

## RC-Servos für Mechatronik-Anwendungen

### Teil 4: Routine-Messungen mit Flug-Daten-Aufzeichnung

#### Übersicht:

Bei der ersten Erprobung eines Motor-Seglers wurden routinemäßig eine mehrkanalige Flug-Daten-Aufzeichnung (FDA) eingesetzt, die sowohl den Akku als auch die kombinierte Empfänger-Servo-Versorgung (BEC: „battery elimination circuit“, im wesentlichen ein Spannungswandler) überwacht. Die Datenaufzeichnung wird normalerweise genutzt, um die Servos zu kontrollieren und um die Schwebelastung zu messen. Bei der Analyse fiel allerdings auf, dass die Servo- bzw. BEC-Spannung nicht so konstant war wie erwartet. Die BEC-Spannung zeigte deutliche Einbrüche.

Zur genaueren Analyse der BEC-Spannung bzw. des BEC-Moduls wurden Laborversuche durchgeführt, bei denen ein baugleiches BEC-Modul und auch andere Spannungsregler untersucht wurden. Dabei zeigten sich erhebliche Unterschiede. Das Verhalten der BEC-Spannung ist besonders hinsichtlich der Zuverlässigkeit problematisch, denn ein starke Beeinträchtigung der BEC-Versorgung führt zum Ausfall des Empfängers und damit der gesamten Steuerung.

#### Motivation

Es ist heute leicht möglich, in einem kleinen E-RC-Modell eine mehrkanalige Datenaufzeichnung unterzubringen. Für die erste Erprobung ist es ratsam, die Servo-Ströme zu überwachen. Dadurch soll vermieden werden, dass die Servos durch Überlastung ausfallen. Deshalb wird die Flug-Daten-Aufzeichnung (FDA) eingesetzt, um den Servo-Strom, aber auch die Servo-Versorgung zu messen. Es ist üblich, dass die kombinierte Empfänger-Servo-Spannungsversorgung aus dem Motor-Controller geliefert wird, der wiederum am Flug-Akku angeschlossen ist. Somit macht es zusätzlich Sinn, auch die Akku-Spannung und den Akku-Strom zu messen.

Die erste Erprobung eines neuen E-RC-Modells verlief eigentlich unauffällig.

Es sollte routinemäßig der Schwebeflug-Leistungsbedarf ermittelt werden.

Nach dem Flug wurden die Messdaten analysiert. Dabei wurde dann eine auffällige Unterspannung bei der kombinierten Empfänger-Servo-Versorgung beobachtet.

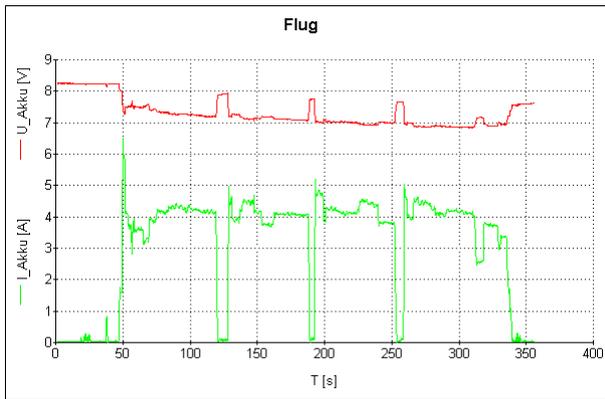
Zur Eingrenzung des Effekts wurden dann Labor-Messungen vorgenommen, um Zusammenhänge zu rekonstruieren und besser zu verstehen.

Die Routine-Messung hat sich als lehrreich herausgestellt und bestätigt, dass es eigentlich keine langweilige Routine gibt. Die Analyse zeigte, dass es auch technisch bessere Lösungen gibt, die dann allerdings etwas mehr Aufwand verursachen.

ROSNER-TDL

**Beobachtung**

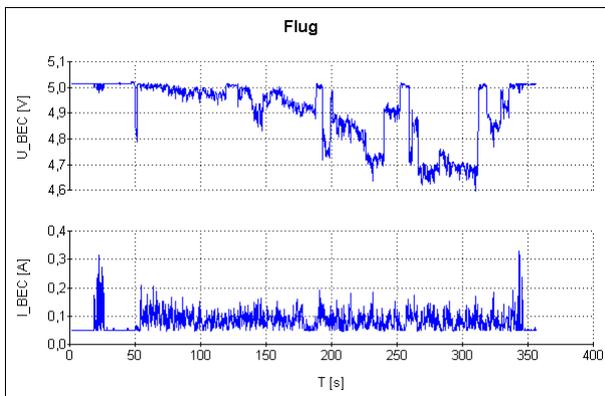
Bei der ersten Erprobung eines Motor-Seglers wurden längere Flüge durchgeführt, um die Schwebelageleistung (d.h. den Strombedarf im Horizontalflug) einzugrenzen. Dazu wurde die 4-kanalige Flug-Daten-Aufzeichnung (FDA) eingesetzt, die sowohl den Akku als auch den BEC überwacht.



Das Diagramm zeigt die Akku-Spannung und den Akku-Strom.

Der Verlauf der Akku-Spannung ist recht typisch für einen 2S-LiPo-Akku. Auch der Strom-Verlauf ist normal.

Man erkennt die kurzen Segelphasen, bei denen der Strom abgestellt ist und die Spannung sich erholt.



In der routinemäßigen Nachbereitung der Messdaten ist aufgefallen, dass die BEC-Spannung öfters vom eigentlich erwarteten konstanten Wert abweicht. Gleichzeitig waren die BEC-Ströme (also für Servos und den Empfänger) nicht besonders hoch.

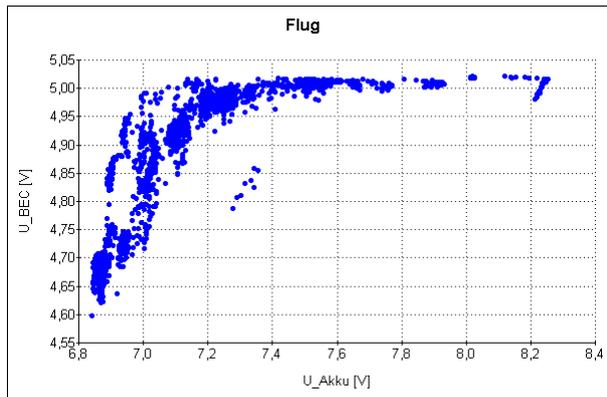
Die Messpunkte werden in Intervallen von 0.1 s aufgezeichnet. Die vorhandene zeitliche Auflösung ist somit deutlich besser als die gezeigte grafische Auflösung

Die BEC-Spannung wird vom Motor-Controller erzeugt, der vom Motor-Hersteller mitgeliefert wurde. Somit sollte eigentlich ein problemloser Betrieb (auch mit Empfänger-Versorgung) möglich sein.

Die BEC-Versorgung ist im wesentlichen ein Spannungswandler, der die Akku-Spannung auf die übliche Spannung für Empfänger und Servos herabsetzt und stabilisiert (meist 5 Volt). Auf die sonst übliche Empfänger-Batterie kann dann verzichtet werden, was Platz und Gewicht spart. Daher auch der Begriff „BEC = battery elimination circuit“, also eine Schaltung, wodurch die Empfänger-Batterie unnötig wird.

ROSNER-TDL

Es ergeben interessante Einblicke, wenn man die Zeitverläufe in parametrische Darstellungen umformatiert.

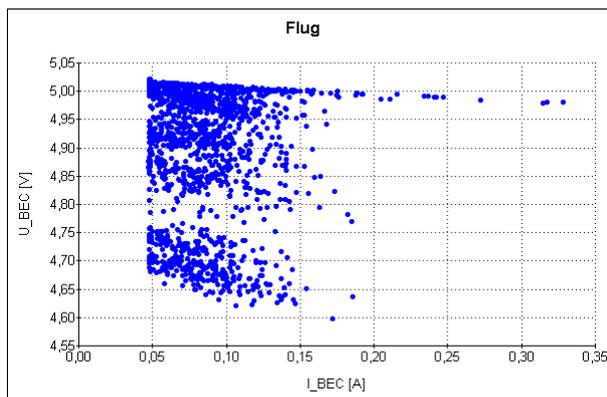


Trägt man die BEC-Spannung über der Akku-Spannung auf, dann sieht man, dass die BEC-Spannung unterhalb einer Akku-Spannung von ca. 7.4 V stark einbricht.

Eine Akku-Spannung von 7.4 V ist besonders bei gleichzeitigem Motor-Strom eigentlich noch nicht unüblich.

Das Diagramm zeigt auch, dass es sehr hilfreich ist, mehrere Messwerte in Relation zu setzen. Eine einzige Spitzenwert-Speicherung für eine ganze Akkuladung (wie von einigen Telemetrie-Einheiten geliefert) liefert nicht annähernd die Einblicke, die durch eine sauber synchronisierte Mehrkanal-Datenaufzeichnung möglich ist.

Zur Verdeutlichung der BEC-Situation wird die BEC-Spannung über dem BEC-Strom aufgetragen. Dabei sieht man, dass der BEC-Strom eigentlich nicht besonders hoch ist.



Interessant ist die obere Grenze der Messpunkte: Die scharfe Grenze ist geneigt und sinkt über einen Bereich von 0.3 A um 0.05 V ab. Dies ist aber gering, gemessen an den sonst auftretenden Spannungseinbrüchen von mehreren Zehntel Volt.

Wenn der BEC-Spannungsregler also schon mit solchen "gemäßigten" Betriebsumständen leichte Probleme haben kann, dann könnte das Verhalten bei stärker entlademem Akku und mehr Servo-Aktivität kritisch werden. Ein solches Szenario wäre gegeben beim unerwarteten Akku-Kapazitäts-Ende, das zu hektischen Steuerkommandos führt. Wenn dabei die Servo-Wirksamkeit wegen der sinkenden BEC-Spannung nachlässt, so ist dies zu verschmerzen. Wenn allerdings der Empfänger ausfällt (der ja auch an der gleichen BEC-Spannung liegt), dann ist die Situation sehr kritisch.

### Labor-Messungen

Zur Untersuchung des Verhaltens wurde ein weiterer baugleicher Motor-Controller sowie mehrere 3-Pin-Spannungsregler zusammen verglichen. Zur Nachbildung der Servo-Ströme wurde eine in Stufen schaltbare Last angeschlossen, die bis zu 0.4 A stabil schalten kann. Mit diesen Komponenten wurden dann mehrere Messreihen durchgeführt, bei denen die Akku-Spannung durch ein Labor-Netzteil nachgebildet wurde. Als Netzteil-Spannungen wurden die Werte von 7.5 V und 6.5 V verwendet. Die stabilisierte Spannung ist nominal 5 V.

Neben dem Motor-Controller mit eingebautem BEC kam ein Standard-Spannungsregler "7805" sowie ein LDO-Spannungsregler "LM2940" zum Einsatz. Der LDO ("low drop-out") arbeitet noch bei besonders niedrigen Akku-Spannungen stabil (was für die Sicherheit sinnvoll wäre).

Es wurde zwei Arten von Messungen durchgeführt:

- Im ersten Durchgang wurde ein möglichst kleiner Aufbau zusammengestellt, der nur aus dem Netzteil, dem Spannungsregler und der Stufen-Last bestand. Dabei wurde dann die Last-Spannung mit einem Digital-Multimeter gemessen.
- Im zweiten Aufbau wurde zusätzlich die Sensorik für die Flug-Daten-Aufzeichnung eingeschleift.

Die Gründe für die zweistufige Vorgehensweise sind:

- Der erste Aufbau (mit Digital-Multimeter) ist bewusst einfach gehalten, um eine sichere Inbetriebnahme des Aufbaus zu ermöglichen. Mit diesem Aufbau lassen sich bequem die statischen Verhältnisse ermitteln.
- Der zweite Aufbau (mit Flug-Daten-Aufzeichnung) kann neben den Spannungen und Strömen auch das Zeitverhalten ermitteln.

Die Messungen liefen folgendermaßen ab:

1. Die Spannungsregler wird an das Netzteil angeschlossen, bei dem die Spannung auf 6.5 V bzw. 7.5 V eingeregelt wird.
2. Durch die angeschlossene schaltbare Last wird der Strom langsam von Null auf ca. 0.4 A hochgestuft. Jede Stromstufe wird 10 s gehalten, wobei die BEC-Spannung gemessen wird.
3. Nachdem der maximale Strom erreicht ist, erfolgt die stufenweise Reduktion des Stroms, bis dann wieder Null erreicht ist.
4. Nach einer Pause wird die Messreihe mit der zweiten Netzteil-Spannung wiederholt.
5. Dann wird auf den nächsten Spannungsregler umgebaut.

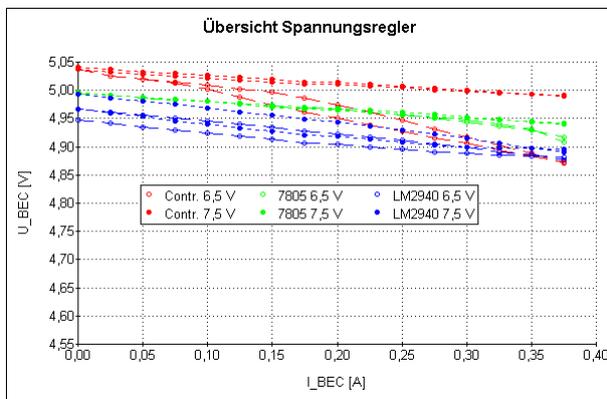
Die maximale Schaltlast wurde dahingehend ausgewählt, dass ein vorsichtiges Herantasten möglich ist. Die Datenblatt-Angaben zum BEC beschränken sich auf "5 V, 1 A", ohne dass Angaben zum Dauerstrom oder Spitzenstrom (mit Dauer) genannt werden. Auch die bei linearen Spannungsreglern wichtige Kombination aus Eingangs-Spannung und Ausgangs-

ROSNER-TDL

Strom, wodurch die Verlustleistung im Spannungsregler festgelegt wird, wird nicht angegeben.

Aus dieser unsicheren Lage heraus wurde dann ein Maximalwert von (fast) 0.4 A gewählt. Genaugenommen hat die Schaltlast 16 Stufen, sodass ein Maximalstrom von  $(16-1) \cdot 25\text{mA} = 375\text{ mA} = 0.375\text{ A}$  fließt.

Im Vordergrund steht, das Verhalten des Motor-Controllers mit BEC zu verstehen, aber nicht ihn zu zerstören.



Das nebenstehende Diagramm fasst die statischen Doppel-Messreihen der drei Spannungsregler zusammen.

Zur Durchführung sei angemerkt, dass jeder Spannungsregler eine Abkühlpause von einer halben Stunde hatte, um von vergleichbaren thermischen Zustände auszugehen.

Es zeigen sich die folgenden Ergebnisse:

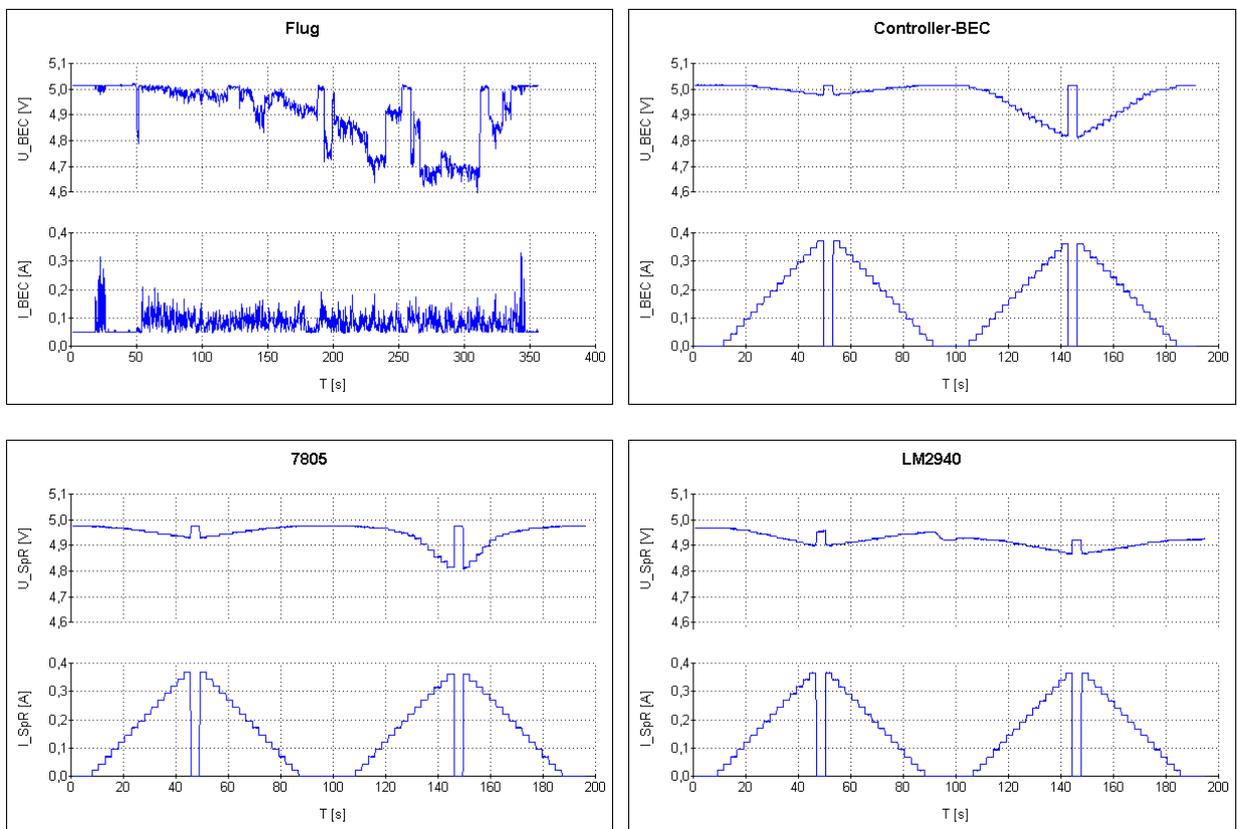
- Alle drei Spannungsregler arbeiten bei 7.5 V ohne Auffälligkeiten. Der lineare Spannungsabfall mit steigendem BEC-Strom liegt bei allen Spannungsreglern in einer normalen Größenordnung.
- Bei 6.5 V fällt allerdings die Spannung aus dem Motor-Controller-BEC sehr schnell ab. Beim 7805 ist der Abfall erst ab 0.3 A zu beobachten. Beim LM2940 tritt kein nennenswerter Abfall auf.
- Alle Spannungsregler erzeugen eine Verlustleistung. Dadurch erwärmen sie sich zwangsläufig. Bei 7.5 V sind die Auswirkungen in allen drei Spannungsreglern zu vernachlässigen. Bei 6.5 V gibt es mehr oder weniger deutliche Unterschiede zwischen der ersten Versuchshälfte, bei der der Strom langsam gesteigert wird, und der zweiten Versuchshälfte, bei der der Strom vom Spitzenwert her langsam reduziert wird. Die Differenz zwischen den beiden Verläufen ist ein Maß für die Sensibilität der Regelung. Hierbei fällt besonders der Controller negativ auf.

Schon der einfache Handversuch bestätigt, dass die Spannungs-Stabilisierung des Motor-Controller-BECs grundsätzlich Schwächen hat. Von der reinen Empfindlichkeit her scheint dieser Spannungsregler etwas schlechter als der Standard-7805 zu sein.

## ROSNER-TDL

Nachdem also der im Flug beobachtete Effekt im Labor-Versuch bestätigt werden konnte, wurde eine baugleiche Flug-Daten-Aufzeichnung (FDA) wie im Flugmodell verwendet, um Zeitverläufe zu erzeugen.

Die folgenden Diagramme zeigen als erste Auswertung die BEC-Spannung bzw. den BEC-Strom der Labor-Messungen zusammen mit den Flug-Daten (links oben). Die erste Hälfte jeder Messung erfolgte bei 7.5 V, während die zweite Hälfte bei 6.5 V erfolgte. Die Pause zwischen den Spannungs-Stufen ist somit relativ kurz; dies entspricht aber eher den Flugversuchen.

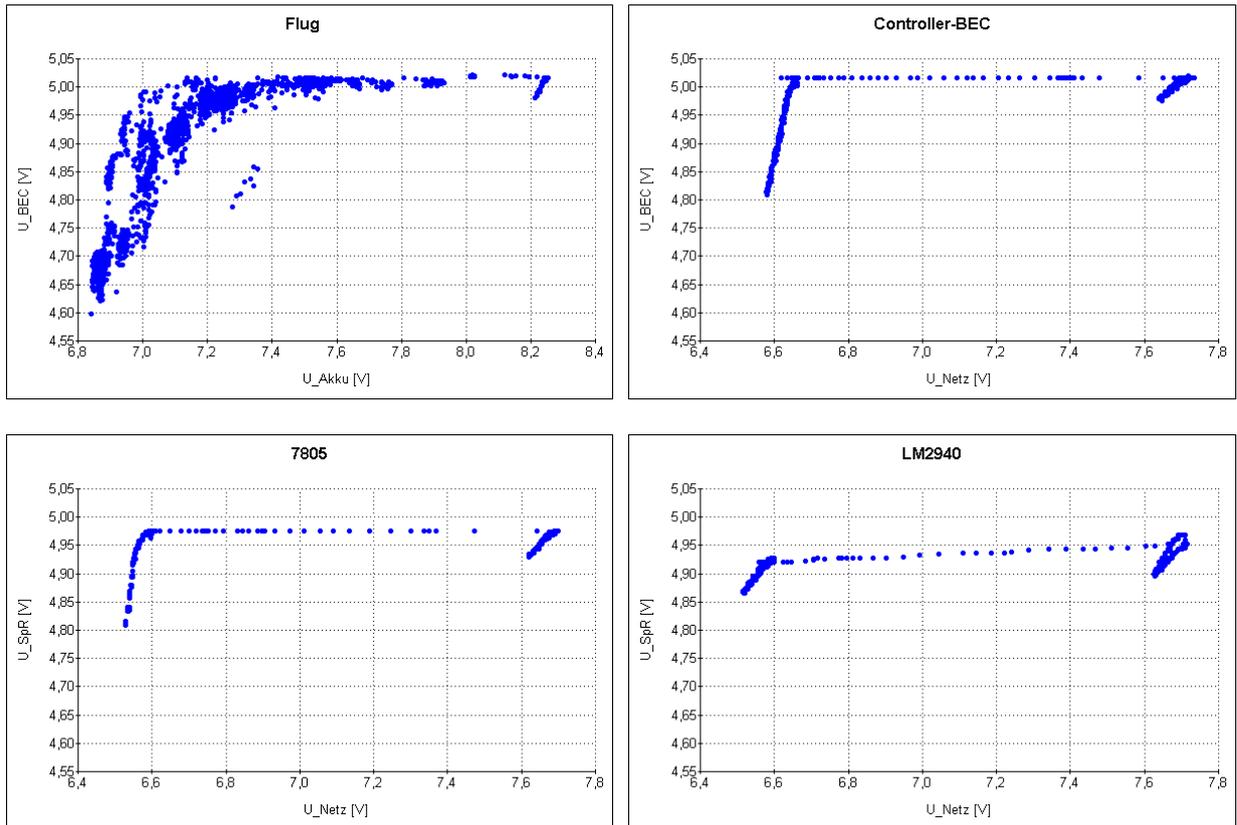


Man erkennt folgendes:

- Der Maximal-Strom vom Flug ist mit dem Stufensignal grob vergleichbar.
- Es ergeben sich mehr oder weniger starke Spannungs-Änderungen. Die größten Abweichungen sind beim Controller-BEC (rechts oben), während die geringsten Abweichungen beim LDO LM2940 sind.

Die Schaltlast wird durch einen Mikroprozessor gesteuert. Dadurch kann das Stufen-Muster in beliebiger Form und beliebiger Länge kommandiert werden. Im vorliegenden Fall wurde eine einfache Doppel-Dreieck-Form gewählt mit einer Stufendauer von 2.5 s.

Trägt man die geregelte BEC-Spannung über der Akku- bzw. Netzteil-Spannung auf, ergeben sich die folgenden Diagramme. Auch hier sind die Flug-Daten wieder links oben zu sehen.

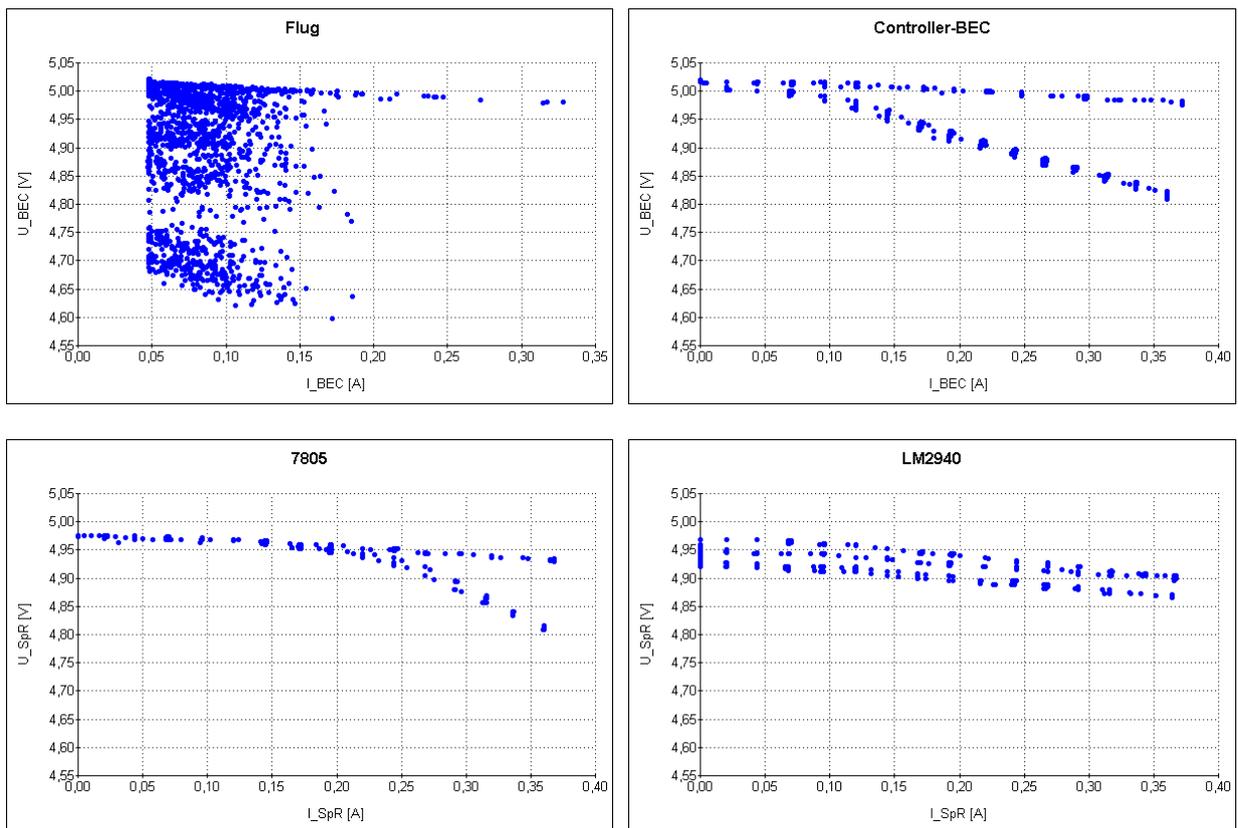


Man erkennt:

- Die Punktwolke des Controller-BECs knickt ähnlich ab wie die Flug-Messung, und zwar sowohl hinsichtlich der Akku-Spannung als auch hinsichtlich der Steigung des Abfalls.
- Der Standard-7805 reicht von der Netz-Spannung her etwas weiter (d.h. tiefer), bricht aber dann auch weg.
- Der LDO LM2940 arbeitet sowohl bei 7.5 V als auch bei 6.5 V ohne Auffälligkeiten.

## ROSNER-TDL

Trägt man die BEC-Spannung über dem BEC-Strom auf, dann kann man die Auswirkung des BEC-Stroms abschätzen. Bei den drei Labor-Messungen gibt es jetzt zwei ausgeprägte Verläufe: die Messung bei 7.5 V (in der Regel horizontal) und bei 6.5 V (abknickend beim Controller-BEC und beim Standard-7805).



Man erkennt:

- Der Controller-BEC knickt bei 6.5 V praktisch sofort ab (oberhalb 0.1 A).
- Der Standard-7805 knickt bei etwas höheren BEC-Strömen ab (bei ca. 0.2 A), dann aber doch ähnlich steil.
- Der LDO LM2940 knickt nicht ab.

Bei genauerer Betrachtung sieht man, dass die Neigung der "horizontalen" Punkte (also bei 7.5 V) beim Controller-BEC und beim Standard-7805 etwas flacher verläuft als beim LDO LM2940. Diese Arbeitsgerade markiert den sauber geregelten Betrieb. Das ist durchaus im Einklang mit den Datenblatt-Angaben zum 7805 und LM2940. Der LDO hat bauartbedingt eine etwas schlechtere Regelgüte, die sich in einem etwas stärker abfallenden Arbeitsgeraden widerspiegelt. Dies ist auch der Grund, weshalb die geregelte Spannung beim LDO bei 6.5 V und bei 7.5 V stärker abweicht als beim 7805.

### Vergleich der Spannungsregler

1. Die verschiedenen Analysen haben bestätigt, dass der Controller-BEC im unteren Spannungsbereich ähnliche Probleme zeigt wie der baugleiche Controller im Flugmodell.
2. Bei Vergleich mit dem Standard-7805 und dem LDO LM2940 lässt sich der Controller-BEC eher als noch etwas schlechter als der Standard-7805 charakterisieren.

### Empfehlung

Die Messungen im Flug und auch im Labor haben ein potentiell kritisches Verhalten gezeigt. Daher wäre folgendes wünschenswert:

1. Der Modell-Flieger sollte die Betriebsgrenzen des BEC-Kreises kennen.
  - ⇒ Hier fehlt es an Hersteller-Angaben.
2. Der Empfänger sollte nicht unkontrolliert ausfallen, sondern solange wie technologisch möglich versorgt werden.
  - ⇒ Hier bieten offensichtlich nicht alle Hersteller das technologisch mögliche an.

Aus der ersten Anmerkung folgt: Man sollte selbst Messungen vornehmen (als Routine-Erprobung).

Aus der zweiten Anmerkung folgt: Ggf. sollte man die technische Lösung für die BEC-Erzeugung wechseln.

Die Erhöhung der Akku-Zellenzahl von 2 auf 3 wäre eine Maßnahme, dass der Controller-BEC immer im Eingangsspannungs-Bereich arbeitet, in dem er sauber ausregeln kann. Allerdings ist es ja ein Linear-Regler, sodass die Verlust-Leistung stark ansteigt:

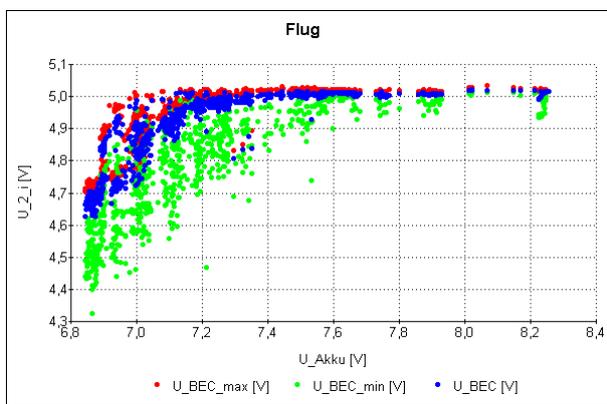
Die bisherige Differenz-Spannung zwischen Eingang (2S voll: 8.4 V) und Ausgang (5.0 V) beträgt 3.4 V. Bei einem 3S-Akku (voll: 11.1 V) ergibt sich eine Differenz-Spannung von 6.1 V (also fast das doppelte). Damit steigt die Verlust-Leistung im Spannungsregler ebenfalls auf fast das doppelte, was in der Regel auch nicht problemlos ist.

Die Zuverlässigkeit lässt sich eigentlich nur durch zusätzlichen Aufwand steigern. Dazu gehören die folgenden Schritte:

- Es wird ein externer LDO-Spannungsregler eingesetzt.
- Es wird ein externer Akku für den Empfänger (und die Servos) eingesetzt.

ROSNER-TDL

Die Aussagen werden noch gewichtiger, wenn man bedenkt, dass in den bisher gezeigten Diagrammen immer nur die gefilterten und gemittelten Werte gezeigt wurden. Die Flug-Daten-Aufzeichnung misst aber auch die Extremwerte (Minimal, Maximal), die innerhalb von 100 ms auftreten. Und da die Servos auch schon bei geringer Aktivität Spitzen-Ströme von mehr als dem doppelten Mittelwert verursachen (siehe dazu auch die vorherigen Berichte der Reihe), ist zu erwarten, dass der Controller-BEC mit diesen Strom-Spitzen noch schlechter klarkommt.



Im nebenstehenden Diagramm sind die bekannten Mittelwerte (blau) sowie die Extremwerte (rot, grün) aufgetragen.

Hier beträgt der stärkste Spannungseinbruch nicht mehr 0.4 V, sondern praktisch das doppelte mit 0.7 V. Und das bei einem leichten Motor-Segler.

Die Gefahr besteht, dass bei stärkeren Servo-Aktivitäten (d.h. hektischen Manövern wie Ausweichen oder Abfangen) noch stärkere Spannungseinbrüche erfolgen, die dann den Empfänger beeinträchtigen können.

Der Laborbetrieb mit der schaltbaren Last führt nur zu geringen Abweichungen von den Mittelwerten (anders als die Servos im Flugversuch). Das liegt einfach an der „glatteren“ Stromerzeugung, im Vergleich zu den Servos. Daher sind die Verhältnisse dort nicht so dramatisch und brauchen hier nicht gezeigt zu werden.

Eine weitere Unsicherheits-Quelle ist der Motor-Controller selbst. Schon die ersten eigenen Versuche haben ja gezeigt, dass der Controller-BEC eine starke Empfindlichkeit gegenüber der Eigenerwärmung hat, was sich dann in der unterschiedlich gut ausgeglichenen BEC-Spannung widerspiegelt. Die gleiche Empfindlichkeit wird strapaziert, wenn der Controller sich durch den Motor-Betrieb mehr oder weniger erwärmt und dann über die gemeinsame Platine den BEC erreicht. Eine grundsätzliche Gegenmaßnahme ist ausreichende Kühlluft.

### Zusammenfassung

Die Beobachtungen im Flug und im Labor haben folgendes gezeigt:

- Auch wenn man den Hersteller-Empfehlungen folgt, können kritische Betriebszustände auftreten. Durch den Einsatz einer kompakten Flug-Daten-Aufzeichnung ist es möglich gewesen, Schwachstellen aufzuzeigen und zu isolieren.
- Das Betriebsverhalten aus der Flug-Messung konnte durch Labor-Versuche nachgebildet werden, sodass die Ursache gefunden werden konnte.
- Es gibt betriebssichere Alternativen, die allerdings mehr Aufwand bedeuten.
- Der Routine-Betrieb mit der Flug-Daten-Aufzeichnung ist ideal geeignet, um unvorhergesehene Effekte zu finden.
- Es reicht nicht, Daten zu sammeln. Die Daten müssen auch sinnvoll interpretiert werden. Dazu sind die mehrkanaligen parametrischen Auswertungen eine große Hilfe (zusammen mit der feinen zeitlichen Auflösung).

### Ausblick

Der vorliegende Bericht zeigt, wie Schwachstellen im Betrieb gefunden und reduziert werden können. Dabei steht der sichere und zuverlässige Betrieb des elektrischen Bordnetz (also des Antriebs, aber eben auch des Empfängers und der Servos) im engen Zusammenspiel, auch wenn die Untersuchungen eigentlich an den Servos begonnen haben.

Erst wenn die elektrischen Baugruppen zusammen mit dem Bordnetz stabil arbeiten können, beginnt der eigentliche Erprobungs-Flugbetrieb, bei dem es um die Flugleistungen geht. Dann kommt es zu der Untersuchung und Optimierung von Antriebs-Komponenten (wie Motor, Propeller, Akku), aber auch um flugmechanische Zustände (wie Schwerpunktslage, Trimmung), bis hin zu Struktur-Änderungen (unterschiedliche Flügel).

Die Ermittlung von detaillierten Flug-Daten stellt eine große Hilfe bei der Weiterentwicklung, aber auch beim Routine-Betrieb dar. Die kompakte Flug-Daten-Aufzeichnung wird daher noch viele Flüge begleiten. Dies lässt noch einige interessante Einblicke erwarten.

**Rosner-TDL**  
**Norbert Rosner**  
**Stellantriebe**

Telefon: +49 (0) 58 27 / 97 09 81  
Telefax: +49 (0) 58 27 / 97 09 82

Neue Straße 3  
D-29 345 Unterlüß

E-Mail: [rosner@rosner-tdl.de](mailto:rosner@rosner-tdl.de)  
Internet: [www.ROSNER-TDL.de](http://www.ROSNER-TDL.de)