

Strukturelle und funktionale Verbesserungen der elektrischen Energieverteilung moderner Verkehrsflugzeuge

J. Brombach¹, A. Lücken¹, D. Schulz¹ und T. Schröter²

¹Institut für elektrische Energiesysteme, Helmut-Schmidt-Universität, 22043 Hamburg, Deutschland

²Airbus, 21129 Hamburg, Deutschland

Ein wichtiges Ziel der Luftfahrtindustrie ist die Reduktion des CO₂-Ausstoßes und damit die Steigerung der Effizienz zukünftiger Verkehrsflugzeuge. Ein Ansatz hierfür ist das More-Electric-Aircraft-Konzept. Im Kern werden dabei Funktionen des Flugzeuges, die vorher hydraulisch und pneumatisch betrieben wurden, elektrisch realisiert. Dadurch kann sich einerseits das gesamte Systemgewicht reduzieren lassen, da nur noch eine Versorgungsart zur Verfügung steht. Andererseits reduziert sich der Primärenergieverbrauch, da elektrische Systeme meist effizienter arbeiten [1,2]. Die Arbeit beschäftigt sich mit den Optimierungsmöglichkeiten aktueller Energieversorgungsnetze in Verkehrsflugzeugen. Diese ergeben sich vor allem für einen Großteil der elektrischen Verbraucher durch die Nutzung einer größeren Spannungsebene. Dadurch kann die Verkabelung leichter ausgelegt werden. Des Weiteren ist das Energieversorgungsnetz stark überdimensioniert. Messdaten belegen diese Überdimensionierung. Die Möglichkeit einer Optimierung wird aufgezeigt. Zusätzliche Optimierungspotentiale sind durch funktionale Verbesserungen des elektrischen Energieversorgungssystems vorhanden. Ein Ansatzpunkt ist ein intelligentes Lastmanagement. Weiterhin wird die Verlegung des POR (Point of Regulation, Ort der Spannungsregelung) in Richtung der Verbraucher untersucht. Alle Optimierungen werden vor dem Hintergrund einer möglichen Brennstoffzellenversorgung als Hilfsaggregat an Bord durchgeführt. Die Thesen werden anhand von Modellrechnungen belegt. Die erarbeiteten Konzepte werden abschließend bewertet und ein Vergleich zu einer Versorgung auf konventioneller Basis gezogen.

Schlagwörter—Kabeloptimierung, More-Electric-Aircraft, 270 V DC Netz, Netzarchitektur

I. EINLEITUNG

MODERNE VERKEHRSFLUGZEUGE haben einen stark steigenden Bedarf an elektrischer Energie. Dies hat verschiedene Gründe. Auf der einen Seite ist die Luftfahrtindustrie bestrebt, die Effizienz moderner Verkehrsflugzeuge immer weiter zu steigern. Ein Ansatz ist hier das More-Electric-Aircraft-Konzept [1,2], welches den gesamten Primärenergiebedarf der Subsysteme dadurch reduzieren soll, dass pneumatische und hydraulische Systeme durch elektrische ersetzt werden. Dies bedeutet zwangsläufig eine Erhöhung des Strombedarfs.

Auf der anderen Seite ist der Strombedarf durch die Integration neuer Verbraucher zur Komforterhöhung in der Vergangenheit stark gestiegen, so dass heutige Energieversorgungsnetze in Flugzeugen an ihre Leistungsgrenzen stoßen.

Ein erhöhter Strombedarf bedeutet zwangsläufig eine größere Auslegung des Energieerzeugungssystems. Konventionell wird das Flugzeug heute in den Bodenphasen von einer Ground Power Unit (GPU) bzw. einem Ground Power Anschluss oder von einer mit Kerosin betriebenen Hilfsturbine im Heck (APU) mit Energie versorgt. Die APU ist hierbei sehr ineffizient, da sie auf eine hohe Leistungsdichte und ein geringes Gewicht ausgelegt ist [3,4]. Somit ist der Schadstoffausstoß schon heute aufgrund der APU sehr groß. Die Erhöhung der Leistung bedeutet noch höhere Schadstoffemissionen in den Ground-Phasen.

Zukünftig kann die konventionelle APU durch ein multifunktionales Brennstoffzellensystem ersetzt werden. So ist es in den Ground-Phasen trotz Leistungserhöhung möglich, lokal schadstofffrei zu operieren.

Zukünftig werden diese Schadstoffemissionen in der Europäischen Union dem CO₂-Handel unterliegen [12]. Allein aus

diesem Grund ist es für eine Airline erstrebenswert, die Schadstoffemission zu verringern um Kosten zu sparen.

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. Abbildung 1 zeigt eine Bordnetzstruktur mit einem Brennstoffzellensystem im Heck des Flugzeugs.

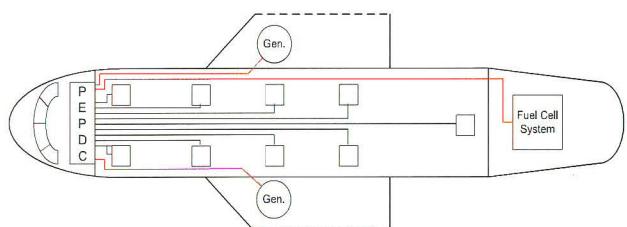


Abbildung 1: Mögliche Netzstruktur mit einer Brennstoffzellenversorgung

II. TECHNISCHER RAHMEN MÖGLICHER OPTIMIERUNGEN

A. Veränderung der Spannungsebene

Der Fokus dieser Arbeit wird auf den drei folgenden Spannungsebenen liegen:

- 115 V/200 V AC
- 230 V/400 V AC
- 270 V/540 V DC

1) 115 V/200 V AC

Momentan sind frequenzvariable (360..800 Hz) 115/200 V Netze Stand der Technik. Diese Spannungsform hat eine

Reihe von Nachteilen. Alle induktiven und motorischen Lasten müssen über Vollumrichter betrieben werden, da sie im Allgemeinen eine definierte Frequenz für den Betrieb benötigen. Des Weiteren ist die Spannungshöhe für die Größe der Lasten zu gering. Somit bietet sie nur im Detail Ansätze für Verbesserungen und Optimierungen.

2) 230 V/400 VAC

Eine Verdoppelung der Wechselspannung auf 230 V AC (360...800 Hz) wäre eine logische Konsequenz aus der Leistungserhöhung. Dadurch ergibt sich eine halbierte Strombelastung bei gleicher Leistung. Neben der Verkleinerung der Verbraucherströme hat diese Spannung zusätzlich den Vorteil, auch in den meisten Verbraucherstromnetzen Anwendung zu finden. Durch kleine Modifikationen können viele Verbraucher an 400 Hz betrieben werden. Vorteilhaft sind auch die leichte Abschaltbarkeit im Fehlerfall und die Erfahrung, welche die Luftfahrt mit dieser Spannungsform gesammelt hat. Nachteilig sind hier die höheren Umrichtergewichte gegenüber einer Gleichspannungsversorgung.

3) 270 V/540 VDC

Eine weitere Lösung ist ein 270 V DC Netz. Dadurch sinken die Ströme bei gleicher Leistung weiter. Im Gegensatz zu Umrichter für Wechselspannungen sind Umrichter für Gleichspannungen leichter.

Somit resultiert eine Gleichspannungsebene mit 270 V DC aus der Versorgung vieler großer motorischer Lasten über Umrichter. Dies ist vor allem im MEA von Vorteil. Die Spannungsebene findet in der Luftfahrtindustrie in neueren Entwicklungen für diesen Zweck Anwendung [1]. Eine Ausdehnung auf das gesamte Flugzeug wäre eine Weiterentwicklung und würde außerdem Vorteile durch die Eliminierung des Blindleistungsbedarfs bedeuten.

Die Integration eines Brennstoffzellensystems findet ebenfalls Berücksichtigung. Vor allem die Gleichspannungsebene erweist sich hier als vorteilhaft, da die Ausgangsspannung des Brennstoffzellensystems eine Gleichspannung ist.

B. Das multifunktionale Brennstoffzellensystem

Ein zukünftiges Hilfsaggregat könnte auf Basis einer PEM-Brennstoffzelle realisiert werden, die mit Wasserstoff und Luft betrieben wird. Diese hat im Gegensatz zu anderen Brennstoffzellensystemen Vorteile in der Dynamik und dem Systemgewicht. Im Vergleich zu einer herkömmlichen APU hat das multifunktionale Brennstoffzellensystem den Vorteil, dass selbst die Abgase Wasserdampf und sauerstoffabgereicherte Luft funktional an Bord von Verkehrsflugzeugen genutzt werden können. Beispielsweise kann das Wasser an Bord für die Spülung der Toiletten weiterverwendet werden. Das sauerstoffabgereicherte Abgas kann als Inertgas (z.B. als Brandschutzgas für Tank und Frachtraum) verwendet werden, so dass zukünftig kein Gas mehr in Druckflaschen mitgeführt werden muss [6].

Zusätzlich ergibt sich durch die Kerosinunabhängigkeit eine Einsatzmöglichkeit als Notstromgenerator. Momentan wird eine Notstromversorgung durch eine Staudruckturbine (Ram Air Turbine, RAT) gewährleistet. Diese kann ebenfalls durch das multifunktionale Brennstoffzellensystem ersetzt werden.

den [5,6].

1) Integration des Brennstoffzellensystems in ein Bordnetz

Zur optimalen Integration eines Brennstoffzellensystems in ein Bordnetz ist eine Anpassung der Netzarchitektur von Nöten. Ein Brennstoffzellensystem liefert keine konstante Ausgangsspannung, wodurch ein DC-DC-Konverter zum Einsatz kommen muss [7]. Des Weiteren ist zur Gewichtsoptimierung eine Überdimensionierung zu vermeiden. Dadurch erfordern speziell Brennstoffzellensysteme ein intelligentes Versorgungsnetz, was mit einem Lastmanagement ausgestattet sein sollte.

C. Verteilsystem mit Primär- und Sekundärverteilung

In modernen Verkehrsflugzeugen ist das Energieverteilsystem in zwei Ebenen aufgeteilt. Das Primärverteilungscenter (PEPDC) ist hierbei im vorderen Teil des Flugzeugs untergebracht und versorgt alle großen Verbraucher und die Sekundärverteilboxen (SPDBs).

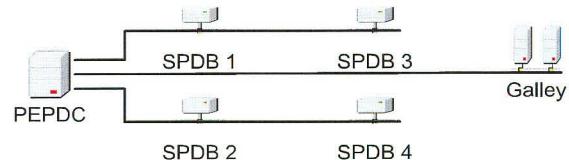


Abbildung 2: Primärverteilung in modernen Flugzeugen

Abbildung 2 zeigt einen Ausschnitt der elektrischen Struktur, mit denen die kommerziellen Lasten versorgt werden. Die essentiellen Strukturen stehen nicht im Fokus dieser Arbeit und werden nur am Rande erwähnt. Zum großen Teil können die Erkenntnisse jedoch auch auf diesen Bereich des Flugzeuges übertragen werden.

III. KABELAUSLEGUNG IN FLUGZEUGEN

Prinzipiell gibt es zwei Kriterien für die Auslegung einer Kabelstrecke in einem Flugzeug [13]. Einerseits müssen thermische Grenzen eingehalten werden und andererseits darf der sogenannte „Voltage-Drop“, also der Spannungsabfall über der Leitung, nicht zu groß werden. Beide Kriterien müssen unter allen Betriebsbedingungen eingehalten werden. Übergeordnet muss ein Kabel immer mit der entsprechenden Sicherung übereinstimmen. Diese ist im Allgemeinen 15 % größer ausgelegt, als der entsprechende Maximalstrom. Für die Auslegung wird der beaufschlagte Stromwert verwendet.

Eine Ausnahme bilden die so genannten Generatorrouten (G-Routen). Diese werden ausschließlich thermisch ausgelegt [13].

A. Thermische Auslegung einer Kabelstrecke

Wird ein Kabel von einer elektrischen Ladung durchflossen, erwärmt es sich (1):

$$W_{th} = Q_{el} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) \quad (1)$$

Wobei φ_1 und φ_2 die Spannungen am Anfang und am Ende der Leitung sind. Im Normalfall gibt die Leitung jedoch über

ihre Kabeloberfläche Energie ab, so dass sich ein thermisches Gleichgewicht bei einer bestimmten Temperatur und einem konstanten Strom einstellt. Dabei ist die abgegebene Leistung über die Kabeloberfläche gleich der zugeführten Leistung durch den Stromfluss:

$$P_{\text{el}} = P_{\text{th}} = \Delta U \cdot I \quad (2)$$

Da die abgegebene Leistung P_{th} nicht linear abhängig der Temperaturdifferenz zwischen Umgebung und Kabeloberfläche ist, werden für die Auslegung spezielle, dem Kabeltyp entsprechende, Kennlinien verwendet. Zusätzlich ist die abgegebene thermische Leistung abhängig von der Kabeloberfläche, so dass für jeden Kabelquerschnitt eine andere Kennlinie verwendet wird. Außerdem verkleinert sich mit steigender Dicke des Kabels der Spannungsabfall und somit die innere Erwärmung, welche durch das Joule'sche Gesetz beschrieben ist. Betrachtet man beide Effekte parallel, ist die Stromtragfähigkeit in Abhängigkeit des Kabelgewichtes bei dünnen Kabeln größer, als bei dicken. Dies liegt an der Tatsache, dass die für die Kühlung relevante Kabeloberfläche linear mit dem Radius steigt. Der Kabelquerschnitt jedoch quadratisch.

Auch der proportional höhere Gewichtsanteil der Isolierung bei dünnen Kabeln fließt, aufgrund realer Kabeldaten, in die Betrachtung mit ein. Die Dicke der Flugzeugkabel wird in AWG (American Wire Gauge) angegeben, wobei die verwendete Skala von dem dicksten, innerhalb dieser Arbeit verwendeten Kabel (000), bis zu dem dünnsten Kabel (24) reicht.

1) Auslegung einer Kabinenkabelstrecke

Betrachtet werden hier reale Flugzeugkabel und eine maximale Erwärmung von 40 K. Zusammen mit der maximal möglichen Außentemperatur (+55°C) erreichen die Kabel eine Oberflächentemperatur von +95°C. Die Gesamtleistung der Kabinenverkabelung wird hier mit 26 kVA angenommen.

2) Auslegung einer Brennstoffzellen G-Route

Die herkömmliche APU und demnach die Brennstoffzelle wird über eine sogenannte Generatorroute an das PEPDC verbunden. Diese Kabel sind einzeln (oder mit speziellen Platzhaltern) verlegt, so dass der Bündelfaktor vernachlässigt werden kann. Aufgrund der Tatsache, dass der Point of Regulation am PEPDC liegt, werden G-Routen nicht auf Voltage-Drop, sondern auf den kabelspezifischen thermischen Grenzwert (+55°C + Erwärmung) ausgelegt. Dieser thermische Grenzwert darf die maximal erlaubte Kabeltemperatur multipliziert mit 2/3 nicht übersteigen.

Herkömmliche Generatorrouten werden auf 115% Leistung ausgelegt (+15 % Überstromfaktor). Im Verhältnis zu herkömmlichen Generatoren, sind Brennstoffzellen nicht in der Lage, einen signifikanten Überstrom über einen längeren Zeitraum zu liefern. Deshalb wird innerhalb dieser Arbeit die Brennstoffzellenroute auf lediglich 100 % Leistung ausgelegt. Der Leitungsschutz von Brennstoffzellen-Generator-Routen basiert auf intelligenten Schutzkonzepten und nicht auf einem konventionellen stromdetektierten Schutz, der keine Auslegung der Kabel auf 100 % ermöglichen würde.

3) Stromtragfähigkeit außerhalb eines Bündels

Die Stromtragfähigkeit ist der maximal mögliche Strom

eines Kabels bei einem bestimmten Temperaturgradienten zur Außenluft. In den Berechnungen wurde ein Gradient von 40 K angenommen. Die Stromtragfähigkeit kann aus den Kabelladenaten abgelesen werden.

Die normierte Stromtragfähigkeit beschreibt die thermische Tragfähigkeit eines Kabels in Abhängigkeit des Gewichtes pro Kilometer und wird nach (3) berechnet:

$$I_{\text{norm}} = \frac{I_{\max}}{m} \quad (3)$$

Sie ist ein Indikator für das gesamte Systemgewicht bei einem konstanten Strom bei der Verwendung eines Kabeltyps.

Abbildung 3 zeigt die normierte Stromtragfähigkeit der verschiedenen Kabeldicken. Betrachtet werden hier Kabelstrecken außerhalb eines Kabelbündels.

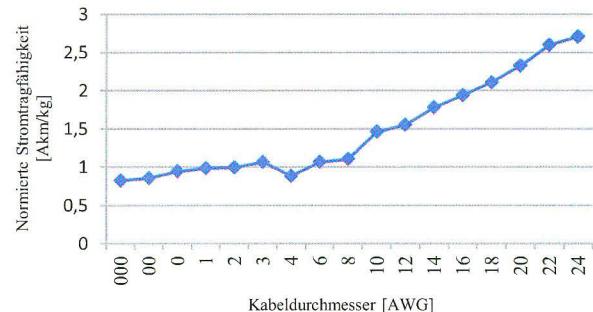


Abbildung 3: Normierte Stromtragfähigkeit der verschiedenen Kabeltypen bei 40K Erwärmung außerhalb eines Bündels

Abbildung 3 lässt erkennen, dass aus Sicht der thermischen Auslegung, die Verwendung mehrerer dünner Kabel leichter ist, als die Verwendung weniger dicker. Dies gilt jedoch nur, wenn Kabelstrecken thermisch unabhängig betrieben werden. Ersetzt man jedoch dicke Kabel gegen dünne, ist es nicht zu vermeiden, die Kabel in ein gemeinsames Bündel zu legen.

4) Stromtragfähigkeit im Bündel

Legt man mehrere Leitungen in ein Bündel, sinkt die Wärmeabgabefähigkeit der einzelnen Kabel. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, wird ein sogenannter Bündelkoeffizient (<1) als Vorfaktor des maximalen Stroms eingeführt. Berücksichtigt man diesen Bündelkoeffizienten bei der Kabelauslegung, reduziert sich die Stromtragfähigkeit der Kabelbündel gegenüber dem einzelnen Kabel. Je dünner die einzelnen Kabel sind, desto größer ist die Anzahl der nun thermisch gekoppelten Kabel in einem Bündel. Hier ergeben sich Unterschiede in der jeweils betrachteten Spannungsebene. Dadurch, dass die Gesamtzahl der Kabel bei steigender Spannung und gleichbleibender Leistung in einem entsprechenden Bündel sinkt, sind die Bündelkoeffizienten entsprechend größer bzw. haben einen kleineren Einfluss.

Abbildung 4 zeigt die normierte Stromtragfähigkeit im Bündel. Diese wird nach (3) berechnet:

$$I_{\text{norm}} = \frac{I_{\max}^B}{m} \quad (3)$$

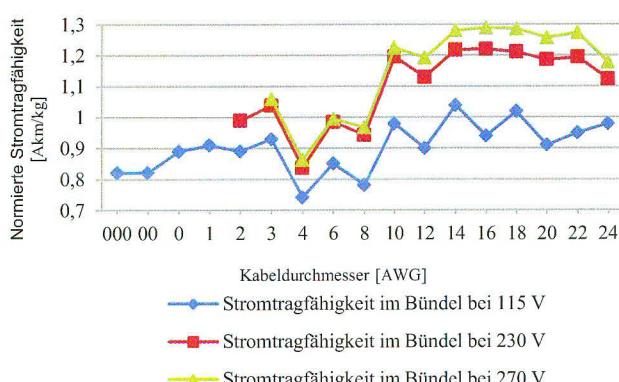


Abbildung 4: Stromtragfähigkeit der verschiedenen Kabeltypen bei 40 K Erwärmung unter Berücksichtigung einer Bündelung und 26 kW Gesamtleistung

B ist hierbei der entsprechende Bündelkoeffizient. Man erkennt einen relativ konstanten Verlauf um 0,9 A·km/kg bei einer 115 V AC Versorgung. Auch die Werte für 230 V AC und 270 V DC bleiben von dem 10 AWG bis zum 22 AWG Kabel relativ konstant.

Unter Berücksichtigung aller Effekte bleibt für die thermische Auslegung festzuhalten, dass die Verwendung weniger oder vieler Kabelstrecken für einen festen Stromfluss kaum Optimierungspotential bietet. Darüber hinaus ist die gewonnene Erkenntnis, dass man zur anderweitigen Optimierung durchaus die Kabelanzahl erhöhen oder reduzieren kann, ohne dabei thermische und somit gewichtsmäßige Nachteile zu erhalten.

B. Auslegung durch Voltage-Drop

Der Voltage-Drop ist der Spannungsabfall über der Kabelstrecke vom Verteiler zum Verbraucher und ist für die Auslegung der Kabinenverkabelung relevant. Dieser ist abhängig von dem Leiterquerschnitt und somit vom spezifischen Kabelwiderstand, der Länge und der Höhe des Stromflusses durch das Kabel. Im Allgemeinen ist der gesamte zulässige Spannungsabfall definiert. Für die folgenden Berechnungen ist der erlaubte Spannungsabfall der Sekundärverteilung über den Leitungen nach folgender Tabelle festgelegt:

TABELLE I

ANGENOMMENER ERLAUBTER VOLTAGE DROP BEI DEN VERSCHIEDENEN SPANNUNGSEBENEN VON DER SEKUNDÄRVERTEILUNG ZUR LAST

SPANNUNG	WERT
115 V/200 V AC	3 V
230 V/400 V AC	6 V
270 V/540 V DC	7 V

Der erlaubte Spannungsabfall in der Primärverteilung liegt in der gleichen Größenordnung und bildet in Addition den gesamten möglichen Voltage-Drop.

Die Grenzlänge eines Kabels lässt sich nach (4) bestimmen.

$$l_{grenz} = \frac{U_{drop}}{R'_{95^\circ C} \cdot I_{max} \cdot B} \quad (4)$$

$R'_{95^\circ C}$ ist dabei der spezifische ohmsche Widerstand des Kabels bei der maximal möglichen Temperatur ($+55^\circ C$ Außentemperatur + 40 K Temperaturerhöhung). Dieser lässt sich aus den Kabeldaten mit (5) bestimmen:

$$R'_{95^\circ C} = R'_{20^\circ C} \cdot 1,3 \quad (5)$$

Abbildung 5 zeigt die Grenzlängen der verschiedenen Kabel bei den erlaubten Spannungsabfällen. Die Bündelung der Kabel ist hierbei berücksichtigt. Die Strombelastung reduziert sich dabei um den Bündelkoeffizienten, welche die effektive Grenzlänge nach (4) vergrößert. Exemplarisch sei für 115 V AC erwähnt, dass ein AWG 24 Kabel außerhalb eines Bündels bei voller thermischer Auslegung zwar einen 3-fach größeren Strom tragen würde, die Grenzlänge aber lediglich 3,4 m betragen würde.

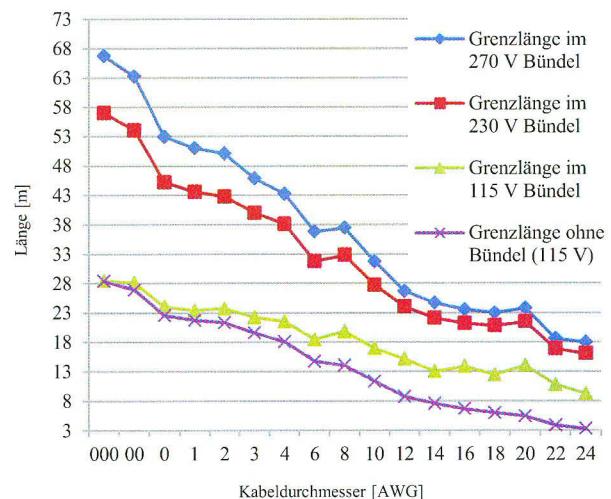


Abbildung 5: Grenzlängen der Kabelstrecken im entsprechenden 26 kW Bündel bei konstantem Gesamtstrom

Aus Abbildung 5 ist ersichtlich, dass vor allem bei den dünnen Kabeln und 115 V AC Versorgung der erlaubte Voltage-Drop schnell erreicht ist. Hier muss entweder der Querschnitt erhöht werden, was einen Gewichtsanstieg bedeuten würde oder es müssten mehrere dünne Kabel gegen wenige dicke getauscht werden. Befinden sich viele Kabel in einem Flugzeug am Spannungslimit, ist hier ein großes Optimierungspotential zu erwarten.

IV. ALLGEMEINE ÜBERDIMENSIONIERUNG DES ENERGIE- VERSORGUNGSSYSTEMS

Unabhängig der zu erwartenden Optimierungspotentiale durch strukturelle und funktionale Anpassungen sind die Energieversorgungssysteme moderner Flugzeuge überdimensioniert. Dies hat im Wesentlichen drei Gründe. Der erste Grund liegt in der exakt identischen Anwendung der Auslegungsrichtlinien für flugrelevante elektrische Systeme auf

nicht-flugrelevante Systeme. Diese Vorgehensweise ist den Zertifizierungsrichtlinien der Behörden, wie der European Aviation Safety Agency (EASA) jedoch nicht zu entnehmen [8].

Der zweite Grund liegt in oft starken Divergenzen zwischen angenommenem und tatsächlichem Lastverlauf eines Systems. Aufgrund des ersten Punktes führt diese Divergenz jedoch niemals zu einem Sicherheitsrisiko für das Flugzeug, meist jedoch zu einer klaren Überdimensionierung der Kapazitäten des elektrischen Systems.

Der dritte Grund liegt in dem so genannten Effekt der Gleichzeitigkeit, welcher typischerweise mittels des Gleichzeitigkeitsfaktors erfasst wird. Letzterer ist besonders bei kleinen elektrischen Netzen kaum als allgemeingültig zu erfassen, da er wesentlich von der Kombination der angeschlossenen Verbraucher abhängt [9].

Im Folgenden wird nur auf die ersten beiden Gründe eingegangen, wobei diese weniger als Einzelproblem, sondern eher als ein kombiniertes Problem auftreten.

A. Auslegungsrichtlinien

Die Auslegungsrichtlinien für das elektrische System fordern, dass es mit diesem möglich sein muss, alle für den Flugbetrieb relevanten Lasten gleichzeitig bei Vollast zu betreiben. Dies gilt es für die flugrelevanten Lasten als absolut sinnvoll festzuhalten und ist aus Gründen der Sicherheit nicht zu ändern. Für die Menge der übrigen Systeme muss jedoch untersucht werden, ob diese Herangehensweise zu einer geeigneten Auslegung führt. Trotz einer bereits in Flugphasen aufgeteilten Leistungsbedarfsbetrachtung (der elektrischen Lastanalyse, kurz ELA) führt diese Auslegung, gefördert durch den Gleichzeitigkeitseffekt, zu signifikanten Unterschieden zwischen erwarteter und tatsächlicher Auslastung der Generatoren und dem elektrischen Netz.

B. Diskrepanz zwischen angenommener und tatsächlicher Leistung

Die Diskrepanz zwischen dem angenommenen Nutzung/Lastverlauf und dem tatsächlichen Nutzung/Lastverlauf einiger Systeme führt ebenfalls zu einer klaren Überdimensionierung des elektrischen Netzes. Messungen¹ zeigen, dass diese Diskrepanz sich besonders bei Kabinen- und Cargosystemen zeigt, deren Leistungsbedarf stark durch die Nutzung von Kabinencrew oder Passagier bestimmt ist. Dies soll beispielhaft anhand einer Flugzeugkonfiguration verdeutlicht werden.

1) Elektrische Lastanalyse

Für jedes Flugzeug, das einer Airline übergeben wird, gilt es eine ELA zu erstellen, die zeigt, dass das elektrische Netz nicht überlastet werden kann. Unter anderem wird hierzu die Leistung ermittelt, die unter der Systemkonfiguration des auszuliefernden Flugzeugs pro System erreicht werden kann. Dies ist im Folgenden als die zu erwartende Leistung bezeich-

net. Die Diskrepanz dieses Wertes zum tatsächlichen Maximalwert der Leistung gibt erste Hinweise zum Grad der Überdimensionierung.

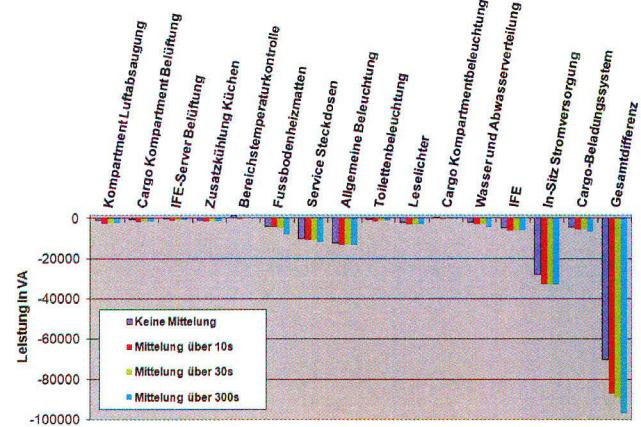


Abbildung 6: Differenz von tatsächlichen und angenommenen Maximalleistungen der Kabinen- und Cargowechselstromsysteme² bei der untersuchten Konfiguration (266 kVA maximale Gesamtleistung).

2) Messungen an realen Flugzeugen

Abbildung 6 zeigt für die Hauptkabinen- und Cargosysteme die Differenz zwischen dem tatsächlich erreichten Maximalwert in 15 Flügen und dem erwarteten maximalen Leistungswert (0 VA Linie). Es ist deutlich zu erkennen, dass mehrere Systeme Diskrepanzen von mindestens 10 kVA aufweisen. Die Gesamtdifferenz beträgt ca. 80 kVA und damit ca. 30 % der Maximalleistung des Energieverteilungssystems.

3) Verwendung einer Standardverkabelung

Aus Fertigungsgründen wird ein Großteil der elektrischen Systeme nicht jeder Konfiguration angepasst. Der Hintergrund ist eine mögliche Nutzung der Verkabelung in jeder Systemkonfiguration³. Dies bedeutet, dass die Differenz zu den installierten Kapazitäten des elektrischen Netzes deutlich größer sein kann. Daraus resultiert ein unnötiges Gewicht, das das Flugzeug bei jedem Flug mit sich tragen muss.

4) Tatsächliches Nutzungsverhalten

Die Abbildungen 7 und 8 zeigen zwei Beispiele, wie diese Differenzen im Einzelnen zu Stande kommen. Abbildung 7 zeigt den Stromverlauf des Kabinensystems "Allgemeine Beleuchtung", aufgenommen für die linke Flugzeugseite. Es sind im Wesentlichen zwei Betriebslevel um 40 A und um 55 A, sowie regelmäßige Wechsel zwischen diesen, zu erkennen. Ein dritter Betriebslevel zeigt sich um 80 A. Der für diesen Bericht wichtige Teil spiegelt sich in der Diskrepanz (55 A) zwischen den erwarteten Maximalwert (gestrichelte Linie) und dem tatsächlich aufgetretenen Maximalwert wieder. Auf das gesamte Flugzeug projiziert, ergeben sich die ca. 13 kVA Differenz aus Abbildung 6. Dies entspricht, allein für ein System, nicht genutzten Kapazitäten eines 15 kVA Unterverteilers, wie er typischerweise auf diesem Flugzeug

¹ Bei den Messungen handelt es sich um Leistungsmessungen verschiedener Kabinen- und Cargosystem auf so genannten In-Service Flügen (Linienflügen) eines modernen Großraumflugzeugs. Pro Sekunde wurde ein (Truc RMS bis 20kHz) Messwert gespeichert.

² Bei den Gleichstromverbrauchern stellt sich diese Situation weniger ausgeprägt dar.

³ Dies trifft nicht vollständig für die Systemverkabelungen zu. Diese sind oft der aktuellen Kabinenkonfiguration angepasst.

eingesetzt wird.

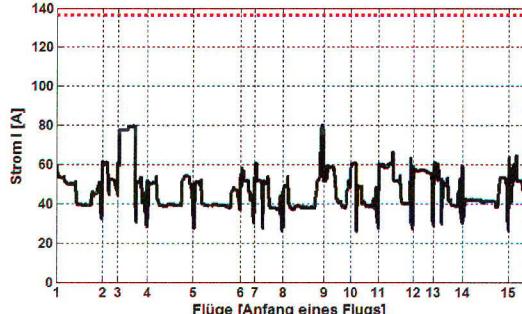


Abbildung 7: Stromverlauf (linke Flugzeugseite) des Systems "Allgemeine Kabinenbeleuchtung" von 15 Flügen auf einem modernen Großraumflugzeug mit erwartetem Maximalwert (gepunktete Linie)

Weit größere absolute⁴ Diskrepanzen treten bei dem System "In-Sitz Stromversorgung" auf. Hier liegt die Differenz zwischen dem tatsächlich aufgetretenen Stromwert und dem erwarteten maximalen Wert bei ca. 15 kVA pro Seite. Dieses System hat im Wesentlichen die Aufgabe Strom für In-Flight-Entertainment (IFE) Equipment, die elektrische Sitzverstellung sowie tragbare Geräte, wie Laptops, zur Verfügung zu stellen. Die maximale Leistung wird um den Reiseflug hin erwartet. Hierbei gilt es unter anderem abzuschätzen, wie viele Personen z.B. Laptops mit an Bord bringen und diese tatsächlich nutzen. Dieser Nutzungsgrad wurde, wie der Abbildung 8 zu entnehmen ist, deutlich überschätzt. Die relativ konstante Last, welche über alle Flüge auftritt, ist die Grundlast des IFE Systems (z.B. Bildschirme). Diese Grundlast schwankt, unabhängig von der Nutzung des IFE-Systems, systembedingt nur wenig. In Zukunft gilt es hier exaktere Prognosen zu treffen und diese in die Netzauslegung einfließen zu lassen. Dieses System kann eher als konstant als ansteigend im Reiseflug betrachtet werden.

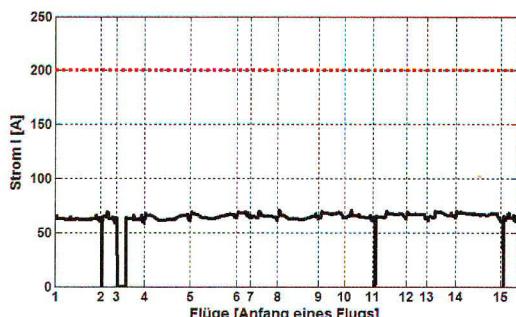


Abbildung 8: Stromverlauf (mehrere Sitzbereiche linke Flugzeugseite) des Systems "In-Sitz Stromversorgung" von 15 Flügen auf einem modernen Großraumflugzeug mit erwartetem Maximalwert (gepunktete Linie)

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Messung von 15 Flügen statistisch noch nicht als ausreichend gesehen werden darf um endgültige Schlüsse auf die Systemauslegungen zu ziehen. Dieses Manko wird durch eine Erweiterung der Studien auf zusätzliche Flüge ausgeglichen. Die

⁴ Bezogen auf die Anschlussleistung zeigen das System "Allgemeine Kabinebeleuchtung" und "In-Sitz Stromversorgung" ähnliche Diskrepanzen zwischen tatsächlichem und erwartetem Maximalwert.

bisherigen Messungen haben jedoch vermittelt, dass stets eine hohe Ähnlichkeit zwischen den Leistungskurven aller Flüge besteht.

V. OPTIMIERUNGSPOTENTIALE

A. Optimierung einer Brennstoffzellen G-Route

Die thermische Auslegung der Generatorroute erlaubt einen beliebig hohen Spannungsabfall über dem Kabel. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die durch den Spannungsabfall auftretende Verlustleistung eine Überdimensionierung des gesamten Brennstoffzellensystems zur Folge hat, wenn man die volle Auslegungsleistung zur Verfügung haben möchte. Ein optimales Verhältnis zwischen den thermischen Verlusten und somit der Überdimensionierung des Brennstoffzellensystems und dem Kabelgewicht gilt es zu finden.

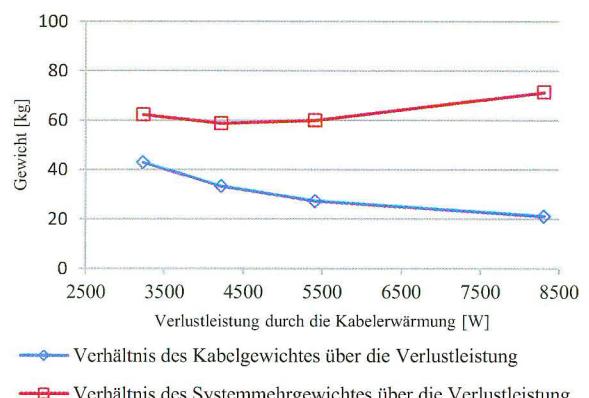


Abbildung 9: Auslegung einer Brennstoffzellen G-Route nach Kabel und Systemgewicht

Abbildung 6 zeigt eine solche Abhängigkeit. Dabei wurde eine Kabelauslegung zum Anschluss des Brennstoffzellensystems an das PEPDC in einem herkömmlichen Verkehrsflugzeug mittlerer Größe vorgenommen. Der Verlauf der unteren Kennlinie zeigt, dass das reine Kabelgewicht mit zunehmender Verlustleistung und kleinerem Kabdeldurchmesser sinkt. Die obere Kennlinie zeigt das Systemmehrgewicht inklusive des reinen Kabelgewichtes und der notwendigen Überdimensionierung des gesamten multifunktionalen Brennstoffzellensystems mit Tank. Man erkennt, dass das Systemmehrgewicht ein Minimum bei ca. 4200 W Verlustleistung über dem Kabel besitzt und somit dickere Kabel zum Einsatz kommen als bei einer rein thermischen Auslegung nötig wären.

B. Optimierte Verkabelungsstruktur

Aus der relativen Unabhängigkeit der Kabdeldurchmesser für eine Kabelauslegung im Bündel folgt, dass eine Primärverteilung bei gleicher Leistung nicht leichter ist, als die Sekundärverteilung. Dies bedeutet für die Auslegung einer optimalen Verkabelungsstruktur die Vermeidung von antiparallelem Lastfluss. Die Sekundärverteilung eines zu Versorgenden Sektors muss, aus Lastflussrichtung gesehen, am Anfang des Sektors platziert werden (Abbildung 7). Dabei sind insgesamt vier SPDBs angenommen, immer zwei pro Sektor (Links/Rechts).

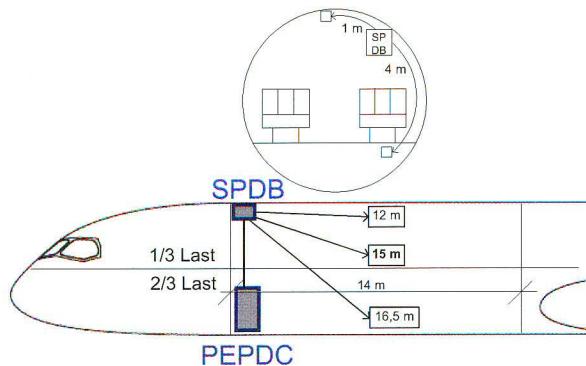


Abbildung 10: Optimierter Sektor einer Sekundärverteilung mit entsprechenden durchschnittlichen Kabellängen zu den Ersatzlasten (mit Umwegfaktor von 1,5)

Die längen oben und unten in der Abbildung sind dabei die durchschnittlichen Längen zu den entsprechenden Ersatzlasten oben und unten. Die fett gedruckte Länge ist hierbei die Durchschnittslänge des gesamten Sektors. Tabelle 2 fasst die wichtigsten Längen zusammen.

TABELLE 2
LÄNGEN DER SEKUNDÄRVERTEILUNG BEI SEKTORWEISER VERSORGUNG

ORT	LÄNGE (IN KLAMMERN DURCHSCHNITT)
Oben	1,5 m- 22,5 m (12 m)
Unten	6 m- 27 m (16,5 m)
Gesamt	1,5m- 27 m (15 m)

Die Längen berücksichtigen, dass der untere Bereich 2/3 der Lasten beherbergt. Für die weitere Auslegung der Sekundärverteilung wird eine durchschnittliche Kabellänge von 15 m angenommen. Für die Primärverteilung wird eine durchschnittliche Kabellänge von 20 m angenommen. Diese ergibt sich aus den Sektorlängen und einer 1/3 Aufteilung zwischen vorderen und hinteren Sektor und der Küche im Heck des Flugzeugs (Abbildung 2).

C. Veränderung der Betriebsspannung

Eine Veränderung der Betriebsspannung hat mehrere Vorteile. Eine höhere Spannung reduziert den Strom und damit die Anzahl der Kabel. Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse aus Abbildung 5 und Tabelle 2 in zusammengefasster Form.

TABELLE 3

ANGENOMMENE GRENZLÄNGE UND ANTEIL AN VERKABELUNG, WELCHE NACH VOLTAGE-DROP AUSGELEGT WIRD

SPANNUNG	ANGENOMMENE GRENZLÄNGE	ANTEIL AN VERKABELUNG ÜBER GRENZLÄNGE
115 V/200 V AC	13 m	60 %
230 V/400 V AC	20 m	26 %
270 V/540V DC	22,5 m	12 %

Tabelle 4 zeigt einige zusammengefasste Ergebnisse.

1) Strom

Aufgrund einer größeren Spannung kommt es bei der Verkabelung zu einem kleineren Stromfluss bei gleicher Leistung. Dieser ist direkt antiproportional zu der Spannungserhöhung.

2) Bündelgewicht

Da der Bündelkoeffizient abhängig von der Anzahl der Kabel in einem Bündel ist und die Anzahl der Kabel bei einer Spannungssteigerung bei gleicher Leistung sinkt, sinkt das Bündelgewicht weiter ab (Abbildung 4). Dieses ist in Zeile 3 berücksichtigt.

3) Voltage-Drop

Trifft man die Annahme, dass der Leiterquerschnitt durchschnittlich um 100 % aufgrund des Spannungsabfalls größer ausgelegt werden muss (Beispielsweise bei einer Länge von 15 m und einer Grenzlage von 7,5 m) ergeben sich die Ergebnisse auf Zeile 4 von Tabelle 4. Zeile 5 normiert die Ergebnisse auf die 115 V AC Versorgung.

TABELLE 4
VERGLEICH DER SPANNUNGSEBENEN

	115 V AC	230 V AC	270 V DC
Strom	100 %	50 %	43 %
Voltage-Drop SPDB-Last	3 V	6 V	7 V
Bündelgewicht ohne Voltage-Drop	100 %	43 %	34 %
Bündelgewicht mit Voltage-Drop	160 %	54 %	38%
Bündelgewicht mit Voltage-Drop gegenüber 115 V	100 %	34 %	24 %

4) Primärverteilung

Bei der Primärverteilung ist der Einfluss der Spannungserhöhung vergleichbar. Es kommt zwar kaum zu einer Bündelung in der Primärverteilung, aber speziell bei der 115 V AC Spannungsebene befinden sich 2/3 der Kabel wieder über der Grenzlage. Bei den anderen beiden Spannungsebenen können jedoch alle Kabel thermisch ausgelegt werden.

D. Optimierungspotential der allgemeinen Überdimensionierung

Im Kapitel „Allgemeine Überdimensionierung des Energieversorgungssystems“ wird festgestellt, dass es in Verkehrsflugzeugen aus verschiedenen Gründen zu einer starken Überdimensionierung, unabhängig der Auslegungskriterien der Kabel, kommt.

Eine Lösung zur Reduzierung dieser liegt in der Mischung der Systeme auf den Unterverteilern. So würden sich Systeme mit unterschiedlichem Lastverhalten gegenseitig ausgleichen.

Des Weiteren können durch eine individuellere Auslegung und einer optimierten Annahme des Nutzerverhaltens die Maximalleistungen reduziert werden. Hier ist ein Potential von über 30 % festzustellen, wenn die Überdimensionierung mit 90 kVA angenommen wird und die Gesamtkapazität mit 266 kVA.

Um bei einer knapperen Auslegung Unterkapazitäten oder Überlastungen zu vermeiden, bietet sich ein intelligentes Lastmanagement an. Dieses wird im folgenden Kapitel genauer untersucht.

E. Intelligentes Lastmanagement

Die zurzeit starke Überdimensionierung der Kabel ist nicht zuletzt darauf zurück zu führen, dass bei ihrer Auslegung davon ausgegangen wird, dass (fast) alle flugphasenabhängigen Lasten gleichzeitig betrieben werden können. Ein zusätzliches intelligentes Lastmanagementsystem könnte die Regelung der Verbraucher übernehmen und ein eventuelles zeitgleiches Betreiben unterbinden. Dieses System kommuniziert mit allen Verbrauchern und Erzeugern und regelt deren Betreiben, ohne dass der Passagier eine Verringerung der Leistung hinnehmen muss.

Ein intelligentes Lastmanagement hat bei zivilen Flugzeugen vor allem einen Einfluss auf das primäre Energieversorgungs- und Verteilsystem. Können gewisse Gleichzeitzitigkeiten ausgeschlossen und dadurch die benötigte maximale Leistung begrenzt werden, kann die Primärverkabelung kleiner ausgelegt werden. Eine Einsparung an der Sekundärverkabelung ist nur dann möglich, wenn Verbraucher lokal fokussiert sind.

Ein zweiter wesentlicher Aspekt zur Integration eines Lastmanagements ist die Dimensionierung des Generatorsystems selber. Speziell bei der Integration eines Brennstoffzellensystems ist eine zusätzliche Verwendung eines intelligenten Lastmanagements vorteilhaft, da eine Reduzierung der Lastsprünge, in Höhe und Anzahl, die Lebensdauer der Stacks erhöht [8].

Nimmt man beispielsweise an, dass der maximale Stromfluss in der Primärebene um 20 % reduziert werden kann, ergeben sich wieder die in Kapitel 3 beschriebenen Reduzierungen beim Kabelgewicht in der gleichen Größenordnung.

Große Gewichtseinsparungen lassen sich bei dem Brennstoffzellensystem erreichen, da hier ein 20 % kleinerer Stromfluss absolut, ein deutlich kleineres Gewicht bedeuten würde.

Man kann festhalten, dass Optimierungen in dieser Größenordnung realistisch erscheinen und auf alle Spannungsebenen angewendet werden können.

F. Verlegung des Point-of-Regulation in die Sekundärverteilebene

Der Point-of-Regulation, also der Ort der Spannungsregelung liegt normalerweise in dem primären Verteilungscenter. Wie unter dem Kapitel „Auslegung durch Voltage-Drop“ beschrieben wird, gilt für jede Spannungsebene ein definierter Spannungsabfall zwischen dem Verteiler und dem Verbraucher, um die zulässige nötige Minimalspannung nicht zu unterschreiten. Im Kapitel „Auslegung durch Voltage-Drop“ wurde ein Wert für den erlaubten Spannungsabfall der Sekundärverkabelung angegeben. Der erlaubte Wert der Primärverkabelung liegt dabei in der gleichen Größenordnung. Je nach Größe des Flugzeugs und dem Einbauort der Primärverteilung können die Kabelstrecken zum Verbraucher sehr lang werden. Als Beispiel sei hier die Verkabelung von den einzelnen Passagiersitzen genannt, die von Sitz zu Sitz abschnittsweise durchgeschliffen werden, um dann an einem Punkt an die

Sekundärverteilung angeschlossen zu werden. Um das nötige Spannungsband am letzten Sitz einzuhalten, darf der Voltage-Drop auf der gesamten Kabellänge nicht zu groß werden (Tabelle 4).

Vergleicht man dazu Abbildung 5, welche die maximalen Kabellängen verschiedener Kabel angibt, wird schnell klar, dass diese Kabel fast immer durch den Voltage-Drop ausgelegt werden. Verschiebt man nun den Point-of-Regulation in die Sekundärverteilung, können die Kabellängen näherungsweise verdoppelt werden. Es steht nun zwei Mal der gesamte zulässige Voltage-Drop (Primär + Sekundärvoltagedrop) zur Verfügung (vor und hinter dem POR).

1) 115VAC

Hier hat eine Verschiebung des POR in Richtung des Verbrauchers von den drei untersuchten Spannungsebenen den größten Einfluss auf die Kabeldimensionierung. Um den relativ niedrigen zulässigen Spannungsabfall vom primären Verteilungscenter zum Verbraucher nicht zu überschreiten, ist dieser meistens der Grenzwert bei der Kabeldimensionierung. Sind durchschnittlich 60 % der Kabel der Sekundärverteilung zu lang für eine thermische Auslegung und müssen sie zur Spannungshaltung durchschnittlich 100 % überdimensioniert werden, ergibt sich eine mögliche Gewichteinsparung von 38 %. Auch in der Primärverteilung sind 2/3 der Kabel nach dem Voltage-Drop ausgelegt (hintere Sektion und Küche). Die Überdimensionierung, aufgrund des Spannungsabfalls ist hier im Bereich von 33 %. Daraus resultiert ein Einsparungspotential von 16 %.

2) 230VAC

Die Tatsache, dass der zulässige Spannungsabfall nach Tabelle 1 in der Größenordnung doppelt so hoch sein darf wie bei dem 115V AC bedeutet, dass eine mögliche thermische Kabelauslegung sehr viel wahrscheinlicher ist und damit das Gewichtseinsparpotenzial geringer ausfällt. Allerdings kann die Verlustleistung bei gleichbleibender Leistung über das Kabel durch die Anhebung der Spannung am Verbraucher und dem daraus resultierenden niedrigeren Maschenstrom reduziert werden.

3) 270VDC

Der zulässige Spannungsabfall ist bei Verwendung dieser Spannungsebene am größten. Das Gewichtseinsparpotenzial ist am geringsten einzuschätzen, da anzunehmen ist, dass die Kabelauslegung in den meisten Fällen bereits thermisch durchgeführt wird. Auch hier kann, wie bei der Verwendung der 230V AC Spannungsebene, die Verlustleistung über dem Kabel durch Herabsenken des Maschenstroms verringert werden.

VI. ZUSAMMENFASSUNG

Diese Arbeit hat sich mit einer Reihe von technischen Optimierungsmöglichkeiten eines modernen Flugzeugbordnetzes beschäftigt. Einerseits wurde das relative Optimierungspotential errechnet, andererseits wurden reale Messdaten zur Feststellung der Überdimensionierung eines Flugzeugbordnetzes analysiert.

Es bleibt festzuhalten, dass vor allem eine Erhöhung der Betriebsspannung ein enormes Optimierungspotential bietet.

Bei der Kabelauslegung ergeben sich Gewichtseinsparungen von 75 % bei einer Betriebsspannung von 270 V DC. Dies resultiert aus der Erhöhung der Spannung und somit der Reduzierung des Stromflusses und aus dem größeren erlaubten Spannungsabfall. Auch die anzunehmende Reduktion der Bündelgröße hat einen Einfluss.

Als weiteres Ergebnis bleibt festzuhalten, dass bei der thermischen Kabelauslegung sich der positive Effekt der besseren Kühlung dünner Kabel mit dem negativen Effekt der Bündelung weitestgehend ausgleicht. Somit ist ein Einfluss der Kabeldicke kaum von Bedeutung.

Einen großen Beitrag zur Netzaufoptimierung wird die bessere Kenntnis der Lastverläufe und Leistungshöhen bewirken. Insbesondere die Kabinen- und Cargolasten sind stark von der Passagier- und Kabinencrewnutzung abhängig. Unter besserer Kenntnis ist hier nicht das Verständnis für die theoretisch auftretenden Maximallasten zu verstehen. Diese sind selbstverständlich bekannt. Vielmehr gilt es hier das Verständnis für die tatsächlich auftretenden Lastkurven zu erweitern um anschließend, stets in Einklang mit Sicherheits- und Verfügbarkeitsanforderungen, das Netz zu optimieren.

Als Ergebnis von Strommessungen, welche in diesem Artikel vorgestellt wurden, bleibt festzuhalten, dass auffällige Unterschiede zwischen den erwarteten und den tatsächlichen Strömen vieler Kabinen- und Cargosysteme aufgetreten sind. Diese gilt es zu analysieren, in Zukunft zu minimieren und ebenfalls in der Netzaufoptimierung anzuwenden.

Zukünftig sollte zusätzlich der Einfluss der Veränderung der Spannungsebene auch noch auf die Wandlerstruktur untersucht werden. Auch hier sind große absolute Optimierungspotentiale bei einer Gleichspannungsversorgung zu erwarten, da die Umrichter deutlich leichter ausfallen. Zur Berechnung absoluter Werte kann die Optimierung auf ein detailliertes Bordnetzmodell angewendet werden.

DANKSAGUNGEN

Diese Arbeit wurde von Airbus im Projekt „Kabinentechnologie und multifunktionale Brennstoffzelle“ und dem Bundesministerium für Bildung und Forschung ermöglicht.

REFERENZEN

- [1] Ian Moir and Allan Seabridge, “Aircraft Systems” 3rd ed, 2008 pp 227-228.
- [2] J.A. Rosero, “Moving Towards a More Electric Aircraft”, IEEE A&E System magazine, March 2007.
- [3] Andre Reichert, “Design of an optimum electrical architecture to connect a multifunctional fuel cell system on modern aircraft”, Helmut Schmidt University, Studienarbeit, April 2010, Hamburg, Germany.
- [4] K. Rajashekara, HYBRID FUEL CELL POWER IN AIRCRAFT”, IEEE Industry Application Magazine, August 2008
- [5] H. Gans, Airbus Deutschland GmbH, Patent: “Fuel Cell Emergency System”, Tampa, FL, USA
- [6] K. A. Friedrich, “Brennstoffzellensysteme in der Luftfahrt, Fuel Cell Systems in aviation (German)”, BWK das Energie-Fachmagazin, April 2010, VDI Verlag, Germany
- [7] J. Oliver, “High level decision methodology for the selection of a fuel cell based power distribution architecture for an aircraft application”, Universidad Politécnica de Madrid, SPAIN
- [8] European Aviation Safety Agency, Certification Specification for Large Aeroplanes (CS-25), amendment 6, 2009
- [9] Nya, B. H.: Diploma Thesis: Analysis of the behavior of electrical aircraft systems aboard Airbus aircraft for network optimization (original title in German: Analyse des Verhaltens elektrischer Systeme an Bord von Airbusflugzeugen zur Optimierung des Bordnetzes), Hamburg: Airbus Deutschland GmbH, 2009
- [10] Guidong Liu and Wensheng Yu, “Power Management for alleviation of Impact on PEM fuel cell due to load fluctuation” Conference on intelligent system design and applications, 2006
- [11] Sunhoc Kim, “The effect of reservoir and fuel dilution on the dynamic behavior of a PEMFC” Journal of power sources, 2004
- [12] J. Kanter, “Europe Forcing Airlines to Buy Emissions Permits”, The New York Times, October 2008
- [13] Airbus, “Electrical Cable Selection Criteria and Protection Against Short-Circuits”, France, 2002