

# Leitungsgebundene Störungen eines Flugzeugantriebsstrangs unter asymmetrischer Last

Dr.-Ing. Robert Keibel, Airbus, Deutschland  
Dr.-Ing. Thiemo Stadler, Airbus, Deutschland  
M. Sc. Maximilian Schubert, DLR, Deutschland

## 1 Einleitung

In der Luftfahrt ist es notwendig, Situationen zu beherrschen, die in einem stationären Betrieb eines Antriebsstrangs eine untergeordnete Rolle spielen. Dazu gehört die Betrachtung systematischer Störursachen, aber auch die Betrachtung von Fehlerfällen und deren Auswirkung. Dieser Beitrag erläutert angesichts der absehbaren Elektrifizierung der Luftfahrt, wie das elektromagnetische Störpotenzial eines elektrischen Antriebsstrangs entsteht und inwiefern es durch existierende Luftfahrtstandards [1] abgesichert ist. Er benennt die systematische Ursache von Störspannungen und die Auswirkung von Netzformen und Asymmetrien der Last. Die Auswahl der Umrichter topologie, die Wahl der Netzform, und im mehrphasigen Antriebsstrang die Betrachtung von Asymmetrien und damit auch seltene Fehlerfällen, die elektrisch tolerierbar sein können, beeinflussen das Maß der zu beherrschenden Störwirkung. Das Störpotenzial ist eine Folge von Architekturentscheidungen, die früh im Entwicklungsprozess getroffen werden sollten.

## 2 Unvermeidliches Störpotenzial

Ein Antriebsstrang im Flugzeug muss Leistungen bis zum Megawatt übertragen können und schaltet im Umrichter Spannungen in der Größenordnung von Kilovolt. Im Sternpunkt einer Motorlast entstehen dadurch je nach Netzform hochfrequente Gleichtaktstörspannungen in der Größenordnung der Versorgungsspannung oder erhebliche Gleichtaktstörströme. Im vorliegenden Beispiel wird die Gleichtaktstöremission auf den Leitungen zwischen Umrichter und Motor dreiphasig betrachtet. Die prinzipielle Anordnung aus Batterie, Umrichter, Leitung und Motor lässt sich in ein vereinfachtes Schaltbild übertragen, siehe Bild 1. Aus dem vereinfachten Ersatzschaltbild ergibt sich die Gleichtaktspannung:

$$u_{cm} = \frac{1}{3} \cdot (u_{10} + u_{20} + u_{30}) = \frac{1}{3} \cdot \left( u_{10}(t) + u_{10}(t) \cdot e^{-\frac{j2}{3}\pi} + u_{10}(t) \cdot e^{-\frac{j4}{3}\pi} \right) \quad (1)$$

für eine gegenüber Referenzpotential hochohmigen Sternpunktimpedanz  $Z_{CM}$ . Beim pulswidenmodulierten Signal  $u_{10}(t)$  eines Umrichters handelt es sich um eine Kombination von Rechtecksignalen. Die Summanden der Fourierreihenentwicklung -- (siehe Gl. (2)) -- von  $u_{10}(t)$  mit  $k \in \{3, 9, 15, \dots\}$  heben einander bei  $120^\circ$  oder  $240^\circ$  Phasenverschiebung nicht auf, denn  $n$ -fache von drei überlagern sich wegen  $3 \cdot n \cdot 120^\circ = n \cdot 360^\circ$  konstruktiv. Gl. (1) führt im symmetrischen 3-Phasensystem immer zu einer Gleichtaktstörspannung, sobald Pulsweiten- oder Rechteckmodulation vorliegt:

$$\begin{aligned} u_{10}(t) &= \sum_{k=0}^{\infty} U_{10,k} \cdot e^{-j(k \cdot \omega_1 t)} \\ u_{20}(t) &= \sum_{k=0}^{\infty} U_{10,k} \cdot e^{-j(k \cdot \omega_1 t - \frac{2}{3}\pi)} \\ u_{30}(t) &= \sum_{k=0}^{\infty} U_{10,k} \cdot e^{-j(k \cdot \omega_1 t - \frac{4}{3}\pi)} \end{aligned} \quad (2)$$

Analog entstehen je nach Netzform Gleichtaktstörströme, die von der Impedanz des Sternpunkts gegenüber dem Bezugspotenzial, und damit von der Netzform abhängen.

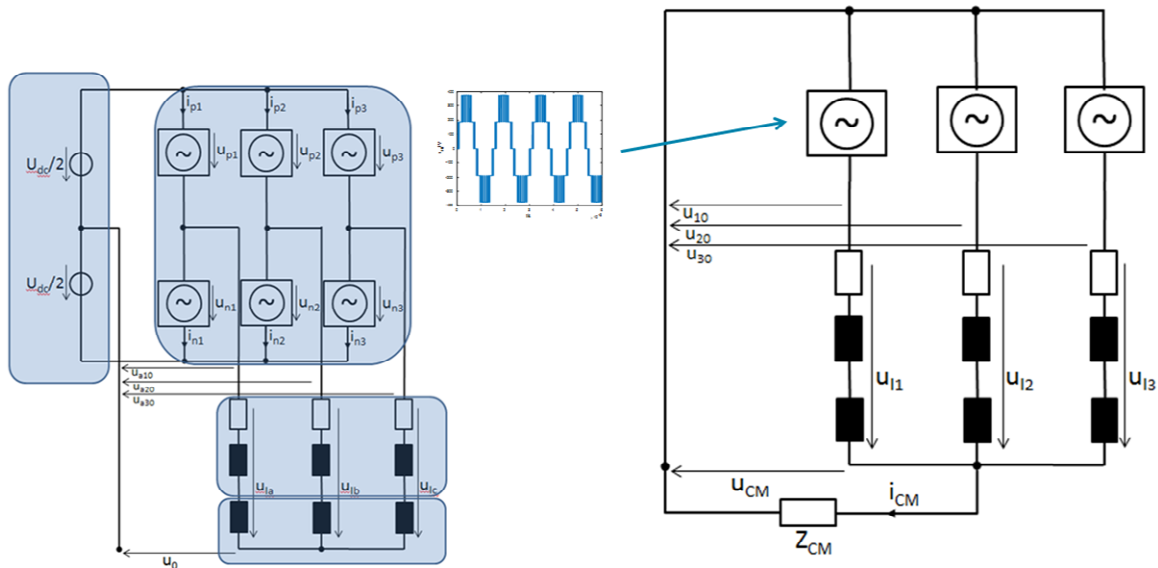


Bild 1: Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines elektrischen Antriebsstrangs

### 3 Einfluss der Netzwerktopologie und des Umrichters

Bild 2 stellt gemessene Leiterspannungen und die sich am Sternpunkt einstellende Gleich-taktspannung simulierten Werte in einem IT-Netz ( $Z_{CM} \rightarrow$  hochohmig, kapazitiv) gegenüber. Die Berechnung basiert auf Strom- und Spannungsteilerregeln im Frequenzbereich. Die PWM-Signale und die Rechenergebnisse werden mit der Fast-Fouriertransformation und der inversen Fast-Fouriertransformation in den Frequenz- bzw. Zeitbereich übertragen. Die Batteriespannung beträgt 400 V; ein 3-phasiger 2-Level-Umrichter schaltet die Batteriespannung mit 20 kHz. Die Längsinduktivität einer Motorwicklung beträgt ca. 2,2 mH [2]. Die parasitäre Kapazität gegen Bezugspotential in  $Z_{CM}$  wird zu  $C_{GND} = 5$  nF gewählt. Die Messung wurde exemplarisch an einem 15 kVA Antriebsstrang durchgeführt. Messung und Simulation über 0,4 ms dargestellt zeigen die PWM-Leiterspannungen, die resultierende Gleichtaktspannung und den Gleichtaktstörstrom  $I_{CM}$ , der sich im isolierten IT-Netz als

$$I_{CM} \sim C_{GND} \cdot dU_{CM} / dt \quad (3)$$

über die Kapazität des Antriebsstrangs gegen Referenzpotential einstellt. Messung und Rechnung stimmen soweit überein, dass weitere Analysen durchgeführt werden können. Bild 3 vergleicht Störemissionen von IT-Netz (Zeile 4 und 5) und TN-Netz (Zeile 6 und 7) bei gleicher Speisespannung eines 2-Level-Umrichters (Zeilen 1 bis 3). Im TN-Netz wird in  $Z_{CM} = R_{CM} || C_{CM}$  mit  $R_{CM} = 1$  Ohm ein niederohmiger Parallelpfad zu  $C_{CM}$  eingerechnet.

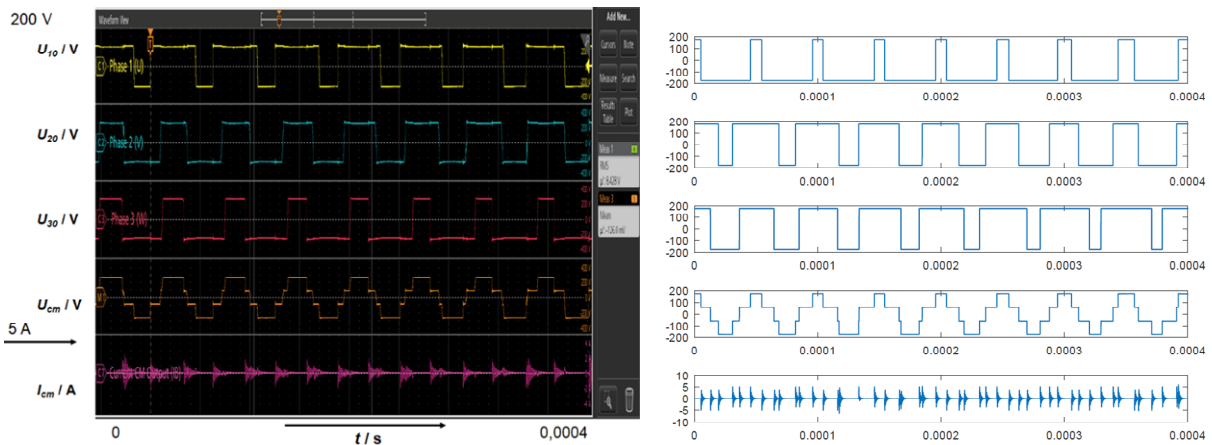


Bild 2: Gemessene (links) und berechnete (rechts) Störgrößen im Antriebsstrang eines 15 kVA Umrichters im IT-Netz

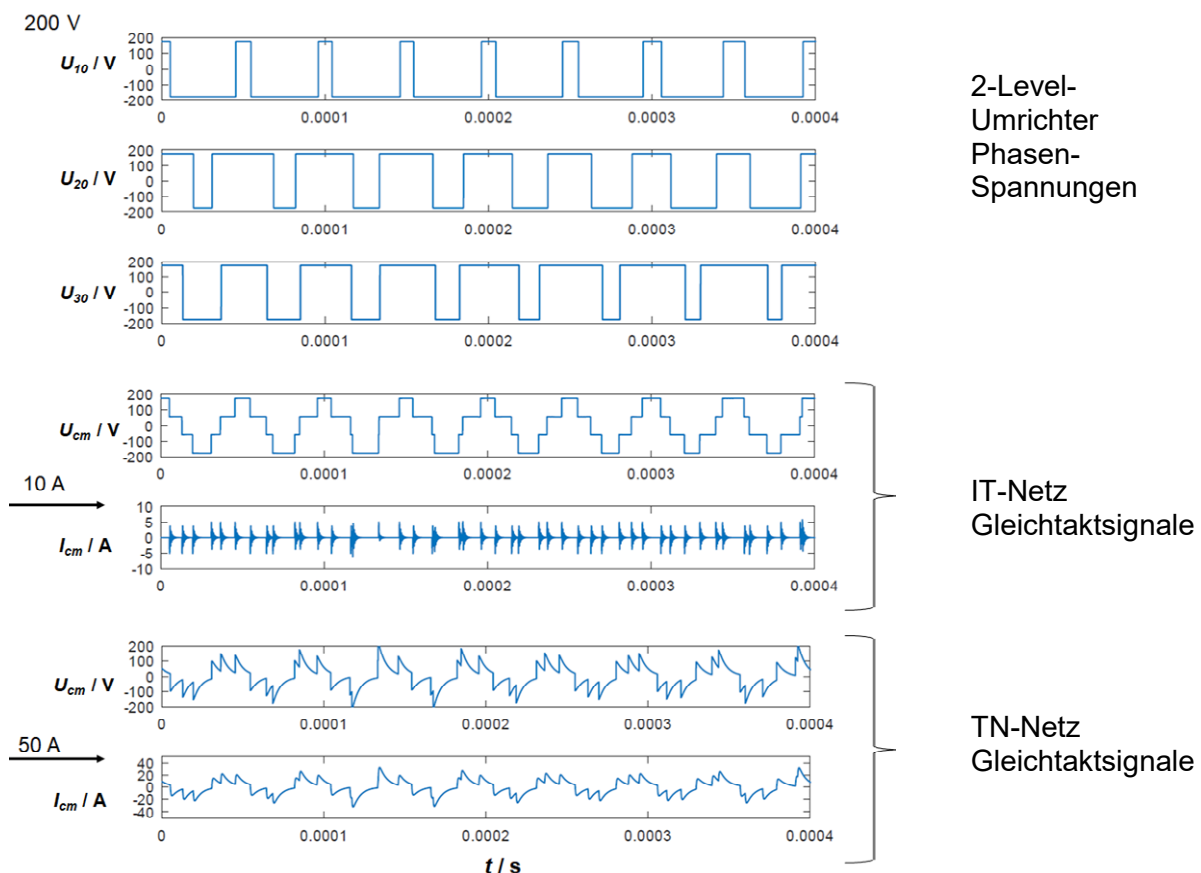


Bild 3: Störgrößen im Antriebsstrang eines 2-Level Umrichters im IT- und im TN-Netz

Bild 4 zeigt die gleiche Rechnung mit gleicher Beschaltung aber für einen 5-Level-Umrichter. Das jeweils günstigere Verhalten mit geringeren Störströmen ergibt sich beim 5-Level-Umrichter. Das IT-Netz ist in der Beherrschung der Störstromemission dem TN-Netz überlegen. Mehr-Level-Umrichter erzeugen Gl. 3 zur Folge ein systematisch günstigeres Emissionsverhalten. Demgegenüber entstehen Aufwände wegen der erforderlichen Isolationswächter im IT-Netz und der komplexeren Elektronik eines Mehr-Level-Umrichters. Bei sehr hohen Leistungsklassen müsste der Mehraufwand zur Beherrschung der EMV, gegen Filterungs- und Schirmungsmaßnahmen geprüft und ggf. kombiniert werden. Die Netzform des Antriebsstrangs (IT- oder TN-Netz) sollte früh im Entwicklungsprozess gewählt werden, denn sie bestimmt, welche

Maßnahmen in der EMV-Architektur in welcher Größenordnung sinnvoll sind. Das gilt ebenso für die Wahl des Umrichters.

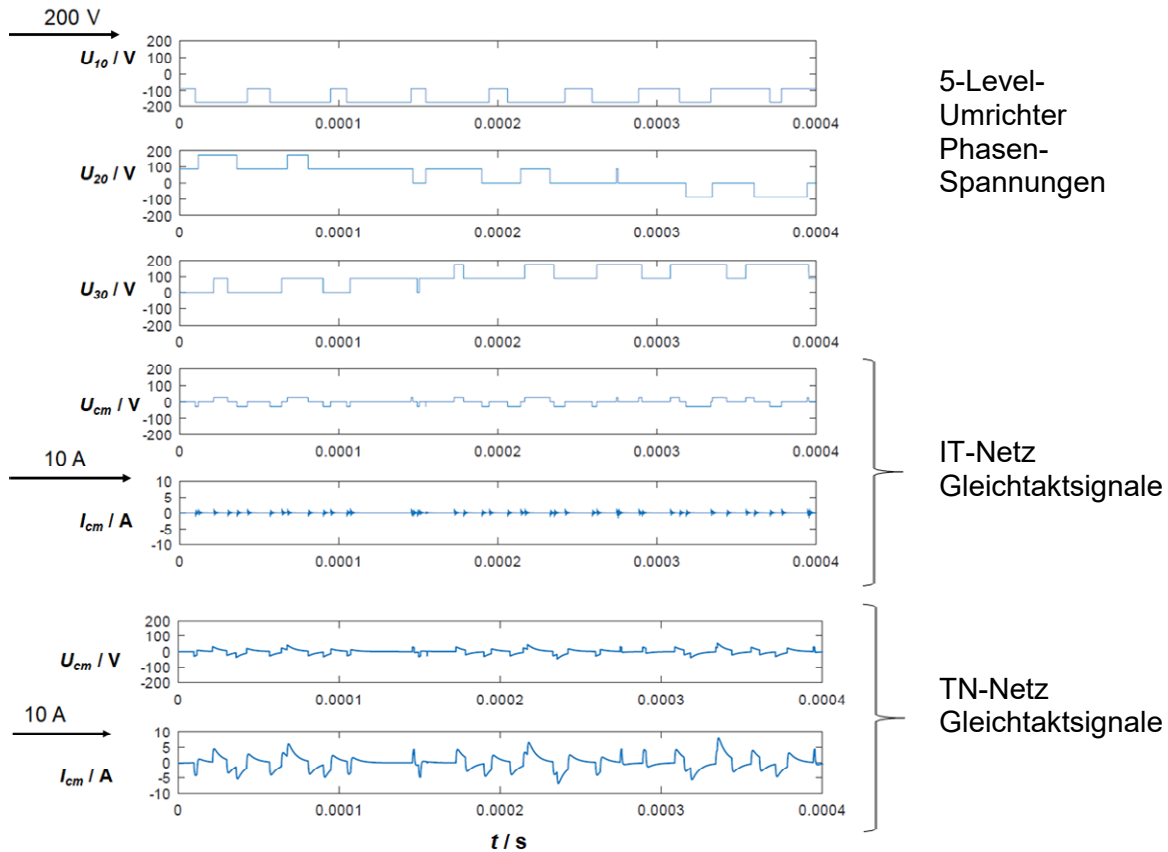


Bild 4: Störgrößen im Antriebsstrang eines 5-Level Umrichters im IT- und im TN-Netz

#### 4 Störsignale durch asymmetrische Last oder elektrische Fehlerzustände

Die Symmetrie einer mehrphasigen Motorlast wird in der EMV-Analyse oft vorausgesetzt [2,3]. Gleichtaktstörpotential und Gegentaktströme werden in separaten Modellen erfasst. Fertigungstoleranzen, z.B. handgewickelter Motorinduktivitäten kleiner Serien, führen aber in der

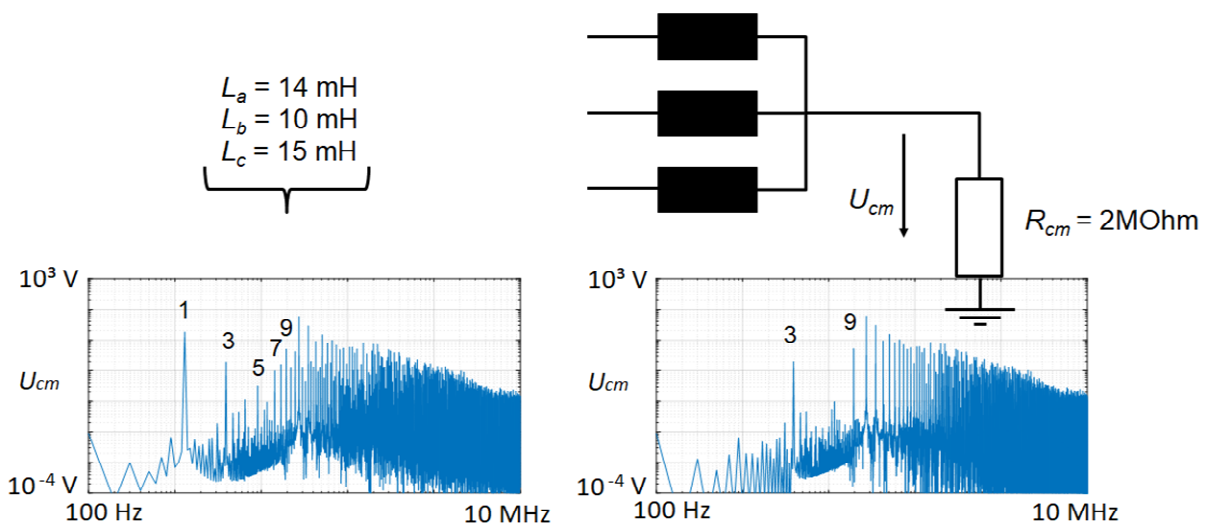
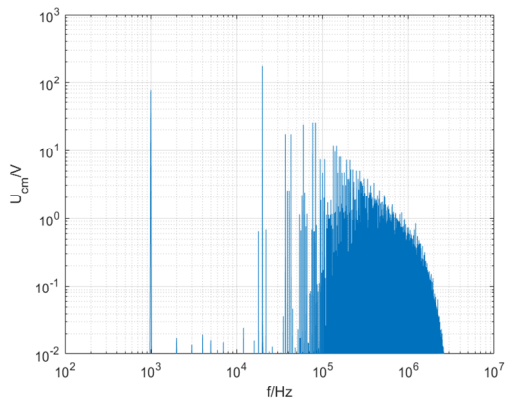
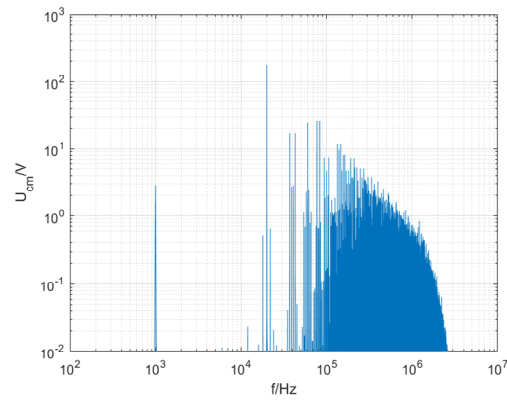


Bild 5: Spektralanteile der Störspannung im Sternpunkt bei asymmetrischer (links) und symmetrischer (rechts) Last im IT-Netz



$U_{CM}$  bei Unterbrechung einer Phase



$U_{CM}$  bei geringfügiger Asymmetrie der Last

Bild 6: Erhöhung der Gleichtaktstörspannung bei Asymmetrie, bis zu 100 V; 20 MHz Tiefpassfilter

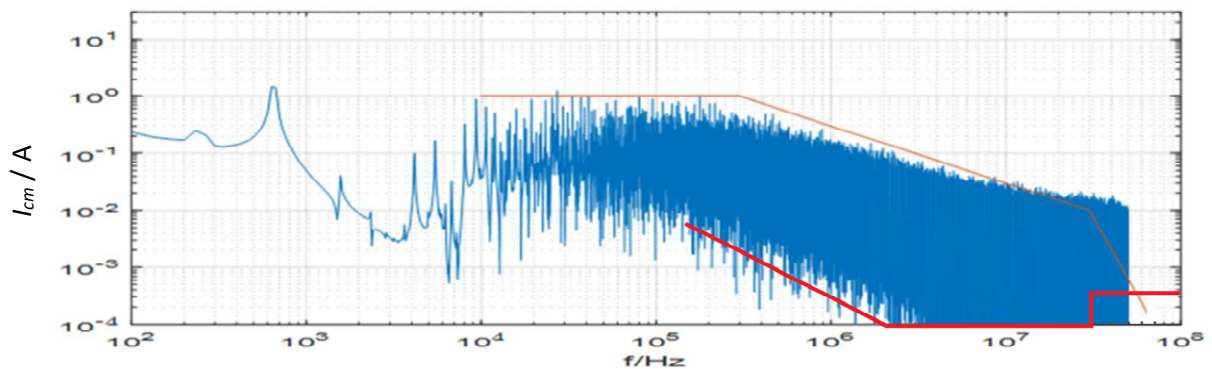


Bild 7: Störstrom im TN-Netz bei ca. 30% Asymmetrischer Motorinduktivität. 100 kVA Anlage an 800V DC. Orangefarbene Linie: Einhüllende des Spektrums; rote Linie schwächster Grenzwert leitungsgebundener Emission [1]

Realität zu Asymmetrien der Motorlast. Nach Gl. 2 heben sich bei asymmetrischer Last weder Spektralanteile mit  $k \in \{3,9,15, \dots\}$  (systematisch) noch die durch den Grad der Asymmetrie bestimmten Anteile mit  $k \in \{1,5,7,11,13, \dots\}$  vollständig auf. Das Spektrum verdichtet sich; alle Spektralanteile tragen ab der Grundfrequenz zur Gleichtaktemission bei. Dies (vgl. Bild 5) zeigen die berechneten Spektren am Beispiel einer asymmetrischen Last mit  $L_a = 14$  mH,  $L_b = 11$  mH und  $L_c = 15$  mH gegenüber der symmetrischen Last mit  $L_{a,b,c} = 13$  mH als relevante Erhöhung der bei Symmetrie nicht vorhandenen Anteile. Für hohe Leistungen eines Flugzeugantriebsstrangs lohnt es sich, Anforderungen an die Symmetrie der Motorlast aufzustellen.

Bei wechsellspannungsseitiger Leitungsunterbrechung zeigt das Spektrum ein signifikantes Oszillieren der Gleichtaktspannung  $U_{CM}$  des IT-Netzes. Die Grundwelle des Gleichtaktsignals zeigt im Spektrum einen Wert von ca. 100 V, gegenüber nur wenigen Volt bei geringfügiger Asymmetrie. Der Störstrom wird sich im IT-Netz auch ändern und wegen der hohen Common-Mode Impedanz etwas erhöhen. Aber auch ein TN-Netz wird bei asymmetrischer Last zur Störstromerhöhung beitragen. Bild 7 zeigt beispielhaft den errechneten Gleichtaktstörstrom eines 100 kVA Antriebs bei einer ca. 30% Asymmetrie durch eine Motorinduktivität.

Ein realer Antriebsstrang zeigte das gleiche Verhalten. Eine Störemission im Bereich von Ampere ist durch die existierende Vorgabe von Conducted Emission Grenzwerten in der DO-160, section 21, [1] nicht abgedeckt.

## 5 Zusammenfassung

Die Phasenrekonstruktion Vielfacher von 3 führt zu einem mathematisch unvermeidbaren Störpotenzial bei PWM im dreiphasigen Antriebsstrang. Wahl von Invertertyp und Netzform beeinflussen das Maß der Störsignalgrößen erheblich. Ein IT-Netz ist einem TN-Netz in der

Störstrombeherrschung überlegen. Ein 5-Level Inverter ist einem 2-Level Inverter überlegen, ist aber komplexer im Aufbau. Asymmetrien bewirken zusätzliche Spektralanteile der Gleichtaktstörspannungen im IT-Netz. Sie äußern sich als Signalschwankungen ab der Grundwelle, auch in höheren Frequenzen verdichtet sich das Störspektrum. Analog entstehen deutliche Störströme bei Asymmetrien im TN-Netz. Fehlerbedingungen sind extreme Formen der Asymmetrie. Airbus und DLR untersuchen die elektromagnetischen Störeffekte verschiedener (tolerierbarer) Fehlerarten skaliert auf relevante Leistungsklassen.

### **Literaturangaben**

- [1] RTCA DO-160G, Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment, Washington D.C., 8 December 2010
- [2] M. Schinkel, S. Weber, S. Guttowski, W. John and H. Reichl, "Efficient HF modeling and model parameterization of induction machines for time and frequency domain simulations," Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06., 2006, pp. 6 pp.-, doi: 10.1109/APEC.2006.1620689
- [3] S. Jeschke: Grundlegende Untersuchungen von Elektrofahrzeugen im Bezug auf Energieeffizienz und EMV mit einer skalierbaren Power-HiL-Umgebung, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2016, urn:nbn:de:hbz:464-20160301-130828-8