellergeometrie.

siehe: <http://www.drivecalc.de/PropCalc/index.html>

Ich habe für einige Propeller in PropCalc die Drehzahl so eingestellt, dass sich ein Schub von 2N bei 15 m/s (= 54 km/h) entsteht. Man kann dann die erforderliche mechanische Leistung und den Wirkungsgrad ablesen. Die 2N Schub sind abgeschätzt aus einem Gewicht von etwa 2 kg und einer Gleitzahl von 10. Das entspricht einem angenommenen Reiseflug bei optimalem Lift/Drag Verhältnis.

Günther 5“ x 4,3“

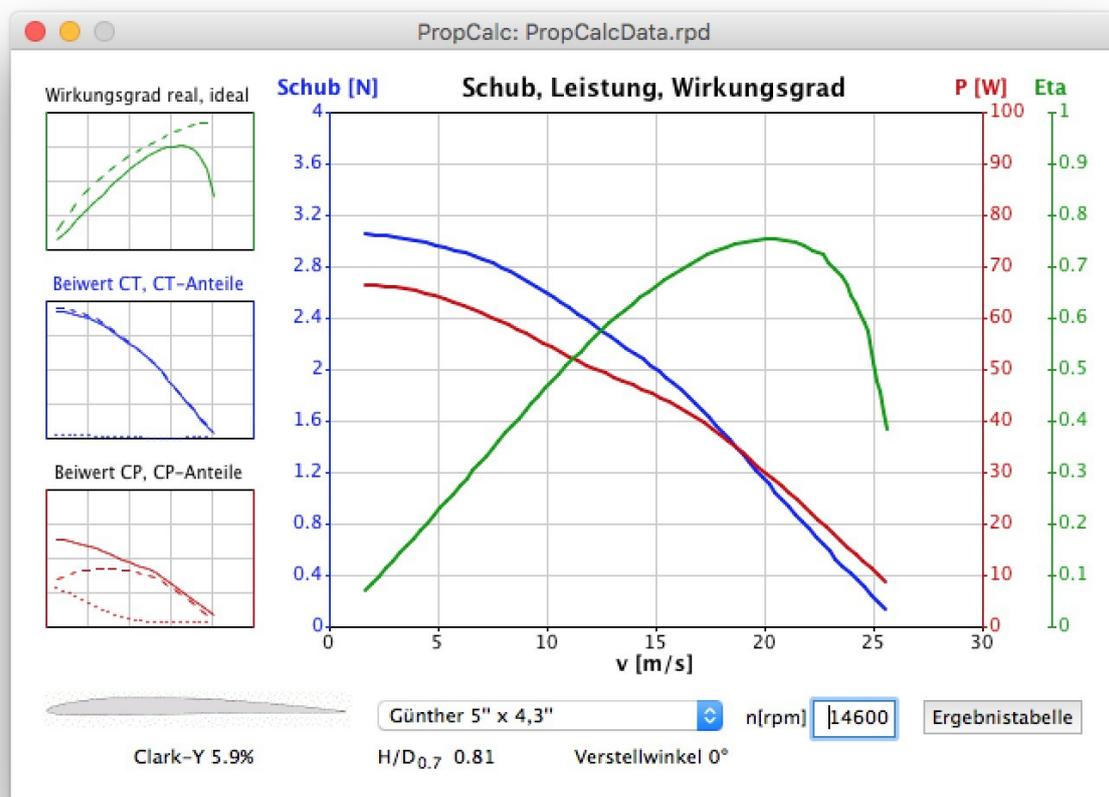


Abb. 1: Günther 5“ x 4,3“ – 14600 U/min für 2N bei ca. 45W

Das ist ein Beispiel für einen sehr kleinen Propeller, mit einem großen H/D Verhältnis, d.h. die Steigung H ist mit 4,3“ fast so groß wie der Durchmesser D 5“. Es sind 14600 U/min notwendig um die 2 Newton Schub bei 15 m/s zu erzeugen. Dabei werden ca. 45W Leistung verbraucht. Bei 25000 U/min mit 340W können im Stand 9N Schub erzeugt werden. Mit dem Propeller sind also Startprobleme zu erwarten.

Taipan 9" x 4"

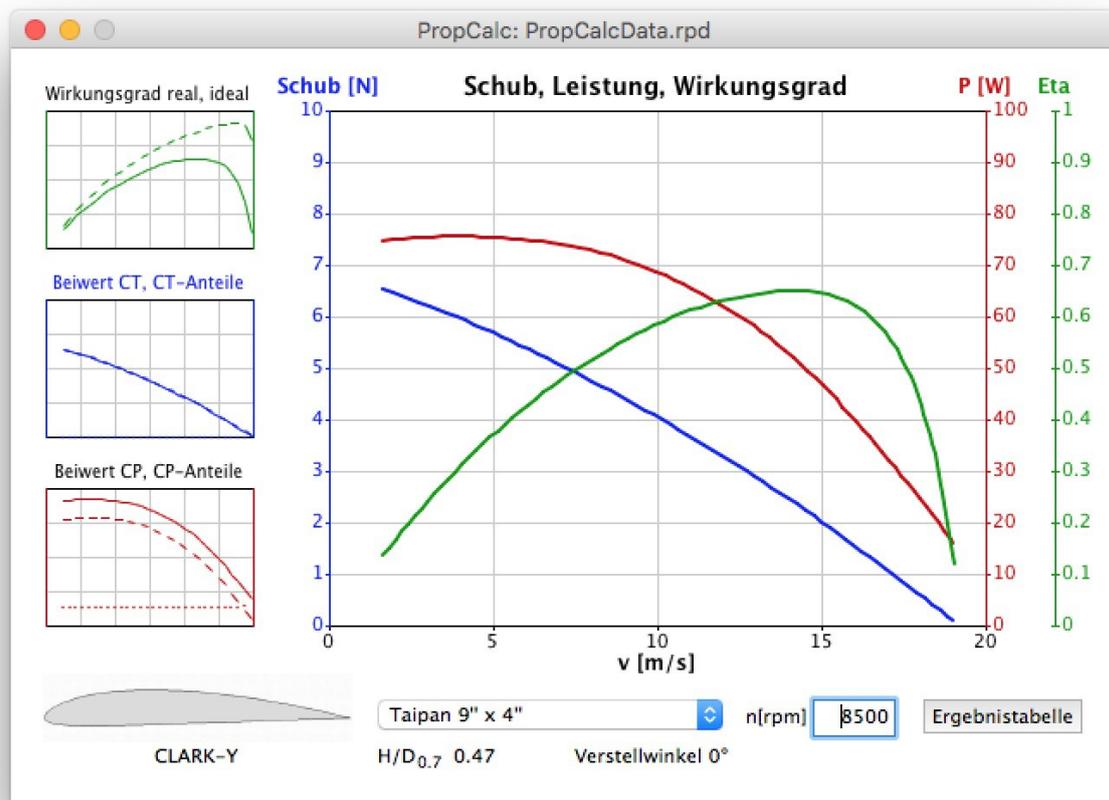


Abb. 2: Taipan 9" x 4" – 48W bei 8500 U/min

Der 9" x 4" Propeller benötigt ca. 48W bei 8500 U/min. Er wird dann fast im Bereich der höchsten Effizienz betrieben, die aber mit 65% eher niedrig ist. Im Vergleich zum Günther mit 5" Durchmesser ist eine deutlich geringere Drehzahl notwendig um den Schub von 2N zu erzeugen.

Taipan 9" x 6"

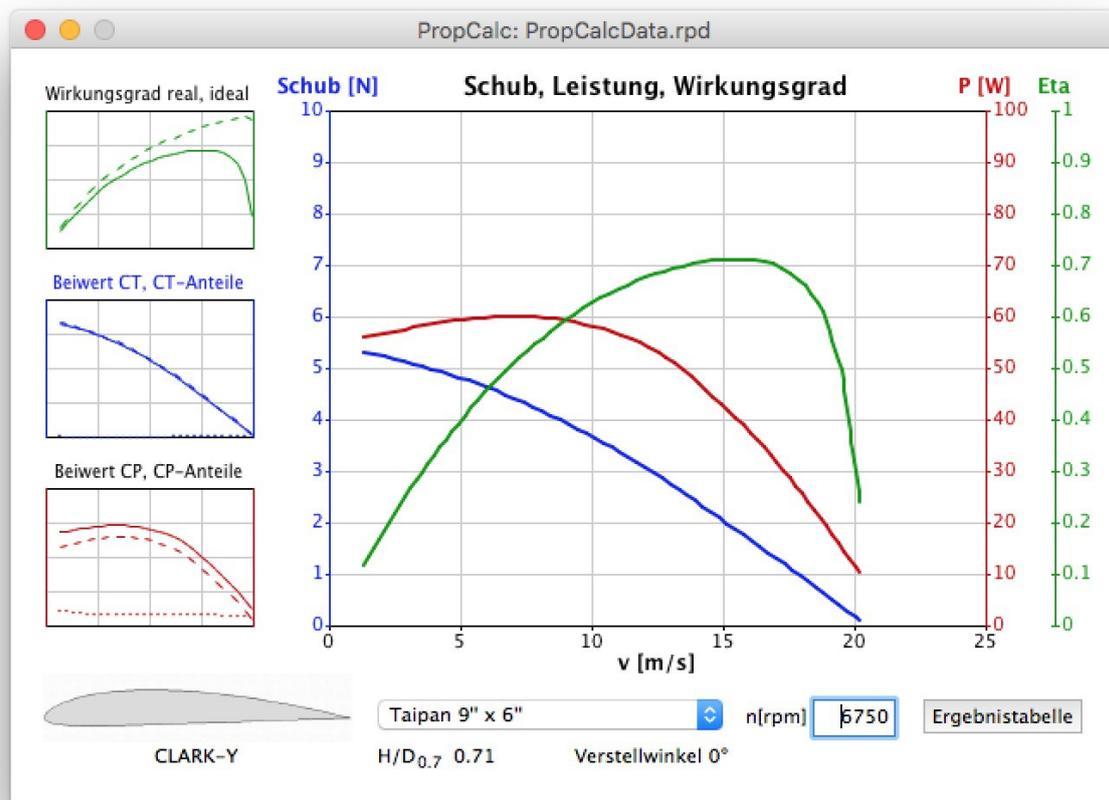


Abb. 3: Taipan 9" x 6" – 43W bei 6750 U/min

Durch die Steigung von 6" benötigt der Taipan 9" x 6" nur 6750 U/min im Vergleich zu 8500 U/min bei der 9" x 4" Variante. Der Wirkungsgrad ist mit etwa 70% größer als bei der Steigung 4" und im optimalen Bereich für diesen Propeller. Die benötigte Leistung ist etwa 43W.

Schöberl Moskito 16" x 19,2"

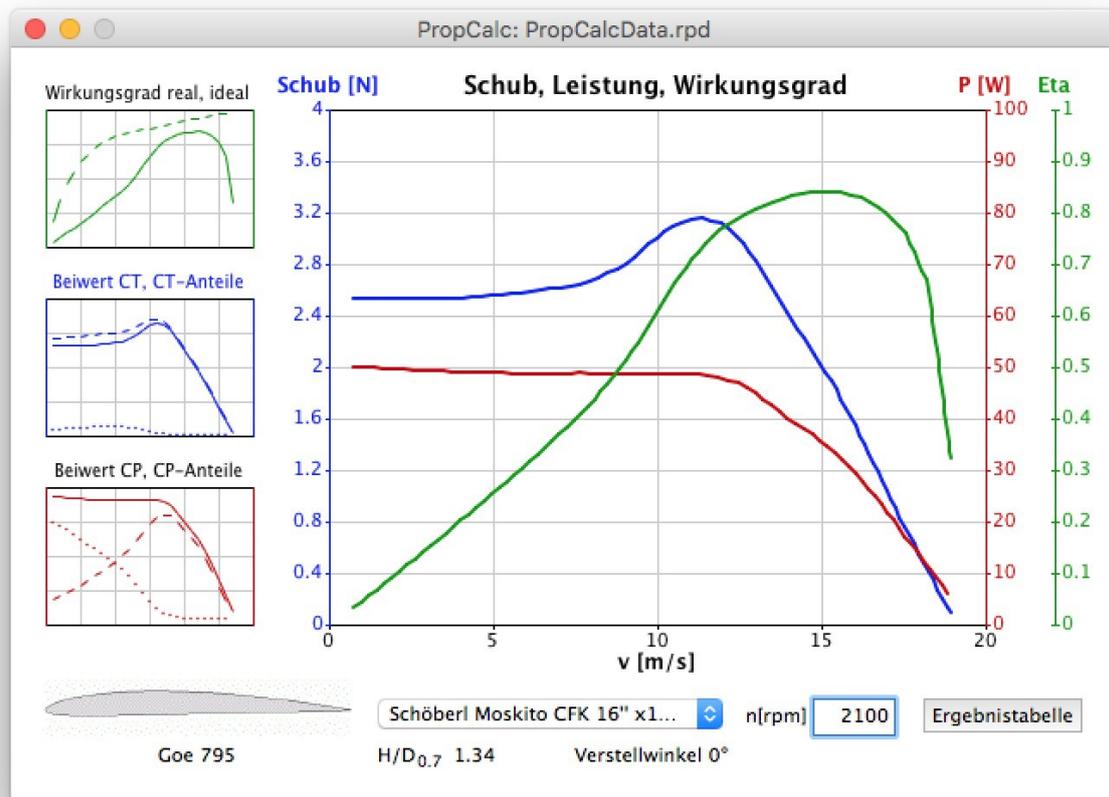


Abb. 4: Schöberl Moskito 16" x 19.2" – 2100 U/min bei 35W

Das ist jetzt ein eher außergewöhnlicher Propeller mit 16" Durchmesser und einer Steigung von 19.2". Bei deiner Drehzahl von nur 2100 U/min werden die 2N Schub mit nur 35W erzeugt.

Selig - Propelleruntersuchungen im Windkanal

Auf der Seite von Michael Selig gibt es Messergebnisse von Propellern im Windkanal.

<https://m-selig.ae.illinois.edu/props/propDB.html>

Ich habe für einige APC Thin Electric und Aeronaut CamCarbon Klapppropeller anhand der Daten aus den Windkanalmessungen wieder den Zustand für 2N Schub analysiert.

APC Thin Electric 10x7

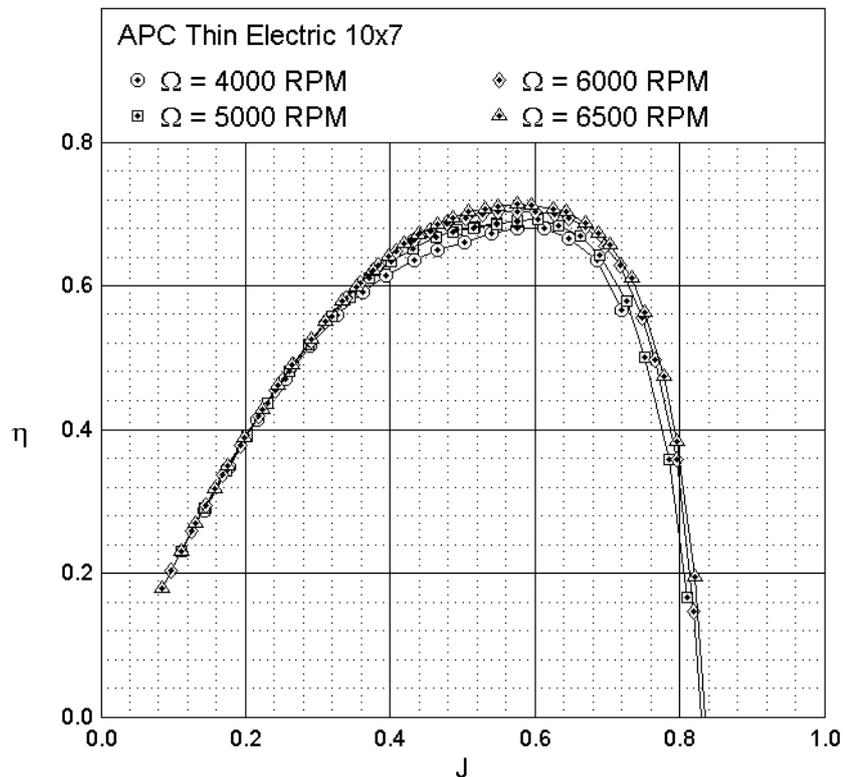


Abb. 5: APC Thin Electric 10x7 Wirkungsgrad über Fortschrittsgrad J

In Abbildung 5 ist der Wirkungsgrad des APC Thin Electric 10x7 Propellers über den Fortschrittsgrad dargestellt. Man kann erkennen, dass der maximal erreichbare Wirkungsgrad etwa 72% bei einem Fortschrittsgrad von etwa 0.6 beträgt. Der Fortschrittsgrad ist ein Maß für den Anstellwinkel des Propellerflügels in der Luft, der sich mit der Geschwindigkeit des Flugzeugs und der Drehzahl ändert. Für eine konstante Drehzahl ist J proportional zur Geschwindigkeit des Flugzeugs durch die Luft.

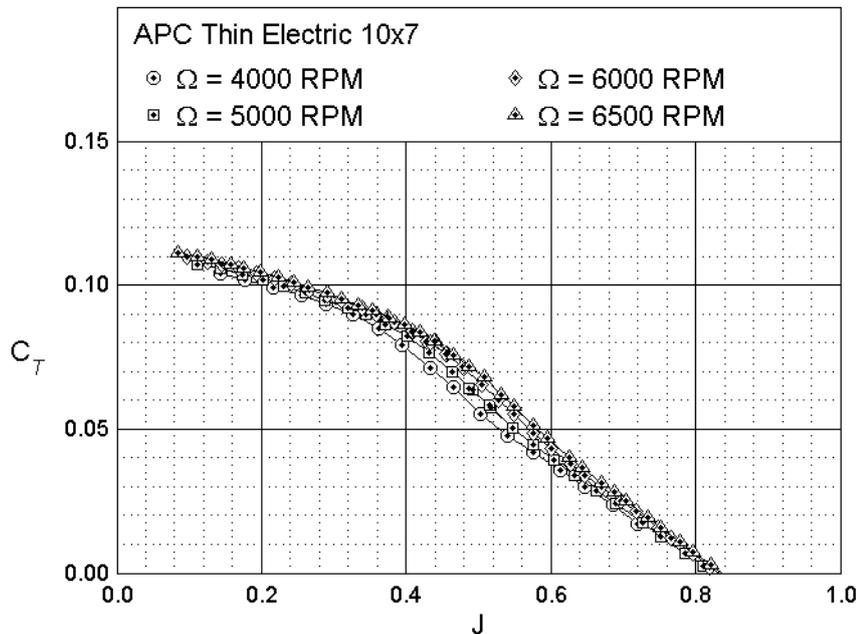


Abb. 6: Thrustcoefficient C_T über Fortschrittsgrad des APC Thin Electric 10x7 Props

Der Fortschrittsgrad J beschreibt den Betriebszustand des Propellers, der durch das Verhältnis der Geschwindigkeit des Flugzeugs durch die Luft V und dem Produkt von Drehzahl n und Durchmesser D gegeben ist. Gleichung 1 zeigt die Definition des Fortschrittsgrads.

$$J = \frac{V}{nD} \quad (1)$$

In Abbildung 6 ist der Schubkoeffizient über den Fortschrittsgrad für den APC 10x7 Thin Electric Propeller angegeben. In Gleichung 2 ist der Schub T (Thrust) in Abhängigkeit von der Drehzahl n , dem Durchmesser des Propellers D , der Dichte der Luft ($1,225 \text{ kg/m}^3$) und dem Schubkoeffizienten C_T angegeben.

$$T = C_T \rho \cdot n^2 D^4 \quad (2)$$

Der Durchmesser D beträgt $10'' = 0,254 \text{ m}$. Die Luftdichte ist $1,225 \text{ kg/m}^3$. Bei einer angenommenen Geschwindigkeit von 15 m/s und einer Drehzahl von 5830 U/min ergibt sich ein Fortschrittsgrad von etwa $J = 15 \text{ m/s} / (5830 \text{ U/60s} \cdot 0,254 \text{ m}) = 0,61$. Aus den Daten gemäß Abbildung 6 ergibt sich ein Schubkoeffizient C_T von $0,042$. Der Schub T ist dann

$$T = C_T \cdot \rho \cdot n^2 D^4 = 0,042 \cdot 1,225 \text{ kg/m}^3 \cdot (5830 \text{ U/60 s})^2 \cdot (0,254 \text{ m})^4 = 2 \text{ N} \quad (3)$$

Der Wirkungsgrad in diesem Zustand beträgt gemäß Abbildung 5 etwa 70%. Die erforderliche Leistung beträgt

$$P = C_p \cdot \rho \cdot n^3 \cdot D^5 = \frac{T \cdot V}{\eta} = 42,8 \text{ W} \quad (4)$$

Die Leistung ist also in der gleichen Größenordnung wie bei den Analysen mit PropCalc – beispielsweise bei dem 9"x6" Taipanpropeller.

APC Thin Electric 11x10

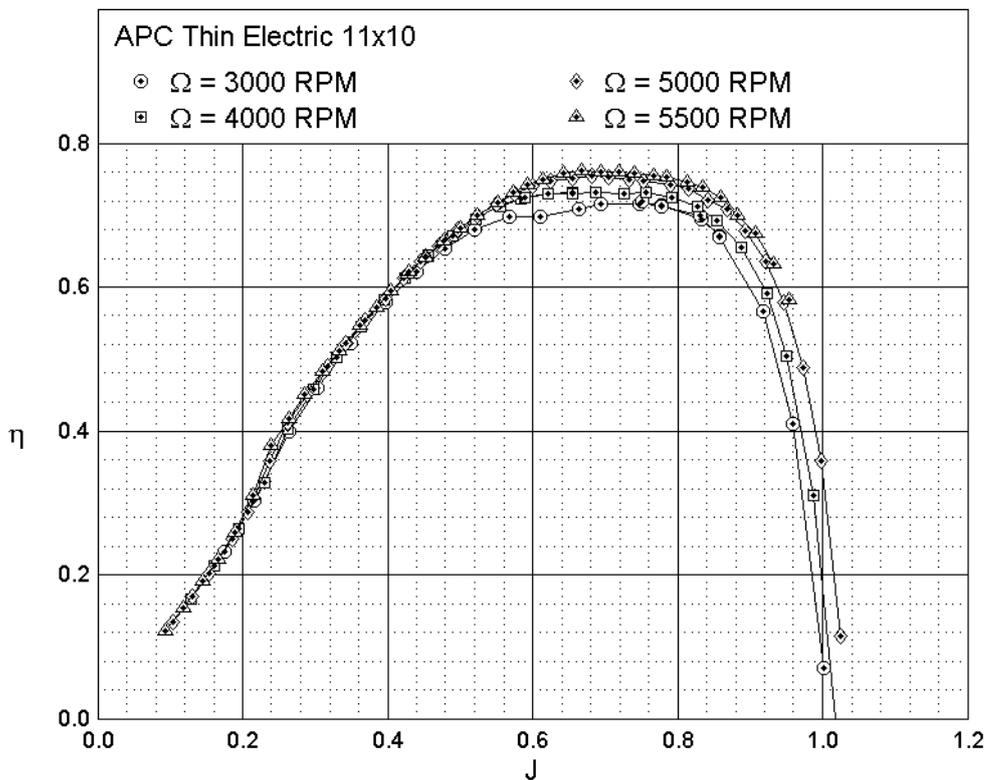


Abb. 7: APC Thin Electric 11x10 Wirkungsgrad über Fortschrittsgrads

Abbildung 7 zeigt den Wirkungsgrad über den Fortschrittsgrad für den APC Thin Electric 11x10 Propeller. Im Vergleich zum APC 10x7 hat der Propeller einen etwas größeren Durchmesser aber insbesondere das Verhältnis von Steigung $H = 10''$ zum Durchmesser $D = 11''$ beträgt 0.9.

Man kann einen maximalen Wirkungsgrad von 76% bei einem Fortschrittsgrad von etwa 0.7 ablesen. Der Wirkungsgrad ist also größer und tritt bei einem größeren Fortschrittsgrad auf. Bei den Drehzahlen 4000 und 3000 U/min sieht man eine verringerte Effizienz aufgrund von den verringerten Reynoldszahlen. Um den Propeller bei einer für ihn hohen Effizienz zu betreiben sollte also die Drehzahl mindestens 5000 U/min betragen.

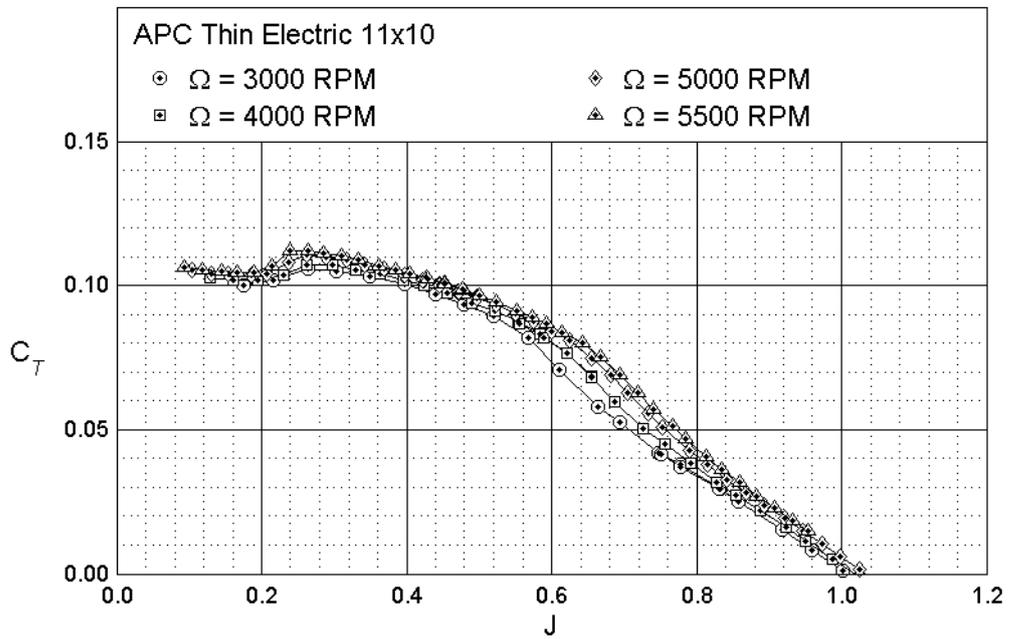


Abb. 8: Schubkoeffizient C_T über Fortschrittsgrad für den APC Thin Electric 11x10

Bei einer Drehzahl von 4410 U/min ergibt sich eine Leistung von etwa 41,1 W analog zu den Überlegungen beim APC 10x7 Propeller. Dies entspricht einem Wirkungsgrad von 73%. Der Wirkungsgrad wäre also größer als beim APC 10x7. Der Fortschrittsgrad ist 0,73.

Aironaut CAM Carbon Klapppropeller 10x12

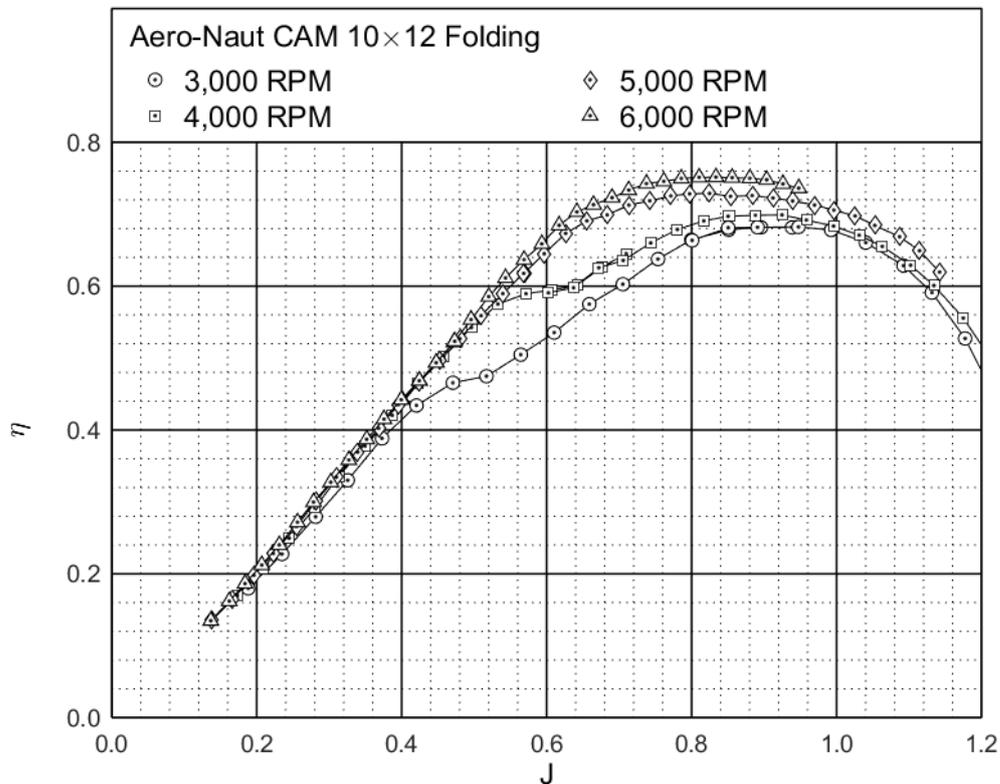


Abb. 9: Aeronaut Cam Carbon 10x12 Klapppropeller

Der Aeronaut Cam Carbon 10x12 Klapppropeller kann eine Effizienz von 75% erreichen. Man kann auch hier den Effekt von den geringen Reynoldszahlen bei kleineren Drehzahlen sehen – der Wirkungsgrad wird geringer. Um die 2N Schub zu erreichen sind 4160 U/min bei einer Leistung von 43 Watt notwendig. Der Fortschrittsgrad beträgt dann 0,85. Ich habe für die Analyse die 4000 RPM Daten verwendet. Der Wirkungsgrad beträgt 70%. Der Propeller wird also für die 2 N Schub bei zu niedrigen Reynoldszahlen betrieben.

Aeronaut Cam Carbon 10x8

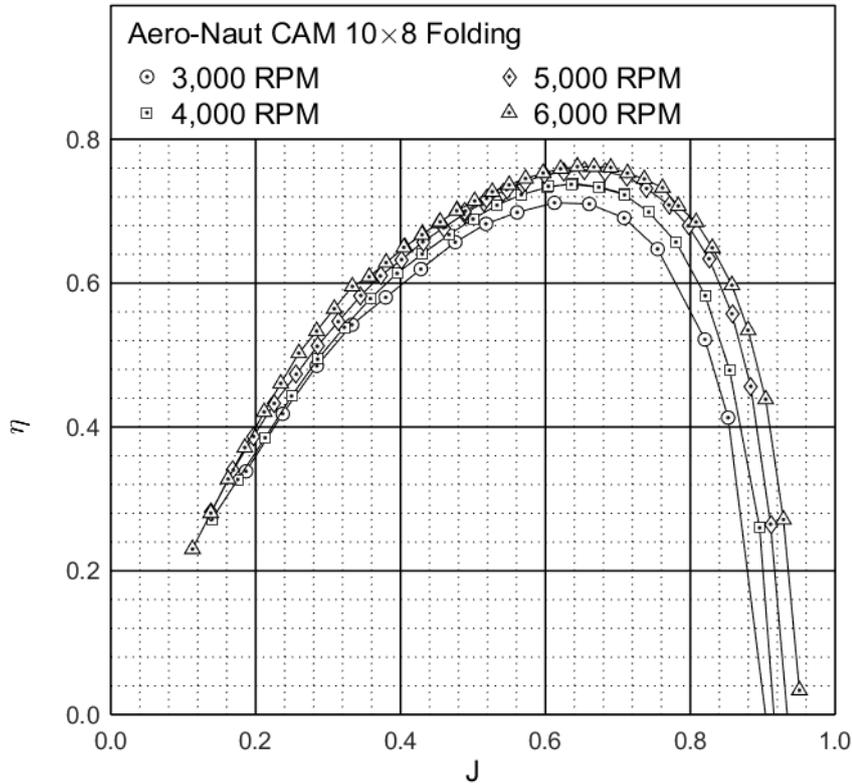


Abb. 10: Aeronaut Cam Carbon 10x8 Klapppropeller

Abbildung 10 zeigt die Effizienz des Aeronaut Cam Carbon 10x8 Klapppropellers. Es ist eine maximale Effizienz von 76% möglich. Eine Analyse auf Basis der 5000 RPM Daten ergibt eine Drehzahl von 5110 U/min bei einer Leistung von 39,75 Watt. Der Wirkungsgrad beträgt 75%. Der Fortschrittsgrad ist 0,69. Der Propeller wird also im optimalen Betriebspunkt mit maximal möglicher Effizienz bei gleichzeitig ausreichend hoher Drehzahl betrieben um die Effekte von niedrigen Reynoldszahlen zu vermeiden.

Aeronaut Cam Carbon 12x10 Klapppropeller

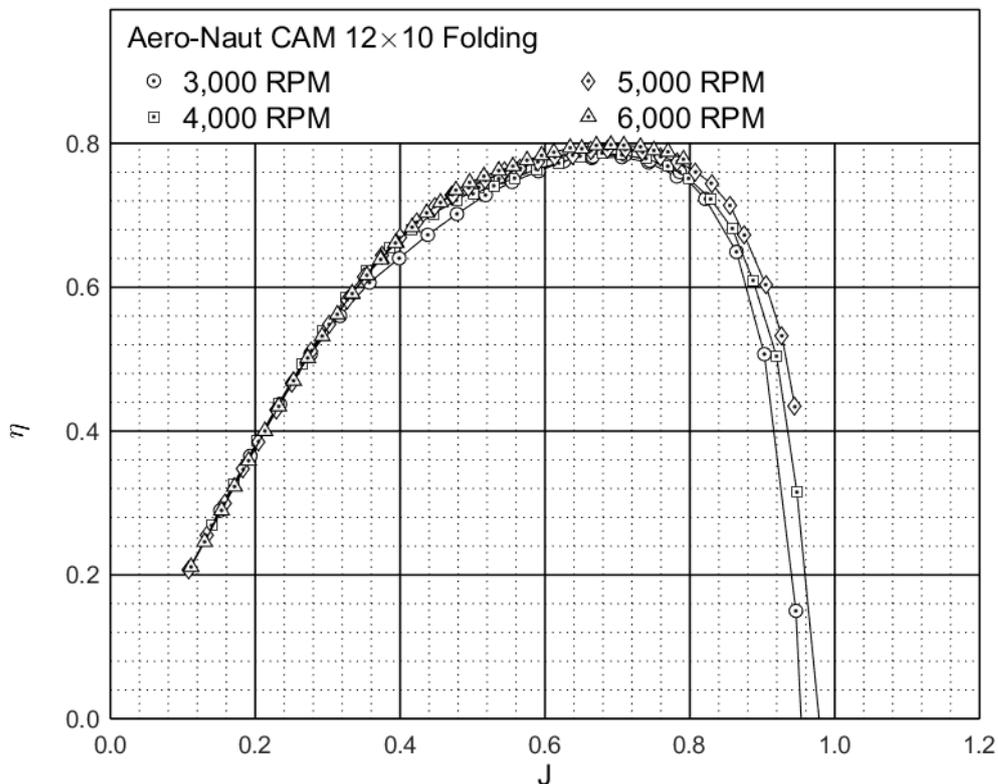


Abb. 11: Aeronaut Cam Carbon 12x10 Klapppropeller Wirkungsgrad

Bei einer Drehzahl von 3850 U/min wird eine Leistung von 39W benötigt. Das entspricht einem Wirkungsgrad von ca. 77%. Der Fortschrittsgrad beträgt 0,77 und liegt für diesen Propeller leicht über dem optimalen Wert von etwa 0,7.

Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Simulationen mit PropCalc passen gut zu den Ergebnissen aus dem Windkanal von Michael Selig vom Department of Aerospace Engineering von der University of Illinois. Bei einem angenommenen erforderlichen Schub von **2N bei einer Geschwindigkeit von 15m/s** ergeben sich je nach Propeller eine mechanische Leistung an der Welle von **35 Watt bis 48 Watt**. Ein günstiger Propeller scheint der **10"x8" bei 40W** Wellenleistung bei einer **Drehzahl von 5110 U/min**. Bessere Wirkungsgrade sind nur mit Propellern mit einem größeren Durchmesser bei einem Steigungs- zu Durchmesser Verhältnis in der Nähe von 1 zu erreichen. Beispielsweise der Aeronaut 12x10 mit 39W bei 3850 U/min. Diese Propeller drehen dann tendenziell immer langsamer was bei der Auslegung des Motors dann möglicherweise ein Getriebe erfordert.

Motorauslegung

Die Drehzahl eines DC Motors wird über die Spannung und eine bauartbedingte Drehzahlkonstante k_n bestimmt

$$n = k_n \cdot U_{ind} \quad (5)$$

Beim Extron 2814/20 ist diese Drehzahlkonstante $k_n = 800 \text{ U/min/V}$. Mit U_{ind} ist die wirksame Spannung ohne die ohmschen Verluste in der Motorwicklung gemeint. Bei 10 Volt Spannung liegt die Leerlaufdrehzahl also bei 8000 U/min. Der Leerlaufstrom des 2814/20 beträgt 1,8A und der Innenwiderstand R_i liegt bei 69,5 mOhm. Deshalb fallen $U_R = 1,8A \cdot 69,5 \text{ mOhm} = 125 \text{ mV}$ zusätzlich am Innenwiderstand ab. Man würde also 10,125 V benötigen um die 8000 U/min im Leerlauf zu erreichen. Leerlauf bedeutet, dass die Welle nicht belastet wird, d.h. es wird kein Drehmoment benötigt. Im Flug mit Propeller ist aber ein Drehmoment erforderlich.

Das Drehmoment an der Welle wird durch den Motorstrom I erzeugt und hängt von der Drehmomentenkonstante k_m ab.

$$M = k_m \cdot I \quad (6)$$

Die Drehmomentenkonstante k_m ist mit der Drehzahlkonstante k_n gemäß (7) gekoppelt.

$$k_m \cdot k_n = 1 / (2 \pi) \quad (7)$$

Beim Extron 2814/20 ist die Drehmomentenkonstante

$$k_m = 1 / (2 \pi k_n) = 1 / (2 \pi \cdot 800 \text{ U} / (60 \text{ s})) = 0,0119 \text{ Nm/A} \quad (8)$$

Wenn der Motor belastet wird, dann sinkt die Drehzahl, da der Strom für einen zusätzlichen Spannungsabfall an R_i sorgt. Die Spannung am Motor beträgt.

$$U = R_i \cdot I + U_{ind} = R_i \cdot I + \frac{n}{k_n} \quad (9)$$

Die Wellenleistung ist das Produkt aus Drehmoment und Drehzahl.

$$P_w = 2 \cdot \pi \cdot M \cdot n \quad (10)$$

Die Analyse vom Aeronaut CamCarbon 10x8 Propeller hat für 2 N Schub bei 15 m/s Geschwindigkeit eine Drehzahl von 5110 U/min bei einer Wellenleistung von 40 Watt ergeben. Daraus ergibt sich aus Gleichung 10 ein Drehmoment von

$$M = \frac{P_w}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{40 \text{ W}}{2 \cdot \pi \cdot 5110 \text{ U} / 60 \text{ s}} = 0,075 \text{ Nm} \quad (11)$$

Dieses Drehmoment erfordert gemäß (6) einen Strom von

$$I = \frac{M}{k_m} = \frac{P_w \cdot 2 \cdot \pi \cdot k_n}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{P_w \cdot k_n}{n} = \frac{40 \text{ W} \cdot 800}{5110 \text{ V}} = 6,26 \text{ A} \quad (12)$$

Der Gesamtstrom ist die Summe aus diesem Strom für das Drehmoment und dem Leerlaufstrom.

$$I_{ges} = I_0 + I_m = 1,8 A + 6,26 A = 8,06 A \quad (13)$$

Der Leerlaufstrom kann als der Strom aufgefasst werden, der die mechanischen Reibungsverluste im Motor kompensiert. Um die 7,5 Ncm gemäß Gleichung 11 bei einer Drehzahl von 5110 U/min zu erzeugen ist eine Spannung von 6,83 V gemäß Gleichung 14 erforderlich

$$U = R_i \cdot I + n \cdot k_n = 69,5 \text{ mOhm} \cdot 8,06 A + \frac{5110 \cdot V}{800} = 560 \text{ mV} + 6,39 V = 6,95 V \quad (14)$$

Die erforderliche elektrische Leistung ergibt sich zu

$$P_e = U \cdot I = 6,95 V \cdot 8,06 A = 56 W \quad (15)$$

Der Wirkungsgrad des Motors ist dann

$$\eta = \frac{P_w}{P_e} = \frac{40 W}{56 W} = 71 \% \quad (16)$$

Vergleich AXI 2814/20 Gold Line V2

Der Motor AXI 2814/20 Gold Line V2 hat zum Vergleich die Parameter $k_n = 800 \text{ U}/(\text{V min})$, $I_0 = 700 \text{ mA}$ und $R_i = 57 \text{ mOhm}$ laut Datenblatt. Für den Aeronaut CamCarbon 10x8 Propeller mit 5110 U/min bei 2N Schub bei 15 m/s ergibt sich

$$I = I_0 + k_m \cdot M = I_0 + \frac{P_w \cdot k_n}{n} = 700 \text{ mA} + \frac{40 W \cdot 800 \text{ U} \cdot \text{min}}{5110 \text{ U} \cdot \text{min} \cdot V} = 700 \text{ mA} + 6,58 A = 7,23 A \quad (17)$$

$$U = R_i \cdot I + \frac{n}{k_n} = 57 \text{ mOhm} \cdot 7,23 A + \frac{5110 \cdot \text{U} \cdot \text{min} \cdot V}{800 \text{ U} \cdot \text{min}} = 415 \text{ mV} + 6,08 V = 6,50 V \quad (18)$$

$$P_e = U \cdot I = 6,5 V \cdot 7,23 A = 47,28 W \quad (19)$$

$$\eta = \frac{P_w}{P_e} = \frac{40 W}{47,28 W} = 84,6 \% \quad (20)$$

Der AXI Motor benötigt also für die gleiche Wellenleistung von 40W eine elektrische Eingangsleistung von 47,28 W im Vergleich zu den 56 W beim Extron 2814/20, also 8,7 Watt weniger. Das liegt hauptsächlich am geringeren Leerlaufstrom von 700 mA beim AXI im Vergleich zu 1800 mA beim Extron und am etwas geringeren Innenwiderstand. Der Motor arbeitet damit mit einem höheren Wirkungsgrad von 84,6 % im Vergleich zum Extron bei 71%. Der AXI Motor kostet 83 Euro und der Extron Motor 39 Euro.

<https://extron.pichler.de/Brushless-Motor-EXTRON-2814-20-800KV>

<https://www.modelmotors.cz/product/detail/378/>

https://www.maxongroup.ch/medias/sys_master/root/8797816389662/maxonMotorData-Notizen.pdf

<http://www.drivecalc.de/PropCalc/PCHelp/Prop+Motor.pdf>

Gesamtbetrachtung Motor und Propeller

Mit dem Aeronaut 10x8 Propeller ist für einen Schub von 2N bei 15 m/s Fluggeschwindigkeit eine Drehzahl von 5110 U/min bei einer Wellenleistung von 40 W erforderlich. Die 30 W Schubleistung werden also mit einem Wirkungsgrad von 75% mit dem Propeller erzeugt. Der AXI 2814/20 Motor kann die Wellenleistung von 40W mit einer elektrischen Leistung von 47,3W mit einem Wirkungsgrad von 84% erzeugen. Der theoretische Gesamtwirkungsgrad beträgt

$$\eta_{ges} = \eta_{pro} \cdot \eta_{mot} = 0,75 \cdot 0,84 = 63 \%$$

Mit dem Extron Motor mit dem geringeren Wirkungsgrad ist der Wirkungsgrad geringer

$$\eta_{ges} = \eta_{pro} \cdot \eta_{mot} = 0,75 \cdot 0,71 = 53 \%$$

Dies berücksichtigt noch nicht die Verluste durch den ESC.