OPTIMIERTE KABINENENERGIEVERSORGUNG IN MODERNEN VERKEHRSFLUGZEUGEN DURCH DEN EINSATZ HOHER GLEICHSPANNUNGSEBENEN

J.Brombach, B.Nya, D.Schulz,
Professur für Elektrische Energiesysteme, Helmut-Schmidt-Universität, 22043 Hamburg

Zusammenfassung

Der Großteil der elektrischen Energieversorgung in Flugzeugen wird heute durch Wechselstrombordnetze realisiert. Durch die einfache Erzeugung, die leichte Transformation und die gute Schaltbarkeit haben sich diese in der Vergangenheit durchgesetzt.

In den hochtechnisierten Bordnetzen werden heute jedoch die meisten Lasten mit integrierten Vorschaltgeräten oder Umrichtern betrieben. Da Bordnetze eine hohe Netzimpedanz haben, muss man einen großen Filteraufwand betreiben, um das Netz nicht mit Spannungsverzerrungen zu belasten. Speziell bei den Lasten müssen spezielle Filter (PFC[1]) eingesetzt werden, um die von dem Brückengleichrichter verursachten Verzerrungen herauszufiltern. Diese Komponenten sind bei einer DC-Versorgung nicht notwendig. Daraus kann sich bei einer DC-Versorgung der lasteigenen Umrichter ein großes Gewichtseinsparpotential ergeben.

Neue Herausforderungen ergeben sich jedoch bei der Stabilität von DC-Netzen. Lasten, die über Umrichter versorgt werden, haben meistens einen eingangsspannungsunabhängigen Leistungsbezug. Bricht die Versorgungsspannung ein, erhöhen die Lasten die Stromaufnahme, was die Spannung weiter einbrechen lässt und somit das Netz destabilisiert.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit den Potentialen einer HVDC[2]-Kabinenversorgung zur Erhöhung der Effizienz und zur Reduktion des Gewichtes. Der Fokus der Untersuchungen liegt in der Umrichterstruktur und strukturellen Einsparungen im Energieversorgungsnetz. Zusätzlich werden Analysen zum Stabilitätsverhalten durchgeführt. Der Einfluss einer großen Anzahl von Lasten mit einem konstanten Leistungsbezug auf ein HVDC-Bordnetz wird untersucht. Es wird dargestellt, inwieweit das Netz technologisch angepasst werden muss, um die Stabilitätskriterien einzuhalten. Abschließend wird eine Bewertung der Einsparpotentiale abgegeben.

1. EINLEITUNG

Eine der wichtigsten Bestrebungen im Bereich der Mobilität ist heute die Verbesserung der Effizienz und die Reduktion des Schadstoffausstoßes. Dies gilt auch für die Luftfahrtindustrie. Waren vor einigen Jahrzehnten die Treibstoffkosten in der Fliegerei nebensächlich, machen sie heute einen erheblichen Anteil der Betriebskosten eines Flugzeuges aus [1-3].

Neben der Optimierung des aerodynamischen Systems und der Triebwerke, ist der Hauptoptimierungsansatz die Reduktion des Gewichtes aller Systeme. Das gesamte elektrische Versorgungssystem eines Flugzeuges hat ein Gewicht im Bereich von 1 % des maximalen Startgewichtes. Zusätzlich ist je nach Ausführung auch noch eine große Anzahl elektrischer Verbraucher verbaut, die ebenfalls einen erheblichen Beitrag zum Gesamtgewicht des Flugzeuges haben.

Zusammen bieten das elektrische Energieversorgungssystem und die elektrischen Lasten einen Ansatz zur Optimierung durch den Einsatz hoher Gleichspannungsebenen [4-9]. Bild 1 zeigt ein Flugzeug mit einen HVDC-Bordnetz und einer Anzahl typischer Lasten mit den integrierten Umrichtern.

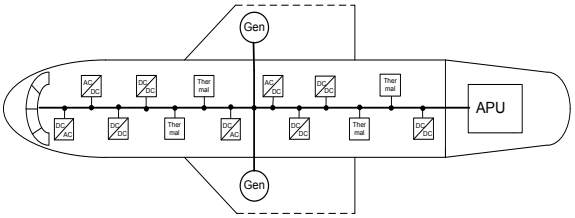

BILD 1. Vermaschtes Bordnetz mit multiplen Einspeisern

In dem Forschungsprojekt „Kabinentechnologie und multifunktionale Brennstoffzelle“, wird an der Helmut-Schmidt-Universität in Kooperation mit Airbus 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.

[1] Power Factor Corection
[2] High Voltage DC

2. KONVENTIONELLE BORDNETZE

In konventionellen Flugzeugen ist die Generatorklemmspannung meist 200 V [10]. Die vorwiegend von den Lasten genutzte Sternspannung beträgt dabei 115 V AC. Die Aluminiumaußenhaut dient hier als Rückleiter. Kleinere Lasten nutzen eine mit Batterien gepufferte 28 V DC Spannungsebene. Diese wird aus der 115 V Bordspannung durch Gleichrichter erzeugt. Neuere Flugzeuge versorgen das Bordnetz mit einer variablen Frequenz von 360 – 800 Hz. Dies hat den Vorteil, dass man die Generatoren ohne Drehzahlanpassung direkt an den Triebwerken mit deren variabler Drehzahl betreiben kann (Bild 2). In älteren (noch aktuellen) Mustern wird ein hydraulischer Wandler (CSD[3]) zwischen die Generatoren und die Triebwerkswelle geschaltet, um die variable Turbinendrehzahl auf einen konstanten Wert zu wandeln. Diese mechanisch-hydraulische Drehzahlanpassung hat jedoch Nachteile beim Wartungsaufwand und der Effizienz und wird in den aktuellsten Modellen der beiden größten Hersteller nicht mehr verwendet.

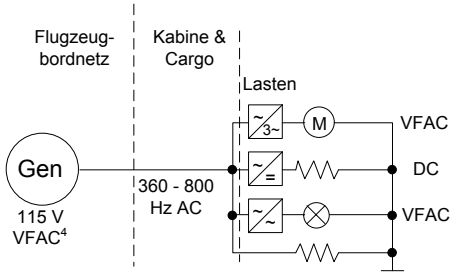

BILD 2. Vereinfachtes konventionelles Bordnetz mit 115 V Sternspannung und vier typischen Lasten (motorische-, elektronische-, beleuchtungs- und thermische Lasten)

Nachteil eines frequenzvariablen Netzes ist jedoch der Umstand, dass Lasten, welche eine konstante Betriebsfrequenz benötigen (Motoren, Beleuchtung mit vorgeschalteten Drosseln), nur über Frequenzumrichter betrieben werden können. Bild 2 zeigt vier typische Lasten. Der Trend geht jedoch bei diesen Lasten auch ohne die Frequenzproblematik hin zu elektronischen Vorschaltgeräten und Vollumrichtern. Dadurch lassen sich motorische Lasten und die Beleuchtung regeln.

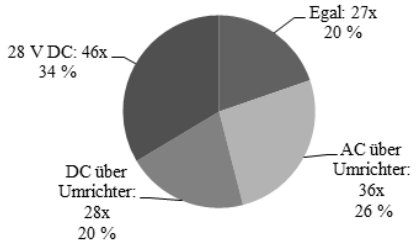

BILD 3. Verteilung der verschiedenen Lasttypen im konventionellen Bordnetz

Bild 3 zeigt die quantitative Verteilung der vier verschiedenen Lasttypen in einem modernen Kurz- und Mittelstreckenflugzeug. Die Abbildung zeigt, dass die verschiedenen Typen, gewichtet nach der Anzahl, in ähnlichen Größenordnungen auftreten und eine Vielzahl von Lasten existiert, die über elektronische Vorschaltgeräte verfügen. Gewichtet man die Lasten nach ihrer bezogenen Leistung, haben die thermischen Lasten einen größeren Anteil. Hier sei auf eine vergangene Veröffentlichung verwiesen [8].

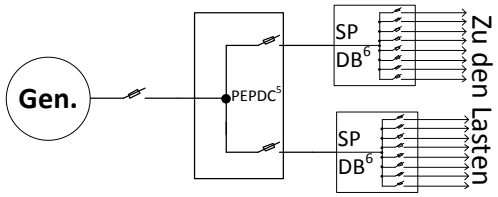

BILD 4. Aufbau eines Flugzeugbordnetzes mit einer dezentralen Verteilung und Absicherung

Bild 4 zeigt den prinzipiellen strukturellen Aufbau konventioneller Bordnetze. Dieser soll in dieser Arbeit auch für neue Spannungsebenen gleich bleiben. Hier sei auf eine andere Arbeit verwiesen, die eine Veränderung der Bordnetzstruktur vorschlägt [11].

Der Aufbau lässt erkennen, dass die Erzeuger (hier ein Generator) auf das primäre Versorgungszentrum (PEPDC[5]) einspeisen. Ein vorheriges Abgreifen der Versorgungsspannung ist dabei nicht möglich. Das PEPDC befindet sich hierbei vorne im Flugzeug. Da die Lasten wieder weiter hinten positioniert sind, kommt es zu einem antiparallelen Lastfluss [2]. Im PEPDC werden dann große Lasten (>15 A) direkt angeschlossen. Kleinere Lasten werden über dezentrale Unterverteilboxen (SPDB[6]) angeschlossen. Zwischen den PEPDC und den SPDBs befinden sich sogenannte Feeder, die von nun an als Primärverteilung beschrieben wird. Von den SPDBs zu den Lasten befinden sich sogenannte M-Routen, die nun als Sekundärverkabelung bezeichnet wird. Dabei hat jede Last eine eigene M-Route. Ein Anschließen mehrerer lokal konzentrierter Lasten an eine Sekundärkabelstrecke ist aus Segregationsgründen nicht erlaubt.

In dem PEPDC befinden sich ebenfalls die Gleichrichter für die 28 V Gleichspannungsebene, sowie ein Teil der Bordbatterien.

Die einzelnen Generatoren versorgen dabei immer ein unabhängiges Netzgebiet. Aufgrund der immer leicht unterschiedlichen Drehzahlen der Triebwerke ist eine Synchronisation und damit Parallelschaltung nicht möglich. Aus diesem Grund weisen die Generatoren eine hohe Überkapazität auf. Einerseits muss jeder Generator in seinem Netzgebiet die benötigte Regelleistung zur Verfügung stellen und andererseits muss aus Redundanzgründen bei einem Generatorausfall das ausgefallene Netzgebiet durch einen anderen Generator mitversorgt werden.

[3] Constant Speed Drive
[4] Variable Frequency AC
[5] Primary Electrical Power Distribution Center
[6] Secondary Power Distribution Box

3. HVDC-BORDNETZE

Sowohl in der konventionellen Energieversorgung, als auch in der Luftfahrtindustrie ist ein Trend zu hohen Gleichspannungsebenen zu beobachten [10,12]. In beiden Bereichen spricht man von dem Begriff HVDC[7]. Bei der konventionellen Energieversorgung ist jedoch die Betriebsspannung solcher Übertragungsanlagen (dt. HGÜ[8]) 145 kV [13]. In Bordnetzen von Flugzeugen wird die HVDC-Spannungsebene aus der Gleichrichtspannung eines 115 V Generators abgeleitet:

(1) $$U_{\mathrm{HVDC}} = \hat{U}_{\mathrm{LL}} = 115V \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \approx 270V$$

Verwendet man 230-V-Generatoren, stehen gleichgerichtet sogar +/- 270 V = 540 V zur Verfügung.

Auch Brennstroffzellensysteme, welche zukünftig die APU ersetzen könnten [5,9], liefern naturgemäß eine Gleichspannung. Denkbar wären auch reine DC-Generatoren. Aufgrund der Robustheit und der hohen Leistungsdichte der konventionellen Drehstromgeneratoren erscheint diese Lösung jedoch unwahrscheinlich.

Die Realisierung der oben angesprochenen Möglichkeiten wird durch den Trend zu immer leistungsfähigerer und leichterer Leistungselektronik wahrscheinlicher. So sind Gleichrichter heute um einiges leichter, als noch vor einem Jahrzehnt [14]. Auch sind heute DC-DC-Wandler mit sehr hohen Leistungsdichten verfügbar, um beispielsweise die lastvariable Gleichspannung einer Brennstoffzelle zu stabilisieren.

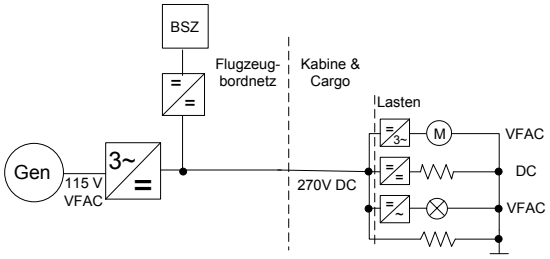

BILD 5. Mögliches Bordnetz mit HVDC-Spannungsebene und einer HVDC Kabine

All diese Vorteile werden in den beiden neusten Typen im Bereich der zweistrahligen Großraum-Langstreckenjets der zwei größten Flugzeugbauer schon teilweise genutzt. So haben beide Typen einen HVDC-Bus an Bord, um große motorische Umrichter zu versorgen [6]. Dieses Prinzip wird auch als dezentraler Gleichspannungszwischenkreis bezeichnet. Es hat den Vorteil, dass nicht jeder Umrichter seinen eigenen Gleichrichter und Zwischenkreiskondensator benötigt.

Heute werden aber nur wenige Lasten von dieser Spannungsebene versorgt und diese Ebene ist nicht die Hauptverteilspannungsebene. Als einzige Ausnahme ist hier ein Militärjet eines amerikanischen Herstellers zu nennen [4] der HVDC an Bord als Hauptspannungsebene nutzt.

Ein mögliches ziviles Flugzeugbordnetz mit einer HVDC-Kabine ist in Bild 5 dargestellt. Hier werden alle Lasten primär mit HVDC versorgt. Es ist kein zentraler Umrichter vorhanden, der beispielsweise eine HVDC-Brennstoffzellenspannung für die Kabine wieder auf die konventionellen 115 V AC umwandelt. Als Nachteil ist hier zu nennen, dass die Lasten an diese neue Spanungsebene angepasst werden müssten. Zusätzlich zu der Einsparung bei dem nicht nötigen zentralen Umrichter ergeben sich Vorteile bei den Lasten. Das wird in dem folgenden Kapitel genauer untersucht.

4. LASTSEITIGE GEWICHTSOPTIMIERUNG DURCH EINE HVDC-VERSORGUNG

Ziel dieser Arbeit ist nicht nur die Optimierung des elektrischen Energieversorgungssystems bis zur Last, sondern auch in die Last hinein. Nur 20 % der Kabinen- und Cargolasten nutzen dabei heute die gegebene Spannung direkt. Ein Großteil der Lasten hat interne Netzteile oder Umrichter, um die Spannung umzuwandeln.

Als Beispiel sei hier das IFE[9]-System genannt, welches aus kleinen Terminals in den Sitzlehnen des Vordermannes besteht. Diese sind kleine Computer, welche intern mit kleinen Gleichspannungen arbeiten. Ähnlich konventionellen Laptop-Netzteilen, wird diese Spannung vor Ort aus der Flugzeugwechselspannung erzeugt.

Als weiteres Beispiel sei hier die Beleuchtung zu nennen. Diese besteht meistens aus Leuchtstoffröhren, welche heute über elektronische Vorschaltgeräte (EVGs) versorgt werden. Diese wandeln die gegebene Spannung in eine Rechteckspannung hoher Frequenz um. Um heutigen Komfortansprüchen gerecht zu werden, kann die Beleuchtung in ihrer Intensität geregelt werden.

Als drittes Beispiel seien motorische Lasten zu nennen. Auch diese sollen heute in ihrer Drehzahl regelbar ausgeführt werden, was einen Vollumrichter erfordert (drehzahlvariabler Ausgang).

4.1. Lastseitige Umrichter im Flugzeugbordnetz

Allen Vorschaltgeräten gemeinsam ist die Tatsache, dass sie eine Wechselspannung am Eingang gleichrichten müssen, da der Ausgang entweder eine Gleichspannung ist oder weil zumindest innerhalb einer Stufe eine Gleichspannung auftritt[10].

Bild 6 zeigt vier verschiedene Umrichtervarianten mit den entsprechenden Leistungsgewichten der einzelnen Stufen und dem Gesamtleistungsgewicht. Man erkennt deutliche Gewichtsunterschiede zwischen einer AC-Versorgung und einer DC-Versorgung. Dieser resultiert einerseits in der geringeren Anzahl der Stufen bei einer DC-Versorgung und andererseits aus einem großen Filteraufwand am Eingang der AC-betriebenen-Umrichter.

[7] High Voltage DC
[8] Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
[9] In Flight Entertainment
[10] Gleichspannungszwischenkreis bei Umrichtern oder bei EVGs

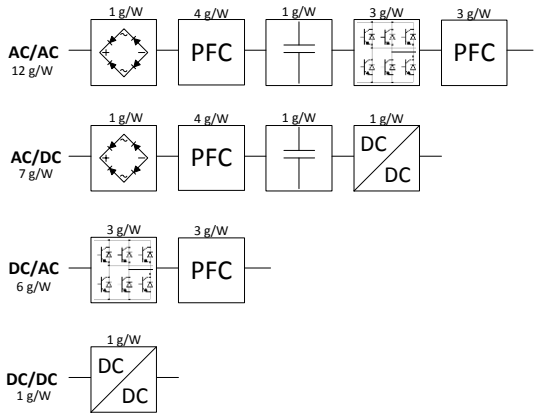

BILD 6. Leistungsgewichte verschiedener Netzteile und Umrichter für Flugzeuganwendungen kleiner 5 kW [8]

Dieser Filteraufwand resultiert aus den Eingangsstrom-verzerrungen konventioneller Brückengleichrichter (Bild 7). Diese laden (wenn kein Filter vorhanden ist) den Zwischenkreis nur im Spannungsmaximum der Wechselspannung auf. Aus diesem Grund entspricht die Gleichrichtspannung auch in etwa dem Dachwert der Wechselspannung.

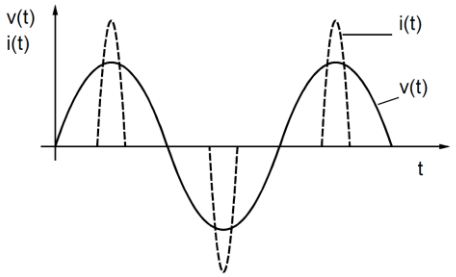

BILD 7. Eingangsstromverlauf eines Brückengleichrichters bei einer sinusförmigen Eingangsspannung [15]

Um die Verzerrungen zu vermeiden, können aktive oder passive Eingangsfilter verwendet werden. Beide Varianten werden auch als PFC[1] bezeichnet. In konventionellen Energieversorgungsnetzen sind diese nach DIN-EN [16] ab einer Leistung von 75 W vorgeschrieben. In Flugzeugbordnetzen gibt es diese Grenze nicht. Jede Last darf ein gewisses relatives Stromharmonischen-spektrum nicht überschreiten. Dadurch müssen auch in sehr kleine Lasten Filter eingebaut werden, um die definierten Bedingungen einzuhalten. Die Regeln in Flugzeugbordnetzen sind besonders streng, da ein Flugzeugbordnetz – wie andere kleine Inselnetze auch – über eine hohe Netzimpedanz verfügt und Stromharmonische daher überproportional in Spannungsverzerrungen gewandelt werden.

Die aktive Variante dieser Filter sitzt dabei hinter dem Brückengleichrichter und besteht aus einem geregelten Hochsetzsteller, der die Stromaufnahme der Spannungsform nachführt und somit eine sinusförmige Stromaufnahme erzeugt. Da der Hochsetzsteller die Spannung von nahezu null auf die Zwischenkreisspannung anheben muss, ist das Gewicht dieser Komponente relativ hoch. Des Weiteren sind die peripheren Komponenten komplex, wenn die Nachführung des Stromes sehr wenige Verzerrungen verursachen soll.

4.2. HVDC-Versorgung der Cargo- und Kabinenlasten

Wie Bild 6 schon gezeigt hat, ergeben sich große Gewichtsvorteile bei den lastseitigen Umrichtern, wenn diese mit einer hohen Gleichspannung versorgt werden. Da DC/DC-Steller mit sehr hohen Schaltfrequenzen arbeiten (um 40 MHz) ist einerseits die Reichweite von Stromharmonischen sehr gering und der Filteraufwand am Eingang in Relation zu den anderen Komponenten zu vernachlässigen [17]. Auch Steller kleiner Leistung haben sehr hohe Leistungsdichten und Wirkungsgrade.

Als anschauliches Beispiel seien hier die Steller innerhalb eines modernen Notebooks genannt, die die DC-Versorgungsspannung (ca. 18 V) weiter herabsetzten. Moderne Prozessoren benötigen alleine ca. 30 W Leistung. Bei einer Betriebsspannung von ca. 1,5 V und einen Betriebsstrom von 20 A ist das Bauelement auf der Platine verbaut und wiegt nur einige Gramm.

Das elektrische Kabinen- und Cargosystem eines modernen Kurz- und Mittelstreckenflugzeuges besteht aus ca. 140 Lasten mit einer Leistungsaufnahmen von ca. 100 kW. Betrachtet man nun jeden einzelnen Lasttyp genauer und ordnet ihnen einzeln die entsprechende Umrichterkategorie zu, kann man mit den in Bild 6 gegebenen Werten das Gewicht jedes einzelnen Umrichters bestimmen. Führt man diese Berechnung mit einer DC und mit einer AC Versorgung durch, erhält man folgende relativen Gewichte.

Versorgungstyp	Relatives Gewicht
115 V AC Kabine	100 %
270 V DC Kabine	42 %

TAB 1. Relatives Gewicht aller lastinternen Kabinen- und Cargoumrichter [8]

Da das absolute Gewicht aller lastseitigen Umrichter bei einem konventionellen Flugzeug im mittleren dreistelligen Bereich liegt, ist auch das absolute Einsparpotential groß. Die Berechnungen zeigen auch, dass die lastseitigen Umrichter einen großen Anteil am Gesamtgewicht des elektrischen Systems aufweisen. Da die Lasten aber zum Equipment zählen, wurde diese Betrachtung bisher nicht durchgeführt. Das Gewichtseinsparpotential steigt sogar noch weiter, wenn – ein HVDC Bordnetz vorausgesetzt – ein entsprechender Kabinenwechselrichter weggelassen werden kann, wenn man sich ebenfalls für eine HVDC-Kabine entscheiden sollte.

Diese Betrachtung sollte man global durchführen. Entscheidet man sich aufgrund der Integration eines Brennstoffzellensystems für ein HVDC-Bordnetz, ist die Nutzung dieser Spannungsebene in der Kabine sehr sinnvoll, da erstens die Umrichterkette verkleinert wird und zweites das Equipment leichter wird. Aber auch ohne die Integration eines Brennstoffzellensystems erscheint die Nutzung dieser Spannungsebene sinnvoll. Das folgende Kapitel wird auf den Einfluss einer HVDC-Spannungsebene auf die Kabinen- und Cargoverkabelung eingehen.

5. STRUKTURELLE GEWICHTSOPTIMIERUNG DURCH EINE HVDC-VERSORGUNG

Die Erhöhung der Spannung hat einen positiven Einfluss auf das Gewicht der Verkabelung [5]. Dies liegt in erster Linie an dem reduzierten Stromfluss bei gleicher Leistung. So kann beispielsweise bei einer doppelten Spannungshöhe überschlägig der Kabelquerschnitt halbiert werden. Bei der Dimensionierung von Kabelstrecken innerhalb des Flugzeuges spielen jedoch mehrere Faktoren eine Rolle. Die Generatorrouten[11] werden heute thermisch ausgelegt und hier gilt dieser Zusammenhang weitestgehend[12]. Die Primärverkabelung und die Sekundärverkabelung werden jedoch nach drei Kriterien ausgelegt:

- Mindestgröße bei entsprechender Sicherung
- Maximal erlaubter Spannungsabfall
- Maximal erlaubte Erwärmung

Vor allem der erlaubte Spannungsabfall über eine entsprechende Kabelstrecke hat einen großen Einfluss auf die Auslegung. So kann dieser bei kleinen Kabeldurchmessern schon nach einigen Metern erreicht sein, so dass aufgrund des Spannungsabfalls eine Last mit einem entsprechend dickeren Kabel angeschlossen werden muss [5].

Auch die Spannungshöhe und die Art des Rumpfes haben wiederum einen Einfluss auf den erlaubten Spannungsabfall. Dieser ist relativ definiert (Tab 1):

	28 V DC	115 V AC	230 V AC	270 V DC
Erlaubter Spannungsabfall Primär	1 V	3 V	6 V	7 V
Erlaubter Spannungsabfall Sekundär	1 V	3 V	6 V	7 V

TAB 1. Erlaubte Spannungsabfälle vom PEPDC zur Last bei verschiedenen Spannungsebenen

Von diesem Wert müssen die Abfälle über etwaige Schaltelemente abgezogen werden. Auch der Spannungsabfall über die Erdung (Rückleiter) muss abgezogen werden. Bei einem niederohmigen Aluminiumrumpf kann diese Spannung als null angenähert werden. Jedoch nicht bei einem CFK-Rumpf[13]. Hier muss ein Spannungsabfall über den Sternpunkt von 1 V berücksichtigt werden[14].

[11] Routen von den Generatoren zum PEPDC
[12] Die thermische Auslegung erfolgt über die Kabeltemperatur bei einem bestimmten Strom. Da kleinere Leiterquerschnitte ein besseres thermisches Verhalten haben, ist der Gewichtsvorteil überproportional (vgl. [5])
[13] CFK alleine ist kaum leitfähig. Um die Erdung und einen Blitzschutz zu realisieren, werden Metalldrähte in die Struktur eingewoben.
[14] Grundsätzlich könnte man die Erde auch niederohmiger zur Verfügung stellen. Dies würde jedoch das Gewicht der Gesamtstruktur vergrößern.
[15] Elektrische Last Analyse

5.1. Gewichtsberechnung der Verkabelungsstruktur

Die Gewichtsberechnung erfolgt wieder einzeln für jede einzelne Last. Dies wird automatisiert durchgeführt. Als Ergebnis erhält man ein Gesamtgewicht des Verkabelungssystems vom PEPDC zu allen Lasten. Bild 8 zeigt das Strukturdiagramm zur Bestimmung des Gesamtgewichtes. Berücksichtigt werden nicht nur die reinen Kabelgewichte, sondern auch Umwege, das Gewicht der Rückleiter und das Gewicht des zum Energieversorgungssystem zugehörigen Equipments (SPDBs, Schalter, Sicherungen, 28 V Erzeugung). Es gibt dabei im Flugzeug immer zwei Spannungsebenen. Die Hauptspannungsebene und die 28 V DC Ebene, die für kleine Lasten weiterhin existiert.

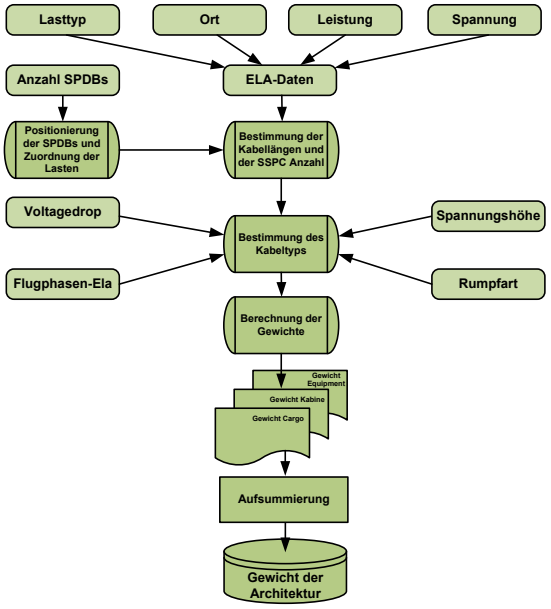

BILD 8. Flussdiagramm zur Berechnung der Architekturgewichte

Mit dem Skript kann man nun verschiedene Spannungsebenen und verschiedene Anzahlen von SPDBs vorgeben und es berechnet für die Vorgaben das Gewicht. Man kann auch die ELA[15] Daten ändern, oder neue Lasten hinzufügen. Des Weiteren kann man die Art der 28 V DC Erzeugung wählen. Hier ist es einerseits möglich, diese zentral zu realisieren, oder dezentral in den SPDBs. Beim dezentralen Konzept wird die DC-Primärverkabelung eingespart und der gesamte erlaubte Spannungsabfall der Sekundärverkabelung zugeordnet. Alle Berechnungen wurden mit einem Einheitslayout für Kurz- und Mittelstreckenflugzeuge durchgeführt. Dieses fand schon in Kapitel 4 Anwendung.

Man kann nun drei Optimierungsparameter variieren. Der erste ist die Spannungsebene, der zweite die Anzahl (oder Vorhandensein) der Unterverteilboxen innerhalb der Kabine und der dritte die Art der 28 V Erzeugung. Bild 9 und Bild 10 zeigen die Ergebnisse der Berechnungen. Hierbei ist die Referenz das Gewicht eines konventionellen Energieversorgungssystems eines aktuellen Kurz- und Mittelstreckenflugzeug, welches der

Sternverkabelung ähnelt. SPDBs finden heute bei diesem Flugzeugtyp noch keine Verwendung [18].

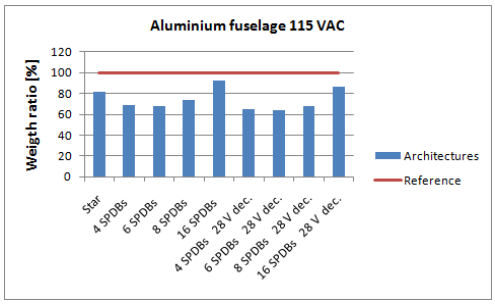

BILD 9. Architekturgewichte bei der konventionellen Spannungsebene von 115 V [18]

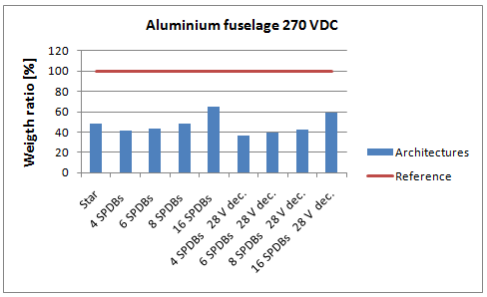

BILD 10. Architekturgewichte bei einer 270 V Spannungsebene [18]

Man erkennt deutlich, dass sich bei den verschiedenen Spannungsebenen jeweils Optima einstellen. So kann das Gewicht bei Beibehaltung der Spannungsebene und ohne eine dezentrale 28 V Erzeugung durch eine SPDB-Struktur auf 70 % gesenkt werden.

Erhöht man die Spannung auf 270 V DC, hat die Architektur noch ein Gewicht von 40 % im Vergleich zur Referenz. Für diese Arbeit ist jedoch der direkte Vergleich der Spannungsebenen einer optimalen Struktur interessant. Normiert man die optimale 115 V Versorgung abermals auf 100 %, hat die 270 V Architektur ein Gewicht von 57 %, es sind also Einsparungen im Bereich von 43 % möglich. Bedenkt man, dass das Energieversorgungssystem ab dem PEPDC ein Gewicht im unteren dreistelligen Bereich aufweist, ist auch hier eine Einsparung im mittleren zweistelligen Bereich möglich.

Bei einer Nutzung einer dezentralen 28 V Erzeugung fallen die relativen Unterschiede sogar noch leicht größer aus, da einerseits der DC/DC-Steller leichter ist und andererseits diese Änderung eine absolute Gewichtseinsparung auf der 28 V Ebene ausmacht, die beide Spannungsebenen gleich betrifft. Die relativen Unterschiede steigen jedoch, wenn die Gesamtarchitektur leichter ist.

Nicht berücksichtigt ist ein zusätzliches, zentrales Equipment zur HVDC-Erzeugung. Hier ist der zentrale Gleichrichter an den Generatoren gemeint. Der gehört nicht direkt zum Kabinen- und Cargosystem, aber der Leistungsanteil der kommerziellen Lasten erfordert anteilig ein Gewicht im zweistelligen Bereich [8]. Dies ist jedoch immer noch gering im Vergleich zu möglichen Einsparungen.

Ebenfalls nicht berücksichtigt in den Kalkulationen ist der Einfluss von zusätzlichem Filterequipment in einer DC-Architektur. Diese dienen zur Verbesserung der Stabilität und eine Beleuchtung findet im nächsten Kapitel statt.

6. STABILITÄTSKRITERIEN IN EINEM HVDC-NETZ

Für die Stabilität in verteilten Gleichspannungsnetzen ist vor allem das Kleinsignalverhalten relevant [19]. Eine Möglichkeit der Bewertung dieser ist die Impedanzanalyse. Dabei wird der Quelle und der Last eine komplexe, frequenzabhängige Impedanz zugeordnet. Voraussetzung für die Impedanzanalyse ist die Abbildbarkeit des Netzwerks mit linearen Bauelementen.

Lasten mit elektronischen Vorschaltgeräten oder Umrichtern haben jedoch kein lineares Verhalten. Da die eigentliche Last von dem Eingang entkoppelt ist, findet beispielsweise bei einem Spannungseinbruch keine Reduktion der Leistungsaufnahme statt. Daraus folgt wiederum, dass die Stromaufnahme bei einer Reduktion der Eingangsspannung sogar steigt. Diese Lasten werden als Konstantleistungslasten bezeichnet und haben ein destabilisierendes Verhalten auf Energieversorgungsnetze. Der Strom-Spannungsverlauf solcher Lasten ist in Bild 11 gegeben. Wie in Kapitel 2 beschrieben, machen diese Lasten heute fast die Hälfte aller Lasten an Bord eines Flugzeuges aus [8].

Um eine Stabilitätsanalyse auf Basis der Ein- und Ausgangsimpedanzen durchführen zu können, ist eine Linearisierung im Arbeitspunkt nötig. Das Resultat ist ebenfalls in Bild 11 zu sehen. Somit haben Konstantleistungslasten im linearisierten Arbeitspunkt das Verhalten eines negativen Widerstandes (-R).

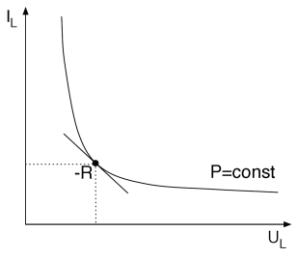

BILD 11. Strom-Spannungskennlinie einer Konstantleistungslast mit einer Linearisierung im Arbeitspunkt

Mit der Linearisierung der Last kann nun das Energieversorgungsnetz abgebildet werden. Bild 12 zeigt ein Netzwerk mit der linearisierten Last und den diskreten Eingangskomponenten.

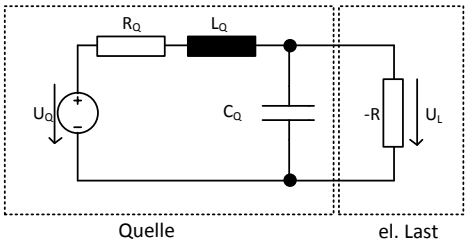

BILD 12. Vereinfachtes Flugzeugbordnetz

Die Komponenten der Quelle fassen dabei sowohl die Komponenten der eigentlichen Quelle (Gleichrichter, Batterie, Generator) und den Kabelstrecken hin zur Last zusammen. Für dieses Netzwerk kann nun eine analytische Stabilitätsbewertung durchgeführt werden. Gleichung 1 zeigt die Umformung des Ansatzes.

$$(1)\quad G(s)=\frac{U_{\mathrm{L}}(s)}{U_{\mathrm{Q}}(s)}=\frac{Z_{\mathrm{L}}}{Z_{\mathrm{L}}+Z_{\mathrm{Q}}}=\frac{1}{1+\mathrm{Z_Q}\cdot\mathrm{Y_L}}$$

Nun kann man die Komponenten in den Laplace-Bereich transformieren. Formel 2 zeigt die Berechnung der Impedanzen im Laplace-Bereich.

$$(2)\quad \text{mit: } G_{\mathrm{R}}(s)=R \qquad Z_{\mathrm{Q}}=R_{\mathrm{Q}}+s\cdot L_{\mathrm{Q}}$$
$$G_{\mathrm{L}}(s)=s\cdot L \Rightarrow \qquad Y_{\mathrm{L}}=-\frac{1}{R_{\mathrm{L}}}+s\cdot C_{\mathrm{Q}}$$
$$G_{\mathrm{C}}(s)=\frac{1}{s\cdot C}$$

Setzt man diese wieder in Gleichung 1 ein, erhält man ein Nennerpolynom mit möglichen Nullstellen und damit die instabilen Zustände des gegebenen Netzwerkes.

$$(3)\Rightarrow G(s)=\frac{1}{s^2\cdot(L_{\mathrm{Q}}\cdot C_{\mathrm{Q}})+s\cdot(R_{\mathrm{Q}}\cdot C_{\mathrm{Q}}-\frac{L_{\mathrm{Q}}}{R_{\mathrm{L}}})+(1-\frac{R_{\mathrm{Q}}}{R_{\mathrm{L}}})}$$

Stabilitätsbedingung eines Systems 2. Ordnung ($a_2s^2+a_1s+a_0$): alle Koeffizienten > 0!

$$(4)\quad \Rightarrow\begin{Bmatrix} L_{\mathrm{Q}}\cdot C_{\mathrm{Q}}>0 \\ R_{\mathrm{L}}>R_{\mathrm{Q}} \\ R_{\mathrm{Q}}\cdot R_{\mathrm{L}}\cdot C_{\mathrm{Q}}>L_{\mathrm{Q}} \end{Bmatrix}$$

Gleichung 4 zeigt die Bedingungen die einen stabilen Betrieb gewährleisten. Die erste Zeile ist hierbei trivial, da C_Q und L_Q nicht negativ sein können.

Zeile Zwei sagt aus, dass der ohmsche Innenwiderstand der Quelle kleiner sein muss als der der Last. Dies ist auch anschaulich zu erklären, da der Punkt der maximalen Leistung einer Quelle immer dann vorliegt, wenn der Lastwiderstand gleich dem Innenwiderstand ist. Danach sinkt die Leistung wieder.

Zeile Drei von Gleichung 4 ist hierbei relevant für das Schwingungsverhalten der Schaltung. Um die Bedingung an einem typischen HVDC-Netz anschaulich zu beschreiben, werden im Folgenden die Parameter des Netzwerkes wie folgt definiert (Tabelle 2):

Leistung Last	22 kW
Spannung	270 V
Innenwiderstand Quelle (R_Q)	0,3 Ω
Widerstand Last	ca. 3,3 Ω

TAB 2. Angenommene Werte für ein HVDC-Netz

Mit diesen Werten erkennt man, dass das Produkt aus R_Q und R_L ungefähr eins ist. Damit muss für diesen speziellen Fall die Kapazität und die Induktivität in derselben Größenordnung liegen (hier sogar gleich sein).

Die erste Erkenntnis aus diesen Ergebnissen ist, dass Netzinduktivitäten ein destabilisierendes Verhalten haben und Netzkapazitäten ein stabilisierendes Verhalten. Nimmt man nun als grobe Abschätzung an, dass in einem HVDC-Bordnetz die beiden Größen dieselbe Größenordnung haben müssen, kann man abschätzen, ob in einem Bordnetz zusätzliche Filter nötig sind.

Das Netzwerk selber (alle Kabelstrecken, ca. 1 km) hat dabei in etwa eine Kapazität von 80 nF und eine Induktivität von 500 µH [17]. Somit liegt seitens des Kabelnetzwerkes kein stabilisierendes Verhalten vor, da die Werte um vier Zehnerpotenzen voneinander abweichen.

Da aber Gleichspannungsquellen meistens eine Kapazität am Ausgang haben, kommt zu der Netzkapazität auch noch die Quellenkapazität dazu. Nimmt man zusätzlich auch noch eine Quellinduktivität unbekannter (aber kleiner) Größe an, sollte die Quellkapazität mindestens einen Wert von 1 mF aufweisen, was bei einem Gleichrichter nicht nötig wäre[16]. Auch ein DC-DC-Steller hat kaum eine Ausgangskapazität in dieser Größenordnung.

Somit muss das Netz zur Stabilisierung mit einem oder mehreren Kondensator(en) gestützt werden. Dies kann beispielsweise mit Superkondensatoren geschehen. Diese würden zur Stützung eines HVDC-Busses bei einer Kapazität von 0,5 F ein Gewicht von 1,25 kg aufweisen [9]. Diese Gewichtsberechnung wurde zur Verbesserung des dynamischen Verhaltens von Brennstoffzellen durchgeführt, aus der auch die große Kapazität resultiert. Die Kondensatoren würden gleichzeitig auch das Netz stabilisieren.

Findet nun ein Brennstoffzellensystem als Hilfsstromerzeuger Anwendung, sind unter Umständen keine zusätzlichen Stabilisierungskapazitäten notwendig, da sie Teil des Brennstoffzellensystems sind.

Eine Stabilisierung mit Superkondensatoren hätte jedoch auch nur ein Gewichtszuwachs mit Peripherie (Housing, Anschluss, Monitoring) ein Gewicht im einstelligen Kilobereich zur Folge und müsste von einer etwaigen Gewichtsreduktion abgezogen werden. Da die Gewichtsvorteile in Summe aber im dreistelligen Bereich liegen, hat die Stabilisierung kaum Einfluss auf die Gewichtseinsparpotentiale.

Zusätzlich kann eine Kapazität im Farad-Bereich zu den stabilisierenden Funktionen auch höherer Anlaufcharakteristiken des Equipments erlauben. Nach aktuellem Stand darf HVDC-Equipment einen Anlaufstrom von dem zweifachen von I_{Nenn} aufweisen. Dies macht unter Umständen Modifikationen im Equipment notwendig, die einen Gewichtsnachteil haben könnten[17].

[16] Basis ist eine Berechnung der minimal erlaubten Welligkeit in dem gegebenen Arbeitspunkt.
[17] Wenn die Begrenzung nicht regelungstechnisch gelöst werden kann.

Eine große Stützkapazität im HVDC-Netz würde deutlich größere Anlaufströme zulassen.

7. POTENTIALABSCHÄTZUNG UND AUSBLICK

Die Arbeit beschäftigt sich mit den Potentialen einer HVDC-Energieversorgung an Bord von Flugzeugen zur Gewichtsreduktion. Drei Punkte finden hier Berücksichtigung.

- Lastseitige Gewichtsoptimierung
- Strukturelle Gewichtsoptimierung
- Zusätzliches Gewicht einer Stabilisierung

Zusammengefasst ergeben sich vor allem durch Einsparungen im Equipment deutliche Gewichtsvorteile im unteren-mittleren dreistelligen Bereich. Hier reduziert sich das interne Gewicht der Schaltnetzteile, wenn diese auf HVDC angepasst werden.

Auch strukturell sind Einsparungen im zweistelligen Bereich möglich. Diese resultieren einerseits durch die höhere Spannung und damit der geringeren Strombelastung und andererseits aus einer deutlichen Erhöhung des erlaubten Spannungsabfalls über die Kabelstrecken und damit aus der möglichen Nutzung dünnerer und leichterer Kabel.

Zusatzgewichte durch den Einsatz von Stabilisierungskondensatoren sind höchstens im einstelligen Bereich zu erwarten. Ist ein Brennstoffzellensystem im Flugzeug vorhanden, welches ebenfalls zur Dynamikverbesserung Kondensatoren einsetzten könnte, ist das Zusatzgewicht sogar null.

Abschließend kann die These bestätigt werden, dass ein HVDC-Netz deutliche Gewichtseinsparungen ermöglicht. Das Lösen von zusätzlichen Problemen, die in HVDC-Netzen auftreten können, erfordert nur minimale zusätzliche Hardware.

Ausblickend sind HVDC-Netze an Bord von Flugzeugen eine interessante Alternative. Präzisere Untersuchungen bei der Behandlung von Anlaufströmen werden zukünftig durchgeführt. Dazu wird eine HVDC-Netznachbildung aufgebaut, um die theoretischen Überlegungen und Erkenntnisse praktisch zu evaluieren.

DANKSAGUNGEN

Diese Arbeit wurde von Airbus im Projekt "Kabinentechnologie und multifunktionale Brennstoffzelle", sowie dem Bundesministerium für Bildung und Forschung ermöglicht (Förderkennzeichen: 03CL03A).

REFERENZEN

[1] F. Heider, “Economical Comparison between Standardized Cable Architecture and Cable Architecture Especially Designed for Low-Cost-Carrier Based on Modern Short- and Midrange Aircraft”, Bachelorarbeit. Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg, 2010.

[2] A. Reichert, “Decrease of the Bidirectional Load Flow on Modern Airliners by Improvement of the Primary Electrical Power Grid”, Diplomarbeit, Helmut-Schmidt Universität, Hamburg, 2010.

[3] D. Bchennati, “Das More-Electric-Aircraft Konzept der bodenrelevanten Systeme”, Helmut-Schmidt-Universität, Bachelorarbeit, Hamburg, 2010.

[4] I. Moir, A. Seabridge: “Aircraft Systems - Mechanical, electrical, and avionics subsystems integration” John Wiley and Sons: (2008)

[5] J. Brombach, A. Lücken, D. Schulz, T. Schröter, “Structural and Functional improvement of the electrical energy distribution of modern aircraft”, Hamburg: 59. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress der DGLR, 2010.

[6] Boeing, AERO - 787 No-Bleed Systems. http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_07/article_02_3.html (Zugriff: 24. November 2010).

[7] J.A. Rosero, “Moving Towards a More Electric Aircraft”, IEEE A&E System magazine, März 2007.

[8] J. Brombach, A. Lücken, D. Schulz, T. Schröter, “Optimized Cabin Power Supply with a +/- 270 V DC Grid on a Modern Aircraft”, CPE, Tallinn, 2011.

[9] A. Lücken, M. Schulze, J.Horn, D. Schulz, “Analysis of different Methods to Improve the Fuel Cell Dynamics for modern Aircraft Application”, Helmut-Schmidt-Universität, September 2011.

[10] K. Heuck, K.-D.Dettmann, Elektrische Energieversorgung, 8. Auflage, Vieweg, Wiesbaden, 2010.

[11] J. Brombach, J. Koch, H. Wattar, D. Schulz, „Optimierung von Bordnetzen hoher Lastdichte durch den Einsatz intelligenter Schutzeinrichtungen“, DLRK, 2011, Bremen.

[12] A.J. Schwab, „Elektroenergiesysteme - Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie“, 2.Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2006.

[13] ABB HGÜ (HVDC), www.abb.com/hvdc, Zugriff 11.08.2011.

[14] P. Mysiak, R. Strzelecki, H. Tunia, K. Zymmer, “Supply System Based on the 18-pulse Diode Rectifier with Coupled Reactors and Integrated with the Series Active Power Filter”, CPE, Tallinn, 2011.

[15] U. Schlienz, „Schaltnetzteile und ihre Peripherie“, 2. Auflage, Wiesbaden, Vieweg, 2007..

[16] DIN EN 61000-3-2, Stromharmonische <16 A, Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV).

[17] D. Krüger: „Abbildung der elektrischen Systemkomponenten zukünftiger Verkehrsflugzeuge in MATLAB/Simulink“, Diplomarbeit, Helmut Schmidt-Universität Hamburg, 2011.

[18] B. Nya, J.Brombach, T.Schröter, D.Schulz: “Weight Evaluation of Cabin Power Architectures on Smaller Civil Aircraft”, Hamburg AST-Konferenz, 2011.

[19] W. Schaade: Selbstgeführte Stromrichter und deren Stabilität an einem dc-Netz, Dissertation, TU Illmenau, März 2003.