

Schutz für elektrische Geräte an Bordnetzen

Teil 1: Störungen aus dem Bordnetz

Übersicht

Der Betrieb von elektrischen Geräten (z.B. Stellantrieben) an Bordnetzen wird durch Störungen erschwert. Im vorliegenden ersten Teil werden Störungen beleuchtet, die direkt aus dem Bordnetz stammen und den Betrieb von elektrischen Geräten behindern können. Basierend auf unseren Erfahrungen mit Luftfahrt-Stellantrieben beschreiben wir Ursachen für Störungen, wie sie besonders im Experimental- und Versuchsbetrieb auftreten, sowie bewährte Gegenmaßnahmen.

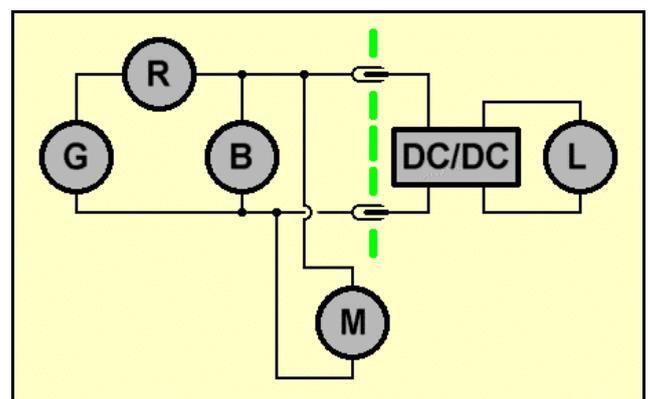
Bei Stellantrieben werden meist zwei unterschiedliche Gerätetypen eingesetzt: das Bediengerät zur Auswertung der Signale aus der Piloten-Eingabe und dem Verhalten der Aktuatoren (mit Leistungen von wenigen Watt) und die Leistungsstufe zum Betrieb der Aktuatoren (mit Leistungen von einigen 100 W). Durch die Unterschiede im Leistungsbedarf ergeben sich auch Unterschiede in den Auswirkungen und den Gegenmaßnahmen.

Die Einsatzbedingungen lassen sich auch auf andere Bereiche übertragen, die auf ein Bordnetz zur Gleichspannungsversorgung angewiesen sind (also mobile Anwendungen ohne Zugang zum stationären Wechselstromnetz).

Typischer Aufbau

Im allgemeinen Fall besteht die elektrische Anlage aus der Spannungsversorgung und den Verbrauchern. Die Spannungsversorgung wiederum besteht vereinfachend aus dem Generator G, der Batterie B und dem dazwischen liegenden Regler R. Die Verbraucher bestehen z.B. aus einem Motor M und einer Last L, die über einen DC/DC-Wandler angeschlossen wird. Im vorliegenden Bericht werden vorwiegend Verbraucher betrachtet, wie sie rechts der grünen Linie angedeutet sind.

Obwohl es sich um Gleichspannungsversorgungen handelt, können erhebliche Spannungsabweichungen (höher, niedriger) bis hin zu Unterbrechungen auftreten. Je nach Einsatzbereich existieren Normen und Vorgaben, die beim Betrieb der Geräte beachtet werden müssen. Übliche Normen sind in der Luftfahrt RTCA DO-160 oder bei Fahrzeugen MIL-STD-704.



Ursache der Störungen

Im Gegensatz zum öffentlichen Wechselspannungsnetz sind die Bordversorgungen im allgemeinen eher knapp bemessen. Das niedrige Spannungsniveau bewirkt gleichzeitig höhere Ströme bei gleicher Leistung als am Wechselspannungsnetz. Bei starken Verbrauchern wird ein Absinken der Versorgungsspannung durch die hohe Belastung einkalkuliert. Davon sind dann auch die anderen Geräte am Bordnetz betroffen.

Die größten Verbraucher sind meist elektrische Motore (z.B. elektrisch angetrieben Hydraulikpumpen für die Fahrwerksbetätigung oder Triebwerks-Anlasser). Werden sie aktiviert, bricht das Bordnetz (besonders unter ungünstigen Umständen wie tiefer Temperatur oder schwache Bordbatterie) mehr oder weniger stark ein. Werden die starken Verbraucher wieder ausgeschaltet, kann die Spannung stark ansteigen, da der Spannungsregler am Generator mit einer gewissen Verzögerung arbeitet.

Häufige Störungen

Batteriegepufferte Bordnetze bewirken oft Störungen an Geräten, deren Wirkung aber zum sicheren Betrieb vermindert werden müssen. Zu den häufigsten Störungen gehören:

- Spannungseinbrüche
- Langsames Einschalten
- Überspannungen

Weitere Belastungen oder Gefährdungen (durch elektrostatische Entladung, Verpolen, falsche Dauerspannung) sollen hier nicht beschrieben werden.

Bedrohung durch Spannungseinbrüche

Die Gegenmaßnahmen bei Spannungseinbrüchen richten sich nach der zu puffenden Energiemenge: bei Kleinverbrauchern reicht ein Kondensator, während bei starken Leistungsverbrauchern eine zweite redundante Energieversorgung einspringen muss.

Zusätzliche Maßnahme zur Reduzierung des Stromverbrauchs wie Abschaltung von größeren Verbrauchern stören den angestrebten Normalbetrieb und sind daher nur für den Notbetrieb sinnvoll.

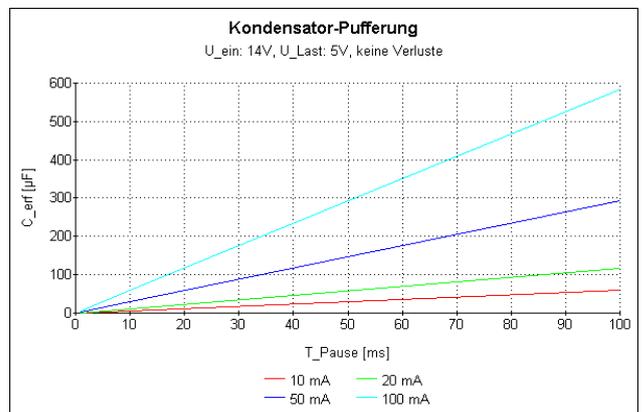
Pufferkondensatoren

Eine häufige Maßnahme gegen Spannungseinbrüche sind unter anderem Pufferkondensatoren.

Unter vereinfachenden Annahmen (z.B. keine Verluste) kann man die erforderliche Kapazität in Abhängigkeit von der zu überbrückenden Pause für verschiedene Lastströme abschätzen. Die Diagramme gelten für eine Lastspannung von 5 V und einer Bordspannung von 14 V bzw. 28 V.

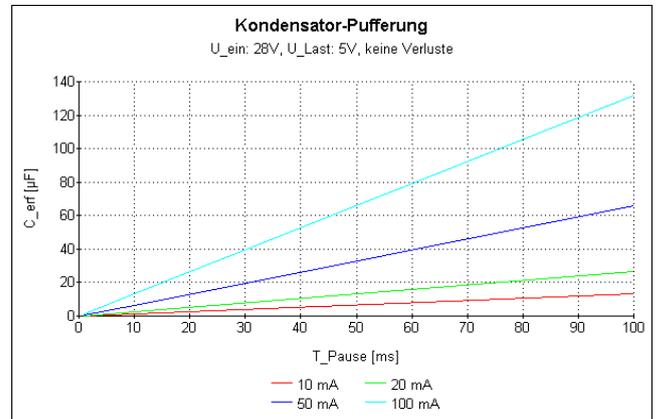
Wie die nebenstehenden Diagramme zeigen, braucht man selbst für kleine Ströme und kurze Unterbrechungen Kondensatoren, deren Volumen oft größer als die zu versorgende Schaltung ist.

Es muss daher ein Kompromiss gesucht werden



ROSNER-TDL

zwischen den Puffer-Anforderungen (Pufferzeit und Pufferstrom) und dem verfügbaren Bauraum, so dass die erforderliche Gesamt-Zuverlässigkeit erreicht werden kann.



Kleinverbraucher (z.B. Sensoren)

Für die Pufferung von kleinen Verbrauchern (wie Sensoren) reichen oft Kondensatoren aus. Häufig werden Elektrolyt-Kondensatoren eingesetzt, da die erforderlichen Kapazitäten viel Platz brauchen. Allerdings sind viele Elektrolyt-Kondensatoren für höhere Zuverlässigkeiten nur bedingt geeignet, so dass dann auf Alternativen zurückgegriffen werden muss, die aber meist noch mehr Platz brauchen.

Andere Technologien (wie Keramik-, Tantal- oder Folien-Kondensatoren) müssen ebenfalls sorgfältig untersucht werden, da manche Technologien zu katastrophalen Schadensfällen (z.B. Kurzschlüssen, Brand) neigen. Auch hier gibt es Gegenmaßnahmen, die allerdings wiederum Bauraum brauchen.

Großverbraucher (z.B. Motore)

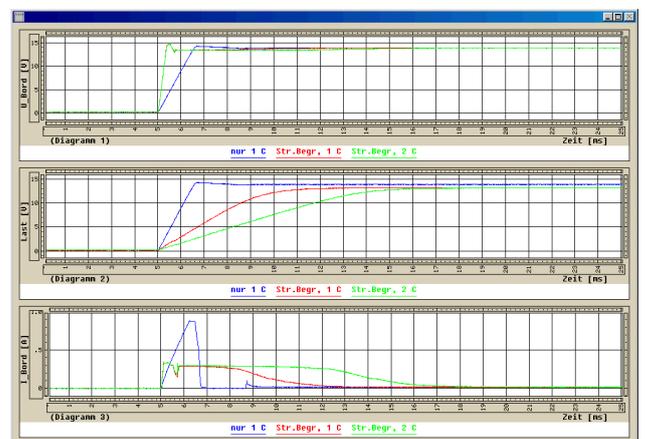
Zum sicheren Betrieb von größeren Verbrauchern (wie Motore) sind für die meisten Anwendungen (bzw. Schutzszenarien) redundante Spannungsversorgungen erforderlich, bestehend aus Backup-Batterien und/oder einem zweiten Generator.

Im Gegensatz zu Kondensatoren stellt dies eine wartungsintensive Lösung dar, die durch die erforderliche Überwachungs- und Umschaltelektronik weiter verkompliziert wird.

Konsequenzen der Pufferkondensatoren

Als Folge der Pufferkondensatoren führt das Einschalten des Geräts zu einem sehr großen Strompuls, durch den die Puffer-Kondensatoren erstmals auf Betriebsspannung geladen werden. Der dabei fließende Strom ist oft um ein Vielfaches höher als der normale Betriebsstrom. Besonders wenn mehrere Geräte an einer gemeinsamen Sicherung angeschlossen sind, kann diese auslösen. Hier spielt auch die Umgebungstemperatur eine Rolle.

Die sinnvolle Gegenmaßnahme ist eine aktive Einschaltstrom-Begrenzung, wie das nebenstehende Bild zeigt. Im Fall „nur 1 C (blau)“ wird ein Puffer-Kondensator direkt geladen. Im Fall „Strom-Begrenzung mit 1 C (rot)“ wird der gleiche Kondensator durch einen begrenzten Strom geladen. Dieser



ROSNER-TDL

Vorgang dauert länger als vorher. Durch einen zweiten Puffer-Kondensator im Fall „Strom-Begrenzung mit 2 C (grün)“ bleibt der maximale Strom gleich.

Bedrohung durch langsames Einschalten

Ein weiterer negativer Nebeneffekt der Puffer-Kondensatoren ist das verzögerte Hochlaufen der eigentlichen Geräte-Versorgungsspannung. Manche ICs oder Sub-Komponenten erwarten einen definierten Einschaltvorgang, der zumindest zügig zu erfolgen hat. Komplexere Baugruppen mit mehreren Versorgungsspannungen erfordern sogar Einschaltsequenzen mit engen Vorgaben zum Hochfahren der Versorgungsspannungen. In vielen Fällen hilft das schlagartige Einschalten bei ausreichend hoher Spannung. Dazu wird die anliegende Zwischenversorgung überwacht und erst dann zum eigentlichen Gerät durchgeschaltet, wenn sie ausreichend hoch ist (UVLO: under-voltage lock-out).

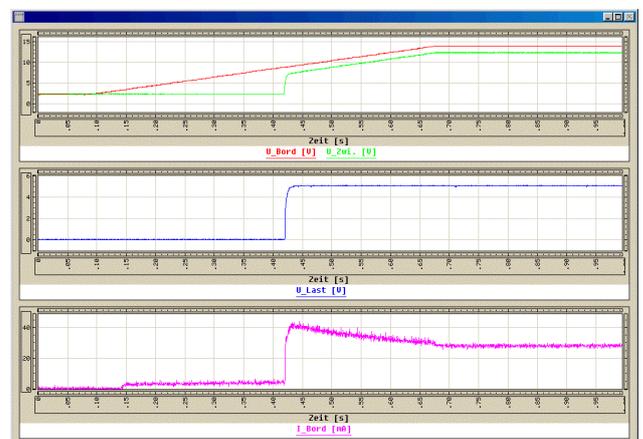
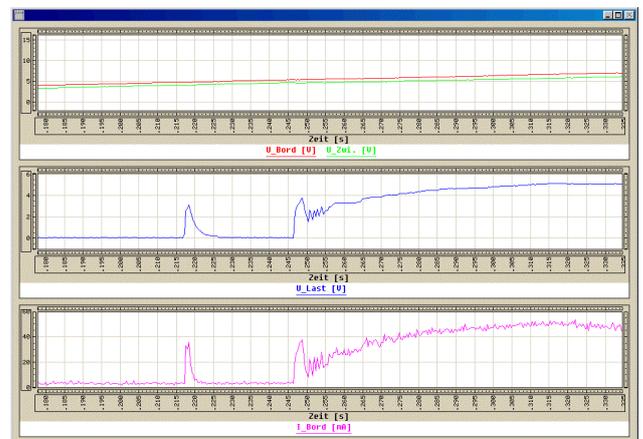
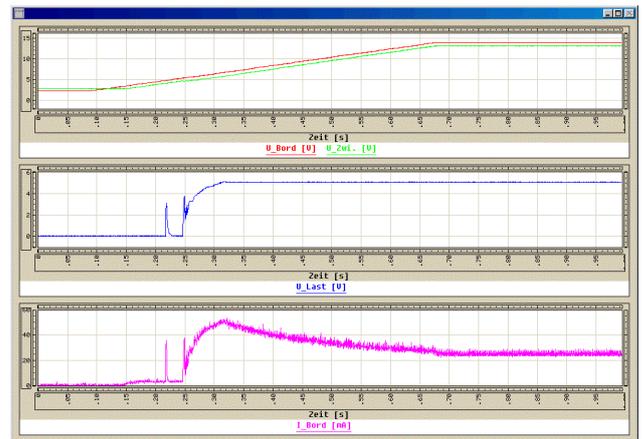
Die nebenstehenden Bilder demonstrieren das Problem anhand von Messungen an einem DC-DC-Wandler:

Im ersten Bild wird die Bordspannung langsam hochgefahren (rote Kurve). Der angeschlossene DC-DC-Wandler springt kurz an (sichtbar an der Lastspannung [blau]), um dann wieder auszugehen. Erst bei höherer Bordspannung springt der DC-DC-Wandler zum zweiten Mal an und bleibt eingeschaltet.

Das zweite Bild ist eine Ausschnittsvergrößerung des ersten Bilds. Hier sieht man, dass der DC-DC-Wandler für einige Millisekunden anspringt, in denen auch angeschlossene Geräte in einen unsicheren Zustand versetzt werden können.

Im dritten Bild sorgt eine Unterspannungsüberwachung dafür, dass die Bordspannung erst dann zum angeschlossenen DC-DC-Wandler durchgeschaltet wird, wenn sie ausreichend hoch ist. Die Schwelle hängt vom angeschlossenen DC-DC-Wandler ab. Die Lastspannung von 5V liegt ohne Schwankungen sofort an.

Die hier dokumentierte Empfindlichkeit des DC-DC-Wandlers auf langsames Einschalten wird im Datenblatt nicht erwähnt und war Ursache für eine längere Fehlersuche. Umso wichtiger sind die hier vorgestellten Tests und die Gegenmaßnahmen.



Beispiel: Betrieb von Motoren

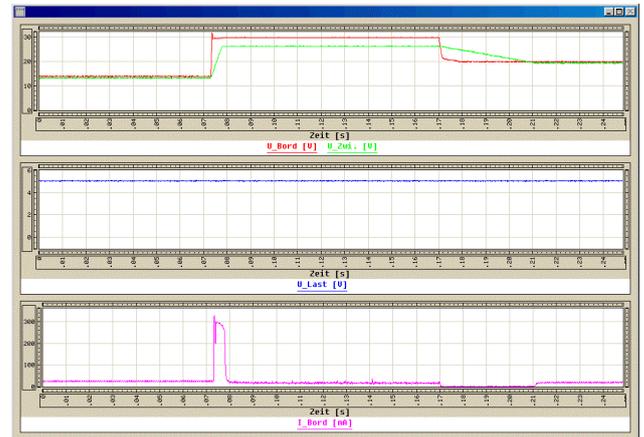
Wie schon festgestellt, reichen bei Motoren (z.B. als Teil eines Stellantriebs in der Flugsteuerung) Elektrolyt-Kondensatoren zur Pufferung nicht mehr aus; statt dessen muss auf ein zweites Bordnetz (Generator und/oder Akkus) umgeschaltet werden. Allerdings bedeuten die zum Betrieb erforderlichen Zwischenkreis-Kondensatoren die gleiche Gefahr beim Einschalten und müssen daher kontrolliert geladen werden.

Auch hier liegt der ungeschützte Einschaltstrom bei einem Vielfachen des Betriebsstroms, da sonst der sichere Motorbetrieb nicht möglich ist. Ohne Einschaltstrom-Begrenzung kommt es auch hier potentiell zu Überbelastungen und damit zu Ausfällen.

Bedrohung durch Überspannungen

Es treten bei Generator-Batterie-Kombinationen als Bordversorgung oft kurzzeitige Überspannungen, die auch ein Mehrfaches der Nennspannung haben können. Erfahrungen haben gezeigt, dass die Überspannungen ohne Gegenmaßnahmen zu katastrophalen Schäden führen können. Es haben sich Schaltungen bewährt, die bei erhöhten Spannungen als Spannungsbegrenzung wirken, aber im normalen Betrieb nicht weiter auffallen.

Im nebenstehenden Bild wird wieder der DC-DC-Wandler betriebe. So steigt die Bordspannung (rote Kurve) von 14 V auf 30 V an (nach RTCA DO-160 „Abnormal surge voltage“). Dieser Wert ist für den DC-DC-Wandler zu hoch. Die Schutzschaltung begrenzt die Spannung auf 27 V (grüne Kurve). Die Lastspannung (blaue Kurve) bleibt die ganze Zeit konstant. Zu Beginn der Überspannung steigt auch der Strom (magenta Kurve) stark an, wird aber durch die Strombegrenzung wieder entschärft.



Schon bei diesem relativ kleinen Verbraucher ist eine aktive Schutzschaltung erforderlich. Der Einsatz von passiven Komponenten (wie Zener-Dioden, o.ä.) reicht wegen der Verlustleistung und Störungs-Dauer nicht aus.

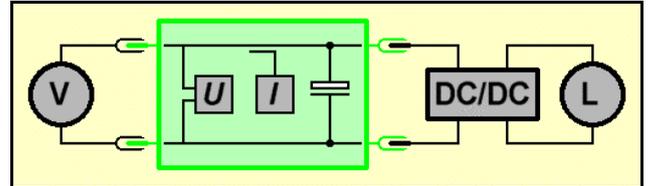
Wenn wir als Stellsystem-Entwickler die Energiezufuhr des Versorgungsnetzes nicht beeinflussen können (und dies ist der übliche Fall), dann muss die überschüssige Energie von der Schutzschaltung aufgenommen werden. Man kann sie in Kondensatoren puffern (mit den geschilderten Problemen). Meist wird sie in Wärme umgewandelt. Die Wärmekapazität bestimmt dann die Einsatzdauer, aber auch die Einsatzhäufigkeit.

Zum Eigenschutz sind Temperatursensoren hilfreich, besonders wenn mit häufigen Überlastungen zu rechnen ist. Besonders im Experimental- und Versuchsbetrieb erscheint dies angeraten.

Zur Überprüfung sollten frühzeitige Labortests erfolgen, wie das gezeigte Beispiel unterstreicht.

Technische Umsetzung

Im Idealfall werden die erforderlichen Schutzmaßnahmen schon in den Geräten untergebracht. Man kann aber auch ein Schutzgerät zwischen das Bordnetz und das eigentliche Gerät schalten. Gerade bei Standard-Geräten (COTS: „commercially off the shelf“) ist oft kein spezifischer oder nicht ausreichender Schutz vorhanden, wie die oben gezeigten Messungen belegen.



Das Schutzgerät kann nachgerüstet werden und überwacht sowohl die Bordspannung als auch den Strom aus dem Bordnetz. Dabei speist es auch den internen Puffer-Kondensator. Damit können die genannten wichtigsten Bordnetz-Störungen abgefangen werden. Aber auch weitere Störungen wie Kurzschlüsse in der Last werden gerade beim Experimental-Betrieb entschärft. Zur Anzeige der Überlast haben sich einfache LEDs bewährt, so dass der Bediener eine direkte Rückmeldung erhält.

Bei der Umsetzung kann man zwar interessante integrierte Spezialbausteine verwenden. Allerdings ist deren langjährige Verfügbarkeit nicht immer gesichert, schon gar nicht für den Experimentalbetrieb. Daher drängt sich die Umsetzung als diskrete Schaltung auf.

Die diskrete Bauform ermöglicht eine Anpassung an die Schutz Aufgabe, sowohl hinsichtlich der Bedrohung („Reinheit“ der Bordnetz-Versorgung), als auch des zu schützenden Geräts (Strombedarf) und kann so die extremen thermischen Belastungen reduzieren, die beim Schutz auftreten.

Beispiel: Flugsteuerungs-System

Zur Verdeutlichung des technischen Aufwands soll abschließend noch gezeigt werden, wie erst die Schutzmaßnahmen mit der eigentlichen Stellantriebs-Elektronik, dem Motor-Controller, ein zuverlässiges Gerät ermöglichen. Nicht nur der technische Entwicklungsaufwand ist nennenswert; auch der Platzbedarf

ist spürbar, sodass man frühzeitig schon sichere Abschätzungen braucht, wie groß die Schutzmaßnahmen werden und wo sie überhaupt untergebracht werden können (bzw. müssen).

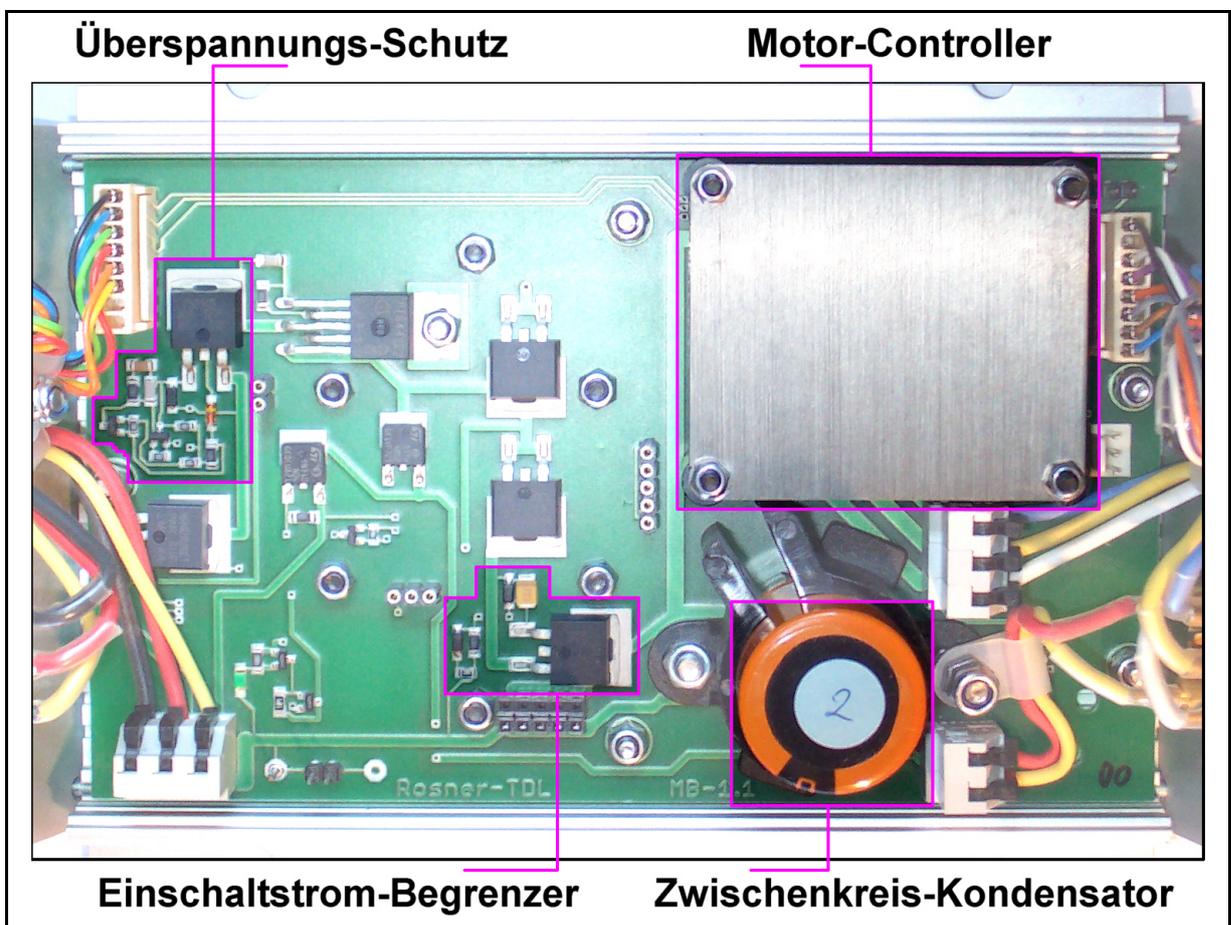
Das Beispiel macht deutlich, dass die Umsetzung der Schutzmaßnahmen gravierende Auswirkungen auf den Entwicklungs-Aufwand und auch den Platzbedarf haben, denen man sich aber frühzeitig stellen sollte.

Gerade der Platz ist in Luftfahrt-Anwendungen ein kostbares Gut, mit dem sparsam umzugehen ist, immer im Hinblick auf die geforderte Zuverlässigkeit.

ROSNER-TDL

Das Foto zeigt eine wesentliche Platine aus der Stellantriebs-Elektronik für einen Aktuator (mit BLDC-Motor mit Resolver-Kommutierung), der in einem Flugsteuerungs-System (Forschungsprogramm zusammen mit Stemme AG, Strausberg) eingesetzt wird. Im Foto sind vier Bereiche besonders hervorgehoben:

1. Der Kern der Stellantriebs-Elektronik: der Motor-Controller,
2. Der Zwischenkreis-Kondensator, der im Prinzip auch eine Schutzmaßnahme darstellt,
3. Der Überspannungs-Schutz aktive Baugruppe gegen Störspitzen aus dem Bordnetz
4. Der Einschaltstrom-Begrenzer: wegen des großen Zwischenkreis-Kondensators zwingend erforderlich.



Einige der anderen Bauteile stellen ebenfalls Schutzmaßnahmen dar, die aber in diesem Bericht nicht besprochen wurden.

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
Internet: www.ROSNER-TDL.de