

## Ein elektrischer Antrieb für F2B

(V 6.0 Stand 4.4.14)

Seit dem Herbst 2010 befasse ich mich mit dem Thema elektrischer Antriebe für Fessel-Kunstflugmodelle. Dabei bin ich, wie bisher immer beim Einstieg in neue Technologien, nach dem Prinzip des Fragens und Kopierens vorgegangen und habe, ohne Ambitionen die diversen Räder neu zu erfinden, genau das gemacht, was mir kompetente Kameraden aus aller Welt stets bereitwillig geraten haben. Immer wieder aktuelle und wertvolle Inhalte zum Thema findet der Interessierte unter "Gettin' all AMP'ed up" auf dem sehr aktiven „Stunthanger“ Forum. <http://stunthanger.com/smf/index.php#8>

Ganz besonders habe ich vom regen Austausch mit Norman Whittle und Jgor Burger profitiert. Norm fliegt seit einiger Zeit erfolgreich mit elektrischem Antrieb und arbeitet dabei eng mit Paul Walker zusammen. Jgor hat mir im Frühjahr 2012 Unterlagen zu seinem Weltmeister Modell „Max Bee“ geliefert und wertvolle Hinweise zur Trimmung gegeben. Dafür schulde ich ihm großen Dank.

Die Auslegung des Antriebes meiner Modelle „Signorina Elettra“, „PC-21/2 E“, „e-Sultan“, „Max Bee“ , „Fireshark“ und „PS-1 E“ entspricht in allen Details dem Antrieb der Modelle von Norman Whittle, dem ich an dieser Stelle für die völlig offene Information und die sehr kompetente Unterstützung herzlich danken möchte.

Bisher habe ich mit neun verschiedenen Flugzeugen, vom einfachen Trainer bis hin zu für E-Antrieb gebauten, großen Kunstflugmodellen, Erfahrungen gesammelt und auch die Erfahrungen aus dem E-Umbau von zwei (PA .75 bzw. Jett .61 / pipe) Modellen sind hier eingeflossen. Am Beispiel des „Fireshark“ möchte ich im Folgenden auf meine Antriebskomponenten und deren Anwendung etwas näher eingehen.



Alle Beschreibungen und Aussagen, ausgenommen die technischen Daten der Komponenten, entsprechen meiner persönlichen Sicht der Dinge heute, im April 2014. Sie sind nicht allgemein gültig. Neue Erkenntnisse werden dazukommen und ich werde mich bemühen, die Inhalte laufend anzupassen. Dies ist die 6. Aktualisierung.

### Allgemeine Informationen

Stand der Dinge .....	2
Das Prinzip .....	2
Was bewirkt die Regelung auf konstante Drehzahl? .....	3
Ist das Alles nicht zu kompliziert? .....	3
Gewicht und Kosten .....	4
Bezugsquellen und Bestelldaten .....	5
Hinweise zum Umbau vorhandener Flugzeuge .....	6
Hinweise zum Flugbetrieb .....	7
Die Vor- und Nachteile .....	8

### Technik im Detail

Der Motor .....	9
Der Regler und seine Programmierung .....	12
Der Timer .....	19
Die Batterie und ihre Dimensionierung .....	21
Propeller .....	24
Datenspeicher .....	25
Alternativen und Aussichten .....	26

## - Allgemeine Informationen -

### Stand der Dinge

Die vor nur wenigen Jahren, nicht ohne Widerstand konservativer Kreise, erfolgte FAI Zulassung elektrischer Antriebe für die Kategorie F2B erweist sich als richtig. In kurzer Zeit, bedingt durch die Verfügbarkeit hoch entwickelter Bauteile aus der R/C Modellflugindustrie, ist die Anwendung elektrischer Antriebe für F2B Modelle zu einer vollwertigen Alternative geworden. Damit wurde ein wichtiges Ziel dieser Erweiterung der FAI Regeln, nämlich die Möglichkeit des **sichtbaren** Betriebes von Fesselflugmodellen bei sehr geringer Geräuschentwicklung, **nahe am Menschen**, erreicht.

Die Eigenschaften der heute verfügbaren Antriebe sind denen eines sehr guten Verbrenner-Antriebes ebenbürtig und die operationelle Sicherheit, vor allem in Bezug auf die Reproduzierbarkeit der Leistungs-Abgabe, ist deutlich überlegen. Ein E-Antrieb läuft überall und immer genau so gut wie im besten Einstellflug zu Hause. Die Anpassung der Leistung, zum Beispiel zum Ausgleich von unterschiedlichen Temperaturen, erfolgt durch direkte, numerische Eingabe der jeweils gewünschten Drehzahl.

**Diese operationelle Sicherheit ist von ausschlaggebender Bedeutung, denn nur sie ermöglicht die uneingeschränkte Konzentration des Piloten auf das Wesentliche, das Fliegen des Flugzeuges.**



### Das Prinzip

Ein elektrischer Antrieb für ein F2B Wettbewerbsmodell üblicher Größe, d.h. ca. 43 qdm bei ca. 1'850 Gr. Gewicht, besteht aus den vier folgenden Bauteilen:

- Einem bürstenlosen Gleichstrommotor, aufgebaut als sogenannter Aussenläufer, ohne Getriebe. Die benötigte Dauerleistung des Motors liegt bei einer Größenordnung von ca. 500 Watt, bzw. bei ungefähr 0.7 PS.
- Einem Umformer und Leistungssteller, dem „Regler“. Der Regler erzeugt aus der von der Batterie gelieferten Gleichspannung ein mehrphasiges Drehfeld. Er soll mit einem Dauerstrom von 50 bis zu 75 Ampere belastbar sein, Eingangsspannungen bis 22.2 Volt verarbeiten können und mit einer Funktion zur **Regelung auf konstante Drehzahl** (Heli- oder Governor Mode) versehen sein. Alle Regler steuern die Leistungsabgabe des Motors, indem sie die vom Empfänger der Fernsteuerung kommenden Signale für die Stellung des Gashebels in geeigneter Form verarbeiten. Bei der Anwendung eines herkömmlichen R/C Reglers im Fesselflug fehlen diese Signale. Sie müssen deswegen mit einem separaten Baustein, dem Timer, erzeugt werden.
- Der Timer. Er erzeugt das vom Regler benötigten Gassignal. Weitere Funktionen des Timers sind die Definition der Startverzögerung und der Laufzeit des Motors.

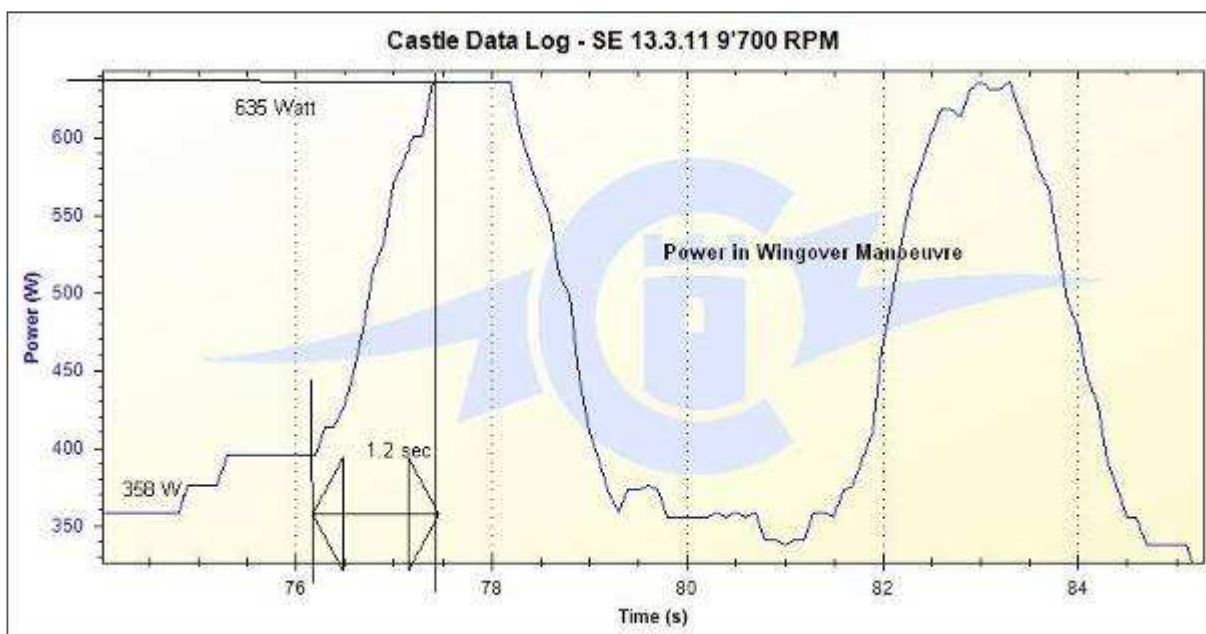
Die Batterie. Eingesetzt werden Li-Po Batterien, bestehend aus 3-6 hintereinander (in Serie) geschalteten Zellen, mit einer totalen Nennspannung von 11.1 - 22.2 Volt. Die benötigte Kapazität der Batterie liegt, je nach Nennspannung und Fluggewicht, zwischen 1'600 mAh (bei 22.2V und 1'400 Gr.) und 4'500 mAh (bei 11.1V und 2'000 Gr.). Näheres dazu siehe „Die Dimensionierung der Batterie“

### Was bewirkt die Regelung auf konstante Drehzahl?

Für F2B Anwendungen benötigen wir einen Regler welcher in der Lage ist, eine zum Voraus gewählte Drehzahl selbsttätig einzuhalten und zwar, innerhalb bestimmter Grenzen, unabhängig von der Belastung des Motors.

Eine solche Funktion, sie wird auch „Heli Mode“ oder „Governing“ genannt führt zu einem, dem klassischen 4-2-4 Verhalten eines ST.60 nicht unähnlichen, Leistungseinsatz. Wie bei einem gut abgestimmten Verbrenner-System wird die Leistung immer dann erhöht, wenn die Drehzahl abfällt, bzw. sie wird reduziert, wenn sich die Drehzahl, z.B. im Sturzflug oder bei Seitenwind, erhöht. Beim Übergang in den senkrechten Steigflug, also wenn das Gewicht des Modells den Motor mehr belastet und deswegen die Drehzahl zurückgeht, erhöht der Regler die Leistung so lange bis die Solldrehzahl wieder anliegt. Nach dem Durchflug des Zeniths passiert das Gleiche, nur jetzt in umgekehrter Weise, d.h. der Regler reduziert die Leistung soweit wie nötig. Das Gleiche geschieht bei Gegen- bzw. Rückenwind und bei Seitenwind in den Loopings. Der Regelvorgang zum Ausgleich der sehr geringen (+/-100 U/min), lastabhängigen Drehzahlschwankungen ist schnell (+/- 1 sec) und als solcher vom Piloten kaum wahrnehmbar.

Diese Grafik, erfasst mittels eines im Regler eingebauten Datenspeichers, zeigt den **im Flug** gemessenen Verlauf der **Leistungsaufnahme** (in Watt) des Motors beim Durchfliegen eines Wingovers:



Auf der horizontalen Achse ist die Zeit in Sekunden dargestellt und man sieht, dass das ganze Manöver vom Zeitpunkt 76.2 sec bis zum Zeitpunkt 84.7 sec. also 8.5 sec dauert. Im ersten Steigflug erhöht der Regler innerhalb von 1.2 sec die Motorleistung von 400 Watt auf 635 Watt, also um 158%. Die Drehzahl von bleibt dabei unverändert. Nach dem Durchfliegen des Zeniths geht die Leistung im Sturzflug wieder auf 350 Watt zurück, auch hier bei gleichbleibender Drehzahl. Diese automatische Anpassung der Motorleistung durch den Regler ist, weil die Drehzahl konstant bleibt, nicht hörbar, aber dennoch, wie die Aufzeichnung nachweist, durchaus sehr wirksam.

Eine Bemerkung zum Vergleich mit einem Verbrennungsmotor: Bei einem im 4-2-4 Betrieb laufenden Verbrenner-Antrieb gehen wir, auf Grund des Auspuffgeräusches, von einer Leistungsänderung über die Drehzahl aus. Zu beachten ist dabei, dass die Änderung des Auspuffgeräusches beim Übergang vom 4- zum 2-Takt Betrieb wohl erheblich ist (immerhin zündet im 4-Takt Betrieb der Motor nur bei jeder 2. Umdrehung und im 2-Takt jedes Mal), dass jedoch die tatsächliche Zunahme der Drehzahl, und damit der Leistung, nicht wirklich bekannt ist.

### Ist das alles nicht zu kompliziert?

Die Handhabung der "plug and play" Komponenten ist völlig unkritisch und von jedermann problemlos in kurzer Zeit zu erlernen. Wenn das nicht so wäre, dann hätten sich elektrische Antriebe in der großen R/C Welt kaum so rasch und umfassend durchgesetzt.

Alles was für F2B braucht, ist ein Computer mit Internetzugang und, unbescheidenerweise behauptet, die exakte Umsetzung der in diesen Bericht enthaltenen Vorschläge. Kenntnisse in Elektrotechnik bzw. Elektronik werden nicht benötigt. Einige Grundkenntnisse in Englisch sowie, dies vor allem, Freude am Entdecken und ein gesunde Portion Neugier, sind jedoch sehr hilfreich. Was die Beschaffung und den Einbau der Komponenten betrifft, so steht jedes auf Elektroflug spezialisierte Modellflug-Fachgeschäft sicher gerne und kompetent mit Rat und Tat zur Seite.

## E- Nachrüstung eines Flugzeuges, Gewicht und Kosten

### Antriebsgewichte

Antrieb PA .75, Pipe, inkl. 157 ccm / 133 Gr. (3/4 voll) Treibstoff:	817 Gr.
Elektroantrieb „Fireshark“, mit gleicher Leistung, mit Batterie.	697 Gr.



Hier die Gewichtsbilanz einer nachträglichen Umrüstung auf e - Antrieb:

PC-21/2 PA.75 ohne Treibstoff:	1'780 Gramm
¾ (157 ccm) Treibstoff:	<u>133 Gr.</u>
<b>PC-21/2 PA.75</b> mit ¾ Treibstoff, Fluggewicht::	<b>1'915 Gramm</b>
<b>PC-21/2 E</b> , mit Batterie, Fluggewicht:	<b>1'820 Gramm</b>

In beiden Fällen wiegen die elektrischen Komponenten des Antriebes ca. 50 Gramm mehr als die Bauteile des PA.75 Pipe Antriebes. Dieser Gewichtsnaheile wird dadurch mehr als ausgeglichen, als dass das elektrische Modell ohne die für den PA .75 benötigte Treibstoffmenge von 200 ccm (170 Gramm) starten kann...

### **Kosten**

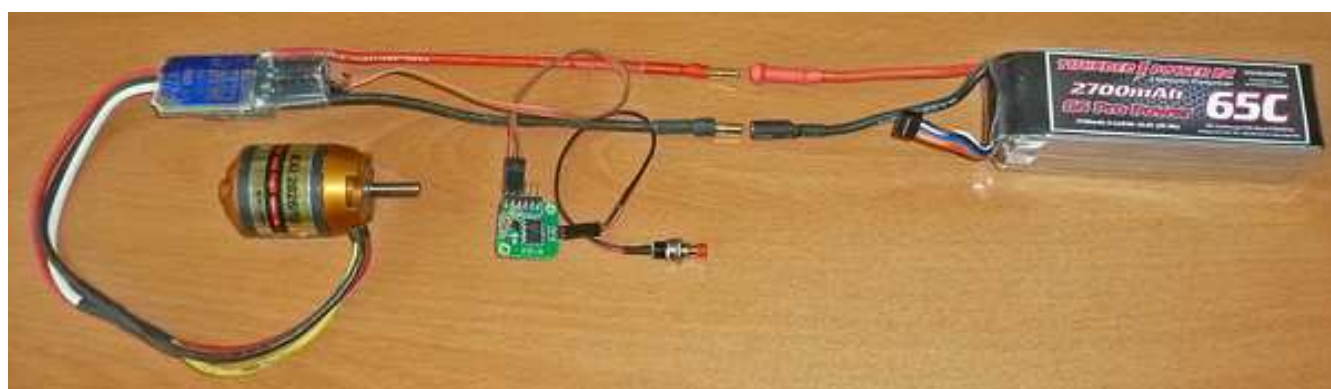
Die Kosten für die Beschaffung der elektrischen Komponenten für meine F2B Modelle, inkl. der einmaligen Anschaffungen Programmiergerät und USB Schnittstelle, jedoch ohne Ladegerät, betragen im Juli 2011 sFr. 505.- bzw. 390.- €. inkl. 1 Batterie. Jede weitere Batterie kostet sFr. 114.- / 95.- €\*. Ich setze für den Trainingsbetrieb 4 Batterien ein.

### Betriebskosten

Basis:	100 Flüge
Treibstoffverbrauch PA .75 pipe (Fr. 12.-/L)	200 ccm/Flug
Angenommene Lebensdauer einer Batterie	100 Zyklen
Treibstoffkosten PA .75 pipe:	sFr. 240.-
Batteriekosten, E-Antrieb:	sFr. 100.-

## Bezugsquellen und Bestellinformationen

Bauteil	Hersteller	Hersteller No. / Bezeichnung	Lieferant	Best. No.	Preis Fr.	Gewicht Gr.
Motor	AXI	2826/12	Fachhandel oder <a href="http://www.electricwingman.com/model-motors/axi-2826/12.aspx">http://www.electricwingman.com/model-motors/axi-2826/12.aspx</a>		139.-	210
2-Blatt Propeller 13 x 5.5 EP	APC	LP13055EP	Pusher. Fachhandel, auf Bestellung		14.-	33
Regler Phoenix Edge lite 75A	Castle Creations	010-0112-00	<a href="http://www.eflight.ch">www.eflight.ch</a> Nachfolgeprodukt von Castle Phoenix ICE lite. Austauschbar	15432	110.-	84
Castle Link Phoenix Schnittstelle	Castle Creations	010-0005-00		426	29.-	
Timer	Will Hubin	FM-9 Timer with extd. leads, w/o retractable gear	Will Hubin 719 Cuyahoga St. Kent, OH 4420 USA		18.-	10
Programmiergerät	Will Hubin	FM-9 Programmer Phoenix High New	Will Hubin whubin@kent.edu		95.-	
Batterie 2700mAh 5S 70C 120 x 39 x 36 mm	ThunderPower G8	TP2700-5SPF70	AKmod Rheinfelden, CH +41 61 843 0000 <a href="http://www.akmod.ch">www.akmod.ch</a>		110.-	372 mit Stecker
Antiblitz Stecker	Jeti	ASC 4 mm	Fachhandel		10.-	3
Lipo Ladegerät für balanced charge	Div.	Bis 6S max.10 A Ladestrom	Für 220 und 12V Eingangsspannung oder Fachhandel		Ca. 200.-	



### Hinweise zum Umbau vorhandener Flugzeuge

Aus Gewichtsgründen sind elektrische Antriebe für F2B Modelle so ausgelegt, dass die einzelnen Komponenten, vor allem die Batterie, bis nahe an ihre Belastungsgrenzen beansprucht werden. Flugzeuge mit grossem Luftwiderstand, benötigen viel Energie und sind deswegen für einen nachträglichen Umbau weniger geeignet.

Der für einen guten Motorlauf sehr stabil ausgeführte Rumpfaufbau eines Verbrenner-Flugzeuges kann bei elektrischem Antrieb leichter gehalten werden. Beim nachträglichen Umbau eines vorhandenen Fliegers lässt so Gewicht einsparen.

- Um den Trimmzustand durch den Umbau nicht zu verändern, ist es notwendig vor dem Umbau den Tank zu  $\frac{3}{4}$  zu füllen und so zuerst die Lage des Schwerpunktes **genau**, zu vermessen. Zu beachten bleibt, dass ein nachträgliches Anpassen der Trimmung, in der Regel in Richtung Kopflastigkeit, notwendig sein kann. Es ist daher **ratsam**, die Batterie so einzubauen, dass ihre Lage im Feld auf einfache Weise um mindestens +/- 25 mm (längs) verändert werden kann.
- Unbedingt einzuhalten ist die richtige Lage des **vertikalen Schwerpunktes** bei eingebauter Batterie. Dieser soll **genau** auf die Profilmitte der Tragfläche zu liegen kommen.
- Motorbalken und schwere Spanten können entfernt werden. An ihre Stelle tritt ein 6 mm Kopfspant, bestehend aus 12-fach Sperrholz, zur Montage des Elektromotors. Wo technisch möglich, ist die **Frontmontage des Motors vorzuziehen**, da diese die Belastung der Kugellager im Motor geringer hält.



- Motor, Regler, Batterie und Timer sind temperaturempfindlich und müssen ausreichend gekühlt werden. Hier gilt es zu beachten, dass bei hoher Umgebungstemperatur die einzelnen Grenzwerte (Siehe „Technik im Detail“) schnell erreicht werden können. **Zu hohe Temperaturen reduzieren die Lebensdauer elektrischer Komponenten, auch des Motors, erheblich.** Deswegen ist **gute Kühlung unbedingt notwendig**.
- Zur sehr wirksamen, direkten Kühlung des Motors kann ein ringförmiger Luftspalt zur Kühlung des Rotors offen bleiben. Dabei ist auf genügend, mind. 3 x größeren, Auslassquerschnitt zu achten. Eine den Luftstrom nach oben gegen den Motor umlenkende Führung der Kühlluft einzubauen ist nützlich. Alternativ dazu sind auch Spinner mit Lufteinlässen und Turbo-Grundplatte eine gute Lösung. (Tru-Turn Turbo Cool)



- Der Regler wird so eingebaut, dass er zwar gut gekühlt wird, aber vor Spritzwasser geschützt ist.
- Zur Kühlung der Batterie ist für ausreichenden Luftdurchfluss um die Batterie zu sorgen.

- Beim Einbau des Timers ist darauf zu achten, dass der 6-polige Anschluss von Außen zugänglich bleibt. Auch der Timer und die Start/Stop Taste sind vor Spritzwasser zu schützen. Die Start/Stop Taste wird **versenkt eingebaut**, um so vor versehentlicher Betätigung gut geschützt zu sein.

Die Batterie wird so montiert, dass die vor dem Umbau vermessene Lage des Schwerpunktes (mit  $\frac{3}{4}$  Treibstoff) exakt erhalten bleibt. Der Wechsel der Batterie sollte von oben möglich sein und die Länge der Kabel zwischen Batterie und Regler sollte weniger als 30 cm betragen.

### Hinweise zum Flugbetrieb

- Batterie erst unmittelbar vor dem Start einsetzen und anstecken.
- Sicherstellen, dass nur mit **vollständig geladenen** Akkus gestartet wird. Bei Unsicherheit Batterie nachmessen (Geeignete Instrumente gibt im Modellbau Fachhandel)
- Das Ende der Gebrauchsdauer (Anzahl Zyklen) einer Batterie kündigt sich dann an, wenn die Spannung **unter Last** (Im Flug, in Manövern) auf einen Wert von **3.0 Volt pro Zelle** abfällt. Bei entsprechender Einstellung der Unterspannungsüberwachung des Reglers (auf 3.0V und auf „soft cutoff“) spricht dann diese Sicherung im Regler an und reduziert die Leistung bis zum Ablauf der eingestellten Laufzeit.
- Beim Anstecken der Batterie zählt der (Phoenix Edge) Regler die Zellen und piepst für jede erkannte Zelle einmal (Bei 5S; Startmelodie und danach 5 Piepser) **Mitzählen**; Wird eine Zelle nicht erkannt (ein Pieps fehlt), nicht starten, Batterie wechseln. Nach den (5) Zählpiepsern ertönt noch eine kurze Tonfolge zur Bestätigung der Betriebsbereitschaft. Fehlt diese, nicht starten und alle Steckkontakte sorgfältig prüfen.
- Bei Anwendung von Funkenschutz-Steckern **entfällt** das Zählsignal. Siehe dazu: „**Funkenschutz**“
- Gelegentliche (ca. alle 50 Flüge) Reinigung und Konservierung aller Steckkontakte mit einem Kontaktspray (Elektronik Fachhandel) ist sinnvoll.
- Ist das System betriebsbereit, so ertönt alle 20 sec ein kurzer Warnpieps. Er zeigt an, dass alle Komponenten scharf sind. Nach der Landung erfolgt noch 1 pieps, danach wird diese Funktion abgeschaltet.
- Startverzögerung nicht unter 30“ einstellen.
- Startsequenz durch kurzes Drücken der Start/Stop Taste einleiten. **VORSICHT**, der Regler quittiert den Startbefehl mit einem kurzen Drehen des Propellers.
- Der Start des Flugzeuges ohne Helfer kann insofern riskant sein, als dass bei ungeplantem Anlauf des Motors erhebliche Schäden an Menschen und Material möglich sind.
- Ein Starthelfer, oder eine Startfalle, muss eingesetzt werden:
  - Beim Betrieb mit Zugpropeller, weil dabei die Nase des Flugzeuges beim Anrollen nach innen dreht.
  - Beim Start auf Gras
 Freigabe erst nach Erreichen voller Drehzahl.
- Bei Unsicherheit oder Zwischenfällen wird die Startsequenz und/oder ein laufender Motor durch kurzes Drücken der Start/Stop Taste abgebrochen, bzw. abgestellt. **Dies muss allen Helfern mitgeteilt und demonstriert werden.**
- Eine abgebrochene Startsequenz und/oder ein abgestellter Motor kann nicht erneut gestartet werden. Dafür muss zuerst die Batterie aus- und wieder angesteckt werden.
- 5 sec vor dem (mit FM-9) programmierten Ausschalten des Motors nimmt der Regler für einen ganz kurzen Moment die Leistung zurück und zeigt so das bevorstehende Abstellen an. **Vorsicht**; dieses Signal kann durch die Programmierung der Bremsverzögerung und/oder der Gasannahme (Phoenix: Head Speed Change Rate) überdeckt werden und ist dann fast nicht mehr wahrnehmbar.

## Die Vor- und Nachteile

- Elektrische Antriebe für F2B Modelle sind wettbewerbsfähig.
- E-Antriebe sind im Betrieb völlig anspruchslos und zeigen exakt reproduzierbares Verhalten. Damit sind sie besonders auch für Einsteiger sehr gut geeignet. Dies auch deswegen, weil sich die Flugzeit fast beliebig kurz einstellen lässt.
- E-Antriebe sind nicht schwerer, aber in der Beschaffung teurer. Der „Eintrittspreis“ für einen für den Wettbewerbseinsatz geeigneten F2B Antrieb dürfte bei einer Größenordnung von sFr. 900.- bzw. 750.- € liegen. Inkl. mehrerer Akkus, und mit den Lade- und Programmiergeräten.
- Bis auf den Timer sind alle der benötigten Komponenten im lokalen Fachhandel zu bekommen.
- E-Antriebe können, auf Grund der sehr viel größeren Anzahl an Bauteilen, eine höhere, statistische Ausfallrate haben.
- E-Antriebe erzeugen zwar geringe, aber durchaus „wirksame“ Vibrationen. Alle heiklen Verschraubungen müssen gut gesichert werden.
- Die Beherrschung des Laufverhaltens eines Verbrenner-Antriebes ist ein wesentliches Element der immer wieder neuen „Herausforderung F2B“. Bei E-Antrieben fehlt diese Herausforderung...

Dies sind subjektive und persönliche Meinungen, gewonnen aus eigener Erfahrung. Sie gelten zum jetzigen Zeitpunkt für mich und sind nicht in jedem Fall auf Andere übertragbar. Einzelne Aussagen können sich als unrichtig erweisen.



## - Technik im Detail -

### Der Motor

Im Leistungsbereich bis ca. 700 Watt, und bei Drehzahlen in der Größenordnung bis ca. 11'000 U/min, sind bürstenlose Gleichstrommotore, aufgebaut als Aussenläufer ohne Getriebe, für unsere Zwecke gut geeignet. Solche Motore werden vom Fachhandel in großer Auswahl angeboten. Auf Grund der mechanischen Belastung, insbesondere durch die Kreiselkräfte der Luftschraube beim Fliegen von harten Ecken (Drehrate 300%/sec!), ist es wichtig ein mechanisch hochwertig konstruiertes Produkt, ausgerüstet mit Kugellagern eines namhaften Herstellers, einzusetzen.

Die in F2B üblicherweise eingesetzten Aussenläufer Motore werden durch folgende Kennwerte definiert:

- Durchmesser und Länge des, nicht drehenden, Stators: z.B. 28 mm Durchmesser und 26 mm Länge = 2826
- Anzahl Windungen: beispielsweise 12.
- Spezifische Drehzahl Kv (auch: RPM/V): z.B. 760. Das bedeutet, dass der Motor, ohne Propeller, pro Volt (V) angelegter Spannung 760 U/min dreht. Bei 18.5 Volt ergibt das 14'060 U/m. Unter Last ist dieser Wert erheblich kleiner. Der Kv Wert muss deswegen so gewählt werden, dass die Nennspannung der Batterie von 3.7 Volt pro Zelle ausreicht um die benötigte Drehzahl (mit Propeller und im Flug!) sicher zu erreichen.
- Maximaler Strom: Ausgedrückt in Ampere (A) über eine bestimmte Zeit: z.B. 35 A / 30 sec.
- Anzahl Pole: z.B.14 Dieser Wert ist für die Programmierung des Reglers und der Datenspeicher-Software von Bedeutung

Hier die Daten des Motors meiner F2B Modelle

Hersteller	AXI	
Typ	2826/12	Aussendurchmesser 35 mm
Kv	760	Länge, ohne Welle, 54 mm
Polzahl	14	
Max. Strom	37 A / 30 sec	
Gewicht	193 Gramm	inkl. Kabel

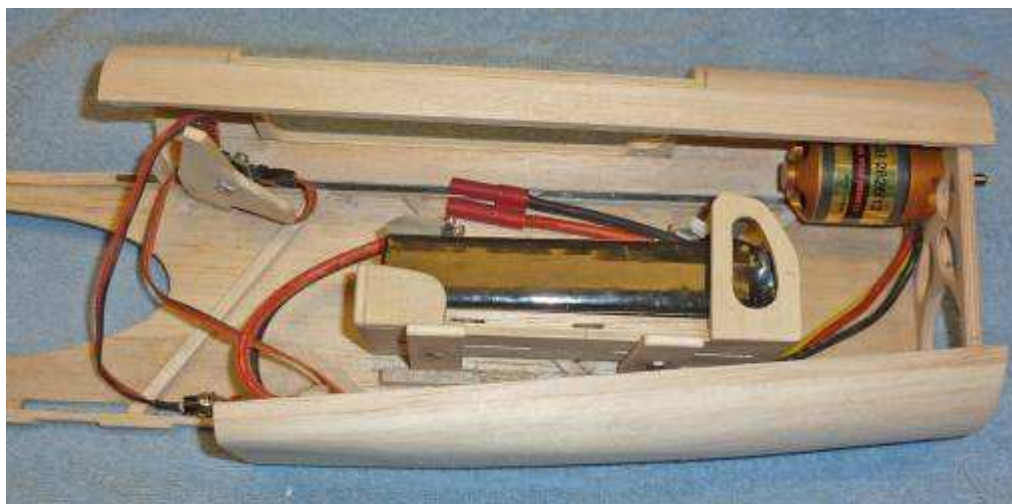


**VORSICHT:** Unsere Motore, auch wenn sie gar nicht so aussehen, entwickeln ganz erhebliche Kräfte und **beschleunigen unter Umständen völlig unvermittelt in Sekundenbruchteilen auf volle Leistung**. Darin liegt ein erhebliches Gefährdungspotential! Die Verbindung mit einer Batterie (Auch wenn diese entladen ist) darf nur dann erfolgen, wenn der Motor genauso stabil wie ein kräftiger Verbrenner eingebaut ist und wenn der Propellerstrahl keinen Schaden anrichten kann.

### Einbau der Antriebskomponenten

Beim Einbau des Motors ist sicherzustellen, dass er mit reichlich Kühlluft umströmt wird. Das zum AXI 2826 als Zubehör lieferbare Lüftungsrad COOL1 (Bild) ist empfehlenswert. **Die Betriebstemperatur, gemessen am rotierenden Teil, darf 85° C nie überschreiten.** Insbesondere Standläufe sollten deswegen nicht länger als unbedingt nötig durchgeführt werden (Weniger als 60 sec). Hier ist große Vorsicht geboten, denn bei zu hohen Temperaturen können die Verklebung der Permanentmagnete, sowie die Magnete selbst, unwiderruflichen Schaden nehmen. Dies kann bei ausgedehnten Standläufen unter hoher Last sehr rasch geschehen.

Der mechanische Aufbau der Motore ist kritisch, ich möchte hier vom Zerlegen ohne spezielle Vorrichtungen bzw. Werkzeuge und von eigenen Reparaturversuchen abraten und empfehle den Motor ins Werk zu schicken.



- Motor mittels min. 6 mm Kopfspant (12-fach Sperrholz) einbauen.
- Batterie auf verschiebbarem Schlitten ( +/- 25 mm) zur Justierung des Schwerpunktes.
- Vertikale Position der Batterie so wählen, dass der vertikale Schwerpunkt mit der Profilsehne der Tragfläche zusammenfällt.
- Alle Elemente im kühlenden Luftstrom.
- Batteriewechsel von oben.



### Funkenschutz

Im Moment des Ansteckens der Batterie an den Regler werden zuerst die beiden Eingangskondensatoren des Reglers aufgeladen. Dabei fließt für einen kurzen Zeitraum von ca. 80/1000 sec. ein Strom von gegen 200 Ampère, was, insbesondere bei Batterien mit mehr als 3 Zellen, zu einem Lichtbogen im Stecker führt. Dies ist zwar nicht gefährlich, kann aber die Kontakte im Stecker durch Abbrennen der Goldschicht beschädigen.

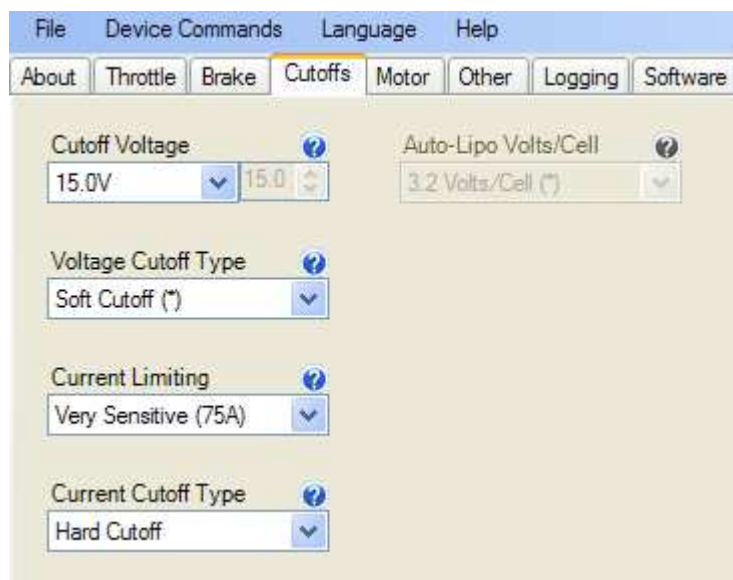
Die Verwendung je eines Batteriesteckers mit Funkenschutz (z.B. Anti-Blitz ASC 4 mm von Jeti) verzögert den Stromfluss für einen (sehr kurzen) Moment und verhütet so diesen Abbrand der Kontakte im Batteriestecker. Anti-Blitz Stecker werden in einem der beiden Kabel von der Batterie zum Regler eingebaut, und zwar so, dass der weibliche Teil zur Batterie hin weist.



Es ist zu empfehlen, dass die Stecker im anderen Batteriekabel so ausgewählt werden, dass ein (fatales!) Verwechseln der + / - Pole bei Einstecken unmöglich ist.

#### **Anti-Blitz Stecker und Castle Edge Regler, Sicherheitsabschaltungen**

Die automatische Zählung des Edge Reglers kann durch die Einschaltverzögerung einer Anti-Blitz Schaltung gestört werden, was dazu führen kann, dass der Motor nicht anläuft. Werden Funkenschutzeinrichtungen, z.B. Anti-Blitz Stecker, eingesetzt, so ist dabei die automatische Erkennung und Zählung der Li-Po Zellen im Fenster „Cutoff Voltage“ des Castle Edge Regler auszuschalten und anstelle die Schwelle der Abschaltung bei Unterspannung auf 3.0 Volt pro Zelle, hier 15.0 V nur für den Betrieb mit 5S Batterien, einzustellen:

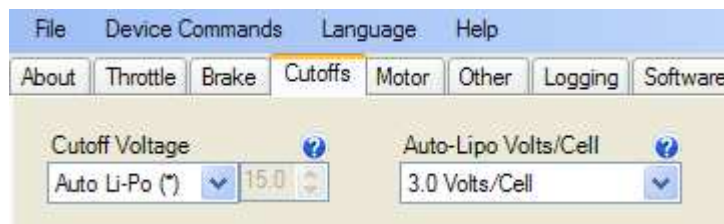


Die Schwellwerte und die Reaktionsgeschwindigkeit der automatischen Abschaltung, bei zu geringer Batteriespannung und/oder bei zu hohem Strom, werden so eingestellt:

Mit den Einstellungen „Cutoff Voltage“ 15.0 V und „Soft Cutoff“ fährt der Regler bei einer Batteriespannung unter Last von weniger als 15.0 V (3.0 V pro Zelle), z.B. wenn die Batterie gegen das Ende der Lebensdauer kommt, die Drehzahl langsam hinunter und erlaubt so eine Notlandung.

Bei zu hohem Strom hingegen, wie bei blockierter Motorwelle, und mit den Einstellungen „Very Sensitive 75A“ und „hard cutoff“ schaltet der Regler mit einer minimalen Verzögerung von weniger als 1 sec nach Erreichen der Schwelle von 75A vollständig aus. Damit besteht eine gute Chance, leider aber keine Garantie, dass der Regler keinen Schaden nimmt.

Für Betrieb ohne Funkschutz wird die automatische Erkennung und Zählung der Li-Po Zellen so eingeschaltet. Sie funktioniert bei allen Zellenzahlen bis 8.



### Der Regler und seine Programmierung

Bürstenlose Motore benötigen eine in geeigneter Form aufbereitete Spannung. Um diese aus der Gleichspannung der Batterie zu erzeugen, wird ein Umformer benötigt. Weil dieser gleichzeitig zur Regelung der abgegeben Leistung dient, heißt er Regler oder engl. Electronic Speed Controller bzw. ESC.



Moderne Regler sind hochentwickelte Bausteine welche auf kleinstem Raum nicht nur sehr große Leistungen steuern, sondern deren Funktionsweise darüber hinaus weitgehend frei programmierbar sind. Der Castle Phoenix Edge Lite Regler hat diese Anschlüsse:

- 2 dicke Kabel zur Verbindung mit der Batterie; Rot = Pluspol Schwarz = Minuspol.
- 1 dünnes, vieradriges Kabel mit Flachstecker für den Anschluss des Timers im Fesselflug. („Servokabel“) Rot und Braun dienen zur Stromversorgung „BEC“ und über das orange Kabel laufen die Steuerimpulse für die Leistung. Auch die Programmierung des stromlosen Reglers erfolgt über dieses Kabel.
- Das dünne weisse Kabel des Phoenix Edge hat in der für F2B gewählten Konfiguration des Reglers keine Funktion. Es wird so gesichert, dass es im Rumpf nirgendwo Probleme machen kann.
- 3 dicke Kabel, weiss, rot, schwarz, zur Verbindung mit dem Motor.
- Die dicken Kabel vom Regler zur Batterie sollten nicht länger als ca. 30 cm sein. Bei längeren Zuleitungen können Störimpulse im Kabel der Stromversorgung zu Fehlfunktionen des Reglers führen. (Die Länge der Motorkabel spielt keine Rolle) Es ist zudem ratsam, das 3-adrige Servokabel (vom Regler zum Timer) nicht über mehrere cm Länge parallel in engem Kontakt mit den Batteriekabeln zu verlegen.
- Regler nie an die Batterie anschließen, wenn das Servokabel nicht am Timer angeschlossen ist.
- **VORSICHT:** Falsches Anschließen der Stromversorgung, bzw. vertauschte Polarität (auf Farbe achten) zerstört den Regler, und zwar sofort.
- Den Regler immer so einbauen, dass er reichlich mit Kühlluft umströmt wird. Dabei aber auch auf den wichtigen Schutz vor Spritzwasser achten.

- Der Regler darf nie wärmer als **100°C** werden. (Siehe Data Logging)
- Regler gut befestigen, z.B. indem die Batterie- und/oder Motorkabel nahe am Regler mit soliden Klemmen im Rumpf fixiert werden. Lose herumhängende Kabel können **fatale** Kontaktprobleme verursachen.

Die wichtigsten Kenndaten von Reglern sind:

Maximaler Strom: In Ampere (A), gemessen zwischen Batterie und Regler. Dauerstrom und/oder kurzfristiger (30 sec.) Spitzenstrom. Für F2B Anwendung ist eine Dauerlastfestigkeit von 50 - 75 A notwendig.

Spannungsbereich: Oft angegeben in Anzahl LiPo Zellen (zu je 3.7 V pro Zelle). Für uns geeignet ist ein Bereich von 3 - 8 Lipos oder 11.1 bis 29.6 Volt.

„Heli Mode“ oder engl. „Governor Mode“: In dieser Betriebsart hält der Regler die vom Timer vorgegebene Motordrehzahl konstant. Diese Funktion, sie wird nicht von allen Reglern angeboten, ist **für F2B unverzichtbar**.

### Der Einfluss des Verstärkungsfaktors (Governor Gain) auf die Funktion der Drehzahlregelung

Beim für F2B E üblichen, drehzahlgeregelten Betrieb wird die Funktion der Konstanthaltung der Drehzahl bei wechselnder Last vom Verstärkungsfaktor bestimmt. Dieser ist, im Fenster „Governor Gain“ der CastleLink Schnittstelle, vom Anwender programmierbar:



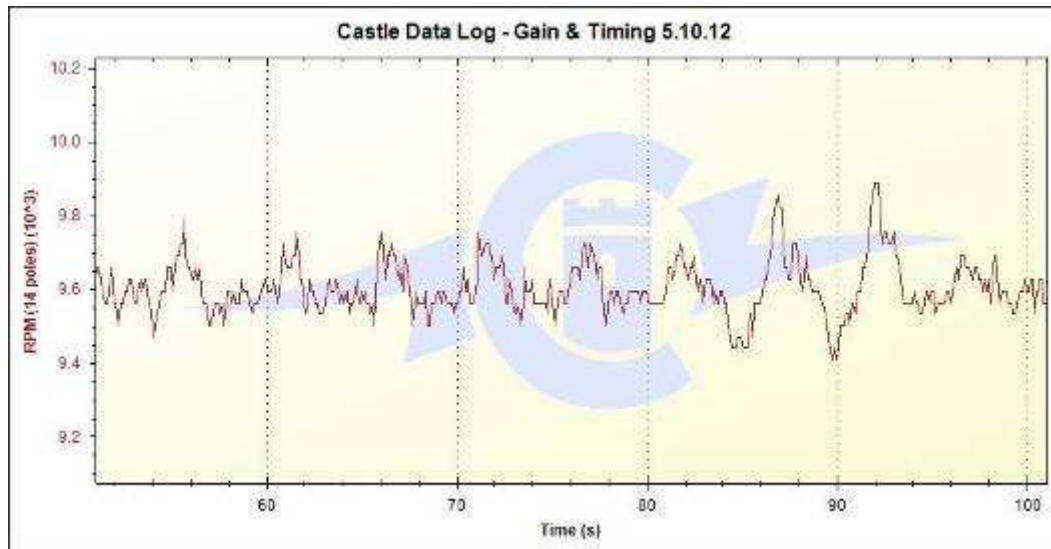
Die „Governor Gain“ Einstellung definiert, wie schnell an der Motorwelle auftretende Laständerungen ausgeregelt werden. Solche Laständerungen können sein:

- Gegen- bzw. Rückenwind
- Zunehmende Last im Steigflug
- Abnehmende Last im Sinkflug
- Änderung der Luftdichte durch Temperatur und/oder Luftdruck

Ein kleiner „Gain“ Wert, z.B. „Medium (25)“, bewirkt eine weniger ausgeprägte Ausregelung solcher Einflüsse als die Einstellung eines grossen „Gain“ wie „High (35)“. Mit der Auswahl des Begriffes „Custom“ („Nach Mass“) und der Eingabe eines Zahlenwertes zwischen 1 und 50 können eigene Faktoren programmiert werden, wobei der Verstärkungsfaktor mit zunehmendem Wert ansteigt.

### Niedrige Gain Einstellung

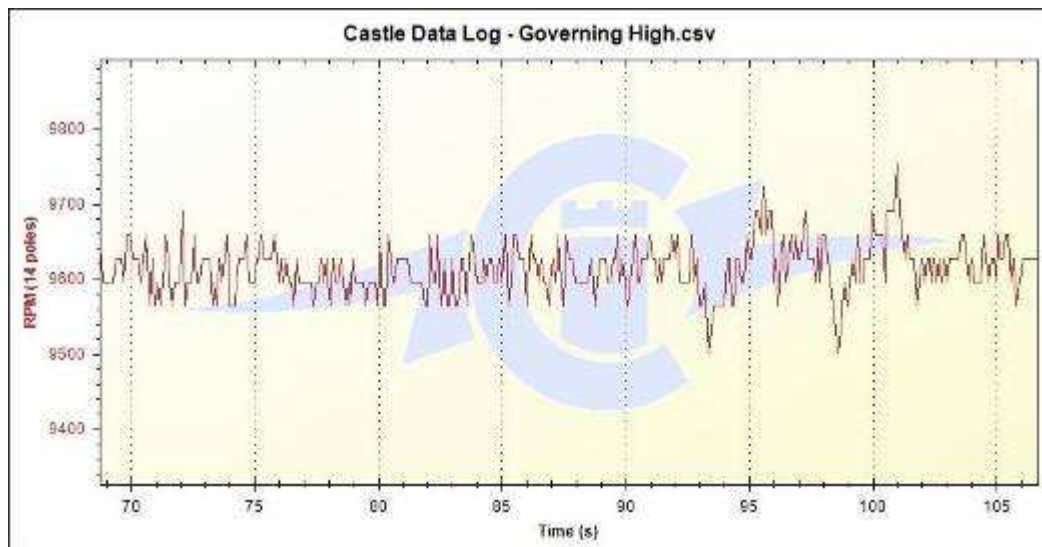
Diese Grafik zeigt, auf der linken Seite, die Drehzahl im Flug während der ersten 5 Runden. Auf der rechten Seite ist der Verlauf der Drehzahl während dem Wechsel-Halbkreis aufgezeichnet:



Gut zu sehen sind die ca. alle 5 sec (1 x pro Runde) auftretenden Drehzahlspitzen bzw. Einbrüche im Horizontalflug. Sie liegen ca. 160 U/min über bzw. über der mittleren (voreingestellten) Drehzahl von ca. 9'600 U/min. Ursache der Spitzen ist der Gegen- bzw. Rückenwind und die Höhe der Spitzen wird vom hier eingestellten, sehr niedrigen Verstärkungsfaktor „Low“ (15) bestimmt. Die beiden höheren Ausschläge rechts dokumentieren zum Einen den Drehzahlabfall beim Hochziehen in den Wingover und zum Anderen die Zeit und das Ausmass des Ausregelns. Festzustellen sind ein Einbruch um ca. 130 U/min und ein kurzes (0.8 sec) Überregeln um ca. 250 U/min innerhalb von 2 sec.

### Hohe Gain Einstellung

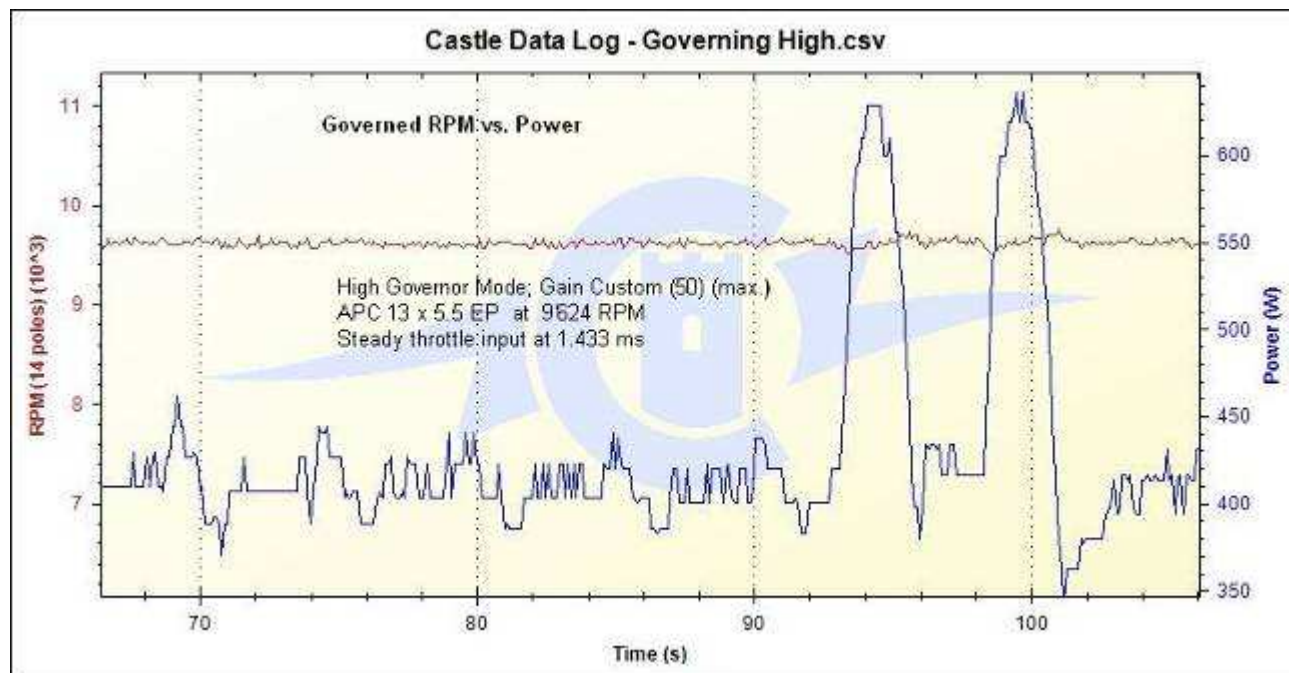
Verändert man nun die Einstellung des Verstärkungsfaktors auf den Maximalwert von „Custom (50)“, sieht die gleiche Flugphase so aus:



Die Einbrüche und Spitzen im Horizontalflug sind mit +/- 70 U/min deutlich weniger ausgeprägt. Auch die Abweichungen im Wingover sind mit einem Einbruch von -100 U/min und einer kurzen (0.8 sec) Überregelung von + 100 U/min geringer. Interessant ist die Tatsache, dass die Regelgeschwindigkeit von der Einstellung des Verstärkungsfaktors nur sehr geringfügig beeinflusst wird.

### Leistungsbedarf zur Konstanthaltung der Drehzahl

Die in den Darstellungen des geregelten Drehzahlverlaufes gemessenen, geringen Abweichungen der Drehzahl bedeuten nicht, dass die Laständerungen in den Manövern ebenso gering sind. Im Gegenteil ist es so, dass diese Änderungen recht gross sind und dass sie vom Regler durch schnelle Erhöhung und/oder Verringerung der Antriebsleistung ausgeglichen werden:



Hier sieht man sehr deutlich, wie die durch das Hochziehen in den Wingover verursachte Laständerung eine Leistungserhöhung von 420 auf immerhin 630 Watt, innerhalb von weniger als 2 sec, auslöst und so die Drehzahl konstant hält. Ein geringerer „Gain“ Wert reduziert diesen Leistungszuwachs etwas und spart so Energie.

### Der Einfluss von Drehzahlschwankungen auf die Fluggeschwindigkeit

Davon ausgehend, dass die Regelung des Phoenix Edge lite 75A die Drehzahl während allen Manövern innerhalb von +/- 100 U/min, bzw. ca. +/- 1 %, konstant hält, bewegen sich die, von dieser Drehzahlschwankung verursachten, Änderungen der Fluggeschwindigkeit in den Manövern in einer ähnlichen Grössenordnung von +/- 1 %, was bedeutet, dass sie kaum spürbar sein dürften. Auch die viel zitierten Unterschiede in Bezug auf das Beschleunigen beim Hochziehen und das „Bremsen“ im Sturzflug können offenbar nicht auf die „Gain“ Einstellung zurückgeführt werden. Solches konnte, weder subjektiv durch meine Testflüge noch objektiv durch die Aufzeichnung der Drehzahl nachgewiesen werden.

### Resultate

Governor Gain	Regelbereich	Regelgeschwindigkeit von n min – n max.
Low (15)	+/- 160 U/min	3.1 sec
Custom (50)	+/- 130 U/min	2.3 sec

Offenbar ist es so, dass der Drehzahlregler des Castle Phoenix ICE lite 75A für unsere F2B Anwendung so ausgelegt ist, dass die „Gain“ Einstellung sowohl sehr schön funktioniert, als auch unkritisch ist. Ich fliege seit längerer Zeit mit einem Wert von High (35). Dies erscheint mir als ein guter Kompromiss in Bezug auf Regelbereich, Regelgeschwindigkeit und Energieverbrauch.

**Bremse:** Das FAI F2B Reglement schreibt vor, dass der Propeller im Landeanflug „stillstehen“ muss. Dabei wird „stillstehen“ so definiert, dass, wenn der Motor noch ganz langsam nachdreht, die einzelnen Propellerblätter noch deutlich sichtbar sein müssen. Diese Forderung wird von einem lediglich stromlos geschalteten Elektromotor nicht erfüllt, denn dessen Drehzahl fällt im Fahrtwind zu langsam ab. Es ist deswegen nötig, den Motor beim Abschalten elektrisch zu bremsen. Hier ist zu beachten, dass es Regler gibt, welche den gleichzeitigen Betrieb von „Heli, bzw. Governor Mode“ und Bremse nicht unterstützen. Bei den Reglern der Phoenix Edge Reihe von Castle kann, durch Aktivierung der „Control Line“ Funktion im „Governor Mode“, die Funktion der Bremse frei programmiert werden.

Einige Regler-Fabrikate (Jeti, Castle Creations Phoenix) verfügen über **eingebaute Datenspeicher**. Diese registrieren während dem Flug eine programmierbare Anzahl von Betriebsdaten und ermöglichen so nach der Landung die sorgfältige Analyse der Abläufe und Funktionen. Beim Castle Phoenix Edge wird dazu der nicht mit der Batterie verbundene Regler über das Servokabel und die Phoenix CastleLink Schnittstelle mit einem Windows PC verbunden.

Die Firma Castle Creations hat in das Betriebssystem, die "Firmware", der Baureihe Phoenix Edge einige Funktionen speziell für Fesselflug eingebaut. Details dazu siehe:

[http://www.castlecreations.com/products/phoenix\\_ice.html](http://www.castlecreations.com/products/phoenix_ice.html)

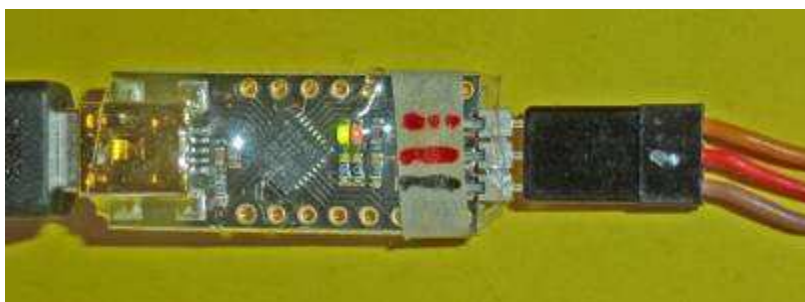
Hier sind die Daten des in meinen F2B Modellen eingebauten Reglers:

Hersteller	Castle Creations	
Typ	Phoenix Edge lite 75A	
Spannungsbereich	14 - 34V	4 – 8 Lipos
Max. Strom	37A / 30 sec	
Governor Mode	ja	
Datenspeicher	ja	Alle relevanten Werte
Programmierbar	Sehr weitgehend	Via PC Schnittstelle
Gewicht	83 Gramm	Inkl. Kabel

### Castle Phoenix Edge Regler programmieren

Zur Konfigurierung des Reglers, d.h. Programmierung der Funktionen, der Datenspeicherung und für die graphische Auswertung wird die CastleLink Software benötigt. Diese läuft auf PC's mit Betriebssystem bis und mit Windows XP, Vista, Windows 7 und Windows 8. Für MAC, bei Castle entsprechende Hinweise beachten. CastleLink ist kostenlos erhältlich auf: <http://www.castlecreations.com/downloads.html>

Ich verwende die Version **V3. 56.21 der CastleLink** Software. Nach erfolgreicher Installation wird der nicht an die Batterie angeschlossene Regler über den 3-poligen Servostecker und das CastleLink Kabel (Schnittstelle) an einem UBS Eingang des PC angeschlossen,



- CastleLink starten.
- Pulldown Menü „Software“ öffnen.
- Im Fenster „Device“ muss der richtige Regler Typ erscheinen (z.B Phoenix Edge 75).
- Unter „Available Firmware Versions“ **V 4.19 (Beta)** markieren.
- Button „Update Firmware“ anklicken.

„Firmware“ ist die Bezeichnung für das Betriebssystem des Reglers. Ich verwende zum heutigen Zeitpunkt (März 2014) die Version **V 4.19 (Beta)**. Im Regler Phoenix Edge 75 sind eine Anzahl Parameter vom Anwender frei programmierbar. Bei neuen Versionen des Betriebesystemes, CastleLink schlägt diese automatisch vor, ist vor dem Herunterladen das Studium der „Changes“ zu empfehlen Diese betreffen in aller Regel Flächen-und Helianwendungen und sind für uns nicht von Nachteil. Sollte irgendetwas nach der Übernahme einer neuen Version nicht gut laufen, so kann jederzeit auf die vorherige Version zurückgegriffen werden



Die unter „Setup“ aufgeführten Werte zeigt die Konfiguration des Phoenix Edge im März 2014 für meinen „Fireshark“:

Fireshark				
ESC Setup	Register	Setup		Remark
Firmware	Software	V 4.19 (Beta)		
Vehicle Type	Throttle	Control Line		
Throttle Type	Throttle	Governor Mode		
Governor Mode	Throttle	Governor High		
Governor Gain	Throttle	High (35)		
Initial Spool-Up Rate	Throttle	High (8)		
Head Speed Change Rate	Throttle	Custom (20)		
Battery Pack Volt.	Throttle	18.500		
Motor and Gearing	Throttle	No Gearing/Direct Drive		
Motor Information	Throttle			
kV of Motor	Throttle	760		für AXI 2826/12
Magnetic Poles in Motor	Throttle	14		für AXI 2826/12
Desired Head Speeds	Throttle			
Brake Strength	Brake	100%		
Brake Delay	Brake	0.6 sec		
Brake Ramp	Brake	Medium		
Cut-Off Voltage	Cutoffs	15.0 V	aktiv	mit Antiblitz Stecker
Voltage Cutoff Type	Cutoffs	Soft Cutoff		
Current Limiting *	Cutoffs	Very Sensitive		75A
Current Cutoff Type	Cutoffs	Soft Cutoff		
Motor Start Power	Motor	Custom (59)		
Motor Timing **	Motor	Custom (4)		
Direction ***	Motor	Reverse		
PWM Rate ****	Motor	8 Khz		
Power-On Beep	Other	Enabled		
BEC Voltage	Other	5.0 Volt		Stromversorgung Timer
Logging	Logging	Enabled	2 Samples / Sec	Battery Voltage / Battery Current / Controller Temperature / Controller Input Throttle / Motor RPM

\* Beim Blockieren der Motorwelle steigt der Strom sehr schnell auf kritische Werte an. Die Einstellung „Very sensitive 75 A“ kann (muss aber nicht...) Schäden an der Elektronik verhüten.

\*\* Der Phoenix Edge Regler bestimmt den optimalen Grad der „Frühzündung“ eines angeschlossenen Motors vollautomatisch. Die Automatik arbeitet dabei mit verschiedenen, einstellbaren Kennfeldern. Für den AXI 2826/12 haben sich die Einstellungen „Custom (3) und (4)“ gut bewährt.

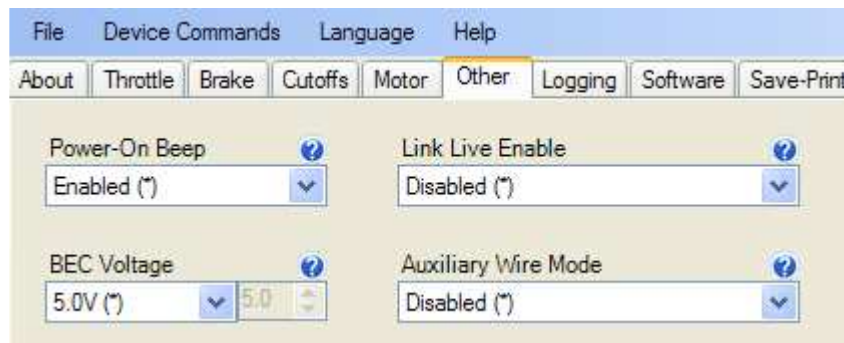
\*\*\* Die Drehrichtung kann auch durch das Vertauschen von zwei der drei Motoranschlüsse umgekehrt werden.

\*\*\*\* Die Faustregel zur Bestimmung der Ansteuerfrequenz lautet:  
 $(Kv \text{ des Motors} \times \text{Anzahl Pole} \times \text{Nennspannung}) \text{ dividiert durch } 20$ , abgerundet auf den nächst niedrigen PWM Wert. Hier:  $(760 \times 14 \times 20) / 18.5 = 9'842 \text{ Hz}$  bzw. 8 Khz. Die Einstellung der Motor-Ansteuerfrequenz (PWM Rate) 8 Khz hat sich für den AXI 2826/12 bewährt. Die an gleicher Stelle wählbare Einstellung „Outrunner“ (Aussenläufer) wird für diesen Motor nicht empfohlen.

Einstellungen	Fireshark		Resultate	Bemerkung
Wetter		19°		
Propeller		APC 13 x 5.5 EP		Pusher
Drehzahl für Leinen 19.5 m		9'092		
Drehzahl für Leinen 18.0 m		9'482		
Rundenzeit 19.5 m		5.35 sec		
Rundenzeit 18.5 m		5.1 sec		
Flugzeit		5 min 30 sec		
Nachladung Leinen 19.5 m		1'900 mAh		
Nachladung Leinen 18.0 m		1'800 mAh		

### Der Timer

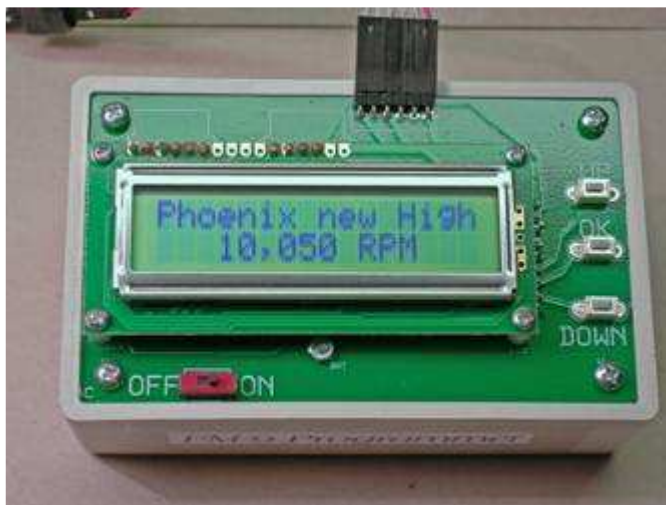
Um dem Regler anzusteuern benötigen Fesselflieger ein besonderes Bauteil, welches passende Signale erzeugt und diese über das 3-adrige Servokabel an den Regler schickt. Dafür ist der „Timer“ genannte Baustein vorgesehen. Er wird vom Regler mit Strom versorgt. Der von mir eingesetzte, direkt programmierbare Timer FM-9 von Wilbert Hubin besteht aus einem elektronischem Baustein und einer extern zu montierenden Start/Stop Drucktaste. Er wiegt ca. 10 Gramm. Die 5 Volt Stromversorgung des Timers geschieht über das 3-polige Servokabel des Reglers. Dazu muss dessen BEC Funktion (Battery Elimination Circuit) im Castle Edge Regler auf 5.0 V eingestellt werden:



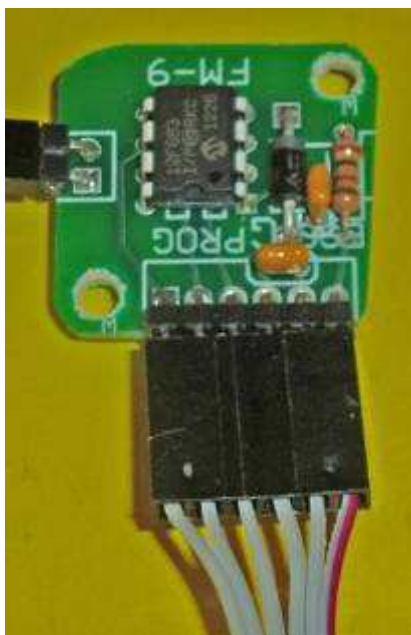
Der „FM-9 Timer with extd. leads, w/o retractable gear“ ist bei Will Hubin [whubin@kent.edu](mailto:whubin@kent.edu) zu bekommen.

**VORSICHT:** Wird, bei angesteckter Batterie, der vom Regler kommende 3-polige Servostecker vom Timer abgezogen, so beginnt der Motor hochzulaufen!

Zur Programmierung des FM-9 Timers auf dem Flugplatz benötigt man das **FM-9 Programmiergerät**.



Um den ausgeschalteten FM-9 Programmer in Betrieb zu nehmen, wird der Servostecker vom Timer abgezogen (**VORSICHT; Verbindung Batterie-Regler zuerst trennen**) und die 6-adrige Verbindung zum Programmer angesteckt. Die rote Markierung ist rechts.



Jetzt wird die Start/Stop Taste gedrückt gehalten und **gleichzeitig** der Programmer eingeschaltet. Danach die Start/Stop Taste wieder loslassen. Die Meldung „ FM-9 Progr: Press OK to continue“ erscheint und zeigt an, dass der Computer des Programmers gestartet wurde. Bestätigen mit der Taste OK und weiteren Anweisungen folgen. Nicht vergessen; Nach der Programmierung den Hauptschalter am Programmierer ausschalten. Mit dem FM-9 Programmer können diese Funktionen in den Speicher des FM-9 Timers gewählt werden:

Anzeige	Funktion	Bereich
Flight Time	Motor Laufzeit ab Ende Hochlauf bis Stop.	1'00" – 9'59"
Delay	Startverzögerung bis Hochlauf	2" – 99"
ESC Mode <b>Phoenix New High</b>	<b>Für Phoenix / Edge Governor High Betrieb *</b>	<b>7'300 – 11'990 U/min</b>
ESC Mode Throttle mode	Feste Leistungseinstellung	15% - 100%
ESC Mode compen throttle	Leistungseinstellung **	59% - 91%
ESC Mode Phoenix High RPM	Für Phoenix / Edge Governor High Betrieb ***	8'040 – 12'880 U/min
ESC Mode Phoenix SET RPM	Für Betrieb mit 3 programmierten Drehzahlen	No. 1 – No. 3
ESC Mode Schulze F2B low	Für Schulze F2B Regler, niedriger Bereich	7'340 -12'040 U/min
ESC Mode Jeti Spin	Für Regler Jeti Spin	8'490 -10'470 U/min
ESC Mode Hacker High X30	Für Regler Hacker X30, hoher Bereich	8'070 -13'050 U/min

\* Für Phoenix Betriebssysteme (Firmware) grösser als 3.20

\*\* Mit autom. Ausgleich des Spannungsabfalls der Batterie (einstellbar)

\*\*\* Für Phoenix Betriebssysteme (Firmware) bis 3.20

Meine Modelle fliegen mit dieser Timer Einstellung:

Delay (Startverzögerung): **30 sec**  
 Run Time (Laufzeit): **5 Min 25 sec**  
 ESC Mode: **Phoenix New High**  
 RPM (Drehzahl), ca. **9'200** (mit APC 13 x 5.5 EP, für 5.3 sec/R an 19.5 x0.4 mm Leinen)

Der FM-9 Programmer ist bei Will Hubin [whubin@kent.edu](mailto:whubin@kent.edu) zu bekommen.

## Die Batterie



Die elektrischen Eigenschaften unserer Batterien werden durch die Spannung, die Kapazität, die Ladung, den maximal zulässigen Entladestrom und den maximal zulässigen Ladestrom definiert. Die dafür gebräuchlichen Einheiten sind:

- Die **Spannung**, in Volt (V). Im Vergleich mit einem Tank ist das der **Druck**. Lipo Akkus bestehen aus einer Anzahl einzelner, hintereinander (in Serie) geschalteter Zellen. Jede Zelle gibt eine Gleichspannung im Bereich von 3.0 – 4.5 Volt, je nach Ladezustand und Belastung, ab. Als mittlere Nennspannung wird 3.7 Volt pro Zelle angenommen. Die Anzahl Zellen wird mit einer Zahl, gefolgt vom Buchstaben S (für Serieschaltung) angegeben: 3S bedeutet somit 3 in Serie (hintereinander) geschaltete Zellen. Die Nennspannung eines in Serie geschalteten Akkus ist also gleich der Anzahl Zellen mal 3.7. Je größer die Nennspannung, desto geringer wird die Strombelastung des Reglers und des Motors. Allerdings wird das Verhältnis von Gewicht zu Stromkapazität der Akkus mit zunehmender Zellenzahl ungünstiger.

- Die **Kapazität**, in Ampère-Stunden (Ah) oder Milliampère-Stunden (mAh). Zeigt an, wieviel drin ist und wie lange es dauert, bis der Akku (der Tank) leer ist. Der Wert 2'700 mAh bedeutet, beispielsweise, dass die Batterie während 1 Stunde einen Strom von 2'700 mA, bzw. 2.7 Ampere, abgeben kann. Oder während 1/10 Stunde 27 Ampere. Der C Wert ist ein theoretischer Grenzwert, er darf in der Praxis nicht ausgenutzt werden.
- Die **Ladung**, in Ampère-Stunden (Ah) oder Milliampère-Stunden (mAh). Sie gibt eine bestimmte Treibstoffmenge an, also z.B. wie viel Treibstoff jetzt gerade im Tank ist oder wie viel Treibstoff in der letzten Minute hinaus geflossen ist.
- Der **maximal zulässige Entladestrom** (Ampère). Der **kurzzeitig** (weniger als 30 sec) zulässige maximale Entladestrom in Ampere ist: Kapazität in mAh dividiert durch 1000, multipliziert mit dem aufgedruckten C Wert. Beispiel: 2'700 mAh / 1000 x 45 C = 121.5 A. Die auf den Batterien aufgedruckten Werte für „Continuous“ oder „Burst“ Ströme sind jedoch in aller Regel „Marketing-Argumente“. Ein Betrieb nahe an diesen Werten ist unbedingt zu vermeiden.
- Der **maximal zulässige Ladestrom** (Ampère). Dieser ist: Kapazität in mAh dividiert durch 1000, multipliziert mit dem aufgedruckten C Wert für **Ladung** bzw. „Charge“. Beispiel: 2'700 mAh / 1000 x 2 C = 5.4 A. Lipo Batterien dürfen nur mit speziellen, programmierbaren Ladegeräten geladen werden, wobei die Funktion „Balancing“, d.h. automatischer Ausgleich des Ladezustandes der einzelnen Zellen, aktiviert werden muss. Höhere Ladeströme, bis 5 C, sind nur mit speziellen, vom Batteriehersteller empfohlenen Ladegeräten und Verfahren möglich. Sie können sich auf die Lebensdauer der Batterie ungünstig auswirken.

### Die Dimensionierung der Batterie

Die Bestimmung der elektrischen Kennwerte einer Batterie geschieht durch das Festlegen von:

- **Nennspannung** in Volt (V). Diese ist gleich der Anzahl Zellen multipliziert mit der mittleren Lipo Zellenspannung von 3.7 V, also  $5 \times 3.7 \text{ V} = 18.5 \text{ V}$  bei einer 5S Batterie.
- **Energiebedarf** in Wattstunden (Wh) Er entspricht der verbrauchten Ladung in Milliamperestunden, multipliziert mit der mittleren Spannung der Batterie und dann dividiert durch 1000, also zum Beispiel  $(2000 \text{ mAh} \times 18.5 \text{ V}) / 1000 = 37 \text{ Wattstunden}$
- **Kapazität** in Milliampèrestunden (mAh) Sie sollte um mindestens 30% größer als der Energiebedarf sein.
- Maximal zulässiger **Entladestrom C** (in Ampère, vielfaches von C/1000)

### Nennspannung in V

Die benötigte Nennspannung einer Batterie berechnet sich aus der vorgesehenen, maximalen Betriebsdrehzahl im Flug und der spezifischen Drehzahl (Umdrehungen pro Volt) des Motors (siehe Datenblatt), sowie einer für die Funktion des automatischen Drehzahlreglers (Governors) notwendigen **Spannungsreserve von ca. 30 %**:

### Maximale Betriebsdrehzahl

Für Propeller APC 13 x 5.5 EP und Rundenzeit 5.3 sec:  $9'500 \text{ U/min} + 10\% \text{ Reserve} = 10'450 \text{ U/min}$   
 Umdrehungen pro Volt des Motors (ohne Last): 760 (AXI 2826/12)  
 Spannungsreserve: 30%  
 Benötigte Spannung:  $(10'450 \text{ dividiert durch } 760) + 30\% = \mathbf{17.875 \text{ Volt}}$

### Benötigte Energie in Wh

Bestimmende Faktoren für den Energiebedarf sind:

- Das Fluggewicht (geht direkt proportional in den Luftwiderstand ein)
- Der Luftwiderstand des Flugzeuges
- Der Luftwiderstand der Leinen (fast gleich groß wie derjenige des Flugzeuges)
- Die Fluggeschwindigkeit (Geht im Quadrat in den Luftwiderstand ein)

Die Erfahrung zeigt, dass um mit einem herkömmlichen F2B Modell, bei einer Motorlaufzeit von 5 Min 25 sec, an 19.5 m x 0.4 mm Leinen und bei einer Rundenzeit von 5.3 sec, ein volles Programm zu fliegen, eine Energie von ca. 36 Wattstunden (Wh) benötigt wird. Daraus lässt sich diese Faustregel zur ungefähren Bestimmung des Energiebedarfs für den Flug (ohne Reserve) ableiten:

$$\text{Energiebedarf in Wh} = (\text{Fluggewicht in Gramm dividiert durch 100}) \times 2$$

(Gewicht 1'600 Gr /100) x 2 = 32 Wh

(Gewicht 1'800 Gr /100) x 2 = 36 Wh

(Gewicht 2'000 Gr /100) x 2 = 40 Wh

#### Benötigte Kapazität der Batterie

Je nach gewählter Nennspannung (siehe dort) und benötigter Energie berechnet sich die notwendige Kapazität. Um die Batterie nicht unter eine Restkapazität von 20% zu entladen, wird der gefundene Wert mit dem Sicherheitsfaktor 1.25 multipliziert:

Zum Beispiel so: 36 Wh (Energiebedarf) dividiert durch 18.5 V (Nennspannung) multipliziert mit Sicherheitsfaktor 1.25 = 2.43 Ah oder 2'432 mAh (benötigte Kapazität)

Gewicht 1'600 Gr.: Energiebedarf 32 Wh / 11.1 V (3S) x 1.25 = 3'604 mAh Kapazität, inkl. 20 % Reserve.

Gewicht 1'600 Gr.: Energiebedarf 32 Wh / 18.5 V (5S) x 1.25 = 2'162 mAh Kapazität, inkl. 20 % Reserve.

Gewicht 1'800 Gr.: Energiebedarf 36 Wh / 18.5 V (5S) x 1.25 = 2'432 mAh Kapazität, inkl. 20 % Reserve.

Gewicht 1'800 Gr.: Energiebedarf 36 Wh / 22.2 V (6S) x 1.25 = 2'027 mAh Kapazität, inkl. 20 % Reserve

Gewicht 2'000 Gr.: Energiebedarf 40 Wh / 18.5 V (5S) x 1.25 = 2'703 mAh Kapazität, inkl. 20 % Reserve.

Gewicht 2'000 Gr.: Energiebedarf 40 Wh / 22.2 V (6S) x 1.25 = 2'252 mAh Kapazität, inkl. 20 % Reserve

#### Maximal zulässiger Entladestrom C

Da bei F2B, im drehzahlgeregelten Betrieb, nur kurze (weniger als 5 sec) Stromspitzen auftreten, und da sich diese auf eine Größenordnung von 50% über den Stromfluss im Horizontalflug beschränken, ist für unsere Anwendung weniger der maximal zulässige Spitzenstrom als der mittlere Strom über die ganze Flugdauer von Bedeutung. Allerdings ist es so, dass die im F2B Betrieb in sehr kurzer Folge auftretenden Stromspitzen die Batterie sehr hoch belasten. Dies führt, bei Batterien mit hohem Innenwiderstand (= geringe C Rate) zu hoher Erwärmung und damit geringer Lebensdauer. So habe ich am Anfang meiner E-Aktivitäten mit preiswerten 25C Batterien in der Regel weniger als 40 Zyklen erreicht. Heute weisen meine Erfahrungen weisen darauf hin, dass eine höhere Kapazität von zum Beispiel 45C oder gar 60C, sich auf die Lebensdauer vorteilhaft auswirkt.

#### Gebrauchslebensdauer

Sie wird gemessen in Zyklen, d.h. der Anzahl der Entlade- / Ladevorgänge bis zum Auftreten des ersten Anzeichen des nahenden Endes der Gebrauchslebensdauer. Diese sind:

- Spannung der kalten Batterie nach dem Flug,ohne Last: kleiner als **3.6 V** pro Zelle
- Temperatur nach der Landung über 50°C
- Ausgeprägte Blähung
- Deutlich längere Ladezeit bzw. lang andauerndes, automatisches Balancing vor dem Beginn des Ladevorganges.

Das **Ende der Lebensdauer** ist dann erreicht, wenn die Spannung der Batterie **unter Last**, das heißt in Manövern während dem Flug, einen Wert 3.00 V pro Zelle unterschreitet. In diesem Fall spricht die auf 3.0 V eingestellte Unterspannungs-Überwachung des Reglers an und die Leistung des Motors wird stark reduziert. Bei meiner Anwendung passierte das bisher gegen Ende des Fluges, ca. 3 Runden nach dem Kleeblatt. Die Batterie wird dann fachgerecht entsorgt.

Der Gebrauch einer Batterie bis zu diesem Punkt ist heikel, denn es kann dabei schon einmal vorkommen, dass die Unterspannungs-Überwachung des Reglers die Leistung schon beim Einflug in den ersten Looping des Kleeblattes zurücknimmt...

**VORSICHT:** Auch ein entladener oder defekter Akku kann bei Kurzschluss einen gefährlich hohen Stromfluss verursachen!

#### Sicherheitshinweise

- Die aufgedruckte Kapazität zu nicht mehr als 80% beanspruchen. **Vorsicht**, die Kapazität nimmt im Betrieb ab. Zur **Prüfung** der noch vorhandenen Kapazität die Batterie mit einem modernen Ladegerät und einem Strom von 1 C auf 3.0 V pro Zelle entladen. Danach mit 1 C

auf 4.2 V pro Zelle laden. Die am Ende des Ladevorganges angezeigte Lademenge in mAh ist die noch vorhandene Kapazität der Batterie.

- Temperatur der Batterie vor dem Flug nicht weniger als 25°C.
- Kurzschlüsse, zum Beispiel beim Anlöten der Stecker, unbedingt vermeiden.
- In Betrieb auf Luftkühlung achten. Nicht in Schaumstoff o.ä. einwickeln.
- Ausschließlich moderne, computerisierte **Lipo** Ladegeräte einsetzen.
- **Niemals** unter 3.0 Volt (unter Last) pro Zelle entladen.
- **Nicht auf über 4.2 Volt pro Zelle und immer „balanced“ laden.**
- Ladestrom gering wie möglich einstellen, typischerweise das 1 - 2 fache der Kapazität/1000 (1-2 C).
- Auch bei Einhaltung aller Vorsichtsmassnahmen darf eine Lipo Batterie NIE unbeaufsichtigt geladen werden.
- Zeigt eine Batterie ohne Last eine Spannung von weniger als 3.0 Volt pro Zelle so ist sie möglicherweise bei der Lagerung und/oder beim Laden brandgefährdet. In diesem Fall sicher und geschützt aufbewahren und unverzüglich einen Fachmann konsultieren (Lieferant)
- **Langzeitlagerung**, in feuerfestem Lipo-Koffer, geladen auf ca. **3.75 V pro Zelle**. Dies entspricht, bei meiner Anwendung, ungefähr der Spannung nach der Landung. Ich lagere meine Batterien deswegen so, wie sie nach der Landung sind. (3.75 V pro Zelle, alle 2-3 Monate nachprüfen)



Hier die Zellenspannungen (in Volt, ohne Last) eines kalten 5-Zellen Akkus nach dem Flug (F2B Programm)

**Neue Batterien** entlade ich vor dem ersten Flug mit 1C auf 3.0 Volt pro Zelle (15.0 V bei 5S) und lade sie anschließend mit 1 C (2.7 A bei 2'700 mAh) auf 4.2 V pro Zelle (21.0 V bei 5S). Das Ganze 2 - 3 mal.

Sollte die auf 3.0 V eingestellte Unterspannungssicherung des Reglers in den ersten Flügen mit einer neuen Batterie ansprechen, so empfehle ich dies sauber zu dokumentieren, am Besten mit einem Ausdruck des Datalogs, und die Batterie als Garantiefall zurückzugeben.

### Energieverbrauch im Flug

Hier die den Energieverbrauch bestimmenden, typischen Eckwerte eines F2B Modells:

Tragfläche	43 qdm	Flügel, inkl. Flaps
Gewicht	1'850 Gramm	Mit Batterie 5S 2'700 mAh
Kabel / Länge	0.39 mm / 19.5 m	Oese-Oese
Rundenzeit	5.3 sec	
Propeller	13" x 5.5"	2-Blatt APC Electric Pusher
Drehzahl eingestellt	9'553 U/min	Am Programmiergerät FM-9
Mittlere Drehzahl im Flug	9'540 U/min	Aufgezeichnet
Motor-Laufzeit	5' 2"	
Nachladung	ca. 2'000 mAh	weniger bei Wind
Energieverbrauch	3.7 Wh	Bei mittlerer Spannung von 18.5 V

Bei einer aufgezeichneten Spannung (unter Last) von 20.9 V am Anfang des Fluges und 18.2 V (3.65 V/Zelle) am Ende, fließt im Horizontalflug ein Strom von bei ca. 22 A und die kurzen Stromspitzen in Manövern erreichen 33 A. Um ausreichend Spannungsreserve für die Drehzahlregelung bereitzustellen, setze ich einen 5 Zellen Akku (18.5 V) mit einer maximalen Kapazität von 2'700 mAh ein.

Abschließend zum Thema Batterie bliebe zu erwähnen, dass das Gewicht der elektrischen Ladung durchaus vernachlässigbar ist. Dies im Gegensatz zum Gewicht der Tankfüllung eines Verbrenners (0.85 Gramm pro ccm), einer Tatsache die bei Gewichtsvergleichen gerne übersehen wird...

## Propeller

Die ausschließlich für elektrische Antriebe entwickelten APC E Luftschrauben zeichnen sich durch einen sehr hohen Wirkungsgrad aus. Darüber hinaus sind sie nicht allzu schwer und fast überall im Fachhandel günstig zu erwerben. Einige Piloten haben herausgefunden, dass die Auswirkungen von Drehmoment, Kreiselkraft und P-Effekt auf den Leinenzug in bestimmten Manövern dann von Vorteil ist, wenn die Luftschraube links herum läuft. Um diesen Effekt auszunutzen verwende ich sogenannte „Pusher“ also linkslaufende Propeller. APC stellt davon eine ganze Reihe unter der Bezeichnung Thin E (für Elektro) und P (für Pusher) her. Diese sind zwar nicht überall vorrätig, können aber per Sonderbestellung vom Fachhändler kurzfristig beschafft werden.

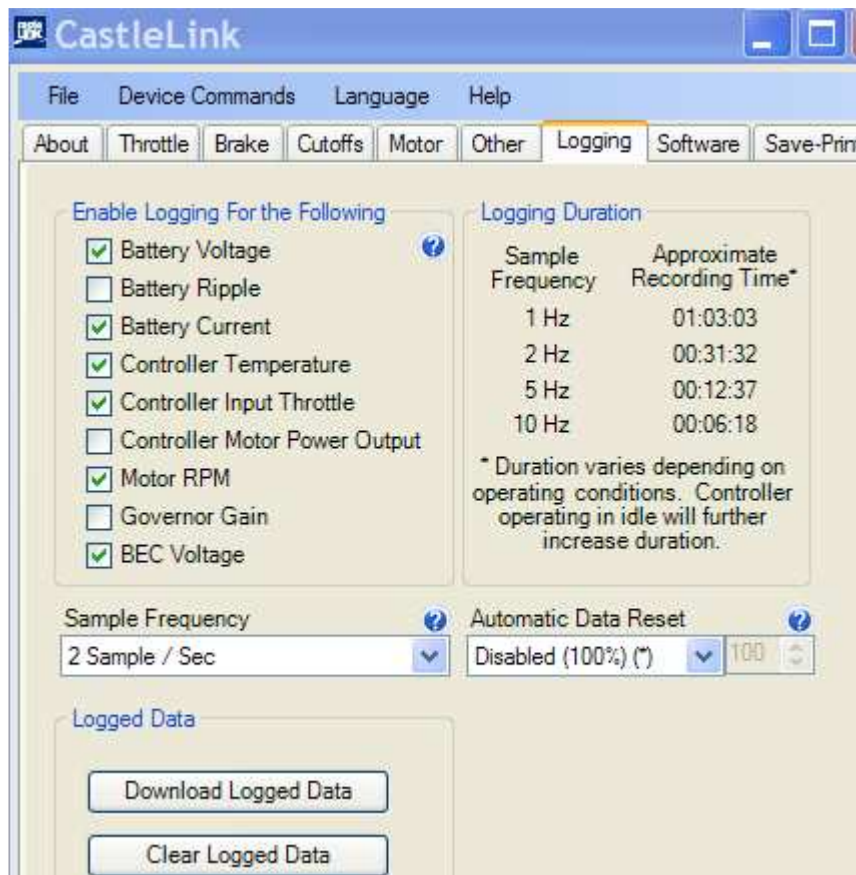
Siehe auch unter: <http://www.apcprop.com/pindex.asp>

Zwei Dinge gilt es zu beachten

- Die Bohrung der APC E (Thin Electric) Propeller ist **nicht** mittig. Sie ist deswegen zuerst um ca. 1 mm Durchmesser größer als die Motorwelle aufzubohren. Die genaue Zentrierung geschieht danach durch das Einlegen eines passenden Ringes in die Eindrehung auf der Rückseite des Propellers. Solche Ringe liegen jedem E Propeller bei, sie werden mit einem Tropfen Sekundenkleber gesichert.
- Die Nabe der dünnen E Propeller ist eher knapp dimensioniert. APC empfiehlt deswegen eine bestimmte Drehzahl nicht zu überschreiten. Diese **Grenzdrehzahl** berechnet sich so: 145'000 dividiert durch den Durchmesser in Zoll. Für eine 13 Zoll Luftschraube ergibt sich ein Grenzwert von 11'153 U/min.

## Datenspeicherung

Die Regler der Phoenix ICE Baureihe von Castle Creations enthalten einen Datenspeicher (Data Logger). Die Funktionen des Speichers sind vom Anwender frei programmierbar. Um die während dem Flug gespeicherten Werte auszulesen, wird der im Modell eingebaute Regler über das 3-adrige Servokabel (mit einer passenden Schnittstelle) mit einem PC verbunden. (**Vorsicht**, Zuerst Verbindung Batterie – Regler trennen)





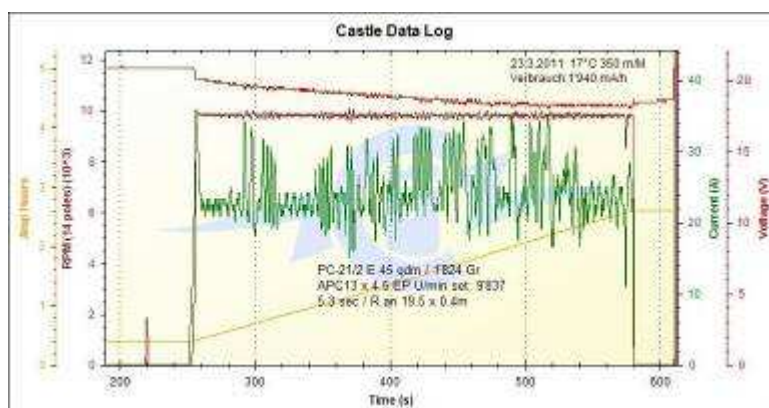
Die USB Schnittstelle CastleLink ist im Fachhandel erhältlich und das dazu benötigte Programm kann von der Castle Website kostenlos heruntergeladen und installiert werden. Das mitgelieferte Programm „CastleLinkGraph Viewer“ erlaubt beispielsweise die graphische Darstellung dieser Daten:

Bezeichnung	Funktion	Einheit
Battery Voltage	Batteriespannung	Volt
Battery Ripple	Spannungsimpulse am Eingang des Reglers	Volt
Battery Current	Batteriestrom	Ampere
Controller Temperature	Regler Temperatur **	°C
Throttle-In	Leistungssignal des Timers	ms
Controller Motor Power Output	Motorleistung	%
Motor RPM	Drehzahl ***	U/min
BEC Voltage	Speisespannung Timer	Volt

\*\* Im Programm „Castle Link Graph Viewer“ muss dazu unter „View“ die Anzeige auf „Celsius“ umgeschaltet werden. Die maximal zulässige Temperatur beträgt **95°C**.

\*\*\* Im Programm „CastleLink“ müssen dafür, unter „Edit“, die Polzahl, der Kv Wert und die Getriebeübersetzung des Motors abgespeichert werden. (AXI 2826/12: 14 Pole, no gearing/direct drive)

Die Dauer der Aufzeichnung hängt von der Anzahl der registrierten Parameter und der Messfrequenz ab. Beides ist programmierbar. So können beispielsweise Spannung, Strom und Drehzahl mit jeweils 10 Messungen pro Sekunde erfasst werden. Die Aufzeichnung beginnt beim ersten Flug. Nach Ablauf der Zeit, hier 15 Minuten, schaltet sich die Messung ab. Weiterlaufende Aufzeichnungsvorgänge, z.B. ein automatisches Überschreiben des Speichers, sind programmierbar. Hier das Beispiel einer Darstellung von geregelter Drehzahl und nachgeführtem Strom über die Zeit eines Fluges.



Das ist das Flugdiagramm eines 45 qdm / 1'824 Gramm Modells bei dem ein APC 13" x 4.5" 2-Blatt E P Propeller mit konstant 9'800 U/min drehte. Stromquelle war ein 5-Zellen (5S) 18.5V Akku mit einer Kapazität von 2'600 mAh. Jedes einzelne F2B Manöver ist auf Grund des Stromflusses (Current A, grüne Kurve) identifizierbar. Dabei ist gut zu sehen, wie der Strom (das Drehmoment) innerhalb eines Manövers beträchtlich erhöht, bzw. verringert wird. \*Die jeweilige Leistungsaufnahme des Motors in Watt ist gleich dem Produkt von Strom x Spannung, d.h. W = Grüner Strom in Ampere x rote Spannung in Volt.



## Alternativen und Aussichten

### Antriebsregelung

In den letzten zwei Jahren haben verschiedene Hersteller interessante Weiterentwicklungen der Antriebsregelung vorangetrieben. Die automatische Steuerung der Antriebsleistung auf Grund der Lage und Position des Flugzeuges auf der Flughalbkugel wurde umgesetzt von:

- Igor Burger: <http://www.netax.sk/hexoft/stunt/>
- Wolfgang Mahringer: <http://mahringer.co.at/projekte.htm>
- Einen Timer mit eingebautem Governor und lastabhängiger Leistungsabgabe gibt es bei Keith Renecl: <http://www.keithrenecl.co.za/Electric%20CL.htm>

### Batterien

Bei den Batterien sind Verbesserungen festzustellen. Mit 8 Exemplaren meiner G6 oder G8 2700 mAh 5S 65C bzw. 70C Batterien von ThunderPower habe ich bis heute je ca. 50 Zyklen ohne spürbare Leistungseinbuße erreicht. Aktuell beträgt die Spannung unter Last, im Horizontalflug nach dem Kleeblatt, ca. 18.1 V bzw. 3.62 V pro Zelle. Nach dem Flug messe ich an der kalten Batterie ohne Last 18.9 V bzw. 3.78 V pro Zelle. Ein low-cost Produkt „Topoly 35 2600mAh 5S 35 C“ zeigt nach aktuell 32 Zyklen ähnliche Werte.

### Propeller

Bei den Propellern ist die APC „Thin Electric Pusher“ Luftschaube 13 x 5.5 EP mittlerweile auf Bestellung lieferbar. Sie läuft insofern etwas ruhiger, als dass die vom APC 13 x 4.5 EP Propeller bekannte Schwingung in scharfen Ecken nicht mehr auftritt. Noch etwas ruhiger und mit geringerem Einfluss der Kreiselkraft auf das Modell, funktioniert die APC 12 x 6 EP (bei fast gleicher Drehzahl). Bei meinen eher etwas schweren Modellen ist mit dieser Luftschaube der Leinenzug über Kopf jedoch etwas geringer.

Auch Versuche mit breitblättrigen 2- oder 3-Blatt Luftschauben zur Verbesserung der Bremswirkung sind interessant, wobei allerdings ein etwas höherer Leistungsbedarf in Kauf genommen werden muss.

### FAI Regeln

Die Ausgabe 2014 des FAI/CIAM Sporting Code erlaubt den Einsatz von bordeigenen, automatischen Systemen zur Leistungsregelung aller zulässigen Antriebe, inkl. Verbrenner, für F2B Modelle. Darüber hinaus stellt die ebenfalls 2014 erfolgte Zulassung von drahtlosen Systemen zur Ein- und Ausschaltung von Antrieben durch den Piloten einen erheblichen Gewinn an Betriebssicherheit dar. Die Verwendung solcher Ein- bzw. Ausschaltssystemen zur Leistungssteuerung im Flug ist nicht zulässig. Eine Regeländerung nach der an Wettbewerben jedes F2B Modell so lange durch einen Helfer festgehalten werden muss, bis der Pilot den Griff in der Hand hält, ist in Vorbereitung.

### Weiterführende Literatur

Elektrotechnische Grundlagen, hervorragend illustriert: <http://www.brucewilles.de/grundlagen.html>

Fachkunde Elektrotechnik, Klaus Tkotz, Europa Lehrmittel Verlag. ISBN-10 3808531894

Warum überhitzen Modellflugregler?, Markus Müller: <http://www.s4a.ch/eflight/reglerleistung.pdf>

4. April 2014 Peter Germann

