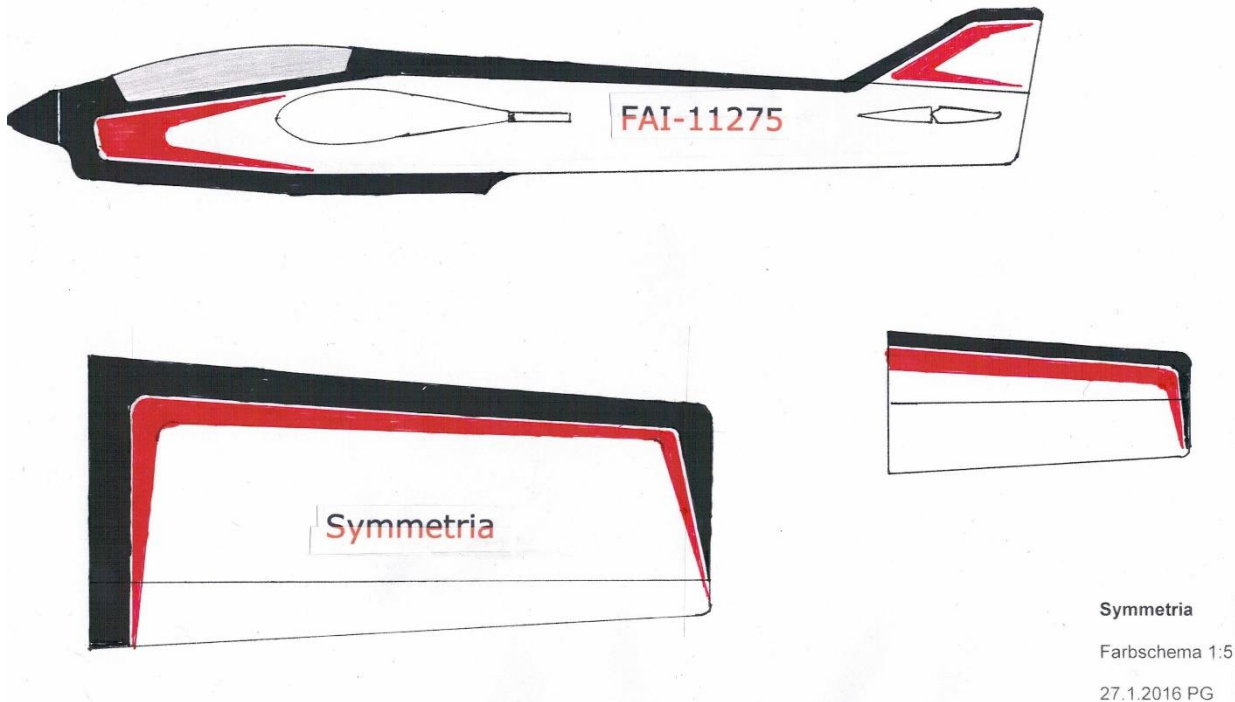


Seit dem Herbst 2010 befasse ich mich mit dem Thema elektrischer Antriebe für Fessel-Kunstflugmodelle. Dabei bin ich, wie bisher immer beim Einstieg in neue Technologien, nach dem Prinzip des Fragens und Kopierens vorgegangen und habe, immer ohne den Ehrgeiz diverse Räder neu zu erfinden, genau das gemacht, was mir kompetente Kameraden aus aller Welt stets bereitwillig geraten haben. Ganz besonders habe ich vom Austausch mit Norman Whittle und Igor Burger profitiert. Igor hat mir Unterlagen zu seinem Weltmeister Modell „Max Bee“ geliefert und wertvolle Hinweise zur Trimmung gegeben. Bei der Auslegung meines 2017 für den Betrieb mit umgekehrt laufendem Propeller konzipierten Flugzeuges „My Way“, ermöglichte mir die kompetente Hilfe von Wolfgang Nieuwkamp die rechnerische Bestimmung wichtiger Konstruktionsdaten. Für diese beispielhaft engagierte und offene Zusammenarbeit schulde ich diesen Kameraden großen Dank.



Bisher habe ich mit 13 verschiedenen Flugzeugen, vom einfachen Trainer bis hin zu für E-Antrieb gebauten, großen Kunstflugmodellen, Erfahrungen gesammelt. Auch die Erkenntnisse aus dem E-Umbau von Verbrenner-Modellen sind hier eingeflossen. Am Beispiel des „My Way“, einer eigenen Variante des Max Bee von Igor Burger, möchte ich im Folgenden auf meine Antriebskomponenten und deren Anwendung etwas näher eingehen.

Alle Beschreibungen und Aussagen entsprechen meiner persönlichen Sicht der Dinge heute, im April 2018. Sie sind nicht allgemein gültig. Neue Erkenntnisse werden dazukommen und ich werde mich bemühen, die Inhalte laufend anzupassen.

- Allgemeine Informationen -

Stand der Dinge

Die bereits 2006 erfolgte FAI Zulassung elektrischer Antriebe für die Kategorie F2B erweist sich als richtig. In kurzer Zeit, begünstigt 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 erreicht; Die Möglichkeit des sichtbaren Betriebes von Fesselflugmodellen bei sehr geringer Geräuschentwicklung und damit nahe am Menschen. Es liegt jetzt an uns, die sich daraus ergebende Chance zur Weiterführung unserer gemeinsamen Sache aktiv zu nutzen.

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

Die Flugzeuge

Sie entsprechen im wesentlichen bewährten Konstruktionen. Dabei gilt es zu beachten, dass herkömmliche Flugzeuge grundsätzlich für den Betrieb mit rechtsdrehenden Verbrennern bzw. Propellern („Tractor“) ausgelegt sind und deshalb gewisse Konstruktionsmerkmale zum Ausgleich der im Flug auftretenden Kreiselkräfte des Propellers enthalten zur Anwendung gelangen. Im Einzelnen sind dies:

- Die Achse des Motors und die Mittellinie des Höhenleitwerks liegen über der Mittellinie des Flügelprofils.
- Die Motorachse ist, bezogen auf die Mittellinie des Flügelprofils, ca. 1-2° nach unten geneigt.
- Der Anstellwinkel des Stabils, auch bezogen auf die Mittellinie des Flügelprofils, beträgt ca. 1° nach oben.
- Das Seitenruder ist mit dem Höhenruder gekoppelt. Dabei erzeugt ein Ausschlag des HR nach unten einen geringen Ausschlag des Seitenruders nach aussen. Bei Ausschlag des HR nach oben bleibt das SR neutral.



Mit der Einführung elektrischer Antriebe ergab sich die Möglichkeit durch die Umkehr der Drehrichtung die Kreiselkräfte des Antriebes so zu nutzen, dass sie in gewissen Manövern (oberer Looping in der stehenden Acht, obere Ecken im Stundenglas) zur Verbesserung des Leinenzuges beitragen. Dabei gelangen Propeller mit umgekehrter Steigung, sogenannte „Pusher“ oder Linksläufer, zur Anwendung. Dabei ist beim Start auf einer Hartbelagpiste, ohne Helfer, der sofortige Aufbau des Leinenzuges ein Sicherheitselement des „Pusher“ Betriebes.

Allerdings ist es so, dass bei herkömmlichen Modellen die oben erwähnten, Massnahmen zur Kompensation der Kreiselkräfte bei umgekehrter Drehrichtung deswegen nicht mehr funktionieren, weil die „Pusher“ Kreiselkräfte umgekehrt wirken. Dies hat beim Umbau herkömmlicher Modelle auf E-Antrieb mit linkslaufenden Propellern oft zu Problemen, insbesondere im Horizontal- und Rückenflug geführt. Abhilfe ist, bei herkömmlichen Modellen, nur durch den Verzicht auf linksdrehende Propeller möglich.

Um die Vorteile des „Pusher“ Betriebs zu nutzen, müssen die konstruktiven Massnahmen zur Kreiselkraft Kompensation so ausgestaltet werden, dass ihre Wirkung umgekehrt wird:

- Die Achse des Motors und die Mittellinie des Höhenleitwerks liegen auf der Mittellinie des Flügelprofils.
- Die Motorachse ist, bezogen auf die Mittellinie des Flügelprofils, ca. 1-2° nach oben geneigt.
- Der Anstellwinkel des Stabils, auch bezogen auf die Mittellinie des Flügelprofils, beträgt ca. 1° nach unten.
- Das Seitenruder ist mit dem Höhenruder gekoppelt. Dabei erzeugt ein Ausschlag des HR nach oben einen geringen Ausschlag des Seitenruders nach aussen. Bei Ausschlag des HR nach unten bleibt das SR neutral.

In-line „Pusher“ (auch ein Max Bee Derivat)



Die Funktionsweise der Antriebe

Drei unterschiedliche Funktionsweisen haben sich bewährt:

1.) Antrieb mit konstanter Drehzahl

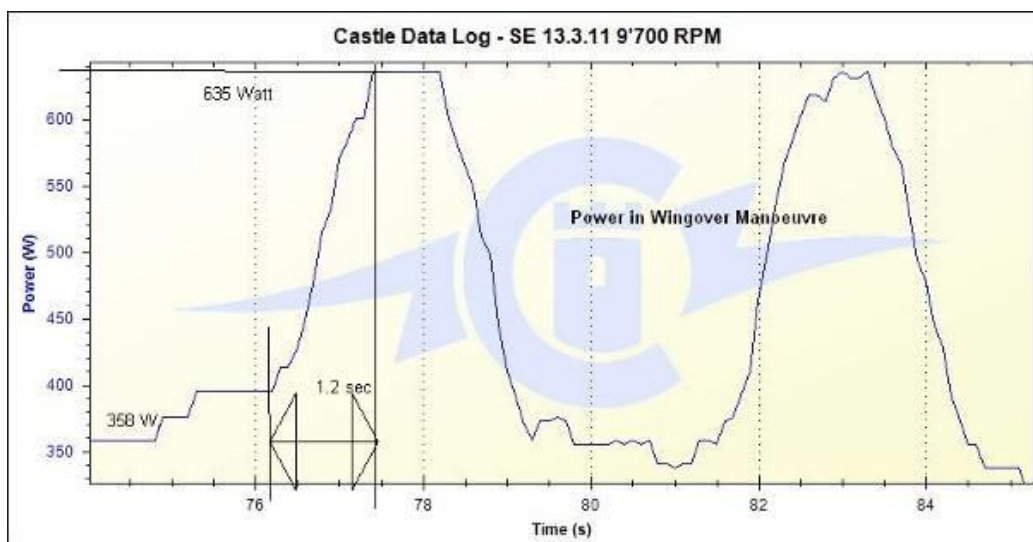
Diese Bauart wird sehr oft sowohl für Einsteiger- als auch für Wettbewerbsmodelle eingesetzt. Sie ist Gegenstand dieser Dokumentation und besteht aus im Wesentlichen handelsüblichen Komponenten:

- Bürstenloser Gleichstrommotor, konstruiert als sogenannter Aussenläufer, ohne Getriebe. Die benötigte Dauerleistung des Motors liegt bei einer Größenordnung von ca. 500 Watt.
- Umformer und Leistungssteller, „Regler“. Er erzeugt aus der von der Batterie gelieferten Gleichspannung ein mehrphasiges Drehfeld. Ein Regler für F2B 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. In dieser Betriebsart des Reglers muss die Motorbremse zugeschaltet werden können. RC 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 solchen Reglers im Fesselflug fehlen diese Signale. Sie müssen deswegen mit einem separaten Baustein, dem Timer, erzeugt werden.
- 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 LiPo 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.).

Was bewirkt die Regelung auf konstante Drehzahl?

Für F2B Anwendungen mit konstanter Drehzahl benötigen wir einen Regler welcher in der Lage ist, eine einmal gewählte Drehzahl automatisch einzuhalten und zwar im Wesentlichen unabhängig von der Belastung des Motors. Eine solche Funktion, sie wird auch „Heli Mode“ oder „Governor“ genannt, führt zu einem, dem klassischen 4-2-4 Verhalten eines Verbrenners 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 unserer Flughalbkugel passiert das Gleiche, nur jetzt in umgekehrter Weise, d.h. der Regler reduziert die Leistung soweit wie nötig. Der Regelvorgang zum Ausgleich der sehr geringen (+/-200 U/min), lastabhängigen Drehzahlschwankungen ist schnell (+/- 1 sec). 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 wirksam.

2.) Antrieb mit automatisch sich anpassender Drehzahl

Durch den Einsatz eines Systems zur Lageerkennung des Flugzeuges im Flug, wird es möglich die Drehzahl des Motors so zu steuern, dass sowohl Schub als auch Verzögerung in Abhängigkeit von der Lage und Position des Flugzeuges automatisch (und programmierbar) angepasst werden.

Diese Bauart wird oft in Wettbewerbsmodellen eingesetzt. Das von Igor Burger entwickelte und produzierte System besteht aus ähnlichen Komponenten wie oben, wobei der „Timer“ durch einen Beschleunigungsaufnehmer ergänzt wird und ein dazu passender Regler, zusammen mit einem geeigneten Motor/Propeller, zum Einsatz gelangt.

Auch wenn ich selbst damit keine Erfahrung habe, so gehe ich davon aus, dass zum gegenwärtigen Zeitpunkt dieses System den gültigen Stand der Technik darstellt. Detaillierte Informationen zu Funktion, Programmierung und Verfügbarkeit sind hier zu finden:

http://www.netax.sk/hexoft/docu/iAccTimer_en.pdf

Wie immer, so ist es ganz besonders in diesem Fall unverzichtbar den dokumentierten Ratschlägen sehr exakt zu folgen.

3.) Einen Timer mit eingebautem Governor und lastabhängiger Leistungsabgabe gibt es bei Keith Renecl:

<http://www.keithrenecl.co.za/Electric%20CL.htm>

Ist das alles nicht zu kompliziert?

Die Handhabung der „plug and play“ Komponenten ist unkritisch und von jedermann problemlos in kurzer Zeit zu erlernen. Alles was für E – Fesselflug braucht, ist ein Computer mit Internetzugang und die 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.

Antriebskomponenten für Einsteiger F2B Flugzeuge bis ca. 1.4 m / 1'500 Gramm

Motor

Turnigy D3536/9 910KV Brushless Outrunner Motor

Anzahl Pole: 14

Leerlaufdrehzahl: 910 U/min pro Volt

Max. Spannung 14,8 V (4-Zellen)

Max. Strom: 25.5 Ampere

Max. Leistung 370 Watt

Wellendurchmesser: 5 mm

Abmessungen: 35 x 36 mm

Gewicht: 102 Gramm

Preis: 16.50 €

Bezugsquelle

https://hobbyking.com/de_de/turnigy-d3536-9-910kv-brushless-outrunner-motor.html

Batterie**

Zippy Compact 2700mAh 4s 25C Lipo-Pack

Spannung: 14.8 V (4 Zellen)

Kapazität: 2'700 mAh

Max. Ladestrom: 2.7 A

Abmessungen: 137 x 44 x 23mm

Gewicht: 278 Gr.

Preis: 17.60 €

Bezugsquelle

https://hobbyking.com/de_de/zippy-compact-2700mah-4s-25c-lipo-pack.html

Regler

Castle Phoenix Edge LITE 50A 8S Brushless ESC mit BEC

Max. Anzahl Zellen: 8

Max. Strom: 50 A

Programme: Alle Betriebsarten, inkl. Sonderbetrieb Fesselflug (Governor mit Bremse)

Datenspeicherung im Flug. Eingebaut, programmierbar

Programmierung: via Windows PC und Schnittstelle (Kabel) Castle Creation Link USB Kit

Abmessungen: 26 x 51 x 24 mm

Gewicht: 60 Gramm, mit Kabel

Preis: Fr. 100.-

Bezugsquelle

<https://www.modellmarkt24.ch/pi/Regler/castle-phoenix-edge-lite-50a-8s-brushless-esc-mit-bec.html>

Programmierkabel zu Regler

Castle Link B3 Programmer

Preis: Fr. 29.30

Bezugsquelle

<https://www.modellmarkt24.ch/pi/Regler/Castle-Talon/castle-link.html>

Windows PC Programm zur Programmierung des Reglers

Kostenloses Herunterladen, bzw. Castle Link download: <http://www.castlecreations.com/downloads>

Timer:

Hubin FM-9 with remote switch

Preis: Ca. 12 USD

Programmiergerät zu Timer

FM-9 Programmer

Preis: Ca. 85 USD

Per e-mail zu bestellen bei:

Will Hubin

719 Cuyahoga St.

Kent, OH 4240

USA

whubin@kent.edu

Propeller

APC thin Electric 11 x 5.5 E

APC Product Code: LP11055E

Beschreibung:

<https://www.apcprop.com/product/11x5-5e/>

Bezugsquelle

Auf Bestellung beim Fachhandel

oder:

XOAR Elektro Holzpropeller 2-Blatt PJN 11 x 5

Gewicht: 11 Gr.

Preis: Fr.10.60

Bezugsquelle

<https://www.modellmarkt24.ch/pi/Propeller/XOAR-Elektro-Holzpropeller-2-Blatt-PJN/Xoar-Electric-Beechwood-11x5-Propeller-PJN-Serie.html>

** Die vom Anbieter angegebene Lebensdauer der Batterie, d.h. die Anzahl der nutzbaren Ladezyklen wird im F2B Betrieb in der Regel nicht erreicht. Die Gründe dafür sind auch den Fachleuten der Hersteller nicht bekannt. Meine Erfahrungen zeigen, dass die Anzahl der nutzbaren Ladezyklen mit zunehmender C-Rate steigt.

Antriebskomponenten für Zugpropeller („Tractor“) F2B Flugzeuge über 1.4 m / bis 2100 Gramm

Motor

AXI 2826/12 Gold Line V2 760 KV Brushless Outrunner Motor

Anzahl Pole: 14

Leerlaufdrehzahl: 760 U/min pro Volt

Max. Spannung 18.5 V (6-Zellen)

Max. Strom: 38 Ampere

Max. Leistung 655 Watt

Wellendurchmesser: 5 mm

Abmessungen: 35 x 57.5 mm

Gewicht: 177 Gramm

Preis: 98.- €

Bezugsquellen

<https://www.modelmotors.cz/product/detail/396/>

<https://shop.hepf.com/Elektro-Motoren/Brushless-AL/AXI-2826-12-V2-inkl-Zubehoer::13555.html>

Batterie

Fullymax Lipo 2600mAh 5s1p 80C

Spannung: 18.5 V (5 Zellen)

Kapazität: 2'700 mAh

Max. Ladestrom: 4 A

Abmessungen: 127 x 37 x 39mm

Gewicht: 372 Gr.

Preis: Fr. 79.-

Bezugsquelle

http://www.leomotion.com/shop/USER_ARTIKEL_HANDLING_AUFRUF.php?Kategorie_ID=1095&Ziel_ID=8409

Regler

Castle Phoenix Edge LITE 75A 8S Brushless ESC mit BEC

Max. Anzahl Zellen: 8

Max. Strom: 75 A

Programme: Alle Betriebsarten, inkl. Sonderbetrieb Fesselflug (Governor mit Bremse)

Datenspeicherung im Flug. Eingebaut, programmierbar

Programmierung: via Windows PC und Schnittstelle (Kabel) Castle Creation Link USB Kit

Abmessungen: 30 x 66 x 21 mm

Gewicht: 84 Gramm, mit Kabel

Preis: Fr. 118.30

Bezugsquelle

<https://www.modellmarkt24.ch/pi/Regler/castle-phoenix-edge-lite-75a-8s-brushless-esc-mit-bec.html>

Programmierkabel zu Regler

Castle Link B3 Programmer

Preis: Fr. 29.30

Bezugsquelle

<https://www.modellmarkt24.ch/pi/Regler/Castle-Talon/castle-link.html>

Windows PC Programm zur Programmierung des Reglers

Kostenloses Herunterladen, bzw. CastleLink Download: <http://www.castlecreations.com/downloads>

Funkenschutz-Stecker

Jeti 4 mm

Preis: Fr. 10.95

Bezugsquelle:

<https://www.brack.ch/jeti-anti-blitz-stecker-anti-724932>

Timer:

Hubin FM-9 with remote switch

Preis: Ca. 12 USD

Programmiergerät zu Timer

FM-9 Programmer

Preis: Ca. 85 USD

Per e-mail zu bestellen bei:

Will Hubin

719 Cuyahoga St.

Kent, OH 4240

USA

whubin@kent.edu

Propeller

XOAR Elektro Holzpropeller 2-Blatt PJN 13 x 6

Gewicht: 21 Gr.

Preis: Fr.12.90

Bezugsquelle

<https://www.modellmarkt24.ch/pi/Propeller/XOAR-Elektro-Holzpropeller-2-Blatt-PJN/Xoar-Electric-Beechwood-13x6-Propeller-PJN-Serie.html>

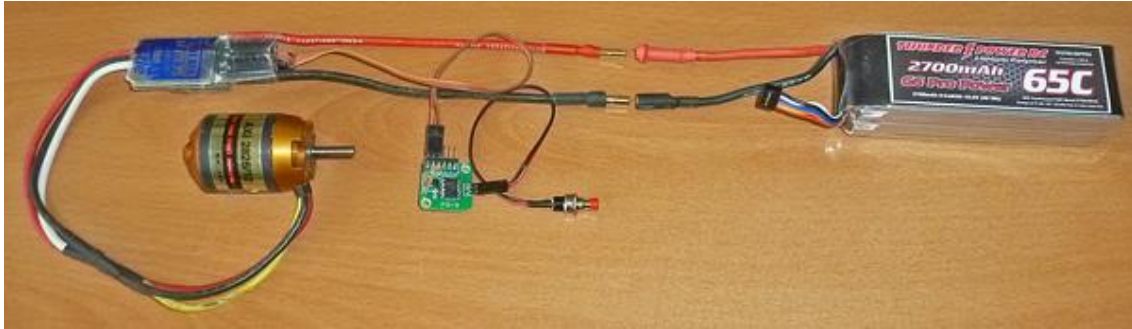
oder

Fiala 2-Blatt 13 x 6 Elektro E3 Holzpropeller – natur (Auch als „Pusher“ erhältlich)

Gewicht: 23 Gr.

Preis: Fr.12.90

Bezugsquelle



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. Schwere 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 Umbau eines vorhandenen Fliegers lässt so Gewicht einsparen.

- Um den Trimmzustand 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 Profilmittre der Tragfläche zu liegen kommen.
- Motorbalken und schwere Spanten können entfernt werden. An ihre Stelle tritt, bei Frontmontage, ein 6 mm Kopfspant, bestehend aus 12-fach Sperrholz, zur Befestigung des Elektromotors.



- 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 und des Motors. Deswegen ist gute Kühlung unbedingt notwendig.
- Zur direkten Kühlung des Motors kann ein ringförmiger Luftspalt zur Kühlung des Rotors offen bleiben. Dabei ist auf genügend, d.h. mindestens 3 x größeren, Auslassquerschnitt zu achten. Auch eine den Luftstrom nach oben gegen den Motor umlenkende Führung der Kühlluft einzubauen ist nützlich. Zusätzlich dazu sind Spinner mit Lufteinlässen und durchbrochener Grundplatte eine gute Lösung:
- http://www.truturn.com/turbo_cool_spinners.html



- Der Regler wird so eingebaut, dass er zwar gut gekühlt wird, aber dennoch 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 leicht zugänglich bleibt. Auch der Timer und die Start/Stopp Taste sind vor Spritzwasser zu schützen.
- Die Start/Stopp Taste wird versenkt eingebaut, um so vor versehentlicher Betätigung sicher 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 Einstellung der Unterspannungsüberwachung des Reglers auf 15.0 V bei 5S (3.0 V pro Zelle) spricht dann diese Sicherung an und reduziert die Leistung bis zum Ablauf der eingestellten Laufzeit. Bereits vor dem Erreichen dieser Grenze wird es so sein, dass die maximale Regleröffnung (Stellung des Gashebels) in den letzten Manövern 100% d.h. Vollgas erreicht und deshalb die Einhaltung der Solldrehzahl nicht mehr möglich ist. Dies lässt sich anhand der Datenaufzeichnung im Flug rechtzeitig erkennen. Bei „Power Out 100%“ im Kleeblatt macht es somit Sinn, die Batterie zu ersetzen.
- 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 FAI Vorschrift muss ein Modell bei dem die Batterie mit dem Regler verbunden ist beim Start so lange festgehalten werden, bis der Pilot den Griff in der Hand hält. Nach der Landung muss das Modell so lange gehalten werden, bis das Antriebssystem gegen unbeabsichtigtes Wiederanlaufen des Motors gesichert ist, d.h. die Batterie nicht mehr mit dem Regler verbunden ist.
- Startverzögerung nicht unter 30“ einstellen.
- Startsequenz durch kurzes Drücken der Start/Stopp 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, einzusetzen macht Sinn:
 - 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 ein laufender Motor durch kurzes Drücken der Start/Stopp Taste abgestellt.
- Eine abgebrochene Startsequenz und/oder ein abgestellter Motor kann nicht erneut gestartet werden. Dafür muss zuerst die Batterie aus- und nach 10 sec. 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. 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 500.- oder € 600.- liegen. Inkl. mehrerer Akkus, und mit den Lade- und Programmiergeräten.
- Bis auf den Timer sind alle benötigten Komponenten über lokalen Fachhandel zu beschaffen.
- E-Antriebe erzeugen zwar geringe, aber durchaus „wirksame“ Vibrationen. Alle heiklen Verschraubungen müssen gut gesichert werden.

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 Gleichstrommotoren, aufgebaut als Aussenläufer ohne Getriebe, für unsere Zwecke gut geeignet. Solche Motoren werden vom Fachhandel in großer Auswahl angeboten. Auf Grund der mechanischen Belastung, insbesondere durch die Kreiselkräfte der Luftschraube beim Fliegen von harten Ecken, ist es wichtig ein mechanisch hochwertig konstruiertes Produkt einzusetzen.

Die in F2B üblicherweise eingesetzten Aussenläufer Motoren 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 im Leerlauf, also 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 bei einer Nennspannung der Batterie von 3.7 Volt pro Zelle, (bzw. 3.7 V x Anzahl) Zellen, ein Leerlaufdrehzahl erreicht wird, welche ca. 35% über der beabsichtigten Drehzahl im Flug liegt.
- Maximaler Strom: Ausgedrückt in Ampere (A) über eine bestimmte Zeit: z.B. 37 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	Die neue Version V2 benötigt keinen Ventilator
Typ	2826/12 V2	Aussendurchmesser 35 mm

Kv	760	Länge, ohne Welle, 54 mm
Polzahl	14	
Max. Strom	37 A / 30 sec	
Gewicht	177 Gramm	inkl. Kabel



VORSICHT: Unsere Motoren, 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. 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, Schaden nehmen. Dies kann bei ausgedehnten Standläufen unter hoher Last sehr rasch geschehen.

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



- Motor zur Frontmontage mittels min. 6 mm Kopfspant (12-fach Sperrholz) einbauen.
- Batterie verschiebbar (+/- 25 mm) zur Justierung des Schwerpunktes.
- Vertikale Position der Batterie so wählen, dass der vertikale Schwerpunkt mit der Profilsehne der Tragfläche zusammenfällt. Eine Einstellmöglichkeit von +/-8 mm kann hilfreich sein.
- Alle Elemente im kühlenden Luftstrom.
- Batteriewechsel von oben.



Funkenschutz

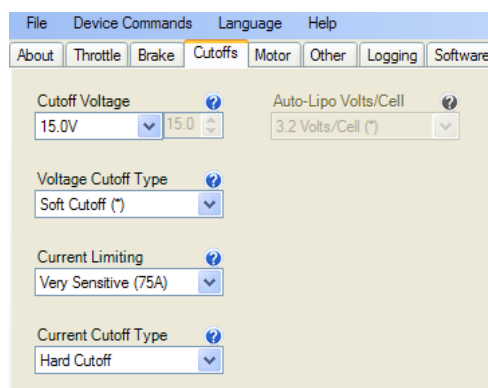
Im Moment des Ansteckens der Batterie an den Regler fließt für einen kurzen Zeitraum von ca. 80/1000 sec. ein Strom von gegen 200 Ampère, was, insbesondere bei Batterien mit mehr als 3 Zellen, zu einem Lichtbogen im Stecker führt. Dies ist zwar nicht gefährlich, kann aber die Kontakte im Stecker durch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



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 der Zellen 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 deswegen 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:

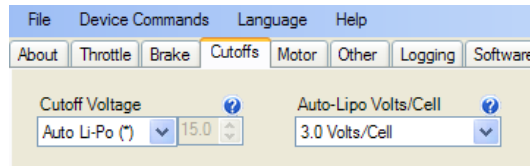


Die Schwellwerte und die Reaktionsgeschwindigkeit der automatischen Abschaltung, bei zu geringer Batteriespannung und/oder bei zu hohem Strom, werden so eingestellt:

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 kontrollierte Notlandung.

Bei zu hohem Strom hingegen, wie bei blockierter Motorwelle, und mit den Einstellungen „Sensitive 105A“ und „hard cutoff“ schaltet der Regler mit einer minimalen Verzögerung von weniger als 1 sec nach Erreichen der Schwelle von 105A vollständig aus. Damit besteht eine gute Chance, leider aber keine Garantie, dass der Regler keinen Schaden nimmt.

Für Betrieb ohne Funkenschutz 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 Motoren 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 abgegebenen 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:

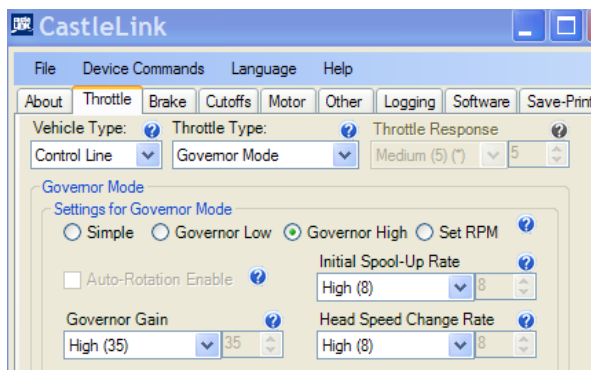
Maximaler Strom: In Ampere (A), gemessen zwischen Batterie und Regler. Dauerstrom und/oder kurzfristiger (30 sec.) Spitzenstrom. Für F2B Anwendung ist eine Dauerlastfestigkeit von 50 - 75 A notwendig.

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

Ein kleiner „Gain“ Wert, z.B. „Custom (5)“, 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. Offenbar ist es so, dass der Drehzahlregler des Castle Phoenix Edge 75A für unsere F2B Anwendung so ausgelegt ist, dass die „Gain“ Einstellung sowohl sehr schön funktioniert, als auch unkritisch ist.

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.

Datenerfassung: 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.

Betriebssystem: 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/en/phoenix-edge-lite/phoenix-edge-lite-75-esc-010-0112-00>

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

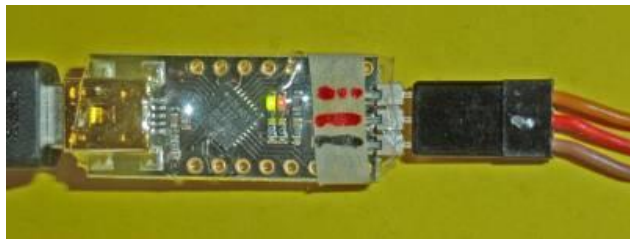
Hersteller	Castle Creations	
Typ	Phoenix Edge lite 75A	

Spannungsbereich	14 - 34V	4 – 8 Lipos
Max. Strom	37A / 30 sec	
Governor Mode	ja	
Datenspeicher	ja	Alle relevanten Werte
Programmierbar	Weitgehendst	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, 8 und Windows 10. Für MAC, bei Castle entsprechende Hinweise beachten. CastleLink ist kostenlos erhältlich auf: <http://www.castlecreations.com/downloads.html>

Ich verwende die Version V3. 72.0 der CastleLink Software. Nach deren erfolgreichen Installation wird der **nicht** an die Batterie angeschlossene Regler über den 3-poligen Servostecker und das CastleLink Kabel (Schnittstelle) an einem USB 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 4.25 (Beta) markieren.
- Button „Update Firmware“ anklicken.

„Firmware“ ist die Bezeichnung für das Betriebssystem des Reglers. Ich verwende zum heutigen Zeitpunkt (April 2018) die Version V 4.25 Beta. Bei neuen Versionen des Betriebssystems schlägt Castle diese automatisch vor, es ist vor dem Herunterladen jedoch sinnvoll die Liste der „Changes“ zu prüfen. Sollte irgendetwas nach der Übernahme einer neuen Version nicht gut laufen, so kann jederzeit auf die vorherige Version zurückgegriffen werden.

Diese Aufstellung zeigt die Konfiguration des Phoenix Edge im April 2018 für meinen „My Way“:

Vehicle Type: Control Line Throttle Type: Governor Mode Governor Mode Setting: Governor High Governor Gain: Custom (5) Initial Spool Up Rate: Medium (5) Head Speed Change Rate: High (8) Brake Strength: 100% Brake Delay: 0.5 sec Brake Ramp: Medium Cutoff Voltage: 15.0 V Voltage Cutoff Type: Soft Cutoff Current Limiting: Sensitive (75A) Current Cutoff Type: Hard Cutoff Auto-Lipo Volts/Cell: Inactive Battery Pack Voltage: 18.500 Motor Start Power: Low (39)	Motor Timing: Normal (5) Direction: Reverse PWM Rate: 8 Khz Gearing Info: No Gearing/Direct Drive KV of Motor: 760 Magnetic Poles in Motor: 14 Power-On Beep: Enable BEC Voltage: 5.0 V Link Live Enable: Disabled Auxiliary Wire Mode: Disabled Logging; 2 samples/second: Batt. Voltage, Batt. Current, Contr. Temp., Contr., Input Throttle, Controller Motor Power Output, Motor RPM, BEC Voltage. Automatic Data Reset: 98% Firmware: V 4.25 (beta)
--	--

* Beim Blockieren der Motorwelle steigt der Strom sehr schnell auf kritische Werte an. Die Einstellung „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 hat sich die Einstellung „Normal (5)“ gut bewährt.

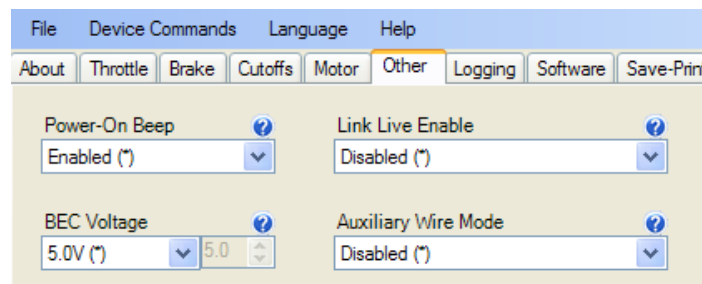
*** Die Drehrichtung kann auch durch das Vertauschen von zwei der drei Motoranschlüsse umgekehrt werden.

**** Die Faustregel zur Bestimmung der Ansteuerfrequenz lautet:

$(K_v \text{ des Motors} \times \text{Anzahl Pole} \times \text{Nennspannung})$ dividiert durch 20. 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) ist für Motoren mit einer hohen Polzahl, grösser als die 14 Pole des AXI 2826/12, bei gleichzeitig hoher Drehzahl vorgesehen. Dabei wird die Ansteuerfrequenz, beginnend bei 6Khz, der Soll Drehzahl dynamisch angepasst. Da wir mit konstanter Drehzahl arbeiten, wird „Outrunner“ für den AXI nicht empfohlen.

Der Timer

Um den Regler anzusteuern benötigen Fesselflieger ein besonderes Bauteil, welches Drosselsignale im Frequenzbereich zwischen 0.9 und 2.0 ms 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/Stopp 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 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/Stopp Taste gedrückt gehalten und gleichzeitig der Programmierer 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 Programmiers gestartete wurde. Bestätigen mit der Taste OK und den weiteren Anweisungen folgen. Nicht vergessen; Nach der Programmierung den Hauptschalter am Programmierer ausschalten. Mit dem FM-9 Programmierer können diese Funktionen 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 Phoenix New High	Für Phoenix / Edge Governor High Betrieb *	7'300 – 11'990 U/min
ESC Mode Throttle mode	Feste Leistungseinstellung	15% - 100%
ESC Mode compen throttle	Leistungseinstellung **	59% - 91%
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)

Meine Modelle fliegen mit dieser Timer Einstellung:

Delay (Startverzögerung): **30 sec**

Run Time (Laufzeit): **5 Min 20 sec**

ESC Mode: **Phoenix New High**

RPM (Drehzahl), ca. **9'108** (mit Fiala Holz 13 x 6 E3 Pusher, für 5.2 sec/R an 19.5 x0.4 mm Leinen)

Der FM-9 Programmierer ist bei Will Hubin 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 U/min plus 10% Reserve = 10'450 U/min
 Umdrehungen pro Volt des Motors (ohne Last): 760 (AXI 2826/12)
 Spannungsreserve: 30%
 Benötigte Spannung: $(10'450 \text{ dividiert durch } 760) + 30\% = 17.875 \text{ Volt}$

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 15 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:

Energiebedarf in Wh = (Fluggewicht in Gramm dividiert durch 100) x 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 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 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 25C Batterien der Generation 2009 in der Regel nur gerade ca. 30 Zyklen erreicht. Heute weisen meine Erfahrungen darauf hin, dass eine höhere Kapazität von zum Beispiel 45C oder gar 70C, sich auf die Lebensdauer vorteilhaft auswirken.

Gebrauchslebensdauer

Sie wird gemessen in Zyklen, d.h. der Anzahl der Entlade- / Ladevorgänge bis zum Auftreten des ersten Anzeichen des nahenden Endes der Lebensdauer. 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 oder nach dem 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. 5 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. Die Kapazität nimmt im Betrieb ab. So hat, zum Beispiel, die Nachmessung einer Batterie, nach 60 Zyklen, nur noch eine verfügbare Kapazität von 2'400 mAh ergeben. Zur Prüfung der noch vorhandenen Kapazität die Batterie mit einem modernen Ladegerät und einem Strom von 1C auf 3.0 V pro Zelle entladen. Danach mit 1C 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)
- **Lagerung**, 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).

Sollte die auf 3.0 V eingestellte Unterspannungssicherung des Reglers in den ersten Flügen mit einer neuen Batterie ansprechen, so empfehle ich dieses 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	1'790 Gramm	Mit Batterie 5S 2'700 mAh
Kabel / Länge	0.39 mm / 19.5 m	Oese-Oese
Rundenzeit	5.2 sec	
Propeller	13" x 5.5"	2-Blatt APC Electric Pusher
Drehzahl eingestellt	9'216 U/min	Am Programmiergerät FM-9
Motor-Laufzeit	5' 20"	
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. 24 A und die kurzen Stromspitzen in Manövern erreichen 38 A. Um ausreichend Spannungsreserve für die Drehzahlregelung bereitzustellen, setze ich einen 5 Zellen Akku (18.5 V) mit einer 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 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

Electric“ und P (für Pusher) her. Diese sind zwar nicht überall vorrätig, können aber per Sonderbestellung vom Fachhändler kurzfristig beschafft werden.

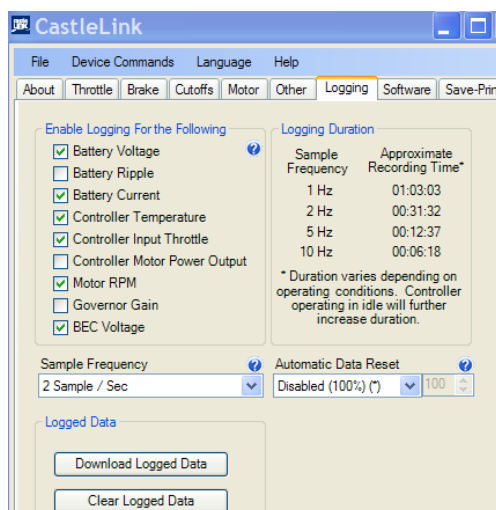
Siehe auch unter: <http://www.apcprop.com/pindex.asp>

Ferner:

- 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.
- APC empfiehlt 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.
- Multikopter Propeller sind zwar jeweils in links- und rechtsdrehender Version erhältlich und auch sehr leicht. Sie können jedoch den harten Beanspruchungen beim fliegen scharfer Ecken nicht in jedem Fall standhalten.
- APC und herkömmliche CFK Propeller sind nicht ganz leicht und ihr Kreiselmoment kann dazu führen, dass Flugzeuge eher runde als scharfe Ecken fliegen. In diesem Fall sind leichte Elektro-Holzpropeller und/oder die leichten CFK Propeller von Igor Burger vorteilhaft.

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)



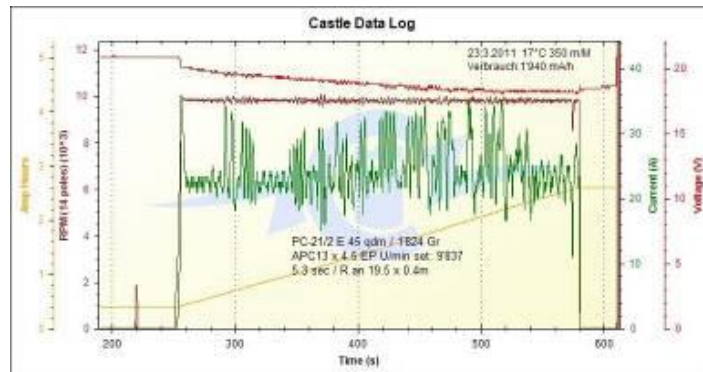
Die USB Schnittstelle CastleLink ist im Fachhandel erhältlich und das dazu benötigte Programm kann von der Castle Website kostenlos heruntergeladen und installiert werden. Das mitgelieferte Programm „CastleLinkGraph Viewer“ erlaubt beispielsweise die graphische Darstellung dieser Daten:

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 bis zu 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. Während der Aufzeichnung der Daten ertönt bei jeder Messung ein leiser Klick.



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. $W = \text{Grüner Strom in Ampere} \times \text{rote Spannung in Volt}$.



Täglich Neues zum Thema Fessel-Kunstflug gibt es hier:

<http://stunthanger.com/smf/index.php#8>

Besonders interessant sind die immer wieder neuen Auflistungen von realisierten Antriebskonzepten unter unter "Gettin' all AMP'ed up" bzw. „List your setup“ Das Forum wird in englischer Sprache geführt und eine wirklich ausgezeichnete Möglichkeit zur Übersetzung steht hier kostenlos zur Verfügung:

<https://www.deepl.com/translator>

Weiterführende Literatur

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

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

5. Mai 2018 Peter Germann