

## RC-Servos für Mechatronik-Anwendungen

### Teil 3: Elektromechanisches Verhalten: Labormessungen und Bordnetz

#### Übersicht:

Das elektromechanische Verhalten von Servos hängt stark von den Einsatz-Randbedingungen ab, besonders aber von der mechanischen Belastung. Daher werden Versuche an mehreren Servo-Typen mit Belastungen analysiert. Zuerst sollte man das Verhalten eines Servos unter kontrollierten Randbedingungen (Bordnetz, mechanische Belastung) kennenlernen, bevor man auf unbekannte Belastungen oder Schäden schließen kann. Dazu wurde eine mobile Daten-Aufzeichnung (Flug-Daten-Aufzeichnung) entwickelt und eingesetzt, die zur Überwachung der Servos im RC-Modell eingesetzt wird. Sie ermöglicht die eingehende Analyse eines Fluges und damit auch die Detektion von Auffälligkeiten. Der Einsatz im Flug sowie die Signale des Antriebs-Motors werden in einem der nächsten Berichte behandelt.

Die Wahl der Servos und der Einsatz in einem RC-Flugmodell ist nur ein Beispiel. Die Zusammenhänge, Methoden und Geräte sind für viele mobile Anwendungen hilfreich, die mit einem Akku-Bordnetz arbeiten.

#### Motivation

Der Betrieb von RC-Flugmodellen ist ein typisches Beispiel für den Einsatz von elektromechanischen Verbrauchern an einem Bordnetz mit begrenzter Leistungsfähigkeit. Als Verbraucher sind besonders der Antriebs-Motor und die Servos gemeint. Die Wirkung des Antriebs-Motors auf den Bordnetz-Akku stellt das zentrale Problem der Elektro-Mobilität dar. Aber auch die Servos sind von typischen Bordnetz-Effekten betroffen. Da die Servos fundamentale Komponenten zur Sicherstellung der Zuverlässigkeit sind, ist es wichtig, hier möglichen Problemen frühzeitig auf die Spur zu kommen, sodass es gar nicht erst zu kritischen Situationen kommt.

Bedingt durch die Mobilität ist man bestrebt, möglichst kleine Akkus und auch ausreichend kleine Servos einzusetzen, da beide Komponenten sowohl vom Platzbedarf als auch vom Gewicht her klein bleiben sollen. Die Miniaturisierung hat aber Grenzen, da kleine Akkus eben auch spürbar begrenzte Leistungsdaten haben. Während diese Betrachtung für den Betrieb des Antriebs-Motors offensichtlich ist, ist die Situation bei den Servos in vielen Fällen ähnlich, ohne dass es dem Anwender bewusst ist. Hier können die Servos selbst an technische Grenzen geraten, aber auch die Spannungs-Stabilisierung (als Teil des Bordnetzes).

Zuerst sollte man das Verhalten des Servos unter kontrollierten Randbedingungen (Bordnetz, mechanische Belastung) kennenlernen, bevor man auf unbekannte Belastungen oder Schäden schließen kann.

Dazu wurde eine mobile Daten-Aufzeichnung (Flug-Daten-Aufzeichnung) entwickelt und eingesetzt, die zur Überwachung der Servos im RC-Modell (aber auch des Antriebs-Motors) eingesetzt wird. Sie ermöglicht die eingehende Analyse eines Fluges und damit auch die Detektion von Auffälligkeiten. Der Einsatz im Flug sowie die Signale des Antriebs-Motors werden in einem der nächsten Berichte behandelt.

Die Flug-Daten-Aufzeichnung hat sich als kompaktes Aufzeichnungs-System bewährt, das durch die hohe Signal-Qualität (Mess-Intervall: 100 ms, 10 bit Genauigkeit) schon eine Vielzahl von nachträglichen Analysen ermöglicht hat.

Zentraler Grundlage für die hier beschriebenen Maßnahmen ist die Vermeidung von Ausfällen, die bei Stellantrieben in der Regel katastrophale Auswirkungen haben. Es gibt bei Servos unterschiedliche Schadens-Szenarien, die typisch für mechatronische bzw. elektromechanische Systeme sind. Die beiden Haupt-Ursachen sind: mechanische Überlastung und elektrische Überlastung.

Die mechanische Überlastung kann zu Verschleiß an Getrieben oder Lagern führen. Wenn diese Teile versagen, kann es zu Blockaden kommen. Die elektrische Überlastung des Motors führt letztlich zum Durchbrennen der Motor-Wicklung oder bei Bürsten-Motoren zur Beschädigung der Kommutierungs-Bürsten. Sowohl bei mechanischer als auch bei elektrischer Überlastung ist der Motorstrom ein guter Indikator, der auch schon vor dem Total-Ausfall auf Schäden hinweisen kann. Deshalb werden im folgenden Labor-Messungen des Motorstroms präsentiert, die die Grundlage zur Einschätzung des Belastungs-Zustands und des Schadens-Monitoring dienen.

Dabei werden die Auswirkungen unterschiedlicher Servo-Größen und unterschiedlicher Belastungen auf den Servo-Strom verglichen.

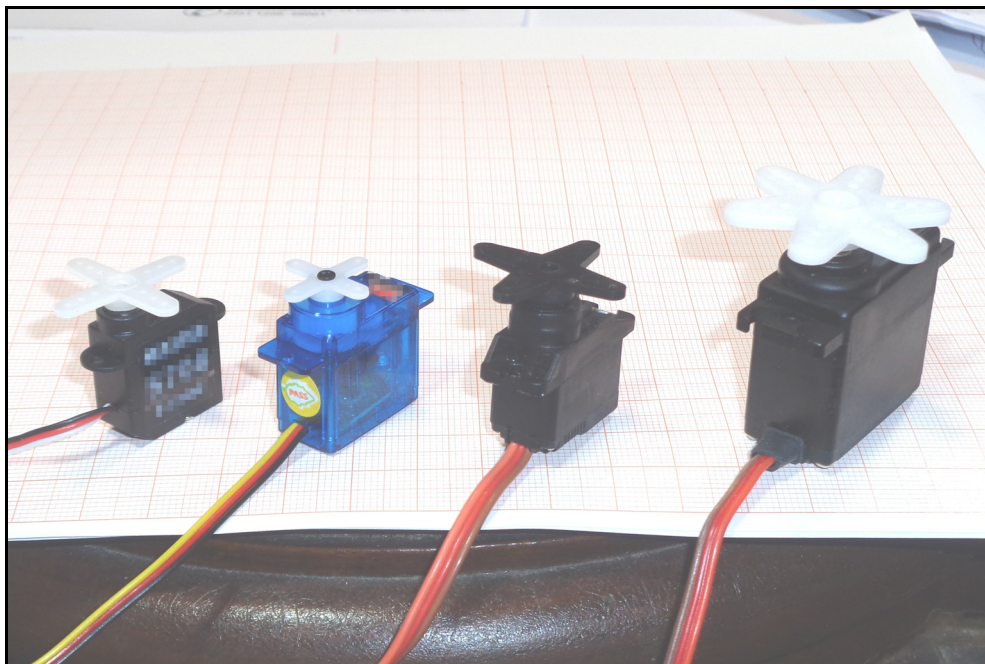
Diese Messungen bilden die Erfahrungs-Grundlage zur Einschätzung der aktuellen elektromechanischen Belastungs-Situation sowie die Abschätzung von zulässigen Grenzen.

Die systematischen Labor-Messungen stellen die Interpretations-Grundlage für den späteren Flugeinsatz dar, bei dem weder die Lasten noch die Betriebs-Zustände konkret bekannt sind. Auch im Flug-Einsatz ist die Messung des Motor-Stroms die wertvollste Messgröße. Natürlich ist auch der Bauraum für eine Flug-Daten-Aufzeichnung begrenzt (wie ja auch der Bauraum für den Akku und die Servos). Daher muss angestrebt werden, mit möglichst kompakter Hardware zu aussagekräftigen Ergebnissen zu kommen. Dies setzt eine gewisse Abstimmung der Messdaten-Hardware an die Messobjekt-Signale voraus. Wie sich zeigen wird, gibt es große Unterschiede zwischen den Signalen, selbst bei Servos der gleichen

### ROSNER-TDL

Leistungsklasse. Das steigert die Bedeutung der Labor-Messungen, da hierbei komplexere (und größere) Mess-Instrumente zum Einsatz kommen können, was später im Flug nicht mehr möglich ist.

Abgestimmt auf die im RC-Modell eingesetzten Servos werden hier relativ kleine Servos präsentiert. Zur Abrundung wird noch ein etwas kleineres Servo und ein etwas größeres Servo getestet.



Die Servos werden häufig über ihr Gewicht klassifiziert.

- Servo 1 (links): 5 gr
- Servo 2 und Servo 3: 9 gr
- Servo 4 (rechts): 26 gr

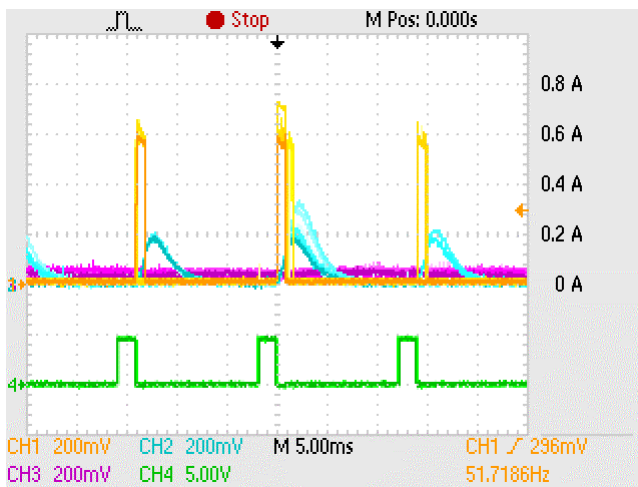
Die Gewichts-Gleichheit der Servos 2 und 3 lässt interessante Vergleiche zu.

ROSNER-TDL

Zur ersten Übersicht wird bei jedem Servo der Gesamt-Strom (der im wesentlichen der Motorstrom ist) mit einem Digital-Oszilloskop und einer Mess-Adapter abgegriffen. Die Servos werden mit einem Signal-Generator zu einer Schwenkbewegung ohne Last bei konstanter Geschwindigkeit angeregt. Die Verstell-Geschwindigkeit ist nicht sehr hoch. Schon hierbei unterscheiden sich die 4 Servos deutlich.

Die oberen Signale sind der direkt gemessene Motor-Strom (CH1) sowie tiefpass-gefilterte Signale (CH2 mit 100 Hz, CH3 mit 10 Hz). Das untere Signal (CH4) ist das RC-Kommando.

Der Mess-Adapter enthält auch eine auswechselbare Filter-Stufe. Die Filterung des Strom-Signals ist für die spätere Daten-Aufzeichnung erforderlich. Es hat sich gezeigt, dass die Wahl der Filterfrequenz durchaus Auswirkungen auf die späteren Interpretations-Möglichkeiten hat. Die Filterfrequenzen müssen gleichzeitig zu den mechanischen und elektrischen Eigenschaften der Servos passen. Da sich die Dynamik der beiden Eigenschaften durchaus unterscheiden, ist ein Kompromiss erforderlich.



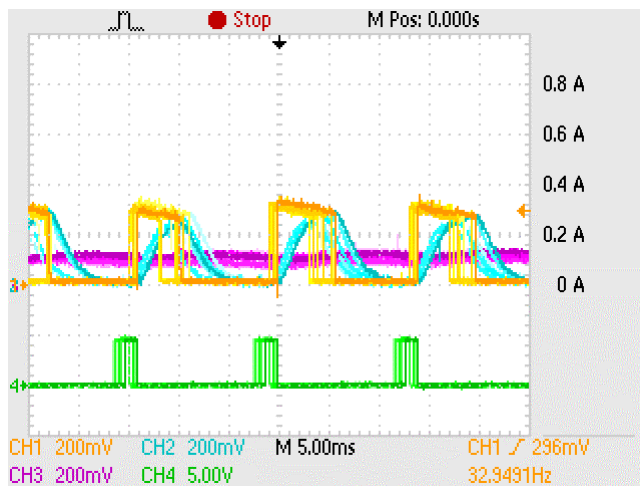
Beim ersten Servo zeigen sich sehr kurze Strom-Pulse, die direkt auf das RC-Kommando folgen.

Die Oszilloskop-Messung stellt die Überlagerung der Messwerte über einen Zeitraum von einer Sekunde dar ("Persistence"-Betrieb). Dadurch kann man die Wiederhol-Genauigkeit der einzelnen Messung besser beurteilen. Hier liegen die Signale sehr gleichmäßig übereinander.

Der stark pulsierende Charakter des Stroms macht zusammen mit der abtastenden Arbeitsweise der Daten-Aufzeichnung den Einsatz von Tiefpass-Filtern erforderlich. Die Erfahrung hat gezeigt, dass die Filter-Frequenz die größte Rolle beim normalen Einsatz spielt, während die Filter-Charakteristik (Bessel, Butterworth) oder die Ordnung eher bei speziellen Mess-Aufbauten variiert werden muss.

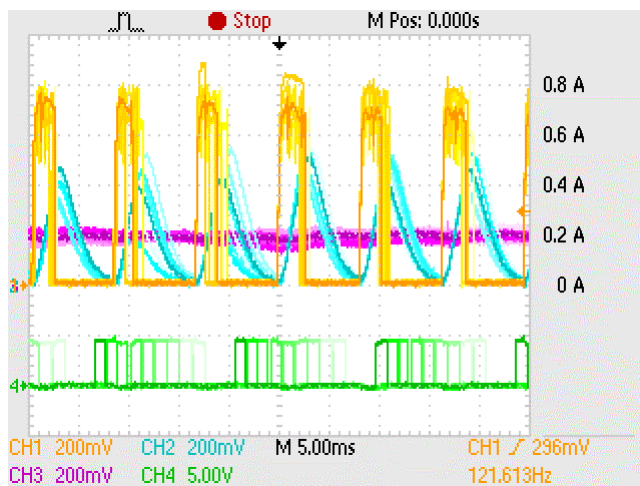
Bei den gefilterten Signale zeigt die Filterung mit 100 Hz (CH2) eine pulsierende Reaktion auf den Strom-Puls, wobei aber die Spitzen-Amplitude nicht erreicht wird. Bei der Filterung mit 10 Hz (CH3) ergibt sich ein fast konstanter Verlauf.

## ROSNER-TDL



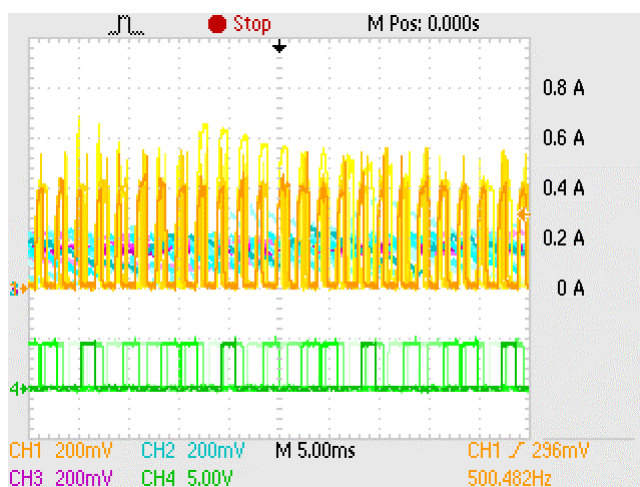
Beim zweiten Servo sind die Strom-Pulse schon deutlich breiter. Auch sind sie in der Spitze niedriger als beim ersten Servo. Die "Persistence"-Darstellung zeigt eine gewisse Unruhe der Signale.

Das mit 100 Hz gefilterte Signal kommt hierbei fast an den Spitzenwert des Strom-Pulses heran, während das mit 10 Hz gefilterte Signal nur eine geringe Welligkeit erzeugt.



Beim dritten Servo entstehen sehr starke Strom-Pulse. Dazu kommt, dass die Strom-Pulse nicht synchron zum RC-Kommando erfolgen, sondern eine eigene Wiederholrate haben. Das sieht man am RC-Kommando, das jedesmal zu einem anderen relativen Zeitpunkt erfolgt.

Hier erreicht das mit 100 Hz gefilterte Signal nicht ganz den Spitzenwert der Strom-Pulse, während das mit 10 Hz gefilterte Signal nur eine leichte Welligkeit zeigt.



Beim vierten Servo zeigt sich ebenfalls, dass RC-Kommando und Motorstrom-Pulse nicht synchronisiert sind.

Die Filterung erscheint hier durch die Strompuls-Wiederholrate (optisch) etwas unsauber, was aber im wesentlichen an der "Persistence"-Darstellung liegt, bei der ja unterschiedliche Kurven-Abschnitte überlagert dargestellt werden, die dann optisch zusammenhängend wirken.

Ohne "Persistence" sieht man, dass beide Filter mehr oder wenig stabile Signale liefern (entsprechend der Filter-Frequenz).

Schon diese 4 Servos zeigen, dass ihr Verhalten doch sehr unterschiedlich ist. Alleine der Spitzenstrom liegt zwischen 0.4 und 0.8 A, und das ohne äußere Last und bei einer mittleren Verstell-Geschwindigkeit. Wenn man bedenkt, dass die ersten drei Servos sehr kleine Baugrößen sind, die meist aus ebenfalls kleinen Spannungs-Reglern (BEC: battery elimination circuit) versorgt werden, dann kann man durchaus die Grenzen der kleinen Spannungs-Regler erreichen. Es treten immer wieder Fälle auf, dass Modelle nach eigentlich harmlosen Manövern außer Kontrolle geraten. Ein mögliches Szenario ist, wenn man beide Steuer-Knüppel auslenkt und dann in die Neutrallage schnappen lässt. Eigentlich ist das Manöver harmlos, allerdings werden kurzzeitig **alle** Servos aktiviert, sodass kurzzeitig sehr hohe Ströme fließen. Wenn der Spannungs-Regler zusätzlich noch an einer höheren Batterie-Spannung arbeitet und daher eine hohe Verlust-Spannung erzeugen muss, ergibt sich bei ihm eine möglicherweise kritische Verlust-Leistung, die zum internen Abschalten (als Selbstschutz) oder gleich zum Durchbrennen führen kann. Damit haben dann nicht die Servos versagt, sondern der Spannungsregler; allerdings ist die Wirkung katastrophal.

Die Wahl der Filter-Frequenz hat gravierende Auswirkungen auf die Aussage-Möglichkeiten der gesammelten Messdaten. Wenn man primär den Stromverbrauch erfassen will ("Tank-Anzeige"), dann spielt die Filterfrequenz keine große Rolle, denn hierbei wird praktisch nur der Mittelwert des Strom-Signals gebraucht. Bei Servos spielt die Erfassung des Stromverbrauchs keine große Rolle. Anders sieht es aus, wenn man auch die Spitzenwerte erfassen will, um etwa die oben gezeigten Spitzenwerte der Strom-Pulse zu erfassen. Hierbei ist die Filterfrequenz sehr kritisch: sie sollte möglichst hoch sein. Andererseits muss sie auf die Abtastfrequenz der Daten-Aufzeichnung abgestimmt sein, damit keine Signal-Artefakte (durch „Aliasing“) entstehen. Daher werden diese erforderlichen Filter auch als Anti-Aliasing-Filter bezeichnet. Somit setzt die Abtastfrequenz der Daten-Aufzeichnung (genauer: die Abtastfrequenz des Analog-Digital-Wandlers) die Grenze.

Wenn der Schwerpunkt der Untersuchungen weniger auf dem Stromverbrauch, sondern auf Zuverlässigkeits-Indikatoren liegt, dann ist eine Anpassung der Filterung an die Servos unter Umständen sinnvoll. Auf alle Fälle kann man dann nicht beliebige Sensoren (incl. Filterung) mit beliebigen Servos sinnvoll kombinieren. Daher wurden auch die oben geschilderten Oszilloskop-Messungen durchgeführt, die mittlerweile an jedem verwendeten Servo-Typ mehrfach vorgenommen werden, damit es später bei der Daten-Aufzeichnung keine Signal-Beeinträchtigungen gibt.

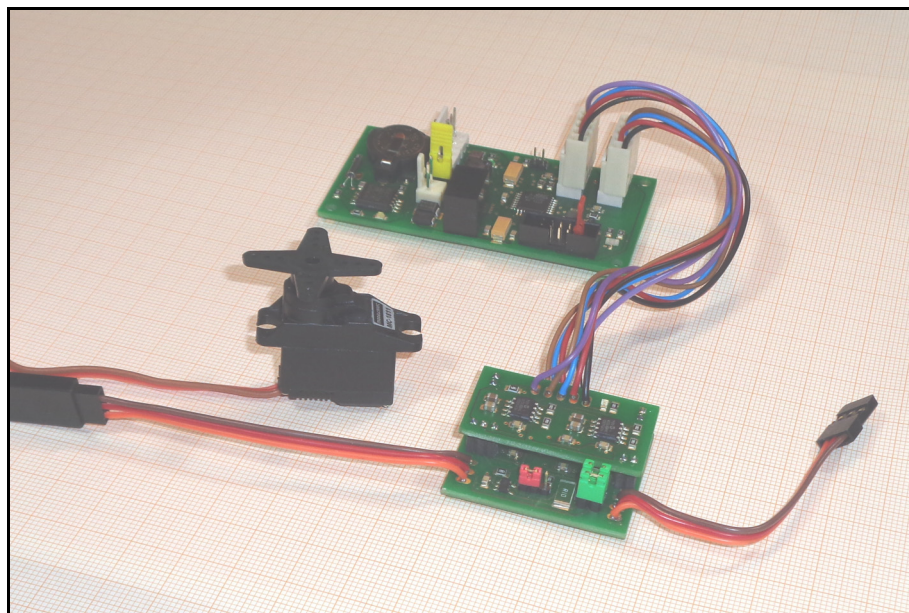
Die Problematik "Was kann man nachträglich noch aus den Messdaten herausholen?" sowie die Einsicht, dass einmal weggefilterte Details nicht mehr rekonstruiert werden können, hat dazu geführt, dass eine Daten-Aufzeichnung entwickelt wurde, die nicht nur gemittelte Werte erfasst, sondern sehr schnelle Minimal-Maximal-Messungen vornimmt, ausgewertet und abspeichert. Der erhöhte Software-Aufwand führt dazu, dass man später zuverlässige Aussagen über beide interessanten Bereiche (also mittlerer Stromverbrauch und Minimal-Maximal-Strom) ableiten kann. Damit ist es z.B. möglich, kurzzeitig erhöhte Lasten im Maximal-Strom zu detektieren, die im Mittelwert nur eine geringe Veränderung hervorrufen.

### ROSNER-TDL

Die hier verwendete Daten-Aufzeichnung ersetzt also die Entscheidung "Entweder Mittelwert, oder Spitzenwert" durch eine Lösung "Sowohl Mittelwert als auch Spitzenwert". Somit ermöglicht die Software eine spürbare Erweiterung der analogen Hardware-Filterung, wobei aber Hard- und Software aufeinander abgestimmt sein müssen.

Die Erfahrungen mit diesem etwas erhöhten Daten-Aufzeichnungs-Aufwand sind sehr positiv, da man immer wieder Überraschungen erlebt, bei denen man sich auf die zusätzlichen Mess-Informationen stützen kann.

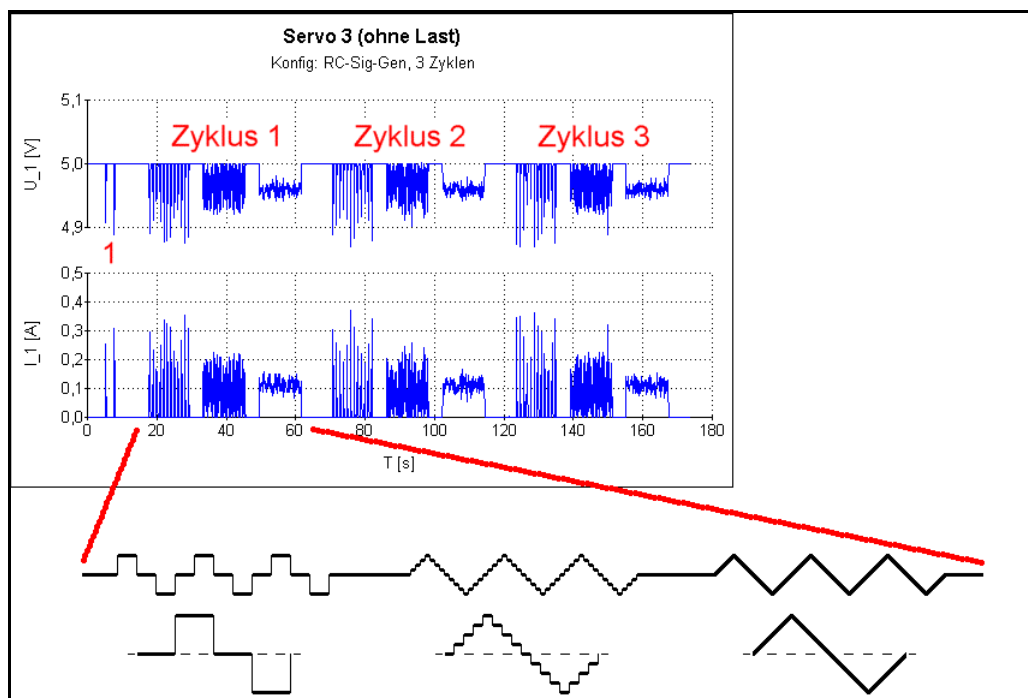
Die eingesetzte Hardware ist so klein, dass sie in einem Motorsegler mit einer Spannweite von einem Meter problemlos eingebaut werden kann.



Das Foto zeigt, dass die eingesetzte Version sowohl robust als auch modular ausgeführt ist, auch wenn dies zusätzlichen Platz kostet. Aber natürlich muss auch die Flug-Daten-Aufzeichnung selbst von hoher Zuverlässigkeit sein, aber auch vielfältig anpassbar sein.

ROSNER-TDL

Die Messungen mit der Flug-Daten-Aufzeichnung werden durchgeführt, indem ein RC-Signal-Generator unterschiedliche Signalarten kommandiert. Die Flug-Daten-Aufzeichnung wird zwischen RC-Signal-Generator und Servo gesteckt und erfasst sowohl die Versorgungs-Spannung als auch den Servo-Strom. Das folgende Bild zeigt ein typisches Ergebnis. Dargestellt werden die Spannung am Servo-Stecker und der Strom in das Servo.



Der Servo-Strom ist direkt mit der Bewegung verbunden, während die Schwankungen der Spannungen im wesentlichen durch Leitungs-Widerstände verursacht werden. Die Zusammenhänge werden später genauer analysiert.

Die Messung wird mit einem Signal-Mix durchgeführt, der sowohl abrupte Sprung-Kommandos als auch weiche Schwenk-Kommandos enthält. Vervollständigt wird der Mix durch ein schnelles Treppen-Kommando. Jeder Signal-Typ wird dreimal ausgeführt. Die drei Signal-Typen bilden einen Zyklus. Dieser Signal-Zyklus wird ebenfalls dreimal ausgeführt. Die Dreifach-Ausführungen von Signal und Zyklus lassen sich erste Aussagen zur Wiederholgenauigkeit der Signale ableiten. Die Periodendauer beträgt 4 Sekunden; die Amplitude beträgt  $\pm 45^\circ$ . Es wird mit einer zeitlichen Auflösung von 100 ms aufgezeichnet.

Die Daten-Aufzeichnung erfasst sowohl die Versorgungs-Spannung am Servo als auch den Servo-Strom. Das oben gezeigte exemplarische Diagramm zeigt deutlich die drei Zyklen sowie das Verhalten bei unterschiedlichen Signalen. Man erkennt, dass die Sprünge der ersten Kommando-Signalform zu hohen Strom-Pulsen führen, während die dritte Kommando-



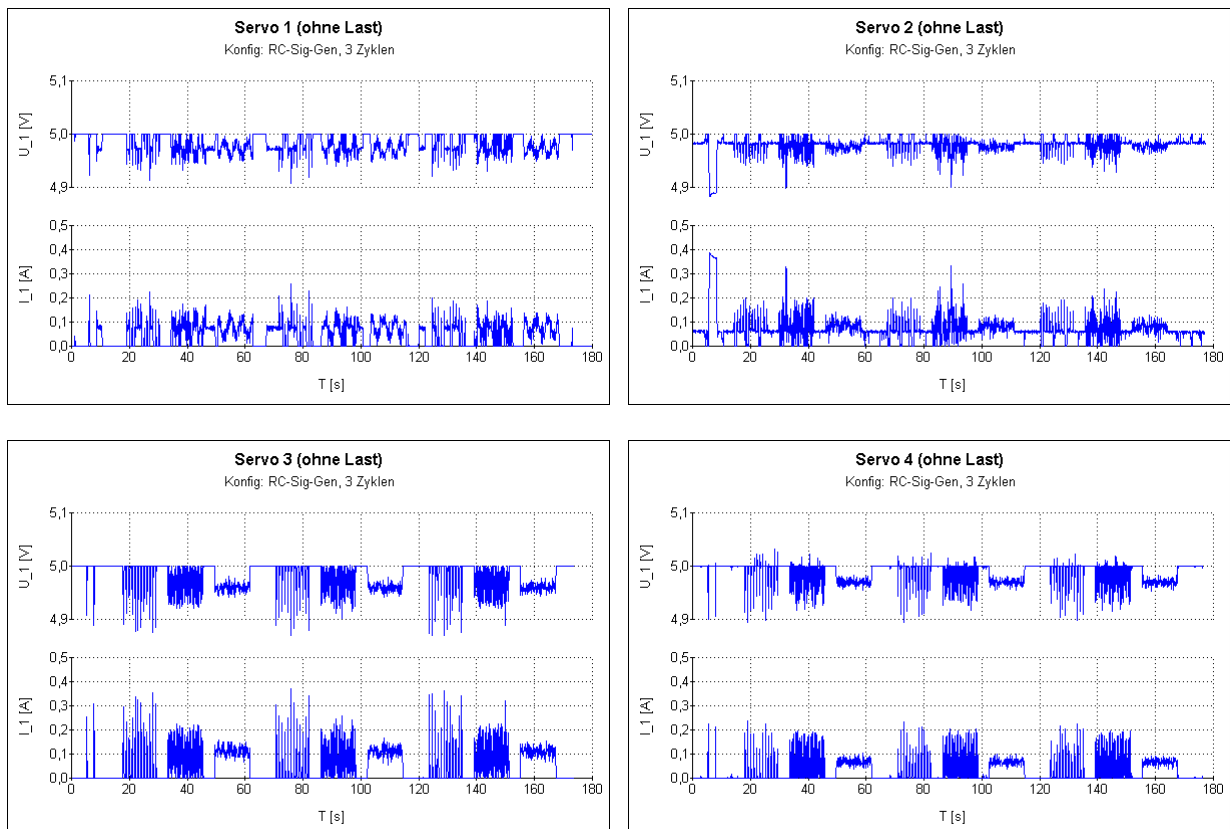
## ROSNER-TDL

Signalform mit seinen konstanten Schwenk-Vorgaben zu einem sehr gleichmäßigen Strom führt. Die mittlere Kommando-Signalform zeigt sich auch bei den Messwerten praktisch permanente Signale. Alle drei Signale sind Dreiecks-Signale, die sich nur in der Größe der Amplituden-Stufen unterscheiden.

Die Erfahrungen mit anderen Signal-Familien (Sinus, Trapez) zeigten ein ähnliches Verhalten. Das Dreiecks-Signal wird hier bevorzugt, da es zu einer konstanten Verstell-Geschwindigkeit führt.

Interessant ist auch das Verhalten zur Marke "1" (bei ca. 10 s). Nach dem Start der Messung erfolgt ein Reset des RC-Signal-Generators. Daraufhin zappelt das Servo etwas, da Kommando-Position und Ist-Position etwas verschieden sind. Dieses Verhalten ist ja auch im realen RC-Betrieb zu sehen. Es ist anzumerken, dass dabei ein sehr hoher Strom fließt, obwohl der Unterschied zwischen der kommandierten Position und der Ist-Position sehr gering ist. Hierbei ergeben sich regelmäßig hohe Belastungen.

Die Messungen an den 4 Servos sind im wesentlichen sehr ähnlich.



## ROSNER-TDL

Die Unterschiede zwischen den Servos sind auf den ersten Blick nicht gravierend. Die Messungen mit der Flug-Daten-Aufzeichnung geben im wesentlichen das wieder, das bei den Oszilloskop-Messungen gefunden wurde:

- Die Servos unterscheiden sich im Strom-Niveau.
- Das höchste Strom-Niveau wird beim Servo 3 registriert.

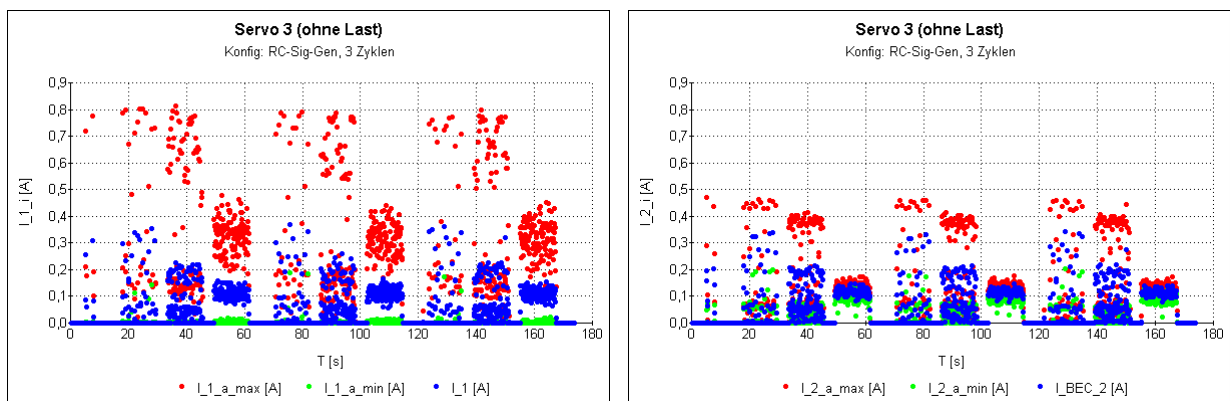
Eine neue Beobachtung ist, dass beim Servo 4 Überspannungen entstehen.

Der Umstand, dass bei Servo 3 die höchsten Ströme auftreten, rechtfertigt die genauere exemplarische Betrachtung dieses Servos.

Wie schon erwähnt, wird bei der eingesetzten Flug-Daten-Aufzeichnung nicht nur ein einfacher Messwert ermittelt, der durch Mehrfach-Messung gemittelt wird, sondern während des Untersuchungs-Intervalls (also 100 ms) werden sehr schnelle Messungen vorgenommen, die hinsichtlich der Extremwerte (also Minimal- bzw. Maximal-Wert) ausgewertet werden. Somit gibt es zu jedem Intervall drei Messwerte für jedes Signal.

Ebenfalls wurde erwähnt, dass die Filterung eine zentrale Rolle zur Interpretation der Messwerte spielt. Daher wurden die Messungen auch mit zwei unterschiedlichen Filter-Frequenzen vorgenommen: mit 100 Hz und mit 10 Hz. Das sind genau die Frequenzen, die auch bei den Oszilloskop-Messungen verwendet wurde (es ist eben der gleiche Mess-Adapter).

Die folgenden Diagramme zeigen die Strom-Signale (wie beim obigen Zeitverlauf). Allerdings werden jetzt nicht nur (wie bisher) die Mittelwerte dargestellt (in blau), sondern auch die Extremwerte (Minimum in grün, Maximum in rot). Außerdem zeigt das erste Diagramm die Ergebnisse mit einer Filterung von 100 Hz (Index "\_1"), während das zweite Diagramm die Ergebnisse mit einer Filterung von 10 Hz zeigen (Index "\_2").



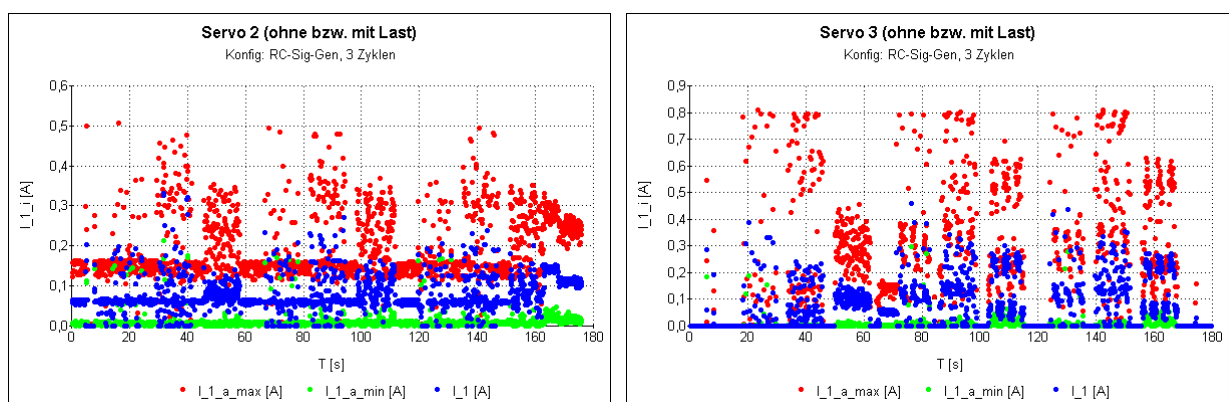
## ROSNER-TDL

Der Vergleich der beiden Diagramme zeigt:

- Die reinen Mittelwerte (blau) sind bei beiden Filter-Frequenzen sehr ähnlich.
  - ⇒ Offensichtlich haben diese Filter-Frequenzen keine großen Auswirkungen auf die Mittelwerte. Damit ist mit beiden Filter-Frequenzen eine Verbrauchsmessung möglich.
- Die maximal auftretenden Ströme liegen mehr oder weniger deutlich über den reinen Mittelwerten. Dabei führt eine Filterung mit 100 Hz dazu, dass deutlich höhere Maximal-Werte auftreten.
  - ⇒ Durch Vergleich mit den Oszilloskop-Messungen sieht man, dass der Spitzenwert von 0.8 A durchaus typisch für das Servo ist. Demnach enthält die Filterung mit 100 Hz deutlich aussagekräftigere Signale, besonders in Hinblick auf eine mögliche Überlastung.
  - ⇒ Auch der Einschalt-Stoß bei ca. 10 s führt zu einem sehr hohen Spitzenstrom.
- Bei den anderen Servos sind sehr ähnliche Ergebnisse, die hier nicht gezeigt werden müssen. Die Bilder zeigen, dass eigentlich erst die Erfassung der Min-Max-Werte die tieferen Einblicke in das Kurzzeit-Verhalten der Servos, aber auch des Bordnetzes allgemein ermöglichen.

Als nächste Stufe der gesteigerten Komplexität wird jetzt untersucht, wie sich das Servo-Verhalten durch eine mechanische Last verändert. Dazu wird eine Gewichtskraft an den Servo-Abtrieb angeschlossen, die in etwa einem Viertel des Lastmomentes aus den jeweiligen Servo-Datenblättern entspricht.

Die Last hemmt die Bewegung des Abtriebs in der einen Halb-Periode, während sie in der anderen Halb-Periode unterstützt. Auch hier wird (zur Vereinfachung) nur das Strom-Signal betrachtet.



Zum einfacheren Vergleich wird der erste Zyklus ohne die Last durchgeführt. Danach wird die Last angeschlossen, sodass der zweite und dritte Zyklus dann mit Belastung erfolgt. Dazu wird einfach das Gewicht während des ersten Zyklus angehoben und dann (nach ca. 45

bis 50 s) abgesenkt, sodass es wirksam wird. In den Diagrammen sieht man zu diesem Zeitpunkt einen Anstieg im Strom-Signal, der dann mehr oder weniger als Offset für die restliche Messung erhalten bleibt. Kurz vor Ende der Messung (nach ca. 170 s) wird die Last wieder angehoben und die Servos entlastet.

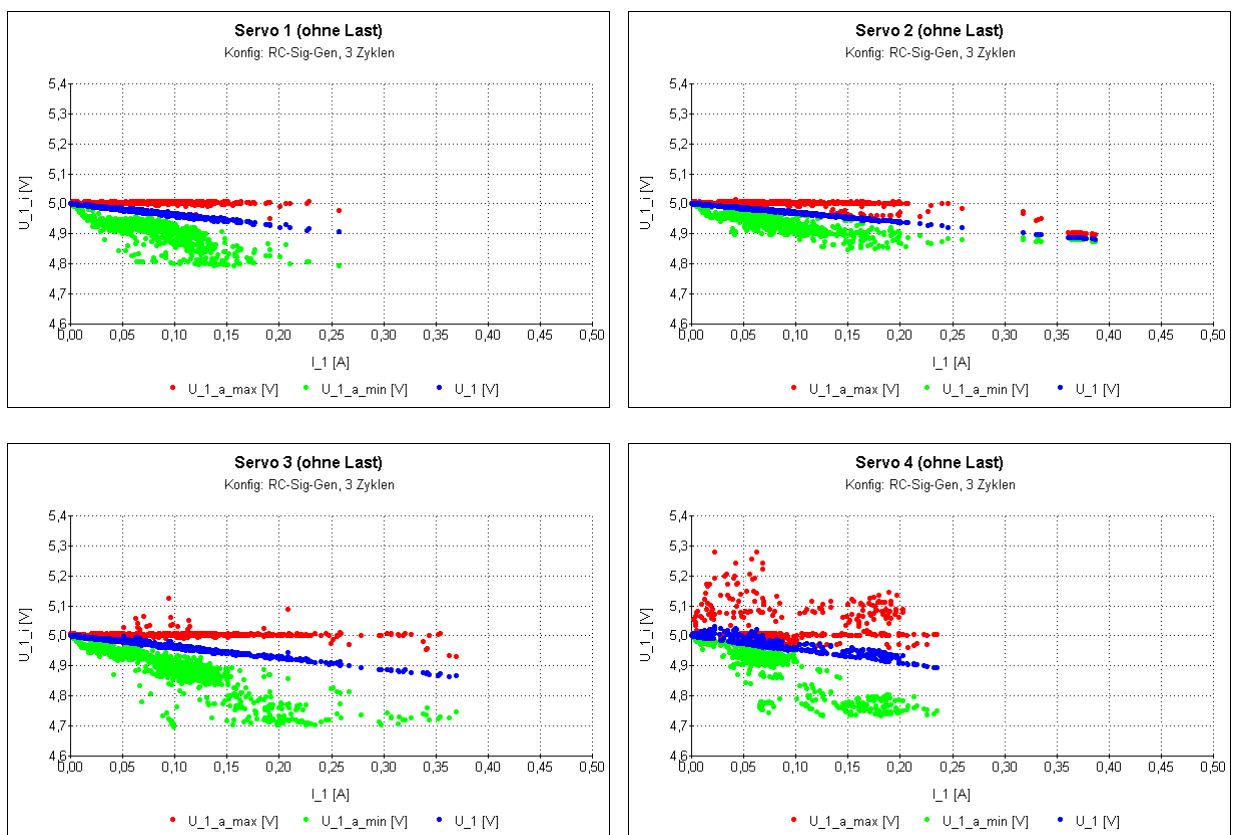
#### Beobachtungen

- Die beiden Servos unterscheiden sich schon deutlich voneinander, obwohl sie von der Bauart her sehr ähnlich etikettiert werden („5gr-Servo“).
- Zwischen dem Zyklus 2 und 3 (also 115 s bis 125 s) werden die Servos statisch belastet. Das eine Servo (Servo 2) reagiert grundsätzlich mit einem Basis-Strom von 0.06 A, der durch die Belastung nicht wesentlich ansteigt. Das andere Servo (Servo 3) zeigt keinen ausgeprägten Haltestrom; dies deutet darauf hin, dass die innere Reibung schon zum Halten reicht. Da dieses Servo nicht selbsthemmend ist (man kann es von Hand durchdrehen), spricht einiges für eine Getriebe-Verformung.
- Bei beiden Servos steigt das Strom-Signal beim Heben der Last an, während er beim Senken der Last (fast) verschwindet. Das sieht man besonders gut beim dritten Signal (dem feinen Dreieck-Signal).
- Die Maximal-Werte steigen nur im Fall des dritten Signals (dem feinen Dreiecks-Signal) etwas an. Das zeigt, dass beim ersten und dem zweiten Signal (also dem Sprung-Signal und dem gestuften Dreieck-Signal) auch ohne Last der maximal mögliche Strom fließt. Wie die Oszilloskop-Messungen gezeigt haben, steigt bloß die Dauer des hohen Strom-Signals an.

## ROSNER-TDL

In den Übersichts-Diagrammen, die neben den Strom-Zeitverläufen auch die Servo-Spannungs-Zeitverläufe zeigten, war zu sehen, dass auch die Spannung nicht konstant bleibt. Trägt man die Spannung über dem Strom auf, ergeben sich die folgenden Zusammenhänge.

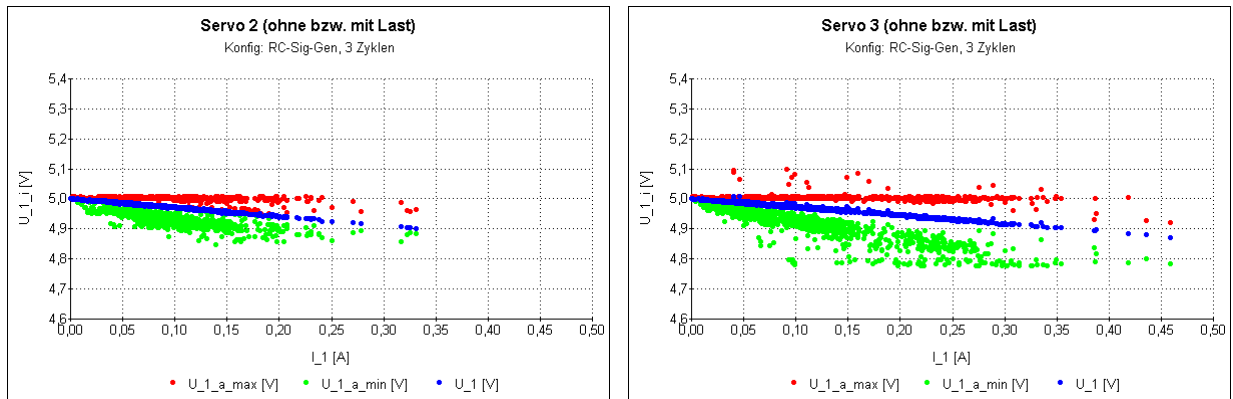
In blau sind die Mittelwerte der Spannung aufgetragen, während rot bzw. grün wie bisher die Extremwerte darstellen.



Bei allen vier Servos liegen die Mittelwerte (blau) sehr eng um eine Gerade. Diese Betriebs-Gerade entspricht einem Widerstand von 0.4 Ohm. Ein solcher Widerstand ist im wesentlichen auf die Verkabelung (Steckverbindungen, lange Kabel) zurückzuführen. Der eigentliche Zahlenwert ist dabei gar nicht so wichtig. Aber alle Abweichungen von dieser Geraden haben einen tieferen Sinn, der auf Veränderungen im Bordnetz hindeutet, was wiederum ein Zuverlässigkeits-Indiz darstellen kann.

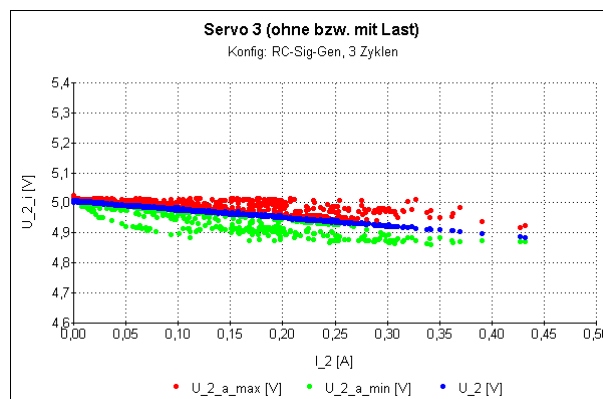
## ROSNER-TDL

Es stellt sich die Frage, in wie weit sich die Betriebs-Gerade verändert, wenn mechanische Belastungen wirken. Dazu werden die entsprechenden Messungen ausgewertet.



Es zeigt sich die identische Betriebs-Gerade.

Natürlich ist zu überprüfen, wie sich die Filterung auf die Betriebs-Gerade auswirkt. Dazu werden im Gegensatz zu den bisher gezeigten Betriebs-Geraden-Diagrammen, die mit den 100Hz-Signalen entstanden (Index "\_1"), jetzt die mit 10 Hz gefilterten Signale (Index "\_2") aufgetragen.



Offensichtlich hängt die Betriebs-Gerade weder vom Servo-Typ ab, aber auch nicht von der Last oder von der Filter-Frequenz. Damit ist eine universelle konstante Größe gefunden, die charakteristisch für das Bordnetz ist und auch nur vom Bordnetz beeinflusst wird.

Ein hoher Stromwert weist **eventuell** auf ein Servo-Problem hin; ein Spannungs-Einbruch ohne einen hohen Stromwert weist dagegen **sicher** auf ein Bordnetz-Problem hin. Deswegen ist die gleichzeitige kontinuierliche Erfassung und Auswertung von Spannung und Strom die Grundlage für die Beurteilung des Betriebsverhaltens der Servos und des Bordnetzes.

#### Zusammenfassung

- Es wurden Untersuchungen an 4 Servos präsentiert, die sowohl charakteristische Eigenschaften (und Unterschiede) der Servos gezeigt haben, aber auch charakteristische Eigenschaften des Bordnetzes.
- Die Untersuchungen wurden durch eine kompakte mobile Flug-Daten-Aufzeichnung vorgenommen, die alle 100 ms einen mehrkanaligen Datensatz abspeichert. Jeder Datensatz enthält neben einem gemittelten Messwert auch die während des Mess-Intervalls (also 100 ms) aufgetretenen Extremwerte.
- Die Aufzeichnung der Extremwerte zusätzlich zu den Mittelwerten liefert (bei sinnvoller Filterung) wichtige Einblicke in das Betriebsverhalten der Servos, aber auch in das Verhalten des Bordnetzes.
- Aus den Messdaten kann man einen Spannungs-Strom-Zusammenhang ableiten (Betriebs-Gerade), der in gewisser Weise den Normal-Zustand darstellt. Massive Abweichungen von dieser Geraden deuten auf kritische Veränderungen hin.
- Für eine Überwachung der Zuverlässigkeit ist es sicher interessant, Zeitverläufe zu erfassen. Aber man kann mit der Betriebsgeraden ein einfacheres Kriterium einsetzen, das sehr einfach abgeleitet werden kann. Erst im zweiten Schritt wird dann hinterfragt, ob dieses abweichende Verhalten von den Servos erzeugt wird oder vom Bordnetz.

#### Ausblick

Die eingesetzten Hilfsmittel (RC-Signal-Generator, Flug-Daten-Aufzeichnung, Daten-Aufzeichnungs-Adapter) haben eine beispielhafte Flexibilität und Modularität bewiesen und werden daher auch in anderen Anwendungen bzw. Überwachungs-Aufgaben eingesetzt.

Ein naheliegendes Thema ist die Überwachung des Zentral-Akkus des eingesetzten Flug-Modells, der sowohl den Antriebs-Motor als auch das restliche Bordnetz versorgt. Diese Ergebnisse werden in einem weiteren Bericht beschrieben.

**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)