

## RC-Servos für Mechatronik-Anwendungen

### Teil 2: Elektrisches Verhalten

#### Übersicht

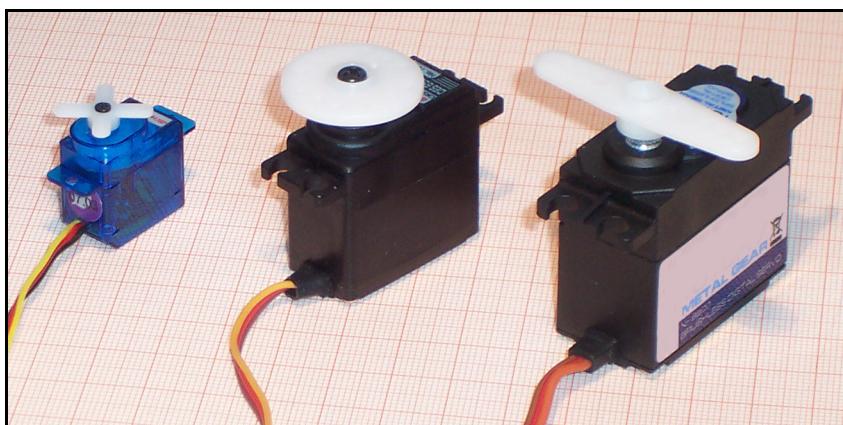
RC-Servos haben sich in vielen Anwendungen als kompakte Stellantriebe bewährt. Der vorliegende zweite Teil der Reihe beschreibt Untersuchungen zum elektrischen Verhalten von typischen Servos sowie deren Zusammenwirken mit dem Versorgungsspannungs-Bordnetz. Die Labor-Messungen werden genutzt, den Status der Zuverlässigkeit von Servo und Bordnetz im Flug zu bestimmen.

#### Motivation

Zur Beurteilung der Betriebssicherheit von Stellantrieben sind Messungen zusammen mit dem Spannungsversorgungs-Bordnetz die aussagekräftigste Methode. Die mess-technischen Vorarbeiten (also Messaufbauten mit Signal-Anzapfungen, aber auch Sensoren und Signal-Aufbereitungen) sind dabei für 10g-RC-Servos nicht wesentlich anders als bei einem 16kN-Landeklappen-Stellantrieb.

Der große Vorteil der RC-Welt ist ihre einfache Verfügbarkeit und sichere experimentelle Testbarkeit, zusammen mit einer guten Übertragbarkeit auf andere Bereiche. So lassen sich Themen wie mobile Datenaufzeichnung oder redundante Spannungsversorgungen testen, die auch in anderen Hochzuverlässigkeits-Anwendungen sehr ähnlich eingesetzt werden können.

Im vorliegenden Bericht werden exemplarisch drei Servos genauer betrachtet. Sie decken einen weiten Bereich der verfügbaren Servos ab: vom klassischen Analog-Servo über Standard-Digital-Servo bis zum "brushless, high voltage" Digital-Servo für sehr hohe Leistungen.



## ROSNER-TDL

## Daten der drei Servos

	Typ	Masse	Stellmoment	Stellzeit
Servo 1	analog	6 g	6 Ncm	0.09 s / 60°
Servo 2	digital	26 g	59 Ncm	0.13 s / 40°
Servo 3	digital, "brushless", "high voltage"	63 g	200 Ncm	0.098 s / 45 °

Die Untersuchungen haben aber nicht primär die Aufgabe, das Verhalten der isolierten Servos zu ermitteln. Vielmehr stehen die Wechselwirkungen mit der Bordversorgung im Mittelpunkt. Aus diesem Verhalten kann man dann auf einen sicheren Betrieb oder aber auf Schäden im Servo oder in der Bordversorgung schließen. Die Auswahl der Servos wird in den betrachteten Anwendungen (also unbemannte Flugzeuge, aber auch mobile Robotik) meist von den gleichen Kriterien getrieben wie die Konzeption deren Bordversorgung: neben den reinen

Leistungsdaten spielen Bauraum und Gewicht die überragende Bedeutung. Daher ist das Absichern des zuverlässigen Betriebs eine wichtige Erfahrung, die aber meist nach der Entwicklung begonnen wird. Die hier vorgestellten Messungen und Erfahrungen sollen zeigen, dass dies schon bei der Architektur des kompletten Stellantriebs (also Aktuator mit Bordnetz) erfolgen kann, und zwar unabhängig davon, ob es sich um unbemannte oder manntragende Flugzeuge handelt.

## Randbedingungen

Die in diesem Bericht vorgestellten Versuche und Ergebnisse wurden im Labor an einem Labornetzteil mit nachgeschaltetem Spannungsregler durchgeführt. Durch die Konzentration auf diesen Typ von Bordnetz (bzw. Nachbildung) und die Signalvorgabe durch einen RC-Signalgenerator soll die Reproduzierbarkeit der Versuche gesichert werden.

Ebenfalls wurden alle Versuche ohne äußere Lasten durchgeführt. Damit wird das ideale Minimal-Verhalten unter kontrollierten Bedingungen charakterisiert.

Alle Signale wurden durch steckbare Messadapter ermöglicht; es wurden also keine Eingriffe in die Servos oder die Spannungsversorgung vorgenommen. Damit lassen sich diese Messadapter bequem in konfigurierten Anwendungen (so bei fertig eingerüsteten RC-Modellen auf dem Flugfeld) einsetzen. Dadurch wird der Aufwand zur Gewinnung von interpretierbaren Daten stark reduziert.

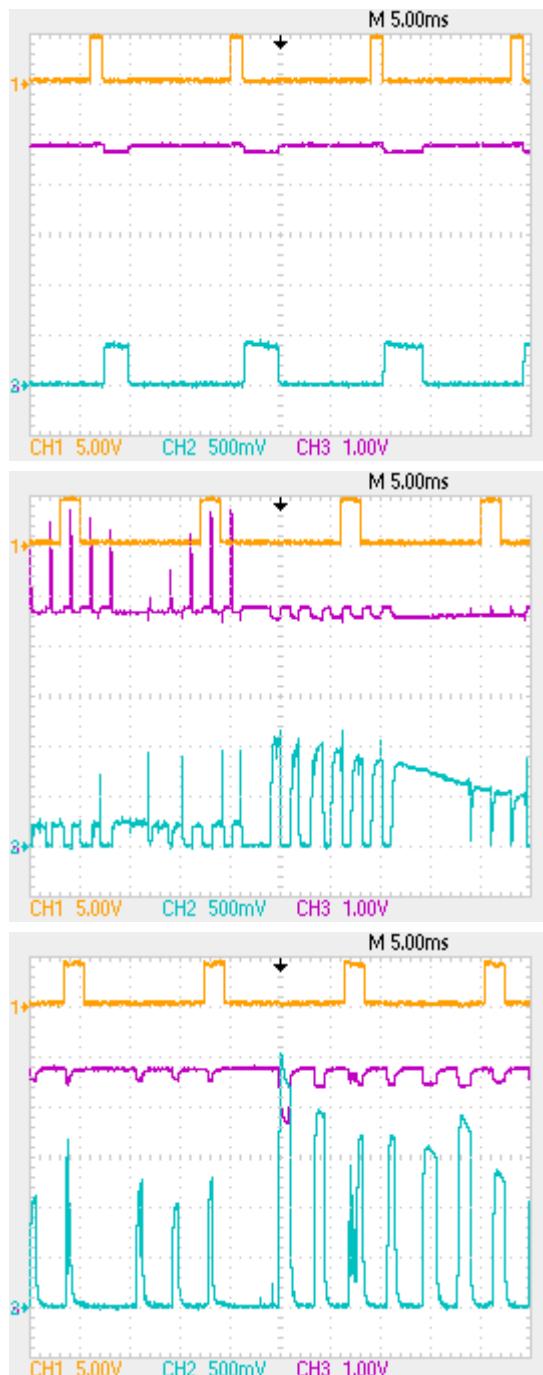
Erst mit den hier beschriebenen Erfahrungen kann man spätere Flugmessungen richtig einstufen.

In späteren Berichten werden auch Messungen analysiert, die im Labor unter Last und während des Fluges gesammelt wurden. Diese Messungen bieten dann vertiefte Einblicke in die Einsatzgrenzen der Servos bzw. der Bordversorgung.

## ROSNER-TDL

## Direkte Messungen

Im ersten messtechnischen Schritt wird ein Digital-Speicher-Oszilloskop eingesetzt, um die Signale direkt am Servo zu erfassen. Dazu wird das Servo durch einen RC-Signalgenerator mit einem Dreiecks-Kommando angesteuert, so dass es die Position linear verfährt.



Schon das kleinste Servo verursacht sichtbare Spannungseinbrüche.

1. Im oberen Signal (**CH1**) ist das RC-Kommando zu sehen: ein Puls zwischen 1.0 und 2.0 ms Dauer.
2. Im unteren Signal (**CH2**) ist der fließende Strom zu sehen. Er ist pulsförmig. Zur Erfassung des Stromsignals wird ein Signal-Adapter (hier Shunt mit Verstärker) erforderlich mit der Skalierung 1 A/V.
3. Im mittleren Signal (**CH3**) wird die Bord-Spannung erfasst.

Beim mittleren Servo treten höhere Ströme auf. Daraus resultieren dann stärkere Spannungseinbrüche. Dazu kommen sogar deutliche Überspannungen, die wohl auf die Schaltflanken im Servo hindeuten.

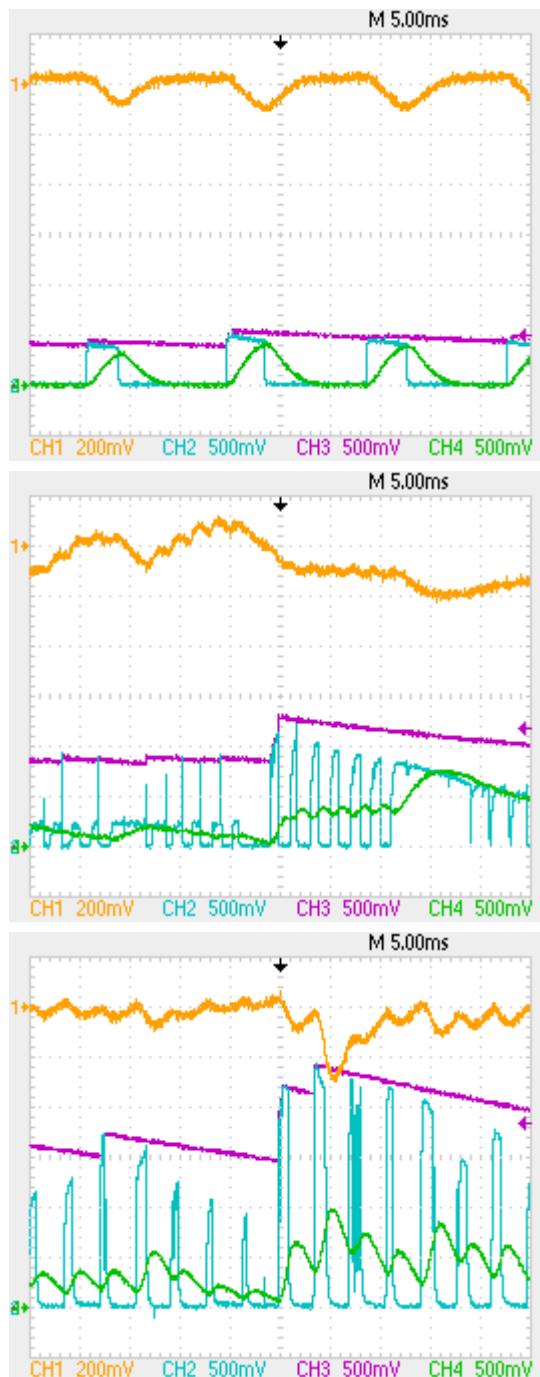
Beim dritten Servo treten recht hohe Stromspitzen auf mit ebenfalls spürbaren Spannungseinbrüchen.

Diese Auswirkungen auf die Bordversorgung sind der Kern des Berichtes. Durch die Spannungseinbrüche kann die Zuverlässigkeit des gesamten Bordsystems und damit auch der angeschlossenen Elektronik beeinträchtigt werden.

## ROSNER-TDL

## Messung mit Filterung

Genauere Betrachtungen zeigen, dass die Signale durch Mess-Adapter bearbeitet werden sollten. Dazu werden lineare Filter (Tiefpass mit Bessel-Charakteristik) und nicht-lineare Filter (Spitzenwert-Detektor) eingesetzt.



Das erste Signal (**CH1**) ist jetzt die linear gefilterte Versorgungsspannung (als AC-Signal). Als Filter wird eine Bessel-Charakteristik 2. Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 100 Hz eingesetzt.

Das Stromsignal (**CH2**) wird jetzt sowohl nicht-linear gefiltert (**CH3**: durch einen Spitzenwert-Detektor mit einer Abklingzeit von 200 ms) als auch linear (**CH4**: ebenfalls Bessel, 2. Ordnung, 100 Hz).

Bei ersten Servo bestätigen sich die Ergebnisse der ersten direkten Messungen.

Besonders das zweite Servo neigt zu sehr kurzen Strom-Spitzen, die das Digital-Oszilloskop nur in stark gedehnter zeitlicher Auflösung (z.B. 0.1 ms/DIV) korrekt darstellen können. Dann wiederum verliert man die Übersicht über die eigentliche Servo-Bewegung.

Der Spitzenwert-Detektor arbeitet dagegen in einem viel breiteren spektralen Bereich und ermöglicht so eine bessere Erklärung der Stromsignale.

Beim dritten Servo treten eher längere, aber dennoch kräftige Strompulse auf. Hier liefert der Spitzenwert-Detektor keine neuen Erkenntnisse.

## ROSNER-TDL

Die Messungen zeigen, dass man verschiedene Mess-Adapter braucht:

1. Shunt-Widerstand mit Verstärker für die Stromerfassung
2. Spitzenv Wert-Detektor (mit einer Abkling-Zeitkonstanten von 200 ms): So lassen sich sehr schnelle Signal-Spitzen detektieren, die vom Digital-Oszilloskop nicht registriert werden. Der Nutzen ist nicht bei jedem Servo gleich.
3. Tiefpass-Filter (Bessel, 2. Ordnung, Grenzfrequenz 100 Hz) zur Filterung des Strom-Signals und des Spannungs-Signals: So wird eine ausgewogene Datenreduktion erzielt, die die mittel-schnellen Vorgänge noch gut abbildet. Die Wahl der Grenzfrequenz stellt einen guten Kompromiss basierend auf der Dynamik der drei Servos dar.

Weiterhin wird die Bord-Spannung als AC-Wert dargestellt: So kann man das Signal stärker vergrößern.

Zur Anpassung an die elektrischen Signale wurden auch verschiedene andere Mess-Adapter getestet. Die oben genannten Mess-Adapter lieferten die brauchbarsten Einblicke:

1. Strom: Neben dem Shunt wurde auch eine DC-Stromzange verwendet.
2. Spitzenv Wert-Detektor: Es wurden unterschiedliche Abkling-Zeitkonstanten getestet.
3. Tiefpass-Filter: Es wurden verschiedene Grenzfrequenzen getestet. Sporadisch wurden auch Filter höherer Ordnung oder mit Butterworth-Charakteristik ausprobiert.

Gerade einstellbare Filter sind eine wichtige Ergänzung zur Darstellung mit einem Digital-Oszilloskop. Wie zu sehen haben die Servos deutlich unterschiedliche Signale. Bei anderen Servos, die aus Platzgründen hier nicht gezeigt wurden, sind wieder andere Signale und damit auch Signal-Adapter hilfreich gewesen.

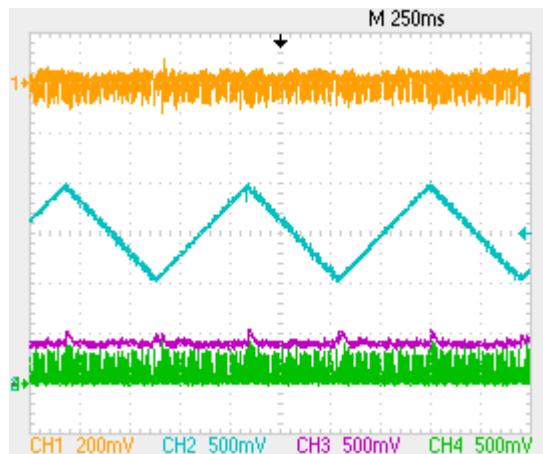
Wichtig für die Signal-Verarbeitung ist: Die Filterung von Strom und Spannung mit identischen Grenzfrequenzen (und natürlich gleicher Charakteristik und Ordnung) erhält die konsistente Synchronisierung beider Signale.

Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass alle Messungen ohne äußere Last durchgeführt wurden. Die Präsentation der Messungen unter verschiedenen Last-Szenarien ist für einen späteren Bericht vorgesehen.

## ROSNER-TDL

## Messung mit Analog-Kommando

Der eigentliche Einsatzbereich der Servos ist aber die Bewegung im Sekunden-Bereich. Wenn man das Zeitfenster so weit öffnet, ist die Darstellung der RC-Kommando-Pulse wenig hilfreich. Vielmehr hilft ein weiterer Mess-Adapter, der das Puls-Signal in eine analoge Spannung umsetzt.



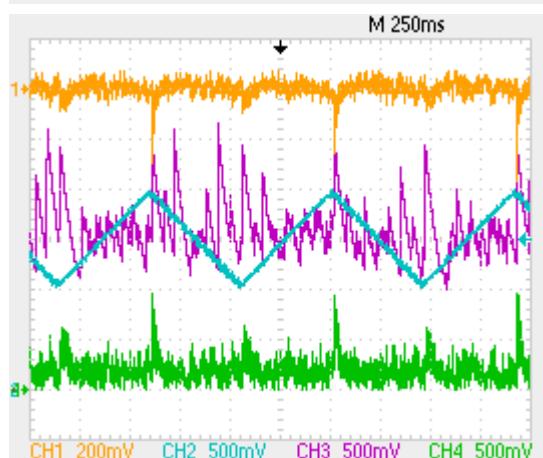
Die Kanäle **CH1** (Bord-Spannung), **CH3** (Spitzenwert) und **CH4** (gefilterter Strom) bleiben identisch.

Neu ist Signal **CH2** zur Darstellung des RC-Kommandos. Es schwankt linear zwischen 1 und 2 V bzw. 1 ms und 2 ms, Skalierung also 1 ms/V).

Servo 1: Hier sind die Signale des Spitzenwert-Detektors und des Filterausgangs ähnlich. Es gibt also keine "unsichtbaren" Signalspitzen. Es treten Stromspitzen bei der Bewegungsumkehr auf.



Servo 2: Die Signale des Spitzenwert-Detektors bestätigen, dass praktisch immer kurze Strompulse auftreten. Der Vergleich mit dem gefilterten Strom-Signal zeigt, dass deren Beitrag zum Servo-Strom gering ist. Dagegen spielen sie durchaus eine gefährliche Rolle als Störquelle.



Servo 3: Hier werden deutlich unregelmäßige Strom-Spitzen detektiert, die zum Teil auch im gefilterten Signal wiederzufinden sind (wenn auch abgeschwächt).

## ROSNER-TDL

**Mobile Datenaufzeichnung**

Zur Überwachung von Bordnetzen werden oft Grenzwert-Speicher eingesetzt, die anderen Funktionen beigefügt werden. Dieser Status als "Randfunktion" wird der Bedeutung als sicherheitsrelevante Funktion nicht unbedingt gerecht. Ein einzelner Messwert jenseits einer Schwelle kann verschiedene Ursachen haben, angefangen von einer elektrostatischen Störung (ESD) über eine elektromagnetische Störung (EMV) bis hin zu einer technischen Fehlfunktion, die ja gerade detektiert werden soll. Also braucht man einen etwas größeren statistischen Aufwand und auch die Korrelation von verschiedenen relevanten Signalen. Die oben gezeigten Messungen bestätigen, dass eine Spitzenwert-Überwachung eine gute Möglichkeit darstellt, aus den vielen Messungen die wenigen kritischen Messungen herauszufiltern, deren Analyse einen wirksamen Beitrag zum Zuverlässigkeitss-Status des

Geräts (hier Servo) oder des Bordnetzes liefert. Als Konsequenz aus diesen Gedanken wird eine Daten-Erfassung mit doppelter Filterung eingesetzt. "Doppelt" bedeutet dabei: wie oben verdeutlicht werden die elektrischen Signale gezielt gefiltert. Die dann vorliegenden Signale werden nicht einfach als Zeitverläufe abgespeichert, sondern als Indizien für den Zustand des überwachten Geräts bewertet: nur die relevanten Signale werden herausgefiltert und abgespeichert. Dadurch ergibt sich eine starke Datenreduktion sowohl während des Betriebs (der Datenspeicher kann deutlich verkleinert werden gegenüber der Speicherung von Zeitverläufen) als auch in der Nachbereitung von Versuchen oder des normalen Betriebs (es sind vorwiegend relevante Signale aufgezeichnet, aber nicht die vielen langen Sequenzen des Normalbetriebs).

In der einfachsten Form werden deutlich mehr Messungen vorgenommen, als für eine reine Datenerfassung nötig wäre. Aus der Vielzahl von Messwerten wird dann für ein festes Zeitintervall der Mittelwert gebildet. Gleichzeitig wird die Abweichung vom Mittelwert erfasst. Aus Rechenzeitgründen wird nicht die Standardabweichung gebildet, sondern die Minimal- und Maximal-Werte genommen. Sie sind bei signifikanten Abweichungen ebenfalls sehr aussagekräftig. Dann wird ausgenutzt, dass es nicht auf die isolierte Betrachtung der Bordspannung ankommt, sondern auf die gleichzeitige Betrachtung des fließenden Stroms. Die kritische Größe, die auf ein Zuverlässigkeitss-Problem hindeutet, ist die *minimale Span-*

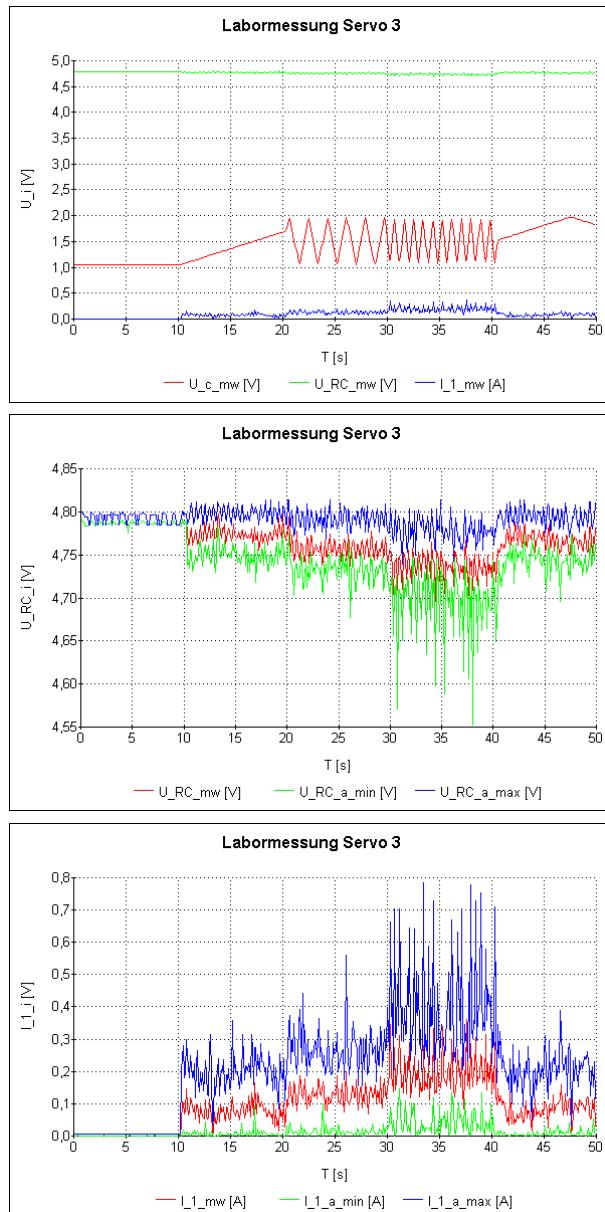
*nung* beim *maximalen Strom* während eines Zeitintervalls. Es ist ein erheblicher Gewinn zur Einschätzung des Bordnetzes oder des Geräts (hier Servo), wenn man Informationen zu diesen Werte-Kombinationen hat.

Die praktische Handhabung soll mit einfachen Labormessungen an den drei Servos demonstriert werden. Es wurden verschiedene lineare Verfahrsequenzen durchgeführt, beginnend mit einer Ruhephase, so dass die ungestörten Verhältnisse erfasst wurden. Die Messung wurde hier als Zeitverlauf durchgeführt mit einem Zeitschritt von 100 ms, während dessen alle 10 ms Messungen vorgenommen wurden (Over-Sampling).

### ROSNER-TDL

#### Darstellung der Zeitverläufe

Am Beispiel von Servo 3 sollen die Möglichkeiten der mobilen Datenaufzeichnung genauer betrachtet werden. Die Servos wurden mit dem gezeigten Dreiecks-Bewegungsprofil bei unterschiedlicher Frequenz angesteuert. Neben dem Mittelwert wurde auch der Minimal- und der Maximal-Wert eines jeden Kanals aufgezeichnet.



Das erste Bild zeigt die Zeitverläufe der Mittelwerte (zur besseren Übersicht).

Man erkennt das Kommando (als Zick-Zack). Das Stromsignal zeigt die steigende Aktivität an, die sich auch in der etwas einbrechenden Bordspannung wiederfindet.

Es wurde aber nicht nur der Mittelwert aufgezeichnet, sondern eben auch der Minimalwert und der Maximalwert. Der Maximalwert der Bordspannung liegt recht stabil bei 4.8 V. Dagegen zeigt der Minimalwert der Bordspannung schon nennenswerte Einbrüche, bis unter 4.6 V.

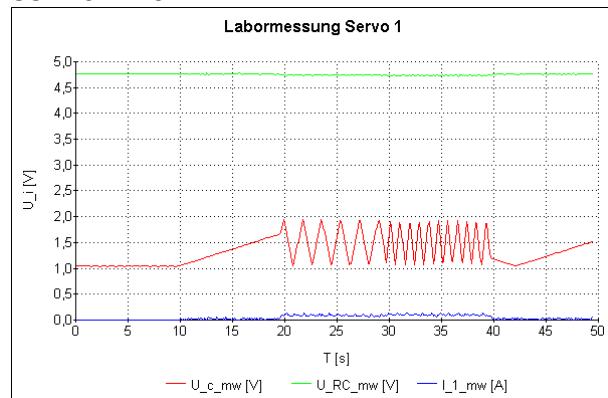
Ein ähnliches Verhalten zeigt der Strom: der Minimalwert liegt fast durchgehend bei Null, während der Maximalwert bis fast 0.8 A steigt. Aus den Oszilloskop-Messungen ist bekannt, dass dieser Wert durch die Filterung bedingt ist; im ungefilterten Zustand sind wohl Werte über 2 A aufgetreten. Dies ist aber "nur" eine Skalierung.

Zur Beurteilung, welcher Strom und welche Spannung kritisch sind, braucht man die Erfahrung vieler Normal-Betriebszeiten und ggf. aufgetretenen Schadensfällen. Beides kann zur Beurteilung des Verhaltens verwendet werden.

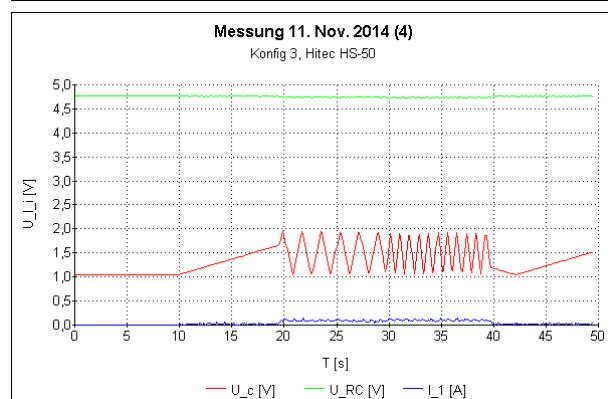
## ROSNER-TDL

### Datenaufzeichnung: Vergleich der Zeitverläufe der drei Servos

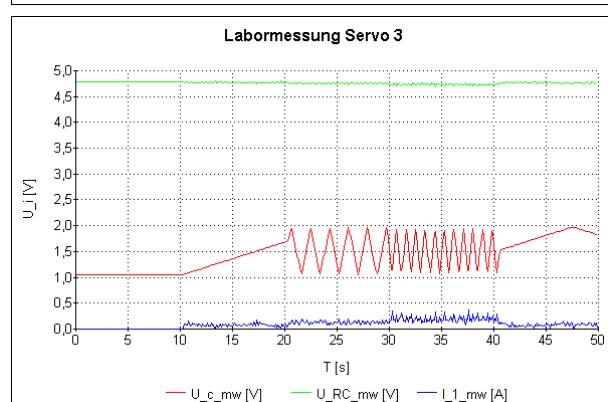
Zur Übersicht sollen hier die Zeitverläufe der drei Servos kurz gezeigt werden. Sie sind alle sehr ähnlich.



Servo 1



Servo 2



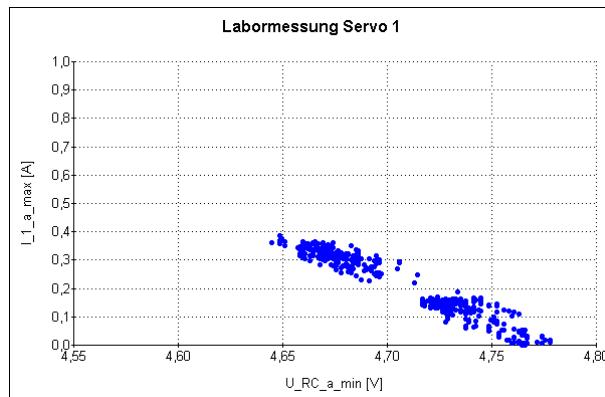
Servo 3

Die Ähnlichkeit der reinen Zeitverläufe zeigt auch die Schwierigkeit, daraus Aussagen zur Zuverlässigkeit anzuleiten. Dies ist das eigentliche Problem der meisten einfachen Datenlogger-Geräte.

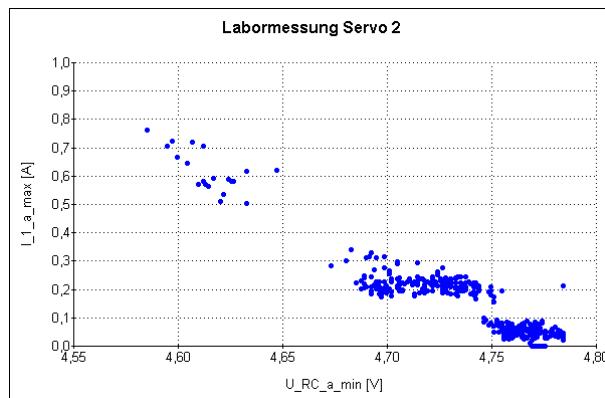
## ROSNER-TDL

## Datenaufzeichnung: Vergleich der Strom-Spannungs-Signale der drei Servos

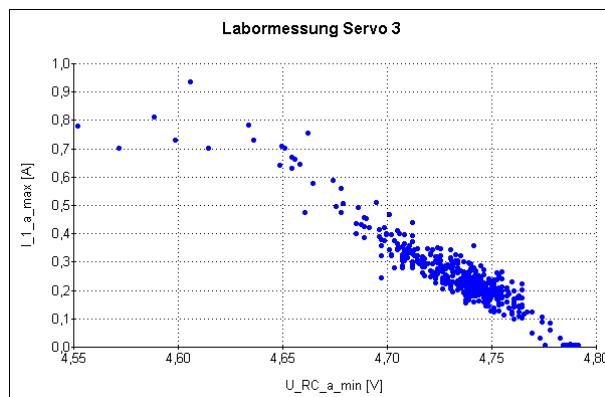
Die interessantere Auswertung der Messungen erfolgt, indem man die Daten nicht als Funktion der Zeit betrachtet, sondern funktionale Abhängigkeiten betrachtet, die ein Indiz für Zuverlässigkeit-Probleme sein können. So wurde oben gezeigt, dass ein hoher Strom üblicherweise mit einer etwas reduzierten Bordspannung korreliert. Umgekehrt bedeutet dies: Wenn die Spannung einbricht, ohne dass ein hoher Strom fließt, dann gibt dies einen Hinweis auf ein potentielles Zuverlässigkeit-Problem. Also wird der Maximal-Strom über der Minimal-Spannung aufgetragen und für die drei Servos verglichen. Dazu werden die Diagramme gleich skaliert.



Ausgehend von einer Ruhe-Bordspannung von etwas unter 4.8 V sind hier die Maximalströme über den Minimal-Spannungen aufgetragen. Es fällt auf, dass auch das recht kleine Servo schon ordentliche Ströme verursacht. Die Messpunkte gruppieren sich um eine Gerade, die einen charakteristischen Zusammenhang zwischen Strom und Spannung darstellt.



Das zweite Servo hat deutlich höhere Ströme, was ja aus den vorherigen Oszilloskop-Messungen bekannt war. Entsprechend sind auch die Spannungseinbrüche stärker. Auch hier gruppieren sich die Messungen um eine Betriebs-Gerade.



Hier fallen die wenigen Punkte bei hohen Strömen und niedriger Spannung auf. Es sind gerade diese Werte, die man im Auge behalten muss. Die anderen Messpunkte gruppieren sich wieder um eine Betriebs-Gerade, deren Steigung für den Zustand des Bordnetzes interessant ist.

## ROSNER-TDL

In der Steigung der Strom-Spannungs-Geraden spiegeln sich z.B. Effekte wie Stecker-Widerstände wider, aber eben auch Innenwiderstände der Betriebs-Akkus. Damit lassen sich aber auch Effekte wie Akku-Alterung oder langsame Akku-Schäden erfassen und bewerten, bevor Ausfälle eintreten.

Zur Beurteilung des Zustands "Bordnetz mit Servo" ist es ein großer Gewinn, wenn man die Extremwerte "links oben" statistisch überwacht. Solange die restlichen Messwerte nahe bei der Betriebs-Geraden liegen, können sie ignoriert werden, da sie einen normalen Betriebszustand darstellen.

Das eigentliche Kriterium zur Zuverlässigkeit liefert das  $U_{\min}$ - $I_{\max}$ -Diagramm: es ist der eigentliche Fingerabdruck der Servo-Bordnetz-Kombination, den man unter den verschiedensten Betriebsbedingungen beobachten muss. Dazu reicht aber deutlich weniger Speicheraufwand, als für die ganzen Zeitschriebe. Die Zeitschriebe sind allerdings für die Sammlung der Erfahrungswerte eine Zeit lang durchaus lehrreich.

Die Daten liefern also Hinweise auf potentielle Ausfall-Szenarien wie erhöhte Reibung im Servo oder erhöhter Innenwiderstand im Akku, die ohne mobile Datenaufzeichnung und vor allem ohne korrelierte Datenanalyse meist nicht auffallen. Eine plausible Erklärung von aufgetretenen Schäden ist ohne aufgezeichnete Daten meist ebenfalls unsicher. Es lohnt sich, die Hinweise der Daten zum Anlass zu nehmen, verdächtige Komponenten genauer zu untersuchen und ggf. auszuwechseln.

## **Zusammenfassung**

Der Bericht zeigt die Auswertung und Korrelation von elektrischen Signalen an RC-Servos, die dann Rückschlüsse auf die Zuverlässigkeit des Servos selbst oder aber auch der Bordversorgung zulassen. Die Messungen erfordern keine massiven Eingriffe in die Servos, sondern erfolgen direkt an den verfügbaren Steckern.

Die Bandbreite der Servos reicht von kleinen Analog-Servos bis zu „brushless, high voltage“ Digital-Servos. Es zeigen sich viele gemeinsame Effekte, von denen die Einbrüche in der Bordspannung durch den stark pulsierenden Strom im Bericht genauer betrachtet wurden.

Die Messungen sind im Labor ohne äußere Lasten vorgenommen worden. Damit bilden sie die Grundlage für die Messungen mit Last und die Flugmessungen mit der mobilen Datenaufzeichnung.

Neben den Messungen an den Servos werden dann auch Messungen an den Antriebs-Motoren (BLDC) vorgestellt.

Die gezeigten Messungen lassen sich leicht auch auf andere Stellantriebe übertragen. Damit können Erfahrungen aus unbemannten Flugzeugen auch für manntragende Flugzeuge genutzt werden.

So lassen sich aber auch Komponenten zum Schutz vom Bordnetz oder von Stellantrieben bei deutlich reduziertem Risiko praktisch erproben und weiterentwickeln.

**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)