

OPTIMIERUNG VON BORDNETZEN HOHER LASTDICHTEN DURCH DEN EINSATZ INTELLIGENTER SCHUTZEINRICHTUNGEN

J.Brombach¹, J.Koch², H.Wattar², D.Schulz¹,

¹Institut für Elektrische Energiesysteme, Helmut-Schmidt-Universität, 22043 Hamburg

²EADS Innovation Works, 21129 Hamburg

Zusammenfassung

Durch den an moderne Bedürfnisse angepassten Energiebedarf und den daraus resultierenden Lastdichten in den Flugzeubordnetzen muss das elektrische Energieversorgungsnetz angepasst werden. Am Anfang dieser Arbeit wird eine Übersicht über den elektrischen Aufbau von Flugzeubordnetzen dargestellt. Der Schutz und die Struktur liegen dabei im Mittelpunkt. Es wird im Detail über thermische Schutzschalter und deren Verhalten gesprochen. Um Simulationen durchführen zu können, wird eine analytische Abbildung eines thermischen Schutzschalters in Matlab-Simulink vorgestellt.

In den nächsten Kapiteln wird auf die Optimierung der Netzstruktur und deren Gewichtsvorteile eingegangen. Ringnetze und vollständig vermaschte Netze liegen hier im Mittelpunkt. Um jedoch komplexe vermaschte Netze aufzubauen, ist ein angepasster Netzschutz nötig. Dieser wird im letzten Kapitel vorgestellt. In Flugzeubordnetzen ist eine hohe Verfügbarkeit der Energieversorgung besonders wichtig. Um diese weiterhin zu gewährleisten, wird ein dezentral aufgebauter Netzschutz eingeführt, der auch in vermaschten Netzen mit hochohmigen Erdfehlern (z.B. im CFK-Rumpf) zuverlässig Fehler erkennt und aus dem Netz heraustrennt.

Abschließend werden die Ergebnisse bewertet und ein Ausblick gegeben.

1. EINLEITUNG

Der Bedarf an elektrischer Energie in Flugzeugen hat in den letzten Jahrzehnten stetig zugenommen [1], siehe Abbildung 1. Dies hat im Wesentlichen drei Hauptgründe [2]. Erstens sind die Flugzeuge in der Vergangenheit immer größer geworden.

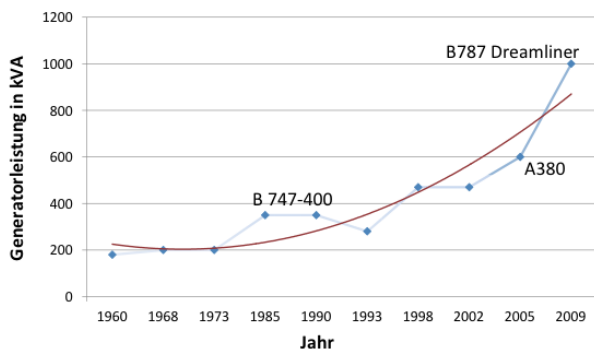


BILD 1. Entwicklung der Generatorleistung an Bord von Flugzeugen in den letzten 50 Jahren [1]

Ein weiterer Anstieg der Generatorleistung entsteht durch die Installation von neuen elektrischen Lasten und Funktionen. Die Substitution von pneumatischen und hydraulischen Systemen durch Elektrische ist unter den Begriff More-Electric-Aircraft zusammengefasst [2, 3, 6]. Der dritte Grund für den Anstieg des Energieverbrauchs und damit der Generatorleistung ist in dem steigenden Komfort an Bord zu suchen. Inzwischen ist auf Langstreckenflügen auch in der Economy-Class ein In-Flight-Entertainment (IFE) Standard, welches einen

großen Teil des elektrischen Verbrauches in der Kabine ausmacht.

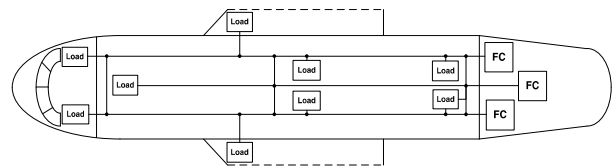


BILD 2. Vermaschtes Bordnetz mit multiplen Einspeisern

Der Aufbau der Bordnetze hat sich jedoch in den letzten 50 Jahren kaum geändert. Diese werden weiterhin sternförmig (Punkt-zu-Punkt-Versorgung) aufgebaut [2, 5], so dass jeder Verbraucher mit einer eigenen Leitung von der zentralen Verteilung versorgt wird. Dementsprechend steigt mit der Anzahl der Verbraucher linear das Gewicht des Versorgungssystems. Elektrotechnisch haben jedoch andere Netzstrukturen Vorteile. Bild 2 zeigt exemplarisch ein vermaschtes Bordnetz mit multiplen Einspeisern. Wie in der konventionellen Energieversorgung, eignen sich Strahlnetze vorwiegend für die Versorgung von Zonen geringer Lastdichte [4]. Eine höhere Lastdichte resultiert meistens in der Vermaschung der Netze um Gleichzeitigkeitsfaktoren auszunutzen und somit die nötige Infrastruktur zu verkleinern. Die Vermaschung hat jedoch gegenüber dem sternförmigen Punkt-zu-Punkt Aufbau Nachteile in der Versorgungssicherheit, wenn Fehler nicht intelligent aus dem Netz herausgetrennt werden können.

In dem Forschungsprojekt „Kabinentechnologie und multifunktionale Brennstoffzelle“, sowie „Simplifizierte Kabine / Smart-Phase-Balancing“ wird an der Helmut-Schmidt-Universität in Kooperation mit Airbus und EADS der

„Entwurf einer neuartigen, innovativen Bordnetzstruktur unter Berücksichtigung einer effizienten Kabinenstromversorgung“ erforscht. Einerseits wird innerhalb der Projekte versucht vorhandene AC-Netze zu optimieren und andererseits wird erforscht, inwieweit eine Optimierung der Energieversorgung durch hohe Gleichspannungsebenen möglich ist.

2. AUFBAU UND ABSICHERUNG KONVENTIONELLER BORDNETZE

Zusätzlich zu dem strahlförmigen Aufbau versorgt in aktuellen AC-Bordnetzen jeder Generator ein untergeordnetes Netz [4]. Eine Parallelschaltung ist dabei nicht vorgesehen. Bei aktuellen Flugzeugmustern mit variablen Drehzahlgeneratoren ist dies sogar unmöglich, da die Triebwerke nie genau gleich schnell laufen und eine Synchronisierung ohne leistungselektronische Wandler nicht möglich ist. Fällt ein Generator aus, kann der Betroffene Netzteil auf einen anderen Generator umgeschaltet werden. Um im Fehlerfall die zusätzliche Leistung zur Verfügung stellen zu können, sind die Generatoren und die entsprechenden Leitungen entsprechend überdimensioniert. Eine weitere Überdimensionierung resultiert in der Bereitstellung der Regelleistung in jedem Netzabschnitt. Auch diese muss von jedem Generator alleine erzeugt werden.

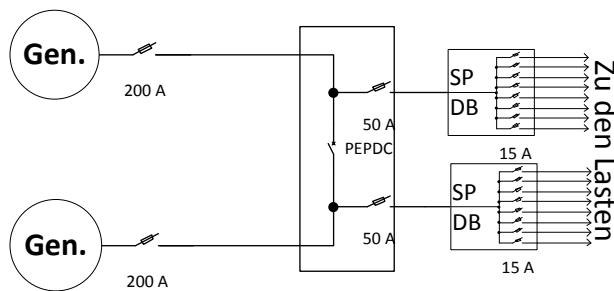


BILD 3. Aufbau eines Flugzeugbordnetzes mit gestaffelten Sicherungen und Leistungsschutzschaltern

Bild 3 zeigt vereinfacht den Aufbau eines Bordnetzes mit zwei Generatoren. Dabei sind die Generatorleitungen zu der Hauptverteilung (PEPDC – Primary Electrical Power Distribution Center) und die Leitungen zu der Unterverteilung (SPDB – Secondary Power Distribution Box) sowie die Verkabelung zu den Verbrauchern dargestellt. Wie man in Bild 3 erkennen kann, sind im Strompfad vom Generator zur Last eine Reihe von Sicherungen vorhanden. Um ein selektives Auslösen zu ermöglichen, sind diese Sicherungen gestaffelt ausgeführt. Im Strompfad werden die Sicherungsgrößen immer kleiner. Kommt es nun zu einem Fehler, löst immer die im Strompfad nächste Sicherung aus. Versagt sie, springt die nächstgrößere ein. Diese Art des Netzschutzes nennt man Strom-Zeit-Staffelschutz [4,7]. Wichtig für das korrekte Funktionieren des Stromzeitstaffelschutzes ist die durchgängige Verwendung desselben Sicherungstyps. Abbildung 4 zeigt verschieden große Sicherungen mit gleicher Charakteristik. Unabhängig vom Fehlerstrom, löst immer die jeweils kleinste Sicherung am schnellsten aus. Verwendet man jedoch unterschiedliche Sicherungen (z.B. flinke und träge Sicherungen) in einem Strompfad, kann es zu Schnittpunkten in den Kennlinien kommen (Abbildung 4 rechts). Bei bestimmten Fehlerströmen

würde die entsprechend größere Sicherung schneller auslösen.

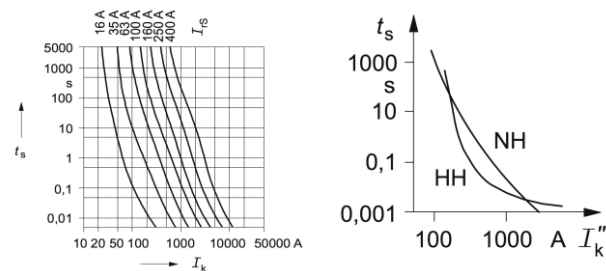


BILD 4. Links: Gestaffelte Sicherungen mit den Auslösezeiten bei entsprechender Strombelastung [4]
Rechts: Verschiedene Sicherungstypen mit sich schneidenden Kennlinien [4]

An Bord von konventionellen Flugzeugen sind deswegen immer Sicherungen mit identischer Auslösecharakteristik im Einsatz. Diese Charakteristik lässt sich aber auf verschiedene Art und Weise erreichen. Dies wird im folgenden Kapitel näher betrachtet.

3. SICHERUNGEN UND LEISTUNGSSCHUTZSCHALTER AN BORD VON FLUGZEUGEN

Die Realisierung eines gestaffelten Netzschutzes ist an Bord von Flugzeugen mit verschiedenen Arten von Schutzschaltern realisiert. Oft werden kombinierte Schalter/Sicherungen eingesetzt, die dezentral eine absichernde Funktion haben und zentral geschaltet werden können. So ist ein manuelles Abschalten einzelner Netzabschnitte möglich. Auch ein automatisches Ab- und Umschalten einzelner Netzabschnitte durch ein zentrales Powermanagement ist dadurch möglich.

3.1. Thermische Leistungsschutzschalter (Circuit-Breaker)

An Bord von Flugzeugen werden weiterhin thermische Schutzschalter verwendet. Diese können als Schmelzsicherung, oder als Leistungsschutzschalter (Circuit-Breaker) ausgeführt werden. In beiden Varianten kommt es durch Erwärmung zur Auslösung. Bei Schmelzsicherung wird der Strompfad hierbei durch das schmelzen und somit zerstören eines Leiters unterbrochen. Thermische Schutzschalter sind hingegen wieder einschaltbar. Hier wird der Strompfad durch ein Schaltelement unterbrochen, welches beispielsweise durch ein Bimetall mechanisch ausgelöst wird. Zusätzlich verfügen thermische Schutzschalter auch noch über eine mechanische Schnellauslösung. Hier wird ab einem bestimmten Stromwert nicht erst die entsprechende Grenztemperatur (durch Erwärmung) abgewartet, sondern sofort ausgelöst. Die Realisierung erfolgt hier meist über magnetisch-mechanisch ausgelöste Schaltelemente. Ist eine Fernbedienbarkeit des Schalters möglich, spricht man in Flugzeugbordnetzen vom RCCB (Remote-Controlled Circuit-Breaker). Dieser Begriff darf nicht mit dem Fehlerstromschutzschalter (RCCB = Residual Current Circuit-Breaker) in der konventionellen Energieversorgung verwechselt werden. Fehlerstromschutzschalter werden

an Bord von Flugzeugen als GFI (Ground-Fault Indicator) bezeichnet und sind nicht Gegenstand dieser Arbeit.

3.2. Elektronische Leistungsschutzschalter

Grundsätzlich muss die Identifikation des Fehlers nicht thermisch oder magnetisch erfolgen. Neuere Leistungsschutzschalter an Bord von Flugzeugen messen permanent den Strom durch die Schaltstrecke und lösen durch eine elektronische Erkennung bei Bedarf die Schaltstrecke aus. Ein Beispiel hierfür sind SSPCs (Solid-State-Power-Controller). Dies sind Halbleiterrelais, die über eine elektronische Ansteuerung verfügen. Vorteil dieser Technik ist, dass sie leicht ferngesteuert und umprogrammiert werden können. So ist es möglich beliebige Auslösewerte und Auslösecharakteristiken in die elektronische Auslösung einzuprogrammieren. Grundsätzlich können auch mechanische Schaltstrecken mit einer elektronischen Auslösung ausgestattet werden. Dies wird bei neueren Flugzeugen auch bei den RCCBs praktiziert.

3.2.1. Auslösecharakteristik elektronischer Leistungsschutzschalter

Um den Staffelschutz in modernen Bordnetzen auch mit elektronischen Leistungsschutzschaltern zu realisieren, muss die in Kapitel 2 beschriebene Stromstaffelung der Kennlinien auf jeden Fall gewährleistet werden. Des Weiteren bilden Sicherungen immer das thermische Verhalten von Kabeln ab. Eine Sicherung wird immer so dimensioniert, dass diese vor der Beschädigung des Kabels auslöst. Die I-t-Kennlinienverläufe verlaufen hierbei parallel. Um einen Schutz mit elektronischer Auslösung zu realisieren, muss das thermische Verhalten einer Schmelzsicherung, oder eines thermischen Schutzschalters, exakt nachgebildet werden. Hierbei ist es nicht ausreichend einen Strom zu messen und entsprechend der Kennlinie verzögert auszulösen. Vielmehr muss die Erwärmung und die Wärmeabfuhr (Diffusion) der thermischen Auslösung nachgebildet werden, um bei schwankenden oder zyklischen Überlastungen weiterhin korrekt auslösen zu können.

3.2.2. Modellierung des Schutzschalters

Wie bereits besprochen, kann die Charakteristik eines Schutzschalters sowohl thermisch, als auch elektronisch abgebildet werden. Um einen elektronischen Netzschutz zu realisieren und um Simulationen durchführen zu können, wird im folgenden Unterkapitel die mathematische und simulatorische Abbildung hergeleitet.

Im Niederspannungsbereich werden für den Schutz von Leitungen vor Kurzschluss- und Überströmen Leistungsschalter verwendet. Die typische Zeit-Strom-Kennlinie solcher Schutzschalter ist in Abbildung 5 dargestellt [7].

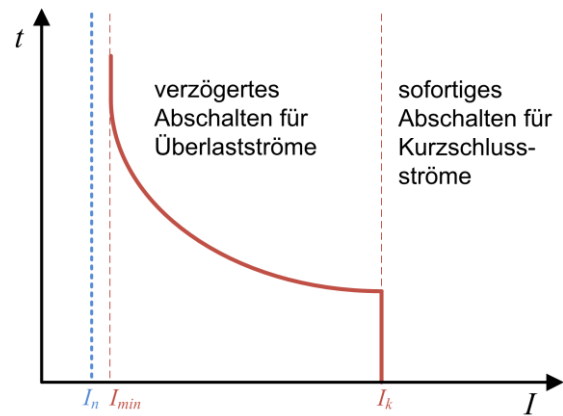


BILD 5. Zeit-Strom-Kennlinie eines typischen Leistungsschutzschalters

Die Kennlinie wird in zwei Bereiche aufgeteilt: Überlastbereich und Kurzschlussbereich. Der erste Bereich liegt zwischen dem minimalen Abschaltstrom I_{min} und dem Kurzschlussstrom I_k , der typischerweise im Bereich des zehnfachen des Nennstroms I_n liegt. In diesem Bereich findet eine verzögerte Abschaltung statt, welche auf dem thermischen Verhalten der Leitung basiert. Im zweiten Bereich oberhalb des Kurzschlussstroms wird unverzüglich abgeschaltet (Schnellauslösung).

Das physikalische Modell für das thermische Verhalten der Leitung kann entsprechend des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik durch die folgende Differenzialgleichung vereinfacht angegeben werden [8]:

$$(1) \quad \frac{dE(t)}{dt} = P_{el}(t) - \dot{Q}(t)$$

Die Energieänderung des Systems entspricht der Differenz zwischen der elektrisch zugeführten Leistung und dem abgeführten Wärmestrom. Diese Gleichung kann wie folgt weiter aufgelöst werden:

$$(2) \quad C \cdot \dot{\theta}(t) = i^2(t)R - \alpha A(\theta(t) - \theta_0)$$

C ist die Wärmekapazität der Leitung, θ ist die Leitungstemperatur, i ist der elektrische Strom durch die Leitung, R ist der Leitungswiderstand, α ist der Wärmedurchgangskoeffizient, A ist die Leitungsoberfläche und θ_0 ist die Umgebungstemperatur.

Durch die Normierung der Gl. (2) auf R , erhält man:

$$(3) \quad k_1 \dot{\theta}(t) = i^2(t) - k_2(\theta(t) - \theta_0)$$

Die Parameter k_1 , k_2 und θ_0 müssen bestimmt werden. Hierfür wird die Lösung für einen konstanten Strom I betrachtet:

$$(4) \quad \theta(t) = \frac{I^2}{k_2} \left(1 - e^{-\frac{k_2}{k_1} t} \right) + \theta_0$$

Als Anfangstemperatur $\theta(t=0)$ wird die Umgebungstemperatur θ_0 angenommen. Für $I=I_{\min}$ wird die maximal zulässige Temperatur bei $t \rightarrow \infty$ erreicht, d.h.

$$(5) \quad \theta(t) = \theta_{\max} = \frac{I_{\min}^2}{k_2} + \theta_0 \Rightarrow k_2 = \frac{I_{\min}^2}{\theta_{\max} - \theta_0}$$

Aus (5) und durch das Einsetzen eines beliebigen Punktes (I_1, t_1) aus der vorgegebenen Kennlinie in Gl. (4) kann k_1 wie folgt ermittelt werden:

$$(6) \quad k_1 = - \frac{I_{\min}^2 \cdot t_1}{(\theta_{\max} - \theta_0) \cdot \ln \left(1 - \frac{I_{\min}^2}{I_1^2} \right)}$$

Da die absoluten Werte von $\theta_{\max}$ und θ_0 für die Modellerstellung nicht relevant sind, führen wir die folgende Temperaturnormierung durch:

$$(7) \quad \Theta(t) = \frac{\theta(t) - \theta_0}{\theta_{\max} - \theta_0}$$

Damit wird die maximal zulässige Temperatur gleich eins und die normierte Umgebungstemperatur gleich null.

Durch das Einsetzen von Gl. (5), (6) und (7) in Gl. (3) erhält man die folgende Modellgleichung:

$$(8) \quad \dot{\Theta}(t) = k_3 i^2(t) - k_4 \Theta(t)$$

mit den Parametern:

$$(9) \quad k_3 = - \frac{\ln \left(1 - \frac{I_{\min}^2}{I_1^2} \right)}{I_{\min}^2 \cdot t_1}, \quad k_4 = -I_{\min}^2 k_3$$

Dieses Modell wurde in MATLAB/Simulink realisiert. Abbildung 6 zeigt das Blockdiagramm des Modells.

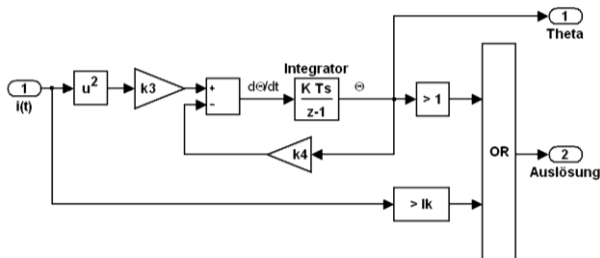


BILD 6. Blockdiagramm des in Simulink realisierten Schaltermodells

Für den Überlastbereich ist der obere Zweig in dem Modell für die Auslösung zuständig, welcher die Gl. (8) implementiert. Es wird erst ausgelöst, wenn die normierte Temperatur Θ den Wert Eins überschreitet. Mit dem unteren Zweig wird überprüft, ob der Kurzschlussstrom überschritten wird, wodurch eine direkte Abschaltung stattfindet.

Abbildung 7 zeigt den Vergleich zwischen der Zeit-Strom-Kennlinie eines ausgewählten Leistungsschutzschalters aus dem Luft- und Raumfahrtbereich und der aus dem Modell resultierenden Auslösekennlinie.

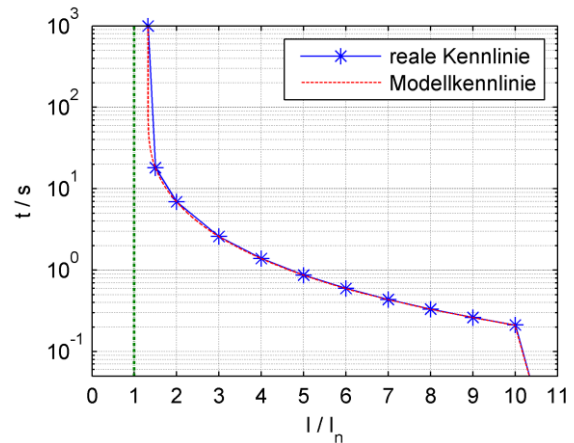


BILD 7. Vergleich zwischen einer realen und einer Modellkennlinie

In Abbildung 8 sind ein exemplarischer Stromverlauf (oben) und der dazugehörige Temperaturverlauf (unten) angegeben. Die Stromspitze am Anfang ist typisch für Lasten mit Anlaufstrom. Durch das verzögerte Verhalten des Schutzschalters würden solche Anlaufströme nicht zur Auslösung führen. Im weiteren Verlauf geht der Strom auf I_n zurück und die Temperatur Θ fällt langsam wieder ab. Bei ca. $t = 9$ s kommt es zu einem weiteren Überstrom ($I/I_n = 3$). Die Temperatur Θ steigt über Eins und es wird abgeschaltet.

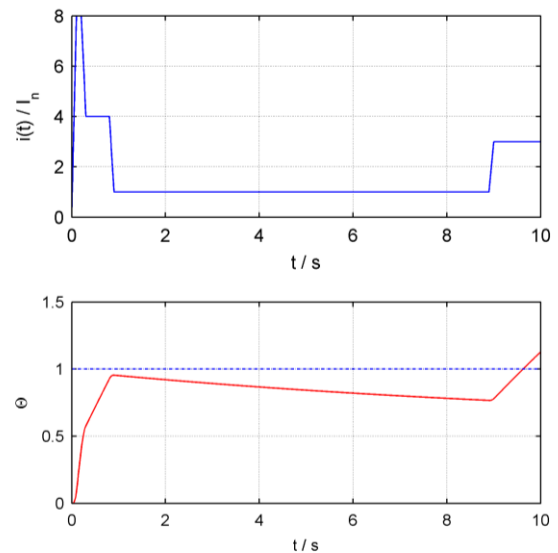


BILD 8. Beispielverlauf für den normierten Strom und die dazugehörige normierte Leitungstemperatur

Mit den beschriebenen Simulationen ist es nun möglich, den Schutz eines konventionellen Bordnetzes simulatorisch zu erfassen. Da das Modell auch dynamische, nicht konstante Ströme erfasst, ist eine sehr detaillierte Abbildung von Simulationen im Zeitbereich möglich.

4. OPTIMIERTE VERKABELUNGSSTRUKTUR IN BORDNETZEN HOHER LASTDICHTE

Da jeder Verbraucher in einem konventionellen Bordnetz eine eigene Versorgungsleitung hat, kann man Gleichzeitigkeitseffekte im Energieversorgungsnetz nicht vollständig ausnutzen. Gegenläufig arbeitende Systeme (z.B. Heizung und Kühlung) benötigen jeweils separat dimensionierte Energieversorgungsleitungen. In Netzen hoher Lastdichte haben sich in der konventionellen Energieversorgung Ringnetzstrukturen oder vermaschte Netzstrukturen durchgesetzt [4]. Diese bündeln einerseits die Kapazitäten und weisen – einen selektiven Netzschutz vorausgesetzt – eine hohe Redundanz auf. Zusätzlich bieten vermaschte Netze ein Gewichtseinsparpotential. Im Folgenden soll nun das Potential einer solchen Einsparung abgeschätzt werden. Dazu wird eine Ringnetzstruktur (als einfachste Form der Vermaschung) mit zwei Einspeisungen aufgebaut. Die Lasten sind entlang des Ringes angeschlossen. Kommt es zu einem Ausfall in einer Einspeisung, kommt es nicht zu einem örtlichen Ausfall der Spannungsversorgung. Tritt ein Fehler in einer Leitung auf, kann dieser freigeschaltet werden.

4.1. Berechnungsgrundlage

Als Berechnungsgrundlage dient ein Bordnetz eines modernen Kurz- und Mittelstreckenflugzeuges mit folgenden Gesamtlasten:

- AC: 70 kW
- DC: 1 kW

Die Bordnetzspannung ist dabei für die Gleichspannungslasten 28 V und für Wechselspannungslasten 115 V (Leiter-Erde). Zusätzlich wird eine Variante mit 270 V DC (anstelle von 115 V AC) berechnet. Abbildung 9 zeigt einen möglichen schematischen Netzaufbau mit den entsprechenden konzentrierten Lasten (SPDB: Secondary Power Distribution Box, Galley: Küche). Das Netz ist als Ringnetz ausgeführt und dient als Vergleichsgrundlage.

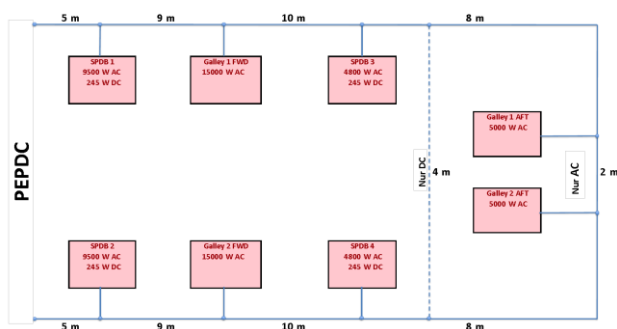


BILD 9. Mögliches Kabinenbordnetz eines modernen Kurz- und Mittelstreckenflugzeuges mit konzentrierten Lasten (SPDBs)

Als Auslegungsgröße dient die Stromtragfähigkeit üblicher Flugzeugkabel sowie der maximal erlaubte Spannungsabfall vom Erzeuger zur Last (Voltage-Drop). Dieser ist wie folgt angenommen:

- 115 VAC: 2,8 V
- 270 VDC: 6,8 V

- 28 V: 0,2 V

Dieser muss im ganzen Netz eingehalten werden. Die Lasten sind in dieser Berechnung gleichmäßig zwischen rechter und linker Flugzeugseite verteilt.

4.2. Berechnungsvarianten

Es werden drei Varianten des gleichen Aufbaus betrachtet. Die erste Variante ist an den aktuellen Standard für neue Airbus Flugzeuge angelehnt. Hier muss ein Feeder bei dem gesamten Dimensionierungsstrom am Ende der Leitung die Kriterien für den Spannungsabfall einhalten. Eine Stromaufteilung ist nicht berücksichtigt. Die Bestimmung des Kabelgewichtes erfolgt hier durch die Berechnung des nötigen ohmschen Widerstandes, um den Spannungsabfall beim Auslegungsstrom einzuhalten. Mit der Gesamtlänge des Kabels und den Widerstandsbelegen möglicher Flugzeugkabel, ermittelt man das Kabel, welches die Mindestanforderung erfüllt. Das Kabelgewicht wird über die insgesamt verbaute Kabellänge ermittelt.

Die zweite Variante berücksichtigt die Stromaufteilung bei Abzweigungen von Lasten. Hier erfolgt die Bestimmung des mindestens notwendigen Kabeltyps über eine Berechnung aller Knotenströme. Im Anschluss werden alle möglichen Kabeltypen durch ein Skript eingesetzt und das Kabel bestimmt, was die Kriterien gerade einhält.

Die dritte Variante berechnet die optimale Kabelkombination. Dabei wurde ein Matlab-Skript zur Berechnung erstellt und das Netz in Matrixform vorgegeben. Dabei werden für alle Teilstücke alle Kabelkombinationen ausprobiert. Hier müssen sehr viele Rechenschritte ausgeführt werden (für 17 verschiedene Kabeltypen und ein Netz mit 17 Kabelstrecken):

$$(2) \quad 17^{17} \approx 8,27 \cdot 10^{20} \approx 827 \text{ Trillionen}$$

Um die Rechenzeit erheblich zu verkürzen, beziehungsweise die Berechnung möglich zu machen, werden triviale und unlogische Berechnungen ausgelassen. Es werden Berechnungen übersprungen, die aufgrund anderer Kriterien nicht zulässig sind. So reduziert sich die mögliche Kabelzahl beispielsweise bei einem bestimmten Strom, wenn kleinere Kabeltypen aufgrund der thermischen Belastung nicht zugelassen sind. Durch diese Optimierungen ist eine Berechnung im Minutenbereich möglich.

4.3. Berechnungsergebnisse

Tabelle 1 fasst die Ergebnisse der Berechnung zusammen.

	28 V DC + 115 V AC	28 V DC + 270 V AC
keine Berücksichtigung der Stromaufteilung	100 %	53 %
Berücksichtigung der Stromaufteilung	63 %	50 %

Berücksichtigung der Stromaufteilung und optimierte Verkabelung	51 %	31 %
---	------	------

TAB 1. Relative Ergebnisse der Gewichtsrechnung.

Die Ergebnisse zeigen ein Gewichtseinsparpotential, sowohl für die aktuelle Bordnetzspannung, als auch für eine mögliche zukünftige DC-Spannungsebene.

4.4. Bewertung der Ergebnisse

Die Berechnungen haben ein Gewichtseinsparpotential aufgezeigt. Bei der Bewertung der Ergebnisse muss man jedoch beachten, dass durch die symmetrische Aufteilung der Lasten, die gleichen Potentiale bei Strahlnetzen mit verzögerten und optimierten Feedern erreicht werden. Der einfach vermaschte Aufbau hat jedoch große Vorteile bei der Verfügbarkeit der Feeder. Kommt es zu einem Ausfall, fallen zumindest größere, örtlich zusammenhängende Netzgebiete nicht aus. Die Gesamtleistung muss jedoch durch ein Power Management reduziert werden.

In aktuellen Flugzeugmustern werden die Unterverteilerboxen mit mehreren Versorgungsleitungen parallel versorgt. Ein einfacher, ringförmiger Aufbau könnte eine ähnliche Verfügbarkeit haben, das Gesamtgewicht jedoch deutlich reduzieren.

5. SCHUTZ IN NETZEN HOHER LASTDICHTHE

Um diesen selektiven Netzschutz in Flugzeugbordnetzen zu realisieren, bietet sich der Distanz- oder Impedanzschutz an. Dieser ist dezentral aufgebaut (keine Kommunikation zwischen den Schaltern notwendig) und arbeitet mit einer selektiven Auslösezeit in Abhängigkeit des Quotienten aus Spannung und Strom nach dem Fehlereintritt, siehe Abbildung 10. Die Selektivität wird hier nicht durch die Staffelung der Sicherungsgrößen (vgl. Kapitel 2 und 3) sondern durch die gemessene Impedanz realisiert. Diese ist dabei abhängig von der Leitungsimpedanz und deren Länge. Je größer die Impedanz ist, desto größer ist auch die Auslösezeit. Dieser Mechanismus hat zur Folge, dass fehlernahe Schutzelemente (aufgrund der kleinen Impedanz) schneller auslösen als fehlerferne und ein Fehler entsprechend separiert wird. Versagt ein fehlernahe Schutzelement, reagiert mit einer entsprechenden Verzögerung das mit der nächsthöheren Entfernung (Impedanz). Dieser Schutz ist zusätzlich für vermaschte Netze mit mehreren Einspeisungen geeignet, da er richtungsunabhängig arbeitet.

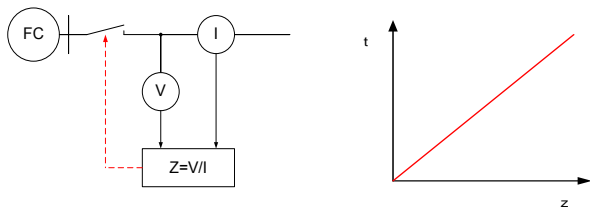


BILD 10. Links: Funktionsweise eines Impedanzschutzgliedes
Rechts: Reaktionszeit in Abhängigkeit der Impedanz

5.1. Schutzglied für Bordnetze

Abbildung 11 zeigt ein einfaches vermaschtes Bordnetz mit zwei Einspeisern und zwei Lasten. Des Weiteren sind zwei Sammelschienensysteme (PEPDC (Primary Electrical Distribution Center) und FCDC (Fuel Cell Distribution Center) vorhanden. Für die korrekte Funktion eines Netzschutzes ist es essentiell, dass die Fehlerimpedanz deutlich kleiner ist als die entsprechenden Leitungsimpedanzen. In einem vermaschten Flugzeugbordnetz mit mehreren Einspeisungen ist dies nicht in jedem Fall gewährleistet.

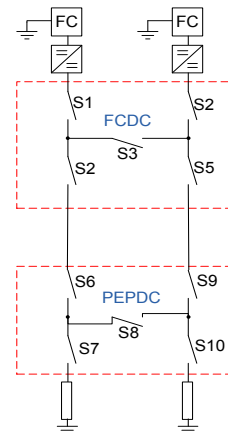


BILD 11. Mögliches vermaschtes Bordnetz mit mehreren Einspeisern (hier Brennstoffzellen)

Einerseits sind die Energieversorgungsrouten sehr niederohmig und andererseits kann bei einem Fehler gegen Erde die Fehlerimpedanz groß sein. Vor allem bei CFK- (Kohlefaserverstärkter Kunststoff) Rümpfen wird die Masse durch ein ESN (Electrical-Structure-Network) realisiert, was aufgrund der Gewichtsoptimierung keine niederohmige Masse zur Verfügung stellen kann. Im Gegensatz zu Aluminiumrümpfen wird bei CFK-Konstruktionen nur wenig elektrisch leitfähiges Material in die Struktur eingearbeitet.

Kommt es bei vermaschten Netzen zu doppelt gespeisten Fehlern, wird der Fehler von zwei Seiten gespeist. Arbeitet der Schutz selektiv, öffnen beide Schalter links und rechts vom Fehler und er ist separiert. Wird ein Fehler durch einen wesentlich hochohmigeren Pfad gespeist, und ist die Fehlerimpedanz nicht wesentlich kleiner, als die Leitungsimpedanz, kommt es im Pfad des hochohmigen Schalters zu einer falschen Impedanzbestimmung.

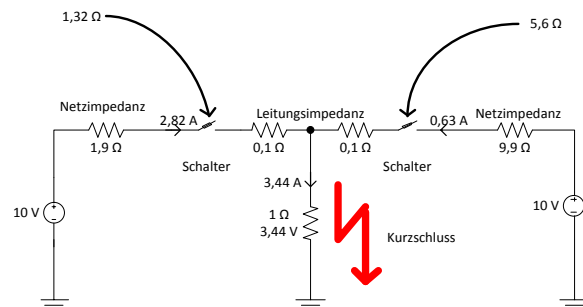


BILD 12. Vereinfachtes Netz mit doppelt gespeistem hochohmigen Fehler

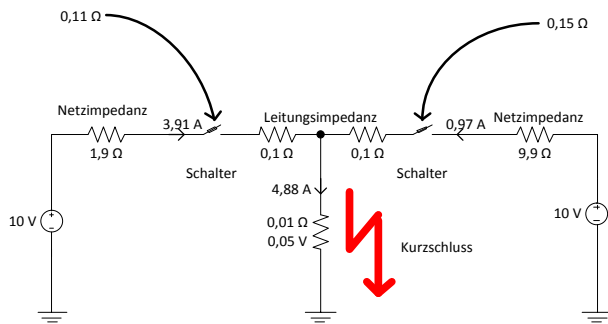


BILD 13. Vereinfachtes Netz mit doppelt gespeistem niederohmigen Fehler

Abbildung 12 und Abbildung 13 zeigen exemplarisch ein vereinfachtes Netz mit doppelt gespeisten Fehlern. In beiden Fällen ist der eine Fehlerpfad wesentlich hochohmiger, als der andere. Die Fälle unterscheiden sich durch unterschiedliche Fehlerimpedanzen.

Die gemessene Impedanz in Abbildung 12 ist nach Fehlereintritt auf der einen Seite des Fehlers vier Mal größer als die andere. Bei konventionellen Energieversorgungsnetzen wird die Auslösezeit unmittelbar nach Fehlereintritt eingestellt. Somit hat der rechte Schalter auch eine vier Mal größere, eingestellte Auslösezeit. In vermaschten Netzen würden aber weitere Schalter nach dem Auslösen des linken fehlernahen Schalters einen Fehler sehen. Ist die nach Fehlereintritt eingestellte Auslösezeit bei den anderen (nicht dargestellten) Schaltern kleiner, als die des rechten Schalters, schalten sich unnötigerweise weitere Netzabschnitte ab, bevor der rechte Schalter reagiert. Somit ist der Schutz nicht selektiv.

Das identische Netz in Abbildung 13 hat nun einen niederohmigen Fehler. Trotzdem ergeben sich weiterhin Unterschiede in den nach dem Fehlereintritt eingestellten Auslösezeiten. Diese sind jedoch deutlich kleiner, sodass ein Netzschutz hier unter Umständen funktionieren würde.

5.1.1. Dynamische Steuerung der Auslösezeit

Das hier neu vorgestellte Schutzglied realisiert in Flugzeugbordnetzen einen selektiven Netzschutz trotz der oben beschriebenen Problematik. Dazu wird ein neues Verfahren zur nachträglichen Auslösezeitanpassung verwendet. Dabei wird die Ist-Zeit nach dem Fehlereintritt permanent mit der Sollzeit der aktuellen Impedanz verglichen. Ist die Ist-Zeit größer, schaltet der Schalter sofort ab. Übertragen auf Abbildung 12 bedeutet dies, dass nach dem Öffnen des linken Schalters der rechte Schalter die tatsächliche Impedanz (1,1 Ω) misst und somit die angepasste Sollzeit kleiner wird, als die Ist-Zeit. Übertragen auf größere Netze mit vielen aktiven Schaltern bedeutet dies, dass auch bei hochohmigen Fehlern und deutlichen Unterschieden in den Speiseimpedanzen eine zuverlässige Auslösung möglich ist. Speziell bei einer CFK-Struktur bietet sich dies an, da die Erdimpedanz hier groß ist.

Abbildung 14 verdeutlicht vereinfacht die Steuerung eines solchen Schalters. Die tatsächliche Steuerung wurde in Matlab-Simpower-Systems realisiert und getestet und hat

in einem modellierten Flugzeugbordnetz mit echten Kabel- und Sammelschienenimpedanzen in der Simulation zuverlässig die verschiedenen Fehlerszenarien separiert (Kapitel 5.2).

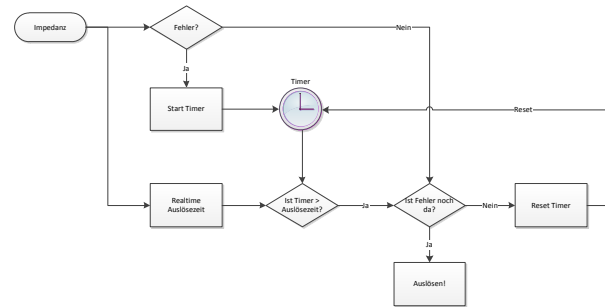


BILD 14. Blockschaltbild Schaltersteuerung

5.1.2. Angepasste Auslösezeitkurven

Abbildung 15 zeigt eine weitere Möglichkeit zur Optimierung. Kommt es in einem Netz zu großen Unterschieden in der Fehlerimpedanz, kann die Auslösezeitbestimmung angepasst werden. Für eine Auslösezeit von einer Sekunde bei einem Ohm Fehlerimpedanz sind vier verschiedene Kurven gegeben. Diese Anpassung ist auch dann geeignet, wenn man Netzabschnitte mit einem Impedanzschutz ausstatten möchte, die sehr kleine Unterschiede in den Zuleitungsimpedanzen aufweisen. Dies kann beispielsweise bei der Absicherung der Hauptsammelschienen sinnvoll sein. Hier sind die Leitungslängen sehr kurz und damit auch die Unterschiede in der Impedanz sehr klein.

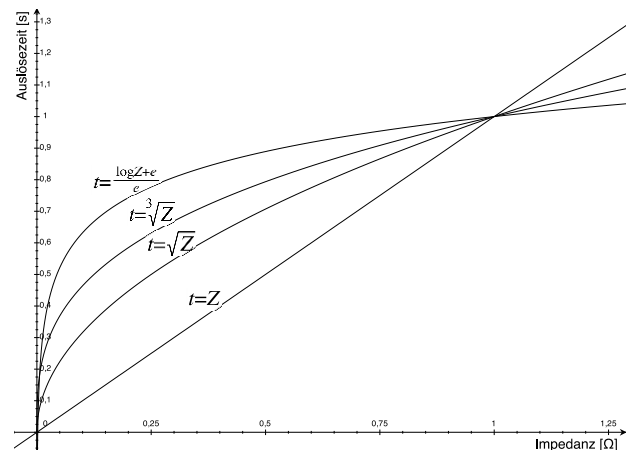


BILD 15. Impedanzabhängige Auslösezeiten bei verschiedenen Bestimmungsverfahren

5.2. Simulatorische Evaluierung des angepassten Impedanzschutzes

Zur simulatorischen Überprüfung der Überlegungen wurde das Bordnetz aus Abbildung 11 in Matlab-Simulink-Simpower nachgebaut. Dabei wurden die Längen aus Abbildung 9 übernommen und entsprechende Kabelimpedanzen in die Simulation eingebaut. In der Simulation sind zwei Powercenter vorhanden (PEPDC und FCDC). Somit ist die Struktur als geschlossener Ring aufgebaut. Der gesamte Simulationsaufbau ist in Abbildung 16 zu sehen. Der Proportionalitätsfaktor

zwischen Impedanz und Zeit ist mit 1 gewählt. Die Auslösezeit ist linear abhängig von der gemessenen Fehlerimpedanz.

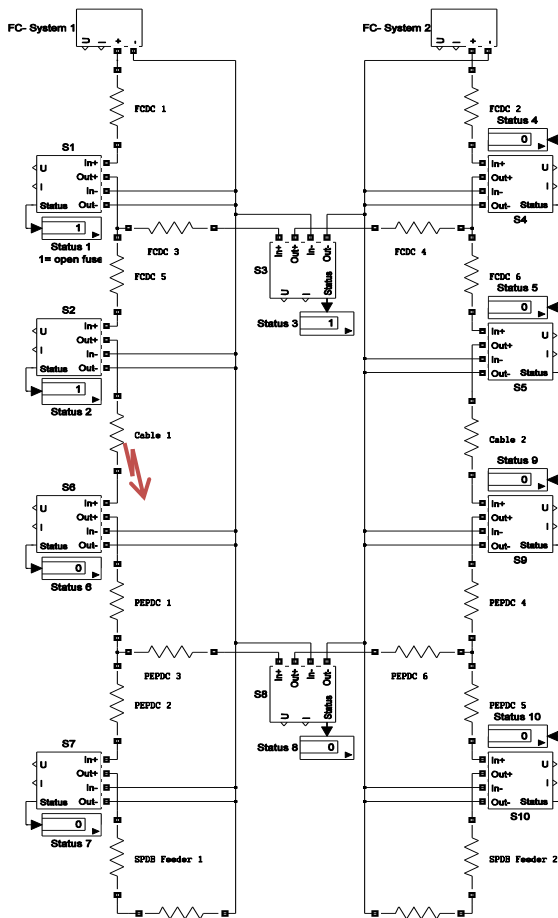


BILD 16. Simulationsmodell in Matlab-Simulink

Auf der Kabelstrecke zwischen den beiden Sammelschienen (Powercenter) kommt es bei $t=5$ s zu einer hochohmigen Erdberührung ($0,1 \Omega$). Die Erdimpedanz ist dabei größer, als die entsprechenden Leitungsimpedanzen. Abbildung 17 zeigt die Impedanzverläufe aller betroffenen Schalter. Es ist zu erkennen, dass zwar S2 die kleinste Impedanz misst und somit auch am schnellsten auslöst, S6 jedoch die größte Impedanz misst und somit bei einem konventionellen Distanzschutz auch die Auslösewartzeit am größten wählt.

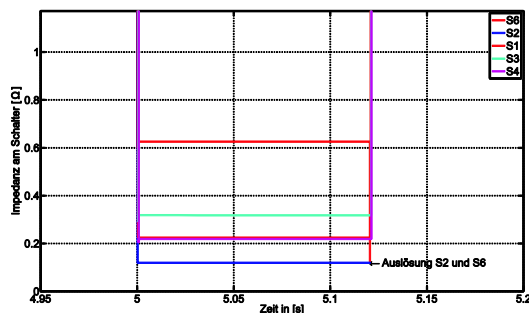


BILD 17. Verlauf der Schalterimpedanzen bei Fehlereintritt $t=5$ s

Man erkennt weiterhin, dass nach $0,12$ s Schalter S2 auslöst. Der Schalter kann nach dem Auslösen keine Impedanz mehr messen (Verlauf endet). Die Impedanz von Schalter S6 springt nun auf $0,12 \Omega$. Durch die nun angepasste Auslösezeit, bekommt der Schalter nun unmittelbar ein Auslösesignal und der Fehler kann freigeschaltet werden.

Mit diesem angepassten Verfahren kann verhindert werden, dass es zu einer Fehlauslösung im Netz kommt. Beim konventionellen Verfahren hätte S4 die nächst höhere Auslösezeit. Da der Fehler nach dem Schalten von S2 immer noch anliegt, würde S4 ebenfalls schalten. Auch nach dem Schalten von S4 kann der Fehler über S1 und S3 weiterhin gespeist werden, so dass gestaffelt auch diese beiden Schalter auslösen würden. Damit wäre das gesamte Netz abgeschaltet und es hätte keine Fehlerseparierung stattgefunden.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Am Anfang der Arbeit wurde ein Überblick über den Aufbau von konventionellen Bordnetzen gegeben. Im weiteren Kapitel wurden Schutzkonzepte und die technische Realisierung derer genauer betrachtet. Es wurde beschrieben, wie man thermische Schutzschalter in einer Simulationsumgebung mit der Implementierung der entsprechenden Differenzialgleichung einbauen kann.

Die folgenden Kapitel beschäftigten sich mit Bordnetzen hoher Lastdichte. Es wurde ein Rechenbeispiel gegeben, wie man eine effiziente und leichte Kabinenenergieversorgung realisieren kann, die die hohen Anforderungen an die Verfügbarkeit einhält.

Abschließend wird ein neuartiger Netzschutz für Flugzeuge vorgestellt. Vor allem in CFK-Rümpfen sind die Fehlerimpedanzen bei einer Erdberührung relativ hoch und man muss den entsprechenden Netzschutz an diese Bedingungen anpassen. Dies ist durch die dynamische Auslösezeit bei einem Distanzschutz gelungen und dies konnte simulatorisch nachgewiesen werden.

Die Gewichtsuntersuchungen zeigen, dass in den elektrischen Energieversorgungsnetzen ein hohes Gewichtseinsparpotential vorhanden ist. Die Beispielrechnung hat sich auf ein Kabinenenergieversorgungsnetz eines relativ kleinen Flugzeuges bezogen. Zukünftig wird die Machbarkeit eines vollständig vermaschten Netzes an Bord untersucht. Damit kann eine präzise Aussage zum Gewichtseinsparpotential gegeben werden. Vor allem in Großraumflugzeugen kann ein solcher Aufbau eine interessante Alternative bilden.

DANKSAGUNGEN

Diese Arbeit wurde von Airbus im Projekt "Kabinentechnologie und multifunktionale Brennstoffzelle", sowie von EADS Innovation Works im Projekt "Simplifizierte Kabine", sowie dem Bundesministerium für Bildung und Forschung und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie ermöglicht.

REFERENZEN

- [1] A. Reichert, "Decrease of the Bidirectional Load Flow on Modern Airlines by Improvement of the Primary Electrical Power Grid," diploma thesis (in German). Helmut-Schmidt University, Hamburg, Germany, 2010.
- [2] Ian Moir and Allan Seabridge, "Aircraft Systems" 3rd edition, 2008, pp 227-228.
- [3] Boeing, AERO - 787 No-Bleed Systems.
http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_07/article_02_3.html (accessed November 24, 2010).
- [4] Heuck, K. and Dettmann, K.-D., Electrical Power Systems, 8. Edition (in German) Wiesbaden: Vieweg, 2010,
<http://www.gbv.de/du/services/toc/bs/479445842>.
- [5] Brombach, J., Lücken, A., Schulz, D., and Schröter, T., Structural and Functional improvement of the electrical energy distribution of modern aircraft. (in German) Hamburg: 59. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress der DGLR, 2010
- [6] J.A. Rosero, "Moving Towards a More Electric Aircraft", IEEE A&E System magazine, March 2007.
- [7] Schwab, A.J.: Elektroenergiesysteme - Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie, 2.Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2006.Schrifttum
- [8] Baehr, H.D.;Kabelac, S.: Thermodynamik - Grundlagen und technische Anwendungen, 14.Auflage, Springer Verlag Berlin, 2009.
- [9] Airbus, "Electrical Cable Selection Criteria and Protection Against Short-Circuits", France, 2002