

## Know-how – Elektrische Modelle optimal auslegen (I)

Im Winterhalbjahr nimmt so manch einer ein neues Projekt in Angriff und muss zwangsläufig Überlegungen zu einem optimal passenden bürstenlosen Antriebskonzept, nötige Servostellkraft und Stärke eines BECs anstellen. Im Internet freiverfügbare elektronische Hilfsmittel können da einen wertvollen Beitrag leisten. Dies soll keine akademische Abhandlung sein, sondern vielmehr die praxisorientierte Anwendung aufzeigen.

Dieser Leitfaden soll Ihnen in zwei Teilen einen Weg aufzeigen, um systematisch alle wichtigen Komponenten eines Elektroflugmodells zu dimensionieren und auszulegen. Hierbei verwende ich Hilfsmittel, welche auf dem Internet für nichtkommerzielle Zwecke frei verfügbar sind. Eine komplette Aufstellung finden sie unter «[www.s4a.ch/eflight](http://www.s4a.ch/eflight)».

### Art des Modells

Die Modellart bestimmt weitgehend die Leistungsbetrachtung. Welche Merkmale sind wichtig, welche sind sekundär?

Die Quantifizierung der Kriterien ist nicht gerade trivial und sehr individuell. Das Festlegen der Zielgrößen ist wohl die schwierigste Aufgabe beim Auslegen eines Elektroflugmodells und bedingt eine gewisse Erfahrung. Die Tabelle zeigt, wo das Augenmerk liegen soll (fette Schriftausprägung).

Modellart	Leistung	Stand Schub	Pitch-Geschw.	Flächenbelastung
Gemütlich	gering	gering	gering	sehr tief
Trainer	moderat	<b>moderat</b>	moderat	moderat
eSegler	moderat	moderat	<b>gering</b>	sehr tief
Sport	hoch	moderat	<b>moderat</b>	moderat
Pylon	hoch	(Prop-Abriss)	<b>sehr hoch</b>	hoch
Dynam. Akro	hoch	<b>moderat</b>	moderat	moderat
3D Akro	sehr hoch	<b>sehr hoch</b>	<b>gering</b>	tief
Hotliner	sehr hoch	<b>hoch</b>	hoch	moderat
Impeller	hoch...sehr hoch	moderat	<b>sehr hoch</b>	moderat

Bei den nachfolgenden Überlegungen und Berechnungen möchte ich mich auf eine Modellart festlegen, um die Vorgehensweise zu veranschaulichen. Die Ausgangslage bildet die Flitework Extra 300 LP mit 1.73m Spannweite aus Heft 02/2010, also eine Kunstflugmaschine mit 3D-Ambitionen. Somit liegt unser Augenmerk auf einem maximalen Schub-Gewichtsverhältnis und einer Pitch-Geschwindigkeit von rund 100km/h.

### Rahmenbedingungen

Die optimale Auslegung ergibt sich natürlich, wenn man auf der grünen Wiese beginnen kann. Oftmals gelten aber Rahmenbedingungen, welche uns die «zweitbeste» Lösung aufzwingen. Solche Bedingungen können unter anderem sein:

- beschränktes Budget
- vorhandene Komponenten (z.B. Akku)
- Verfügbarkeit von Komponenten
- Vorlieben
- ...und mehr

In unserem Fall gelten keine Rahmenbedingungen. Zur Vereinfachung und vor allem Vergleichbarkeit sollen aber nur Motor und Akku variiert werden um das Schub-Gewichtsverhältnis zu maximieren. Welches wird wohl das optimale Antriebkonzept sein 5s, 6s oder gar 8s?

### Antriebsberechnung

Die Zahl im Internet verfügbaren Programme zur Auslegung elektrischer Antriebe nimmt stetig zu. Der von mir entwickelte und frei verfügbare **eMotor Calculator** ist einer davon.

Auf den ersten Blick schreckt die Datenflut manch einen ab. Die Anwendung ist aber sehr einfach. Achten Sie darauf, dass Ihr Browser JavaScript zulässt.

Der Seiteninhalt ist in drei Blöcke gegliedert:

### Eingabe:

Als ersten Schritt geben wir die Daten zu unserem Modellflugplatz ein. Die Luftdichte beeinflusst die Arbeit, welche der Propeller verrichten muss und damit den Strom des Motors. Mit zunehmender Luftdichte, d.h. bei tieferen Flugplatzhöhen bzw. tieferen Temperaturen wird der Strom leicht ansteigen. Wir überschreiben also einfach die entsprechenden Felder «Flugplatzhöhe» und «Lufttemperatur» mit unseren Angaben. Nun wählen wir die passenden Akkuzellen bzgl. Kapazität und Belastbarkeit (Dauer-/maximale Entladeraten) und legen dessen Konfiguration bzgl. in Serie und parallel geschalteter Zellen ein.

Bei der Wahl des Reglers und des Motors müssen wir lediglich das gewünschte Produkt mittels der Drop-Down-Listen festlegen. Weitere Eingaben sind nicht nötig.

Die Dimensionen und die Blattzahl des Propeller sind frei wählbar. Es gilt zu beachten, dass bei Propellern mit mehr als 66% Steigung (bezogen auf den Durchmesser) die Strömung am Propellerblatt abreißt und der errechnete Standschub, sowie der max. Strom bei Standmessungen nicht erreicht werden kann. Bei schnellen Modellen (z.B. Pylon) ist dies nicht zu vermeiden. Hier wird der optimale Standschub zu Gunsten einer hohen Pitch-Geschwindigkeit «geopfert». In unserem Beispiel sind wir mit 44% (Pitch 8" / Durchmesser 18") deutlich unter dieser Abrissgrenze.

Sollte Ihr Motor über ein Getriebe verfügen, können Sie hier die Untersetzung eingeben, z.B. 6.7 für ein 6.7:1 Getriebe.

Berechnungsgrundlagen:				Flugplatzhöhe:	Lufttemperatur:	Luftdruck (QNH):
				500 m.ü.M	25 °C	1013 hPa
<b>Batterie:</b> (Dauer / Max. C)	Anzahl seriell:	Anzahl parallel:	Kapazität:	Innenwiderstand:	Volt pro Zelle:	Zellen Gewicht:
LiPo 4000mAh (25/35C)	8 s	1 p	4000 mAh	0.0053 Ohm	3.7 v	108 g
<b>Regler:</b>	Innenwiderstand:	Dauerstrom:	max. Strom:	Gewicht:		
Jeti Spin 99	0.0025 Ohm	90 A	90 A	105 g		
<b>Motor:</b> Hersteller - Typ (Kv in U/V)	Kv:	Innenwiderstand:	Leerlaufstrom:	Limite (max. 20s):	Gehäuselänge:	Gewicht:
Scorpion S4025-16 (332)	332 U/V	0.034 Ohm	1.17 A	2000 W	46 mm	350 g
<b>Propeller:</b>	Durchmesser:	Pitch:	Anzahl Blätter:	Prop Konst.	Getriebe:	
APC Electric (E)	18 inches	8 inches	2	1.08	1.00	
						<input type="button" value="berechnen"/>

Beispiel für unsere Extra mit einer 8s-Konfiguration

Werden Produkte aus der umfangreichen Datenbasis ausgewählt, können die Felder ausserhalb der roten Markierungen nicht modifiziert werden.

Es können im eMotor Calculator grundsätzlich Berechnungen mit beliebigen Komponenten durchgeführt werden. Besorgen sie sich die technische Spezifikation der Komponente beim Hersteller oder im Internet. Wählen Sie in der entsprechenden Drop-Down-Liste «Andere» und alle Felder dieser Komponente können nun mit Ihren eigenen Daten abgefüllt werden.

Berechnungsgrundlagen:				Flugplatzhöhe:	Lufttemperatur:	Luftdruck (QNH):
				500 m.ü.M	25 °C	1013 hPa
<b>Batterie:</b> (Dauer / Max. C)	Anzahl seriell:	Anzahl parallel:	Kapazität:	Innenwiderstand:	Volt pro Zelle:	Zellen Gewicht:
Andere	8 s	1 p	4000 mAh	0.0053 Ohm	3.7 v	108 g
<b>Regler:</b>	Innenwiderstand:	Dauerstrom:	max. Strom:	Gewicht:		
Anderer	0.0025 Ohm	90 A	90 A	105 g		
<b>Motor:</b> Hersteller - Typ (Kv in U/V)	Kv:	Innenwiderstand:	Leerlaufstrom:	Limite (max. 20s):	Gehäuselänge:	Gewicht:
wählen... Anderer	332 U/V	0.034 Ohm	1.17 A	2000 W	46 mm	350 g
<b>Propeller:</b>	Durchmesser:	Pitch:	Anzahl Blätter:	Prop Konst.	Getriebe:	
Anderer	18 inches	8 inches	2	1.08	1.00	
						<input type="button" value="berechnen"/>

beliebige Komponentendaten eingeben

Bei Akku, Regler und Propellern können Sie ruhig vorhandene Produkte mit ähnlichen Eckdaten wählen. Beim Motor sind aber möglichst genaue Daten nötig um eine verlässliche Berechnung zu erhalten. Vom Motor benötigen sie folgende Angaben:

Kv:	Die spezifische Drehzahl Kv definiert die Anzahl Umdrehungen pro Volt [U/V], welche der Motor ohne anliegende Last erreicht.
Innenwiderstand:	Beschreibt den ohmschen Widerstand und bestimmt massgeblich die Verlustleitung mit.
Leerlaufstrom:	Stromaufnahme des Motors ohne Last auch I <sub>0</sub> genannt [A].
Limite:	die vom Hersteller definierte maximale Leistung [W] oder der maximale Strom [A].
Gehäuselänge:	Die Länge [mm] des Motorgehäuses ist ein Mass für die Fähigkeit die Abwärme an die Umwelt abgeben zu können.

**Berechnung:**

<b>Richtwerte:</b>	<b>Warnungen:</b>					
<b>Batterie:</b>	Belastung: 17.2 C	Spannung: 26.68 V	Nennspannung: 29.6 V	Flugzeit bei Vollgas: 3.48 min	Ø Flugzeit: 5.92 min	Gewicht: 864 g
<b>Motor:</b>	max. Strom: 68.87 A	Spannung: 26.51 V	Drehzahl: 8023 U/min	el. Leistung (In): 1825.59 W	mech. Leistung (out): 1633.31 W	Wirkungsgrad: 89.5 %
<b>Optimaler Wirkungsgrad:</b>	Strom: 31.51 A	Spannung: 28.86 V	Drehzahl: 9224 U/min	el. Leistung (In): 909.22 W	mech. Leistung (out): 841.7 W	Wirkungsgrad: 92.574 %
<b>Propeller:</b>	Statischer Schub: 7590 g	Schub b. Abriss: 6428.6 g	Drehzahl: 8023 U/min	Pitch Geschw.: 97.9 km/h	Effizienz: 4.16 g/W	
<b>Gesamter Antrieb:</b>	Gewicht: 1450.9 g (Batterie + Regler + Motor + 10%)			P (in): 2038.55 W	P (out): 1633.31 W	Wirkungsgrad: 80.1 %

*Berechnung der 8s-Konfiguration*

Die berechneten Daten basieren auf einem mathematischen Modell der Propellertheorie. Die Güte der Resultate ist abhängig von der Datenqualität der Hersteller. Der eMotor Calculator errechnet nun Richtwerte zum Akku, Motor und Propeller. Wir richten unser Augenmerk auf einen angemessenen hohen statischen Schub und eine Pitch-Geschwindigkeit von rund 100km/h. Es gilt nun unterschiedlichste Motor-Propeller Kombinationen durchzurechnen um ein Optimum zu erzielen.

Warnungen:	Der Calculator überwacht unterschiedlichste zuvor eingetragene Limiten und gibt beim Überschreiten eine entsprechende Warnung aus. Er überwacht jedoch nicht alle Limiten (z.B. Drehzahl, mechanische Festigkeit von Wellen).
Belastung:	Entladerate des Akkus gemessen an seiner Nennkapazität. Neuere Lithium-Akkus lassen Entladeraten bis 50C zu. Die maximale und Dauerentladerate ist meist auf dem Akku aufgedruckt.
Flugzeiten:	Die Flugzeit bei Vollgas ist eine 100%-Entladung bei maximalem Strom. Die durchschnittliche Flugzeit ist ein Richtwert für eine 85% Entladung und abhängig von ihrem persönlichen Flugstil und dem vorhandenen Leistungsüberschuss. D.h. schwach motorisierte Modelle erreichen diese Flugzeit nur knapp, übermotorisierte erreichen Flugzeiten weit darüber. Tasten sie sich von unten (Flugzeit bei Vollgas) an Ihre persönliche Flugzeit heran, indem sie Ihren Timer entsprechend der nachgeladenen Akkukapazität anpassen.
max. Strom:	Der maximale Strom im Stand (ohne Strömungsabriss am Propeller).
Drehzahl:	Die Drehzahl [U/min] eines Motors und jene des Propellers unterliegen physikalischen Limiten, welche vom Calculator nicht überwacht werden, sich aber innerhalb der Herstellerangaben bewegen müssen.
Statischer Schub:	Schub, welcher im Stand ohne Strömungsabriss am Propeller erreicht wird – auch Standschub genannt.
Schub bei Abriss:	Ist das Verhältnis von Steigung (Pitch) zum Durchmesser eines Propellers grösser als 66% (0.66), reisst die Luftströmung am Propeller ab und der Statische Schub, wie auch der max. Strom wird bei Standmessungen nicht erreicht. Sind Strömungsabriss im Stand vorhanden bzw. hörbar ist der zu erwartende Standschub unter «Schub bei Abriss» abzulesen. Der

Propeller wird erst bei gewissen Vorwärtsbewegung richtig «greifen» und seine volle Leistungsfähigkeit erreichen. Bei sehr schnellen Modellen, wie etwa Pylon-Modelle, ist ein Strömungsabriss nicht zu vermeiden.

**Pitch-Geschw.:** Geschwindigkeit der Luft beim verlassen des Propellerblattes [km/h]. Eine Pitch-Geschwindigkeit, welche wesentlich höher als die beabsichtigte Fluggeschwindigkeit liegt, ist ineffizient. Es wird viel mehr Luft umgewälzt, als nötig ist, was zu höheren Motorströmen führt. Ein grösserer Propeller mit geringerer Drehzahl (Getriebe oder tieferes Kv) kann die Effizienz des Antriebs verbessern. Als Faustregel nehmen Sie für die Pitch-Geschwindigkeit das 2.5- bis 3-fache der Abreissgeschwindigkeit (stall speed) des Modells.

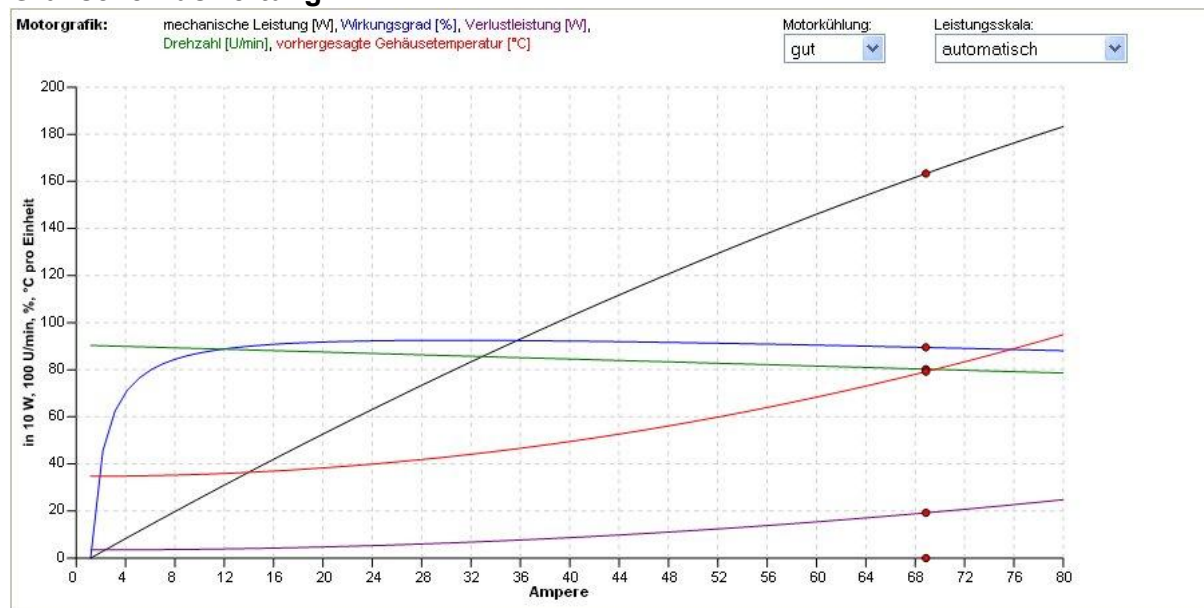
**Effizienz:** Die Effizienz definiert, wie viel Gramm Schub pro Einheit der Eingangsleistung des Motors umgesetzt wird [g/W]. Gut ausgelegte Propeller-Antriebe bewegen sich zwischen knapp 4g/W und über 5g/W (Impeller 1.5g/W bis 2g/W).

Die Erklärung zu weiteren Datenfelder finden sie unter «Hilfe zum eMotor Calculator» oben rechts im Calculator.

Folgende optimale Antriebskonzepte wurden so ermittelt:

Akku	Motor	Propeller	~max. Strom*	~Stand Schub
5s	Scorpion 4025-12 (Kv 440U/V)	APC E 18x10"	74A	6.18kg
6s	Scorpion 4025-16 (Kv 332U/V)	APC E 19x12"	67A	7.09kg
8s	Scorpion 4025-16 (Kv 332U/V)	APC E 18x8"	69A	7.59kg

**Grafische Auswertung:**



Die Motorgrafik zeigt die Parameterentwicklung mit zunehmendem Strom und ist aus technischen Gründen nur mit dem Internet Explorer sichtbar. Interessant ist insbesondere der rote Betriebspunkt im Vergleich zum maximalen Wirkungsgrad und die vorhergesagte Gehäusetemperatur.

Auf den ersten Blick wäre der Betrieb des Motors beim maximalen Wirkungsgrad von 31.5A wünschenswert. Hier wird das Optimum pro Leistungseinheit (Watt) erreicht. In der Performance-Betrachtung würde aber der Motor viel zu schwer sein in Bezug auf die abgegebene Leistung und damit zu einem schlechten Schub-Gewichtsverhältnis führen. Das beste Schub-Gewichtsverhältnis wird meist erst an der thermischen Limite des Motors erreicht.

Hier kommt nun die vorhergesagte Gehäusetemperatur zum Zuge. Die Gehäusetemperatur ist sehr stark von der Verlustleistung, seiner Bauart (offen oder geschlossen) und der Luftum- bzw. -durchströmung abhängig. Eine Gehäusetemperatur von unter 80°C gilt als bedenkenlos. Bei Temperatur über 80°C gilt sie als kritisch und kann die Motorenbestandteile thermisch beeinträchtigen oder gar zerstören. Maximale Flugleistungen zu erzielen ist immer eine Gratwanderung entlang der thermischen Limite eines Motors. In Wettbewerben wird sie gar bewusst überschritten.

### Performance-Betrachtung

Bei einem Kunstflugmodell gilt es das Schub-Gewichtsverhältnis zu maximieren. Nicht immer bedeutet mehr Leistung auch eine bessere Performance. Oftmals vermag die höhere Leistung das miteinhergehende Mehrgewicht nicht zu kompensieren. Diese Maximierung bedeutet Knochenarbeit. Für jede in Betracht gezogene Auslegung ist aufwändig das Schub-Gewichtsverhältnis zu berechnen. Hier unterstützt Sie das Excel-Blatt «Modell Performance & Flugzeit». Tragen wir die unterschiedlichen Leistungsdaten des Calculators und (Akku-) Gewichte ein, ergeben sich folgende Leistungsmerkmale:

Modell:	Flitework Extra 300 LP			
Gewichtsberechnung:	5s-Antrieb	6s-Antrieb	8s-Antrieb	
Bausatz:	Extra 300 LP	2025.00 g	2025.00 g	2025.00 g
Motor:	Scorpion 4025-16	360.00 g	360.00 g	360.00 g
Regler:	Phönix Ice 75	57.00 g	57.00 g	57.00 g
Propeller:	APC E	63.00 g	63.00 g	63.00 g
Servos:	5 Servos	225.00 g	225.00 g	225.00 g
Empfänger:	FASST 617	15.00 g	15.00 g	15.00 g
RX-Stromversorgung:	BEC im Regler	0.00 g	0.00 g	0.00 g
Flugakku	4000-25C	540.00 g	648.00 g	864.00 g
Kleinmaterial:	10% (bis 15%) des Bausatzes	202.50 g	202.50 g	202.50 g
	<b>Total Gewicht (g)</b>	<b>3487.50 g</b>	<b>3595.50 g</b>	<b>3811.50 g</b>
<b>Performance:</b>	<b>Leistungsgewicht</b>			
	Elektrische Leistung des Motors	1214.00 W	1341.73 W	1825.00 W
	Wirkungsgrad Motor	0.88	0.87	0.89
	Leistung des Strahls	1068.32 W	1167.31 W	1631.55 W
	<b>Leistungsgewicht</b>	<b>306.33 W/kg</b>	<b>324.66 W/kg</b>	<b>428.06 W/kg</b>
	<b>Schub-Gewichtsverhältnis</b>			
	Statischer Schub	6.18 kg	7.09 kg	7.59 kg
	<b>Schub-Gewichtsverhältnis</b>	<b>1.77</b>	<b>1.97</b>	<b>1.99</b>
	<b>Flugzeiten</b>			
	max. Strom des Motors	74.00 A	67.47 A	68.87 A
	Akku-Kapazität	4000.00 mAh	4000.00 mAh	4000.00 mAh
	<b>Motorlaufzeit Vollgas (100% Akkukapazität)</b>	<b>3.24 min</b>	<b>3.56 min</b>	<b>3.48 min</b>
	<b>Motorlaufzeit eSegler (80%)</b>	<b>2.59 min</b>	<b>2.85 min</b>	<b>2.79 min</b>
	<b>Motorlaufzeit dynamischer Akro (80%)</b>	<b>9.20 min</b>	<b>11.22 min</b>	<b>11.10 min</b>
	<b>Motorlaufzeit 3D Akro (80%)</b>	<b>4.60 min</b>	<b>5.61 min</b>	<b>5.55 min</b>
	<i>Die Motorlaufzeiten sind Richtwerte und müssen erfolgen werden!</i>			

Diese Aufstellung zeigt nun deutlich, dass «mehr» nicht immer «besser» ist. Obwohl der 8s-Antrieb gegenüber dem 6s-Antrieb über einen Drittel mehr Leistung verfügt, steigt der Standschub nur noch um 500g (+7%) und das Schub-Gewichtsverhältnis gerade mal noch um kaum wahrnehmbare 0.02 (+1%) an. Zieht man nun noch die geringeren Ausgaben in Betracht für Akkus, fällt hier die Wahl auf den 6s-Antrieb.

### Messungen vor und nach Erstflug

Rechnerisch haben wir nun die gesamten Komponenten unseres Modells ausgelegt. Unsere Auslegung basiert ausnahmsweise auf mathematischen Modellen und Faustregeln und wird nie exakt sein. Daher sind Messungen vor und nach dem Erstflug so unerlässlich, wie ein Reichweitentest! Hierfür sind nicht sündhaft teure Präzisionsmessgeräte nötig, sondern ein einfaches Infrarot-Thermometer und Zangenamperemeter, welches getaktete Gleichströme zu messen vermag, sind ausreichend.



Vor dem Flug gilt es den maximalen Motorstrom bei Vollgas zu messen. Dieser muss zwingend innerhalb der von den Herstellern spezifizierten Maximalwerten liegen, sonst erlischt unter Umständen die Garantie! Sollten Sie nun feststellen, dass der Motorenstrom eine Limite übersteigt (z.B. max. Motorstrom) können sie nun versucht sein, diesen durch Begrenzung des Drosselweges am Regler zu reduzieren. Dies ist aber ein äusserst ungeeigneter Lösungsansatz. Dadurch läuft ihr Regler bei «Vollgas» lediglich im Teillastbereich und damit mit hoher Verlustleistung. Eine Überhitzung droht. Durch diese Massnahme wird der Durchschnittliche Strom (= Messung mit Amperemeter) zwar reduziert, durch die Natur der Pulsweitenmodulation liegt aber am Motor nach wie vor der zuvor gemessene Maximalstrom in Form von «Stromimpulsen» (statt Dauerstrom) am Motor an. Zur Reduktion/Steigerung des Motorstroms sollten Sie stets mit einem leicht redimensionierten Propeller arbeiten. Das Variieren um eine Grösse ist oft ausreichend. Nehmen Sie den eMotor Calculator zur Hilfe. Der prozentuale Unterschied im Strom zwischen zwei Propellern kann auf Ihre Messung angewendet werden. Daraus ergibt sich der zu erwartende effektive Strom mit dem angepassten Propeller.



Den Erstflug setze ich immer kurz an. Nach etwa der Hälfte der zu erwartenden Flugzeit wird gelandet und ich nehme umgehend eine erste Temperaturmessung an Regler und Motor vor. Dabei sollte die Temperatur des Reglers unter 90° und jene des Motorengehäuses unter 80°C bleiben. Bei den darauf folgenden Flügen taste ich mich sukzessive an meine persönliche Flugzeit heran. Hierfür erhöhe ich die Flugzeit bzw. Timer des Senders schrittweise bis die Akkus etwa mit 75% ihrer Nennkapazität nachgeladen werden müssen. Dabei wird wiederholt die Temperatur des Reglers und Motors überprüft. Mit dieser Annäherung würde sich ein Temperaturproblem vorzeitig manifestieren, ein Ansprechen des nützlichen, aber fliegerisch unangenehmen Regler-LiPo-Tiefentladeschutzes verhindert. Die 25% Kapazitätsreserven lassen im Bedarfsfall einen stressfreien zweiten Anflug zu.

Im nächsten Teil wollen wir die Stellkraft der Servos Ihres Modells, die Versorgung der Empfangsanlage mit einem BEC und die Dimensionierung des Flugreglers genauer betrachten.

*electric power – what else?!*

**[www.s4a.ch/eflight](http://www.s4a.ch/eflight)**

*Dieser Artikel ist im FMT 04/2010 erschienen.*