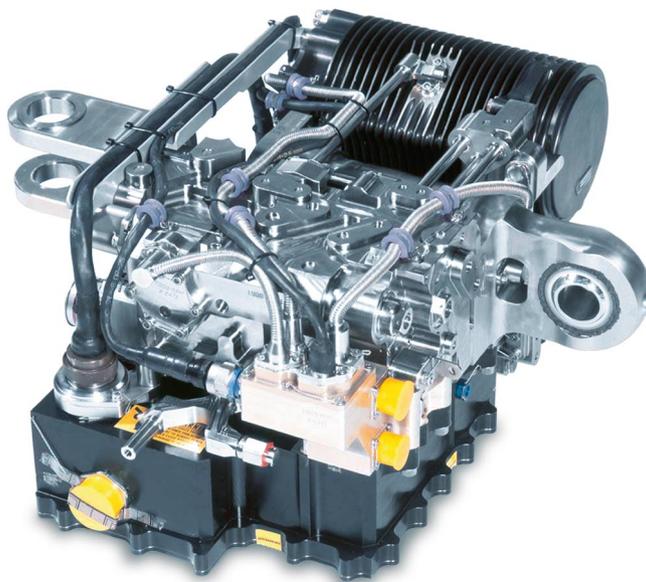




Neue Wege bei der Entstörung von Flugzeug-Bordnetzen durch aktive Netzfilter

# Unter Strom

Gewichtsreduktion bei Flugzeugen senkt den Kerosinverbrauch und belastet damit geringer die Umwelt. Eine Maßnahme ist der Einsatz von leichten, elektrischen Komponenten anstelle schwerer, hydraulischer und pneumatischer Systeme. Voraussetzung hierfür ist eine hochwertige Stromversorgung des Flugzeuges, die durch eine leistungsfähige Entstörung des Bordnetzes gewährleistet wird. Die Liebherr-Elektronik GmbH hat mit Hilfe von dSPACE-Werkzeugen einen aktiven Netzfilter-Prototyp als Lösungsansatz entwickelt.



*Aktive Netzfilter werden zukünftig unter anderem im „Airbus A380 Electrical-Back Up Hydraulic Actuator“ eingesetzt.*

#### **Herausforderung: hochqualitative Stromversorgung an Bord**

Jeder kennt die Geräusche, die ein Handy in der Nähe eines Lautsprechers verursacht, sobald es zum Beispiel eine SMS empfängt. Neben diesen akustischen Störungen gibt es auch nicht hörbare Störungen, die beispielsweise von Handyladegeräten verursacht werden. Diese ziehen einen nicht sinusförmigen Strom aus dem Netz und verzerren die Spannung (Abbildung 1). Dadurch entstehen zusätzlich zur Grundschwingung harmonische Oberschwingungen, die negative Auswirkungen auf das gesamte Stromnetz haben. Sie führen zu erhöhten Verlusten in Transformatoren, Generatoren und Leitungen, stören empfindliche Geräte und können sogar zu einer Netzüberlastung führen. Was im Haushalt meist harmlos ist, kann im Flugzeug zu folgenreichen Fehlfunktionen führen. Vermeiden lassen sich diese Effekte durch den Einsatz eines aktiven Netzfilters, der dafür sorgt, dass derartige Verzerrungen gar nicht erst ins Bordnetz gelangen.

#### **Entstörung durch Filter**

Elektrische Energie wird im Flugzeug mit Drehstrom-Generatoren erzeugt,

#### **Der „Airbus A380 Electrical-Back Up Hydraulic Actuator“**

ist ein elektrischer hydrostatischer Aktuator als Backup-Ausführung. Im Normalbetrieb ist die Pumpe ausgeschaltet und der Aktuator wird über den flugzeuginternen Hydraulikdruck bewegt. Sollten beide Hydraulikkreisläufe des Flugzeuges ausfallen, springt die elektrische Pumpe ein und erzeugt direkt am Aktuator den erforderlichen Öldruck. Die Liebherr-Elektronik GmbH entwickelt und produziert Teile dieser Steuerungs- und Leistungselektronik und setzt dazu Werkzeuge von dSPACE ein. Der aktive Netzfilter wird künftig Bestandteil dieser Elektronik sein und verhindern, dass Störungen ins Flugzeugnetz gelangen, die bei der Gleichrichtung der dreiphasigen Bordnetzspannung variabler Frequenz (360 bis 800 Hz) entstehen. Hauptintention für den aktiven Filter ist die Verringerung von Masse und Volumen der Leistungselektronik und damit auch die Verringerung des Kerosinverbrauches.

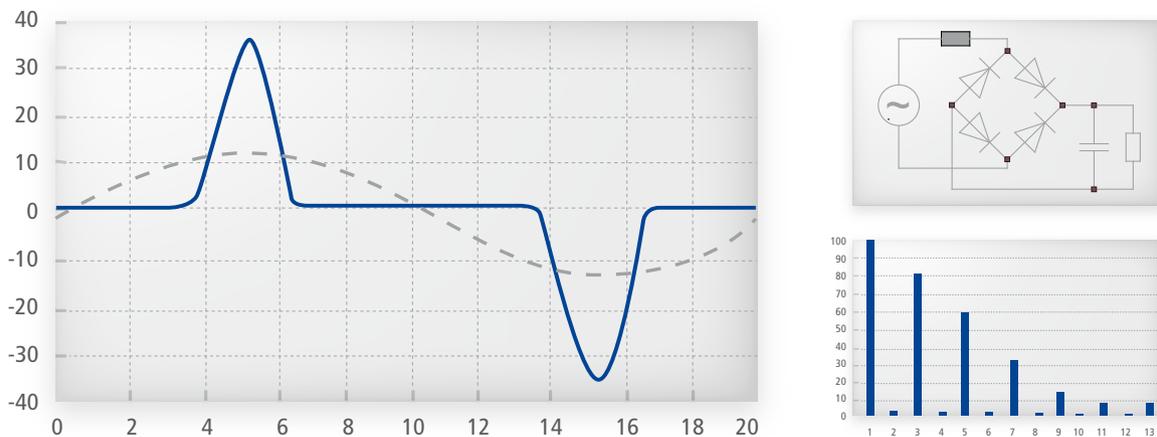


Abbildung 1: Der Gleichrichter (rechts oben) zieht einen nicht sinusförmigen Strom aus dem Netz. Dieser verursacht zusätzliche Verluste in Transformatoren und „verbeult“ die Phasenspannung. Der ideale Strom ist gestrichelt dargestellt (links). Das Spektrum zeigt den großen Oberschwingungsgehalt (rechts unten).

„Mit dem dSPACE Prototyping-System gelang die Entwicklung eines voll funktionsfähigen aktiven Netzfilters für Flugzeuge in wenigen Monaten.“

Sebastian Liebig, Liebherr-Elektronik GmbH

die von den Turbinen angetrieben werden. Jeder elektrische Verbraucher muss aus dem dreiphasigen Netz variabler Frequenz (360 bis 800 Hz) zunächst eine Gleichspannung erzeugen. Dies geschieht bisher mit 12-Puls-Gleichrichtern (spezieller Gleichrichter mit einem 12-Puls-Transformator) und aktiver Leistungsfaktorkorrektur (Power Factor Correction, PFC). Eine überlegene Alternative zur PFC ist der aktive Netzfilter, der je nach Ausführung einzelne Harmonische sowie Blindleistung, Spannungsasymmetrien oder sogar Überspannungen kompensieren und ausregeln kann.

entstören. Dies ist erheblich wirtschaftlicher als der Einbau eines eigenen Filters pro Gerät. Weiterhin muss der aktive Netzfilter nur für die zu kompensierenden Ströme ausgelegt sein, wodurch Baugröße und Gewicht kleiner ausfallen als bei einer aktiven PFC, die für den kompletten Strom ausgelegt wird. Darüber hinaus erlauben die hohen Schaltfrequenzen Drosseln mit kompaktem Design.

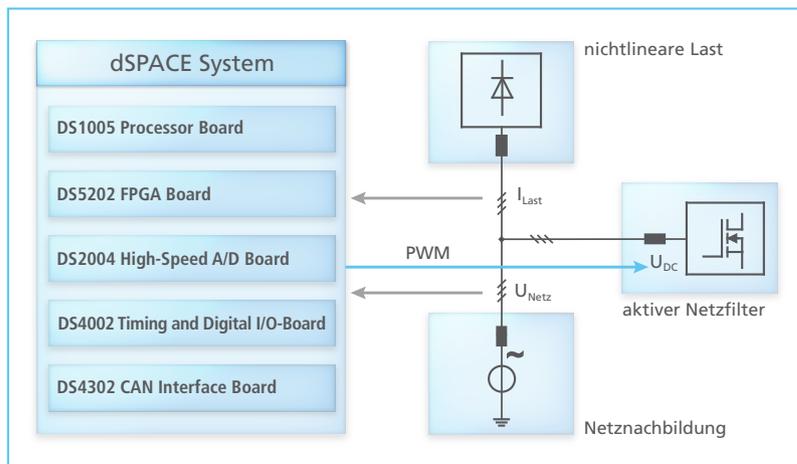
**Prototyp-Entwicklung mit dSPACE-Prozessorboard**

Zur Realisierung des aktiven Netzfilters ist vor allem leistungsfähige Hardware nötig, um die hohen Schaltfrequenzen von bis zu 100 kHz zu realisieren und die aufwändigen Regelalgorithmen in Echtzeit zu berechnen. Das dSPACE-System (Abbildung 2) besteht aus dem DS1005 Processor Board und meh-

**Aktive Netzfilter zur Verbesserung der Netzqualität**

Aktive Netzfilter wurden im Flugzeug bisher nicht eingesetzt, weil ihre Regelung wegen der hohen Bordnetz-frequenz von bis zu 800 Hz (relevante Oberschwingungen bis zu 10 kHz) sehr schnell erfolgen muss. Neue schnell schaltende Halbleiter machen einen Einsatz jedoch inzwischen interessant. Besonders reizvoll ist die Möglichkeit, mit einem aktiven Netzfilter mehrere Geräte gleichzeitig zu

Abbildung 2: Der Laboraufbau besteht aus einer dreiphasigen Netznachbildung, einem nicht-linearen Verbraucher (Gleichrichter mit ohmscher Last), dem aktiven Netzfilter sowie der dSPACE Expansion Box, die per Laptop und ControlDesk bedient wird.



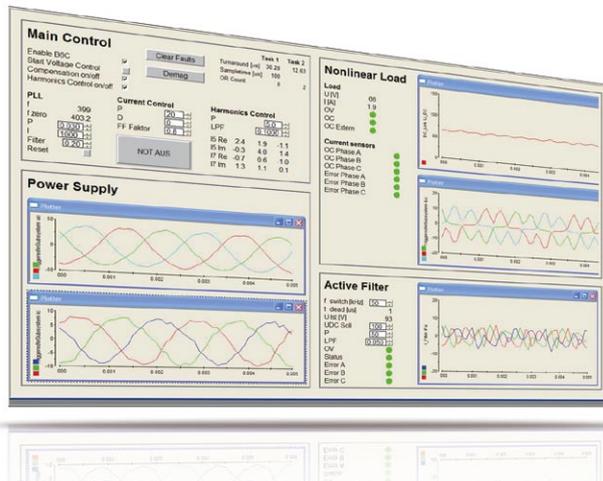


Abbildung 3: ControlDesk-Layout mit Darstellung der gemessenen Spannungen und Ströme sowie der Korrektursignale.

renen I/O-Boards. Darunter ist auch das neue DS5202 FPGA Base Board mit dem Piggyback-Modul EV1048, das eine PWM (Pulsweitenmodulation)-synchroner Pulsmittenabtastung der getakteten Ströme und Spannungen ermöglicht. Weitere analoge Signale wie die Lastströme  $I_{\text{last}}$  oder Temperatursensoren werden über das DS2004 High-Speed AD Board eingelesen. Die bisher erreichte Schaltfrequenz liegt bei gut 50 kHz, d.h. der komplette Regelalgorithmus wird in weniger als 20  $\mu\text{s}$  durchgerechnet. Dank Multitasking gelingt es, die Rechenleistung flexibel zu verteilen, z. B. weniger wichtige digitale I/O-Signale und Temperatursignale deutlich langsamer

auszuwerten und im Gegenzug wichtigeren Tasks zusätzliche Ressourcen einzuräumen. Nach dem Reglerentwurf mit MATLAB® lassen sich im laufenden Betrieb mit Hilfe von dSPACE ControlDesk® alle Sensorsignale und beliebige virtuelle Variablen beobachten, was die Fehlersuche und Optimierung von Parametern äußerst komfortabel gestaltet (Abbildung 3).

### Ergebnis

Mit Hilfe des dSPACE-Prototyping-Systems gelingt der Nachweis, dass ein aktiver Netzfilter trotz variabler Bordnetzfrequenz zuverlässig eingesetzt werden kann. Die harmonischen Oberschwingungen werden

erfolgreich kompensiert. Messungen bestätigen, dass ein Gerät mit aktivem Netzfilter die relevanten Normgrenzen einhält. Damit ist eine wichtige Hürde auf dem langen Weg zur Luftfahrtzulassung genommen.

### Ausblick

Der nächste Schritt ist die Optimierung des Algorithmus, um die Schaltfrequenz von 50 kHz weiter zu erhöhen. Dies ist für die Verkleinerung der passiven Bauelemente, wie Induktivitäten und Zwischenkreiskondensatoren, sowie zur Erhöhung der Sicherheit während des Betriebs wichtig. Je öfter das Modell durchgerechnet wird, desto besser können unerwartete Ereignisse wie Spannungstransienten oder Phasenausfälle erkannt und ausgeglichen werden. Eine solche Robustheit ist wegen der hohen Sicherheitsansprüche in der Luftfahrt von entscheidender Bedeutung. Für die Serienanwendung des aktiven Filters wird ein digitaler Signalprozessor (DSP) von Texas Instruments eingesetzt. Die Umsetzung der entwickelten Algorithmen in Serienscode für diesen DSP erfolgt mit dSPACE TargetLink®. ■

Alfred Engler, Sebastian Liebig  
Liebherr-Elektronik GmbH

Alfred Engler  
ist Leiter der Vorentwicklung – EV  
bei der Liebherr-Elektronik GmbH  
in Lindau, Deutschland.



Sebastian Liebig  
ist Ingenieur der Praxisorientierten  
Forschung & Vorentwicklung bei der Liebherr-  
Elektronik GmbH in Lindau, Deutschland.



## Fazit

- Die Elektrifizierung der Flugzeuge erfordert neue Maßnahmen für eine hochwertige Bordnetzspannung.
- Ein aktiver Netzfilter ist für den Einsatz in Bordnetz-Architekturen in Flugzeugen geeignet und hält die vorgegebenen Normgrenzen ein.
- Der Startschuss für die Entwicklung eines seriennahen Prototyps voller Leistung mit dSPACE TargetLink ist gefallen.