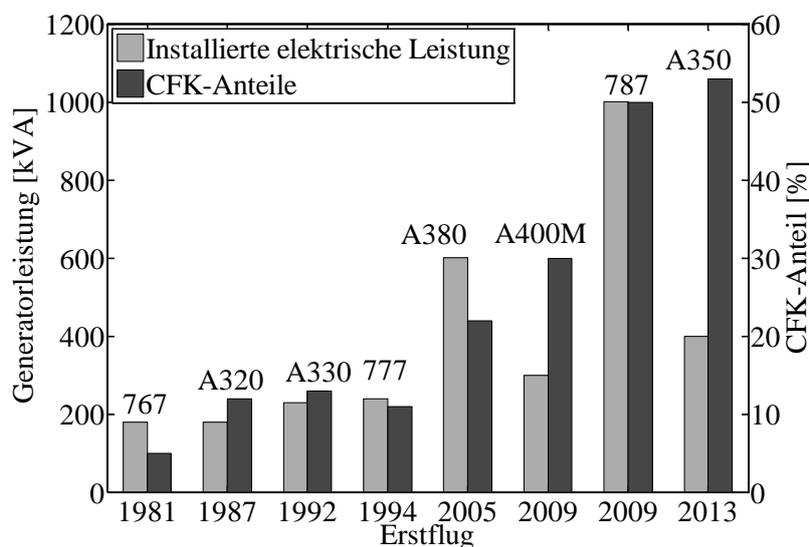


# 1 Einleitung

Flugzeughersteller befinden sich in einem Wettbewerb, der es notwendig macht, die Flugzeugsysteme ständig zu optimieren. Dabei sind unterschiedliche technische, ökonomische, ökologische und regulatorische Aspekte zu berücksichtigen. Die Optimierung der immer komplexer werdenden Flugzeuge zielt auf Kostenreduktion und steigende Umweltfreundlichkeit ab. Aktuell wird von einer weltweiten Zunahme des Passagieraufkommens von 4,5 % pro Jahr ausgegangen [Faa01]. Im Jahr 2012 befanden sich 15.560 Passagierflugzeuge im Einsatz. Bis zum Jahr 2031 wird von einem Bedarf in Höhe von 27.000 bis 31.000 neuen Flugzeugen ausgegangen [Air12], [Boe12]. Hauptgrund für diese zukünftig erwartete Nachfrage ist, neben dem wachsenden Flugverkehr, vor allem die Notwendigkeit, den Treibstoffverbrauch der Flugzeugflotten zu reduzieren, um weiterhin wettbewerbsfähig zu bleiben. Zwei Möglichkeiten, um die Effizienz von Flugzeugen zu erhöhen, sind die steigende Elektrifizierung und die vermehrte Nutzung von carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK). Elektrische Energie ist effizient zu verteilen und kann mit hohen Wirkungsgraden in andere Energieformen umgewandelt werden. Durch den vermehrten Einsatz elektrischer Systeme kann deshalb die Komplexität und das Gewicht von Flugzeugen verringert werden [Naa13]. Dieser Ansatz wird als „More Electric Aircraft“ (MEA) bzw. „All Electric Aircraft“ (AEA) bezeichnet und meint im Speziellen die Substitution von hydraulischen, pneumatischen und mechanischen Systemen durch elektrische [Clo98], [Ma199], [Ros07]. Dadurch entfallen schwere Pumpen, Rohrleitungen und entflammbare Flüssigkeiten und die Flugzeuge werden wartungsärmer und zuverlässiger [Chr11], [Cot08], [Qui93]. Die vermehrte Nutzung von elektrischen Kabinenverbrauchern, die dem Passagier den Flug angenehmer gestalten sollen, erhöht zusätzlich den Energiebedarf [Cut02], [Abd12]. Die Entwicklung der installierten elektrischen Triebwerksgeneratorleistung bei unterschiedlichen Flugzeugmustern ist in **Bild 1.1** dargestellt und beträgt bis zu 1.000 kVA.



**Bild 1.1** Installierte Generatorleistung und carbonfaserverstärkter Kunststoffanteil (CFK) in unterschiedlichen Verkehrsflugzeugen (eigene Darstellung mit Daten aus [Abd12], [Her11], [Mec05], [Moi08], [Wie09])

Das vorherrschende Material im Flugzeugbau war bisher Aluminium. Seit einiger Zeit wird jedoch vermehrt CFK in Bereichen eingesetzt, in denen früher ausschließlich Leichtmetalle genutzt wurden.

Die Hauptgründe sind die gewichtsbezogenen Festigkeits- und Steifigkeitsvorteile der CFK-Werkstoffe gegenüber Leichtmetallen. Durch die Verwendung von CFK-Werkstoffen könnte im Vergleich zur Aluminiumkonstruktionsweise 30% Gewicht eingespart werden [Dit12]. Dieser Trend wird als „More Composite Aircraft“ (MCA) bezeichnet [Gol10], [Tou13]. Der Anteil des CFK am Leergewicht wird in **Bild 1.1** für verschiedene Flugzeugmuster dargestellt und beträgt bis zu 53%.

### 1.1 Motivation

Eines der Hauptziele der Optimierungen in der Luftfahrtindustrie ist die Gewichtsreduktion, da diese einen direkten Einfluss auf den Treibstoffverbrauch und damit auf die Betriebskosten eines Flugzeuges hat. Das kann durch Verbesserungen der Triebwerke und der Aerodynamik sowie durch die Verwendung neuerer und leichter Materialien erreicht werden. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Optimierung des elektrischen Bordnetzes, welches die Sicherstellung der Energieversorgung der elektrischen Lasten an deren jeweiligem Ort zu jeder Zeit als Aufgabe hat.

Basierend auf den geltenden Zertifizierungsregeln bietet die Verkabelung ein großes Gewichtseinsparpotential aufgrund der langen Kabelstrecken und der hohen Anzahl an elektrischen Verbrauchern [Ema00], [Bro12], [Sch11]. In modernen Großraum-Passagierflugzeugen befinden sich Kabel mit einer Gesamtlänge bis zu 300 km [Mec05]. Der Bedarf an elektrischer Energie für die Passagierversorgung bei aktuellen Langstreckenflugzeugen beträgt etwa 300 kVA [Eng09].

Elektrische Bordnetze sind derart dimensioniert, dass sie den flexiblen und gleichzeitigen Betrieb aller Lasten ermöglichen, die zeitgleich in den unterschiedlichen Boden- und Flugphasen aktiv sind. Die Lasten sind über eine feste, nicht veränderbare Verkabelung mit dem jeweiligen Generator verbunden. Die Kabel für Dreh- und Gleichstrom werden auf den maximal vorkommenden Strom während der Boden- und Flugphasen ausgelegt. In den unterschiedlichen Bodenphasen dominieren die Frachtraumverbraucher und während des Fluges die Kabinenverbraucher. Da die maximalen Ströme nur in bestimmten Zeitabschnitten auftreten, sind die Kabel den Großteil der Zeit nur gering ausgelastet.

In der Vergangenheit bestand der Flugzeugrumpf aus Aluminium und konnte als Rückleiter verwendet werden. Einige moderne Flugzeughüllen wie die des Airbus A350 und der Boeing 787 bestehen jedoch aus CFK. Das verwendete CFK hat eine 1.000-mal schlechtere Leitfähigkeit als Aluminium und eignet sich deshalb nicht als Rückleiter [Gol10].

Die beiden vorgestellten Konzepte MEA und MCA haben einen starken Einfluss auf zukünftige Flugzeuge. Ohne die Anpassung der bestehenden Systeme würden diese Konzepte zu einer weiteren Erhöhung des Kabelgewichtes führen. Daher ist die Hauptmotivation dieser Arbeit, eine bessere Ausnutzung der Verkabelung sowie eine Reduzierung des Rückleiterstromes zu erzielen und dadurch Gewicht einzusparen. Dies geschieht mithilfe eines intelligenten und flexiblen Bordnetzes, das die Leermasse des Flugzeuges und die elektrischen Verluste reduziert.

## 1.2 Zielsetzung und Abgrenzung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Gewichtseinsparung im elektrischen Bordnetz von Flugzeugen durch den Einsatz der Lastumverteilungsverfahren:

- Leitersymmetrierung
- Netzwerk-Rekonfiguration
- multi-symmetrierendes Leistungsmanagement

Der Begriff Lastumverteilung bezeichnet in dieser Arbeit das Umschalten von elektrischen Lasten zwischen unterschiedlichen Leitern sowie zwischen unterschiedlichen Kabeln ausgehend von einer bereits vorliegenden Leiterzuordnung der Lasten. Dazu werden mehrere Leiter von einem oder mehreren Kabeln mit den Eingängen eines Mehrfachschalters verbunden, der wahlweise erlaubt, die Last von einem bestimmten Leiter zu versorgen.

Das Konzept der Leitersymmetrierung bezieht sich auf einzelne Drehstromkabel in Drehstromnetzen mit dem Ziel, alle drei Leiter zu allen Zeiten gleichmäßig zu belasten. In Flugzeugen ist es dadurch möglich, Kabel mit geringerem Querschnitt zu verlegen und die Rückleiterstruktur zu entlasten.

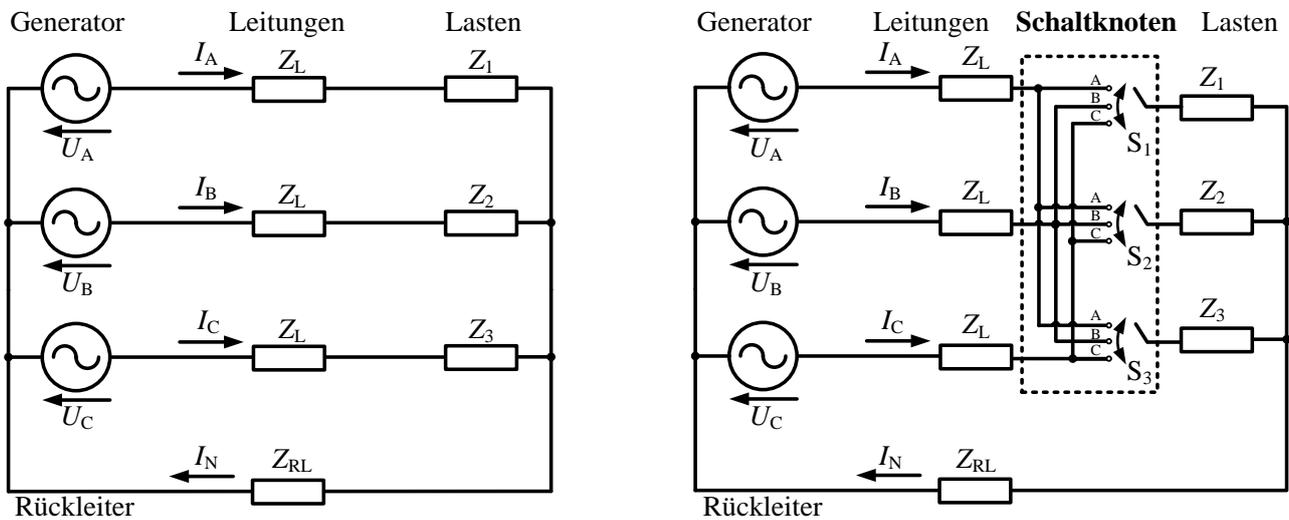
Bei den Drehstrom- und Gleichstromkabeln im Kabinenbereich und im Frachtraum treten die jeweiligen Maximalströme, die die Basis für die Kabelauslegung bilden, im Allgemeinen nicht zeitgleich auf. Eine gleichmäßige Auslastung aller Kabel zu jedem Zeitpunkt führt bei einer vorgegebenen Gesamtleistung zu einer kleineren Auslegungsgrundlage, wodurch die Querschnitte der Kabel reduziert werden können und somit Gewicht gespart wird. Solch ein Konzept wird als adaptive Netzwerk-Rekonfiguration bezeichnet. Da Lasten zwischen unterschiedlichen Kabeln umgeschaltet werden können, erhöht sich auch die Zuverlässigkeit beim Eintreten eines Kabelfehlers.

Das neuartige Verfahren des multi-symmetrierenden Leistungsmanagements kombiniert beide Verfahren und erlaubt eine höhere Gewichtseinsparung, indem ein größeres elektrisches Netzwerk symmetrisch belastet wird.

Die Verfahren haben unterschiedliche Aufgaben, weisen jedoch Gemeinsamkeiten auf, da sie ein echtzeitfähiges, selbstkonfigurierendes System durch Lastumschaltungen bilden. Dieses System muss den Typ und die Position des Verbrauchers identifizieren und die entsprechende Energieversorgung sicherstellen. In dieser Arbeit wird die Implementierung der Verfahren anhand von Umverteilungsmöglichkeiten in Flugzeugen untersucht. Dabei stellt die gleichmäßige Belastung der Kabel ein kombinatorisches nichtlineares Optimierungsproblem dar. Um die Belastung in jeder Flugphase auf die Kabel gleichmäßig zu verteilen, können die Lasten durch Schaltknoten mit dem Bordnetz verbunden werden. Das **Bild 1.2** zeigt vereinfacht die konventionelle Bordnetzstruktur (links) und den Einsatz der Schaltknoten für ein flexibles Bordnetz (rechts). Diese Schaltknoten bestehen aus Mehrfachschaltern ( $S_1$ ,  $S_2$  und  $S_3$ ) sowie einer gemeinsamen Steuerung und sollen ein Umverteilen der Lasten während des Fluges ermöglichen. Von einem hoch belasteten Kabel können Lasten getrennt und auf ein schwach belastetes Kabel umgeschaltet werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden erstmals Konzepte zur echtzeitfähigen Leitersymmetrierung und zur adaptiven Netzwerk-Rekonfiguration für elektrische Bordnetze von Flugzeugen entwickelt. Einen echtzeitfähigen Algorithmus, der Wechselstromlasten unter Berücksichtigung der Phasenverschiebung derart verteilt, dass Drehstromsysteme symmetrisch belastet werden, ist derzeit nicht bekannt.

Basierend auf den Anforderungen, mit möglichst wenigen Schaltvorgängen ein hinreichend symmetrisches Drehstromsystem zu erzielen, wird in dieser Arbeit ein neuartiger deterministischer Algorithmus entwickelt.



**Bild 1.2** Konventionelles (links) und adaptives (rechts) elektrisches Bordnetz

In der klassischen elektrischen Energieversorgung ist die ungleichmäßige Auslastung der Leiter von Drehstromsystemen ein bekanntes Problem und wird unvollkommen durch den Versuch gelöst, Lasten beim Anschließen gleichmäßig auf die Kabel zu verteilen [Gan04], [Zhu98], [Uki08]. Hier spielt das Leitungsgewicht aber keine entscheidende Rolle. Eine Umverteilung der Lasten im Betrieb ist nicht erforderlich und wird nicht angewandt. In konventionellen Bordnetzen von Flugzeugen, Schiffen oder Fahrzeugen wird ein Umschalten der Lasten nicht durchgeführt und wurde in anderen Arbeiten ebenfalls nicht untersucht. Dies liegt zum einen an der fehlenden Verfügbarkeit von zuverlässigen und verlustarmen Halbleiterschaltern in der Vergangenheit und zum anderen an der mangelnden Notwendigkeit zum Einsparen von Gewicht im elektrischen System.

Durch das MEA-Konzept nimmt der Anteil an elektrischer Energie immer weiter zu, wodurch auch zukünftig eine Gewichtssteigerung des elektrischen Systems zu erwarten ist [Ema00]. Einfluss auf das Bordnetz nimmt ebenfalls die neue CFK-Struktur der Flugzeuge, da der Rückleiterpfad sich ändert. Aus diesen Gründen wird ersichtlich, dass die echtzeitfähige Umverteilung von Lasten ein spezielles Problem von zukünftigen Flugzeugen darstellt. In diesem neuen Feld gibt es bisher keine vergleichbaren Lösungsansätze.

In der Literatur wurden bereits Lastmanagementsysteme für Flugzeuge untersucht [Xia11], [Sch13a]. Das Lastmanagement unterscheidet sich von den hier behandelten Methoden dadurch, dass Lasten zu- und abgeschaltet werden, jedoch immer mit demselben Kabel verbunden bleiben. Bei den hier vorgestellten Verfahren werden Lasten zwischen unterschiedlichen Kabeln umgeschaltet, die Lasten bleiben aber immer aktiv.

### 1.3 Vorgehensweise

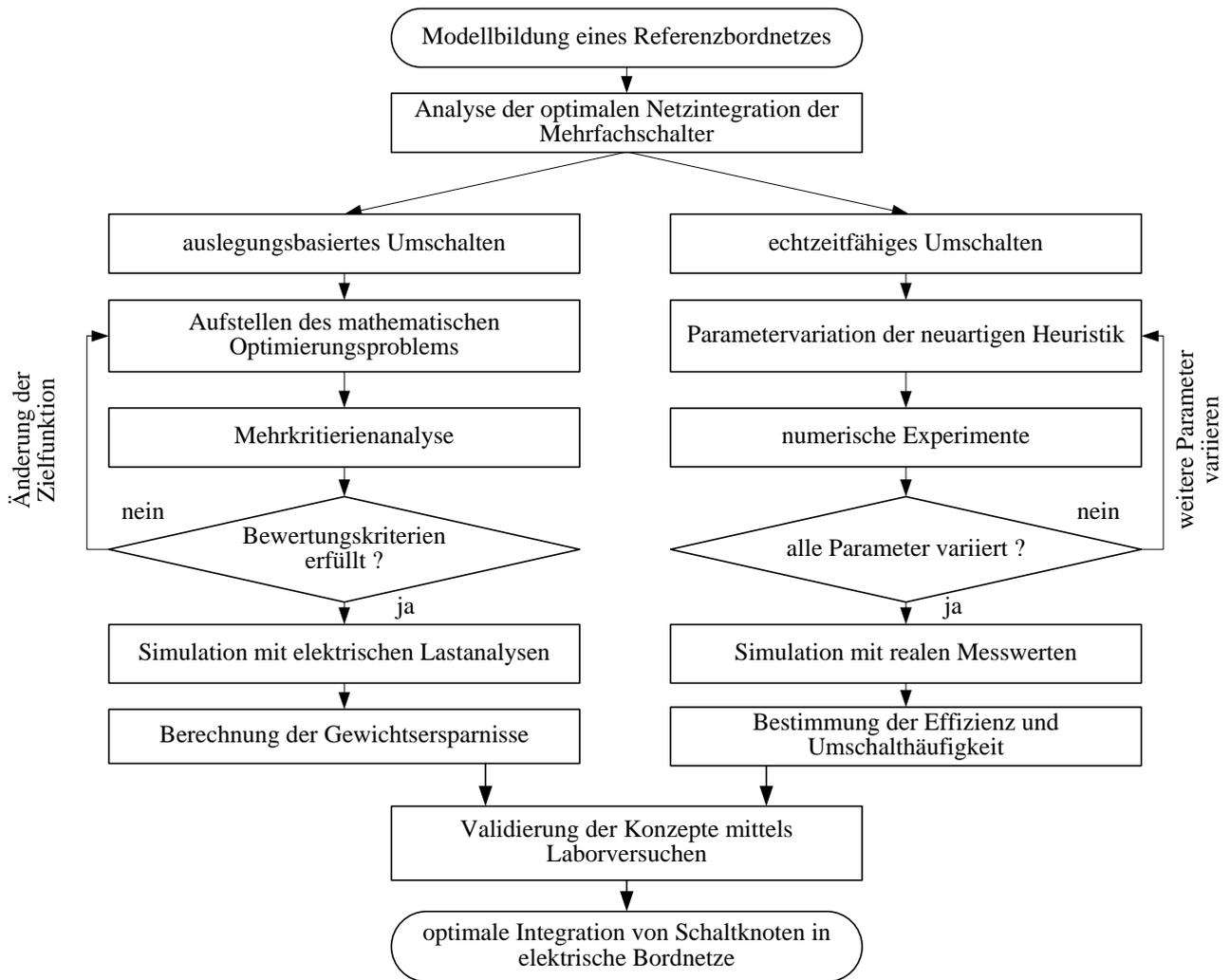
Die Aufgabenschwerpunkte dieser Arbeit lassen sich wie folgt gliedern:

1. Modellbildung des Referenzflugzeuges auf der Basis eines existierenden Flugzeuges
2. Aufstellung des mathematischen Optimierungsproblems und Analyse geeigneter Algorithmen zum Lösen der Optimierungsaufgabe
3. Simulation der Lastumverteilungsverfahren
4. Berechnung der Gewichtseinsparung und Effizienzsteigerung
5. Vorschlag einer neuartigen echtzeitfähigen Heuristik zur Erreichung nahezu symmetrischer Systeme bei beliebiger Anzahl von Leitungen und Validierung mittels einer Multiparameter-Analyse
6. Nachweis der erhöhten Lastverfügbarkeit durch Fehlerbaumanalysen
7. Experimentelle Untersuchung von Mehrfachschaltern mit Sicherungsfunktion zur Validierung der Konzepte

Das **Bild 1.3** visualisiert das methodische Vorgehen für die optimale Integration von Schaltknoten zur Gewichts- und Verlustreduktion. Es werden zwei Konzepte erarbeitet, die für die drei Umschaltverfahren (Leitersymmetrierung, Netzwerk-Rekonfiguration und multi-symmetrierendes Leistungsmanagement) eingesetzt werden können: Das auslegungsbasierte Umschalten auf Grundlage elektrischer Lastanalysen und das echtzeitfähige Umschalten basierend auf Messwerten während der Flugmission. Die Festlegung der Zielfunktionen für die unterschiedlichen Lastumverteilungsverfahren beim auslegungsbasiertem Umschalten erfolgt anhand einer Mehrkriterienanalyse nach dem Schema:

1. Festlegung des Ziels und der Bewertungskriterien
2. Analyse von möglichen Optionen zur Beschreibung der Asymmetrie
3. Bewertung der Optionen anhand der Bewertungskriterien
4. Beurteilung der Ergebnisse für das Gesamtsystem

Unterschiedliche Ziele können z.B. die Minimierung des Rückleiterstroms im Rückleiternetzwerk sein oder die symmetrische Belastung einzelner Drehstromkabel. Die Validierung der echtzeitfähigen Heuristik erfolgt durch eine Parametervariation und der Betrachtung von Extremfällen. Dabei wird die Effizienz der Heuristik mittels numerischer Experimente bewertet. Die Verifikation der Heuristik erfolgt durch eine Simulation mit realen Messwerten eines existierenden Flugzeuges.



**Bild 1.3** Systematisches Vorgehen für die Untersuchung von Lastumverteilungsverfahren zur Gewichts- und Verlustreduzierung in elektrischen Bordnetzen