

EIN INTEGRIERTES ENTWURFSWERKZEUG FÜR ELEKTRISCHE BORDSYSTEME

C. Schallert,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Robotik und Mechatronik,
82234 Wessling

Zusammenfassung

Ein integriertes modellbasiertes Entwurfswerkzeug für elektrische Bordsysteme, nachfolgend bezeichnet als ENADOT (Electric Network Architecture Design Optimisation Tool), wird in diesem Paper vorgestellt. Mithilfe von ENADOT können im Entwurf von elektrischen Bordsystemen das Leistungsverhalten, das Gewicht und die Zuverlässigkeit analysiert und optimiert werden.

1. EINFÜHRUNG

Der Trend zur Elektrifizierung von Bordsystemen (More-Electric Aircraft) und der Rückbau der zentralen Hydraulik- und Pneumatikversorgung in Transportflugzeugen zeigt sich an den aktuellen Mustern, dem Airbus A380 und der Boeing 787.

Die zunehmende installierte Leistung, Komplexität und Kritikalität elektrischer Bordsysteme hat die Entwicklung des integrierten modellbasierten Werkzeugs ENADOT motiviert, mit dem die im Entwurf solcher Bordsysteme wesentlichen Aspekte wie Leistungsverhalten, Gewicht und Zuverlässigkeit einheitlich betrachtet und optimiert werden können. Das untenstehende BILD 1 gibt einen Überblick.

ENADOT ist in der Modelica-Sprache [1] realisiert, die mittlerweile in der Modellierung und Simulation technischer Systeme weit verbreitet ist. Mehrere automatische Analysefunktionen, die die verschiedenen Aspekte der Optimierung elektrischer Bordsysteme abdecken, sind in ENADOT integriert.

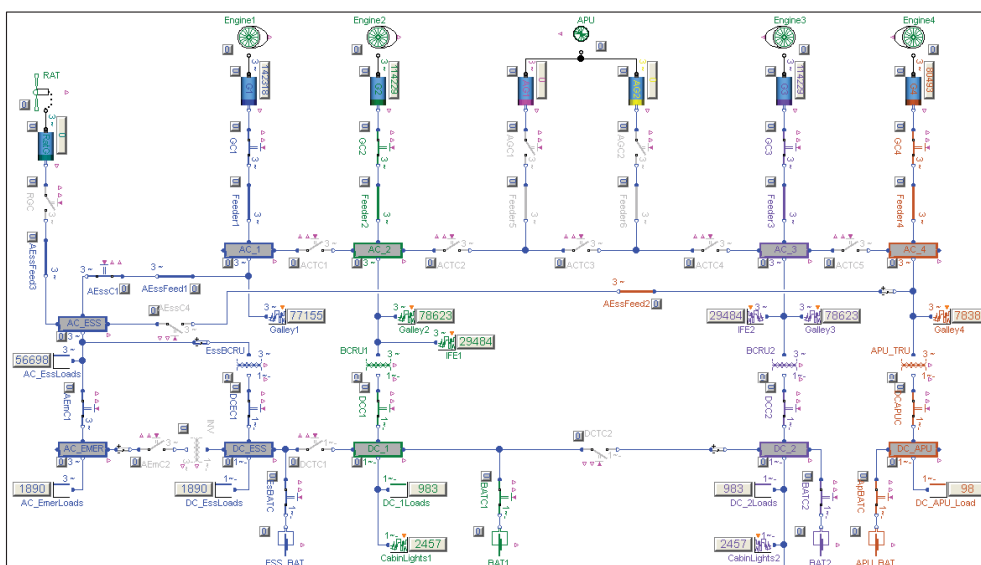
BILD 1: ENADOT-Konzept: Modellbasierte Auswertung und Optimierung eines elektrischen Bordsystems

2. KONZEPT UND UMFANG DES INTEGRIERTEN ENTWURFSWERKZEUGES

2.1. Modellbibliothek

Eine Bibliothek von Modellen elektrischer Komponenten ist in ENADOT enthalten. Die Bibliothek ist hierarchisch strukturiert und umfaßt Modellklassen unterschiedlicher Komplexität, wie Schnittstellen (elektrische Verbindungselemente, Signalbusse etc.), einfache elektrische Komponenten (z.B. Schalter, Sammelschienen, Kabel), komplexere elektrische Komponenten (Generatoren, Konverter etc.) und elektrische Verbraucher. Weiterhin stellt die Bibliothek einige Modelle elektrischer Flugzeugbordsysteme bereit, die dem Benutzer bei der Erstellung eigener Systemmodelle und der Durchführung von Entwurfsanalysen als Beispiel dienen können.

Der grafische Modelleditor in Dymola [2] ermöglicht, durch allgemein bekanntes „drag and drop“, das einfache Erstellen von Systemmodellen mit zahlreichen enthaltenen Komponenten. Durch den objekt-orientierten Modellierungsansatz unterstützt Modelica eine klare grafische Darstellung von Modellen elektrischer Bordsysteme, die, wie in BILD 1 und BILD 2 zu sehen ist, das Aussehen einer Prinzipskizze haben.



Leistungsverhalten

- elektrische Lasten von Bordnetz-Komponenten
- im normalen u. degradierten Betrieb des Systems

Gewicht

- maximale elektrische Komponenten-Lasten
- Einzelgewichte und
- totales Systemgewicht

System-Zuverlässigkeit

- Minimal-Pfade
- Minimal-Schnitte
- Ausfallwahrscheinlichkeit

2.2. Elektrische Komponenten – Modellansatz

Der Modellansatz und die Modellierungstiefe sind entsprechend den Zielen von ENADOT gewählt, nämlich der Betrachtung des Leistungsverhaltens, des Gewichts und der Zuverlässigkeit von elektrischen Bordnetzen.

Jedes Komponentenmodell beinhaltet eine physikalische Beschreibung des stationären elektrischen Verhaltens, transiente Effekte werden nicht betrachtet. Ein- oder dreiphasige AC-Systeme sind durch äquivalente DC-Systeme beschrieben, mit RMS-Effektivwerten für Spannung und Strom.

Der Art der Komponente entsprechend sind deren normale Funktion sowie das Verhalten in verschiedenen Ausfallzuständen modelliert. Somit enthalten die stationären physikalischen Modellgleichungen jeder Komponente eine Beschreibung des normalen sowie des Verhaltens bei Ausfall. Die zugehörigen Ausfallwahrscheinlichkeiten sind als Parameter im Komponentenmodell abgelegt. Ein einfaches Beispiel: Ein Kabel wird im Normalbetrieb durch seinen ohmschen Widerstand (Größenordnung $10^{-1} \Omega$) beschrieben. Ein durchtrenntes Kabel (open circuit failure, $p_{O/C} = 2 \cdot 10^{-4}$) wird durch einen hohen Widerstand ($10^5 \Omega$) abgebildet, und ein Kurzschluß (short circuit failure, $p_{S/C} = 10^{-4}$) wird durch einen niedrigen Widerstand ($10^{-5} \Omega$) zwischen den zwei Leitern des Kabels beschrieben. Über ein boolesches Eingangssignal am Komponentenmodell werden dessen Normalbetrieb bzw. die Ausfallzustände gesteuert.

Weiterhin gehört zu jedem Komponentenmodell eine Abhängigkeit des Gewichts von dimensionierenden Parametern, z.B. die nominale Leistung und nominale Drehzahl eines Generators.

2.3. Modellierung der Betriebszustände eines elektrischen Bordsystems

Elektrische Bordsysteme können im allgemeinen in verschiedenen Betriebszuständen arbeiten (z.B. am Boden mit externer Versorgung oder im Flug) oder beim Auftreten eines Ausfalls die betroffene Komponente isolieren und redundante Pfade aktivieren, um den Defekt bestmöglich zu kompensieren. Diese typische Eigenschaft redundanter elektrischer Bordsysteme wird im entsprechenden Systemmodell abgebildet, und zwar durch eine boolesche Modellierung der Steuerlogiken der Netzwerkschalter, die die Verbindungen zwischen Generatoren, Leitungen, Sammelschienen und Verbrauchern herstellen.

2.4. Interaktives Testen von Modellen elektrischer Bordsysteme

In einem interaktiven Simulationsmodus stellt ENADOT die Schaltzustände der Netzwerkschalter und die daraus resultierenden elektrischen Kreise grafisch und farbig im Modelldiagramm dar, wie es in BILD 2 und BILD 5 gezeigt ist. Intakte Komponenten erscheinen in der Farbe der sie versorgenden Stromquelle, ausgefallene Komponenten werden in roter und passive in grauer Farbe dargestellt. Modellkomponenten können interaktiv, d.h. durch Mausklick, zwischen dem normalen und Ausfallzuständen hin- und hergeschaltet werden. Durch die grafische Darstellung des resultierenden Systemverhaltens kann somit einfach und schnell überprüft werden, ob sich das Modell eines elektrischen Bordsystems wie beabsichtigt verhält.

2.5. Automatisierte Entwurfsanalyse und Optimierung

Zur Auswertung eines Systemmodells verfügt ENADOT über automatische Analysefunktionen, mit denen die maximalen elektrischen Lasten jeder Netzwerkkomponente sowie die Einzelgewichte und das Gesamtgewicht berechnet werden können. Somit wird die Dimensionierung der Komponenten des elektrischen Systems weitgehend automatisiert. Weiterhin können selbsttätig sog. Minimalpfade oder -Schnitte [3] ermittelt werden, mithilfe derer die Zuverlässigkeit der Stromversorgung einzelner oder mehrerer Sammelschienen (busbars) berechnet wird. Die Analysefunktionen setzen voraus, daß das zu untersuchende Systemmodell für verschiedene Betriebszustände simuliert werden kann, daß also normales und Ausfallverhalten auf Komponentenebene sowie Steuer- und Umschaltlogiken auf Netzwerkebene im Systemmodell realisiert sind.

Die verschiedenen Analysemöglichkeiten und -Ergebnisse, die den Entwurf und die Optimierung elektrischer Bordsysteme unterstützen, sind im Überblick in BILD 1 gezeigt.

2.5.1. Elektrische Lasten- und Gewichts-Analyse

Als dimensionierende Last wird die maximale elektrische Leistung, die eine Komponente im für sie ungünstigsten Betriebspunkt erzeugt, leitet oder umwandelt, bezeichnet. Zur Bestimmung der dimensionierenden Lasten verschiedener Komponenten eines elektrischen Systems wird das Systemmodell für zahlreiche Betriebsszenarien simuliert. In der Regel liegt der normale Betrieb eines Systems vor, wenn keine Komponente ausgefallen ist. Abnormale oder Notbetrieb-Szenarien entstehen durch den Ausfall einer oder mehrerer Komponenten. Somit simuliert die automatische Elektrische Lasten-Analyse das Systemmodell für Kombinationen von bis zu drei (oder vier) ausgefallenen Komponenten und ermittelt für die Komponenten des Systems die jeweilige maximale elektrische Leistung, die während eines Flugzyklus auftritt. Als Ergebnis wird in einem Diagramm (vgl. BILD 3) das Verhältnis aus maximaler (simulierter) elektrischer Leistung und nominaler Leistung für jede Komponente dargestellt. Anschließend werden die dimensionierenden Parameter für jede Komponente gewählt. Z.B. sind dies für einen Generator die nominale Leistung und nominale Drehzahl, für einen Schalter der nominale Strom, für ein Kabel der Querschnitt. Durch die in jedem Komponentenmodell hinterlegten parametrisierten Gewichte ergeben sich somit die einzelnen und das Gesamtgewicht des elektrischen Systems.

2.5.2. Zuverlässigkeitsanalyse

Mithilfe einer weiteren Analysefunktion in ENADOT kann für ein elektrisches System die Zuverlässigkeit der Stromversorgung einzelner oder mehrerer Sammelschienen, an die elektrische Verbraucher insbesondere mit sicherheitskritischer Funktion angeschlossen sind, selbsttätig berechnet werden. Das oder die zu untersuchenden Szenarien sind durch den Benutzer vorzugeben, z.B. „System ist funktionsfähig, wenn wenigstens ein DC-Bus Spannung führt“ oder „System ist ausgefallen, wenn der AC-ESS-Bus ohne Spannung ist“.

Die Zuverlässigkeitsanalyse kann wahlweise entsprechend

der sog. Blockdiagramm-Methode (RBD) oder der Fehlerbaum-Methode (FTA) durchgeführt werden.

Erstere beruht auf einer Ermittlung der Minimalpfade: Ein Minimalpfad ist eine Menge intakter Komponenten, für die das System im Sinne des vorgegebenen Szenarios funktionsfähig ist. Minimal bedeutet, daß der Pfad aus nur so vielen intakten Komponenten besteht, wie es für das Funktionieren des Systems nötig ist. Redundanz im System ist dadurch gekennzeichnet, daß für ein Szenario mehrere Minimalpfade gefunden werden, es also mehr als eine Möglichkeit gibt, eine Sammelschiene elektrisch zu versorgen. Naturgemäß werden bei einer Minimalpfadanalyse pro Komponente nur zwei Zustände betrachtet [4]: intakt bzw. ausgefallen.

Die Fehlerbaum-Methode entspricht dem Auffinden von Minimalschnitten: Ein Minimalschnitt ist eine Menge defekter Komponenten, für die das System ausfällt. Minimal bedeutet hier, daß der Schnitt nur so viele defekte Komponenten enthält, wie für einen Systemausfall mindestens notwendig sind. Minimalschnitte bestehen aus einer, zwei oder drei defekten Komponenten, wobei die Auftretenswahrscheinlichkeit des Minimalschnittes mit der Anzahl der Komponenten i.d.R. stark abnimmt. Redundanz im System ist nun dadurch gekennzeichnet, daß es, abgesehen von Defekten der jeweils betrachteten Sammelschiene, keine Minimalschnitte gibt, die aus nur einer Komponente bestehen, sondern das System fällt erst bei bestimmten Kombinationen von zwei oder drei defekten Komponenten aus.

Eine Minimalschnittanalyse unterscheidet sich von einer Minimalpfadanalyse außerdem durch die Berücksichtigung sämtlicher Zustände jeder Komponente (intakt, 1. Ausfallart, 2. Ausfallart, ...). Somit ist sie komplexer und rechenintensiver als die Minimalpfadanalyse. Jedoch ist das Ergebnis dem einer Fehlerbaumanalyse gleichwertig, das aufgrund der Vollständigkeit als Nachweis der Systemzuverlässigkeit im Allgemeinen akzeptiert wird. Die weniger rechenintensive Minimalpfadanalyse liefert schneller verfügbare Ergebnisse, die im Entwurfsprozeß i.d.R. als erste Abschätzung verwendet werden.

3. MODELLIERUNG UND AUSWERTUNG EINES ELEKTRISCHEN BORDSYSTEMS

In diesem Kapitel werden die Möglichkeiten von ENADOT anhand der Auswertung eines Beispielsmodells eines elektrischen Bordsystems veranschaulicht. BILD 2 zeigt das Modell, das in seiner grundlegenden Struktur und Eigenschaften dem elektrischen Bordsystem des Airbus A380 angenähert ist. Das Modell entspricht dem für diese Klasse von Flugzeugen typischen Aufbau und Funktionsweise des elektrischen Bordsystems, eignet sich also für die Darstellung der Möglichkeiten von ENADOT. Es wurde auf der Basis einer Beschreibung, Prinzipschema und Auflistung der größten elektrischen Verbraucher erstellt, die in Kapitel 5.12.1 der Referenz [5] zu finden ist.

3.1. Beispielsmodell eines elektrischen Bordsystems

Das in BILD 2 gezeigte Beispielsmodell eines elektrischen Bordsystems weist die folgenden, wichtigsten Komponenten und Eigenschaften auf:

- vier durch die Triebwerke angetriebene 3-Phasen 115 VAC / 150 kVA VF Generatoren, im Modell bezeichnet als G1, G2, G3 und G4

- zwei 3-Phasen 115 VAC / 120 kVA CF Generatoren, Antrieb durch APU, genannt AG1 und AG2
- ein 70 kVA Not-Generator, angetrieben durch die Stauluftturbine (RAT)
- vier 300 A Gleichrichter (BCRUs) zur Versorgung der DC-Sammelschienen und zum Laden der Batterien
- vier 28 VDC Batterien
- ein statischer Inverter (INV) zur Notversorgung der AC_EMER Sammelschiene

3.1.1. Funktionsweise des Bordsystems

BILD 2 zeigt den normalen Betrieb im Flug des elektrischen Bordsystems. Jeder triebwerkgetriebene Generator G1 (blau), G2 (grün), G3 (magenta) und G4 (bronze) versorgt die ihm zugeordnete Sammelschiene AC_1, AC_2, AC_3 und AC_4. Die APU Generatoren AG1 (violett) und AG2 (gelb) sind verfügbar, aber vom Netz getrennt.

Wenn ein Generator ausfällt, übernimmt der benachbarte Generator die Versorgung dessen Sammelschiene. Dazu wird einer der Schalter ACTC1 oder ACTC5 geschlossen. Fallen beide Generatoren einer Seite aus, werden durch Schließen der Schalter ACTC2, 3 und 4 weiterhin alle AC Sammelschienen versorgt (Quertransfer), jedoch mit insgesamt geringerer verfügbarer Leistung. Wegen der unterschiedlichen und variablen Frequenzen (abhängig von Triebwerksdrehzahl) der AC-Spannungen werden die Generatoren in keinem Betriebszustand parallel betrieben. Die AC Sammelschienen versorgen die nicht-essenziellen elektrischen Kabinen-Lasten, dies sind die vier Bordküchen und Geräte für Komfort und zur Unterhaltung der Fluggäste. Die elektrische Leistung dafür summiert sich auf zeitweise bis zu 320 kVA (80 kVA pro Küche inklusive Kühlung) und 60 kVA (Komfort und Unterhaltung). Die für die Sicherheit des Fluges essenziellen Geräte sind an die AC_ESS und AC_EMER Sammelschienen angeschlossen. Dies sind die Heizungen der Staurohre zur Geschwindigkeitsmessung und die der Cockpitscheiben sowie durch Elektromotoren angetriebene Hydraulikpumpen und eine Anzahl von Elektro-Hydrostatischen Aktuatoren (EHAs) der Flugsteuerung. Letztere sind erforderlich zur Sicherstellung einer minimalen Steuerbarkeit des Flugzeuges im Notfall. Die essenziellen Lasten summieren sich auf 60 kVA. Die AC_ESS und AC_EMER Sammelschienen werden entweder über die AC_1 (Normalbetrieb) oder, wenn AC_1 ausfällt, über die AC_4 Sammelschiene versorgt. Sollten alle Hauptgeneratoren ausfallen, dann wird der durch die Stauluftturbine (RAT) angetriebene Notgenerator (RatG) zur Versorgung der AC_ESS und AC_EMER Lasten aktiviert. Letztere können auch über den statischen Inverter INV von einer Batterie versorgt werden, z.B. für die Dauer des Ausklappens der Stauluftturbine.

Mithilfe der Batterien ist in den 28 VDC Bereichen des elektrischen Bordsystems eine unterbrechungsfreie Stromversorgung auch während Umschaltvorgängen im System sichergestellt. Dies ist wichtig für die Funktion sicherheitskritischer Steuergeräte, wie z.B. Triebwerk- und Flugsteuer-Computer, Avionik, Cockpitinstrumente und Sprechfunk. Diese elektrischen Lasten sind im Modell durch die Komponenten DC_EssLoads, DC1_Loads und DC2_Loads repräsentiert und machen insgesamt 4 kW aus. Die Kabinenbeleuchtung summiert sich auf 15 kW, welche an den nicht-essenziellen Teil des DC Bordnetzes angeschlossen ist.

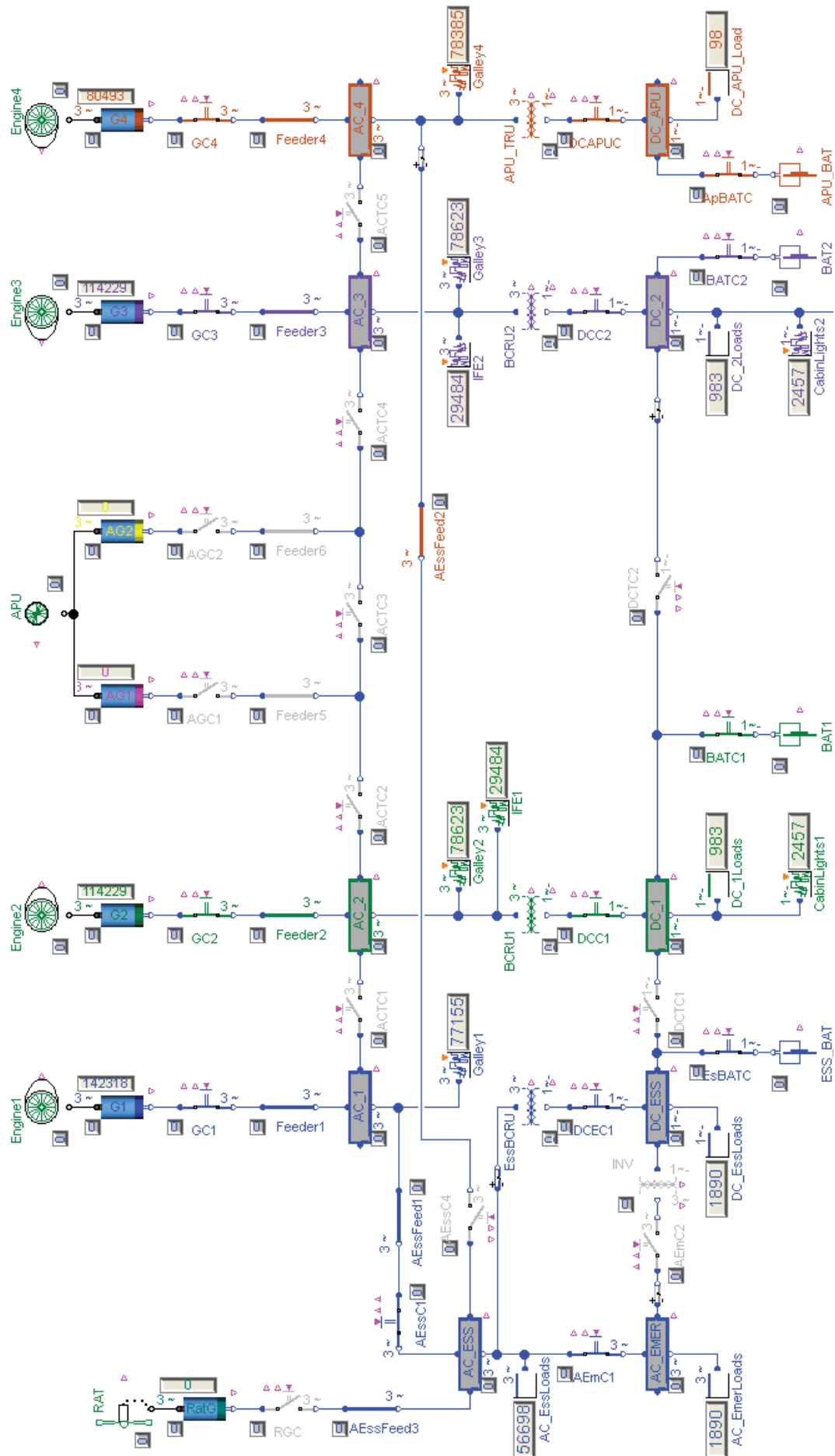


BILD 2: Modell des Elektrischen Bordsystems eines modernen vierstrahligen Langstreckenflugzeuges, Schema zeigt normalen Betrieb im Flug

3.1.2. Beispiel für Abnormalen Betrieb

BILD 5 stellt einen denkbaren abnormalen Betriebszustand des elektrischen Bordsystems dar. Die ausgefallenen Komponenten Engine1, G2, APU und BCRU2 sind in **roter** Farbe markiert und umrandet. Da G1 und G2 keinen Strom liefern, werden die Sammelschienen AC_1, AC_2, AC_3, DC_1 und DC_2 vom Generator G3 (**magenta**) versorgt. Wegen des Ausfalls von BCRU2 ist der Schalter DCTC2 geschlossen. Der andere verbleibende Generator G4 (**bronze**) versorgt AC_4 sowie die essenziellen Sammelschienen AC_ESS, AC_EMER und DC_ESS. Wie außerdem zu erkennen ist, ist die Hälfte der Kabinenlasten abgeschaltet, wohingegen die essenziellen Lasten voll versorgt bleiben.

3.2. Analyse und Optimierung dimensionierender Generatorlasten

In diesem Abschnitt wird beispielhaft gezeigt, wie die dimensionierenden elektrischen Lasten der Generatoren und somit deren Gewichte minimiert werden können. Wie bereits erläutert, machen die Kabinensysteme den größten Anteil des gesamten AC Leistungsbedarfs aus. Im Gegensatz zu den essenziellen Lasten ist es akzeptabel, die Kabinensysteme teilweise abzuschalten, wenn weniger elektrische Leistung insgesamt verfügbar ist.

Ausgehend von einer angenommenen „Anfangskonfiguration“ wurde eine Minimierung der dimensionierenden Generatorlasten durch eine modifizierte Logik für die Versorgung der AC_ESS Sammelschiene sowie eine bessere Verteilung des Leistungsbedarfs der Bordküchen erreicht. In TAB 1 sind die jeweiligen Logiken beschrieben, die Generatoren G1 und G2 werden dabei als l/h G bezeichnet, G3 und G4 als r/h G.

	Anfangskonfiguration	Optimierte Konfiguration
AC_ESS versorgt durch	AC_1 wenn intakt, sonst AC_4	AC_1 wenn beide l/h G aktiv, oder wenn ein l/h G aktiv und ein oder beide r/h G ausgefallen

TAB 1. Logik für Anschluß der AC_ESS Sammelschiene

Modelle beider Konfigurationen wurden für Betriebsszenarien mit bis zu drei kombinierten Generatorausfällen durch die von ENADOT bereitgestellte automatisierte Elektrische Lasten-Analyse ausgewertet. Bei der „Anfangskonfiguration“ entsteht der ungünstigste Betriebsfall für Generator G1 durch einen Ausfall des benachbarten G2, so daß G1 die essenziellen Lasten und zwei der vier Bordküchen versorgt. Wie in BILD 3 zu sehen ist, führt dies bei G1 zu einer maximalen Last von 250 kVA, das 1,7-fache der nominalen Generatorleistung (150 kVA). Für G2 tritt dieselbe Situation bei einem Ausfall von G1 auf.

Die Optimierung zielt nun auf eine Angleichung und somit Minimierung der dimensionierenden Generatorlasten. Dies wird hier durch ein Aufschalten der essenziellen Verbraucher auf einen weniger belasteten Generator erreicht, wenn andere Generatoren ausgefallen sind. Die gesamte Leistungsaufnahme aller Verbraucher ist bei beiden Konfigurationen gleich, d.h. die Minimierung der Generatorlasten wurde nicht durch einfaches Abschalten sondern durch eine optimierte Verteilung der Lasten erreicht. BILD 4 zeigt die maximalen Generatorlasten für die optimierte Konfiguration. Das Gewicht von Generatoren dieser Kategorie (100 bis 200 kVA) ändert sich um ca. 4 kg pro 10 kVA, so daß der Gewichtsunterschied zwischen beiden betrachteten Konfigurationen mindestens 100 kg beträgt. Weitere Einsparungen ergeben sich durch geringere Dimensionen bei Kabeln und Schaltern.

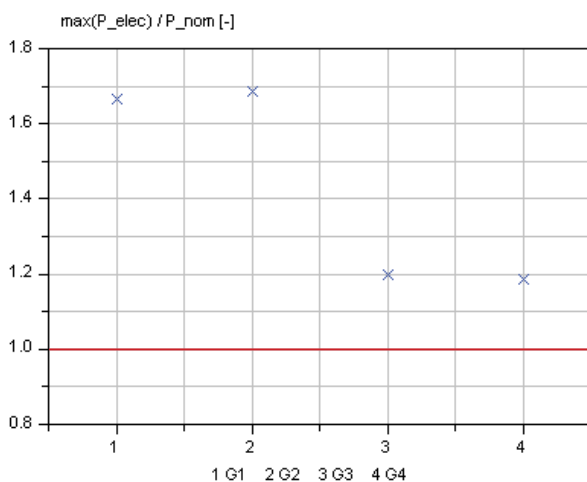


BILD 3: Anfangskonfiguration - Verhältnis aus maximaler elektrischer Last und nominaler Leistung für die vier Triebwerks-Generatoren

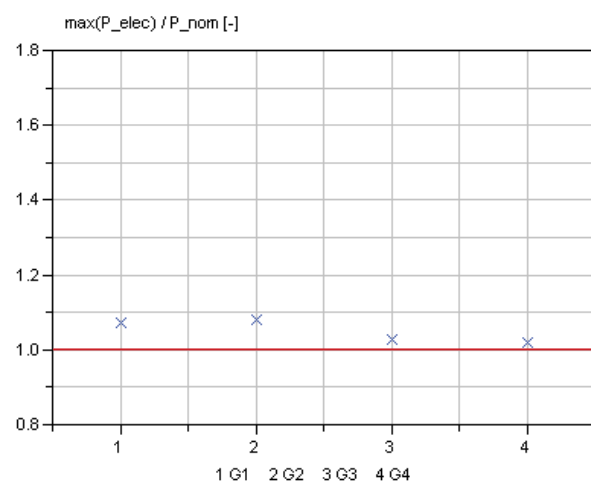


BILD 4: Optimierte Konfiguration - Verhältnis aus maximaler elektrischer Last und nominaler Leistung für die vier Triebwerks-Generatoren

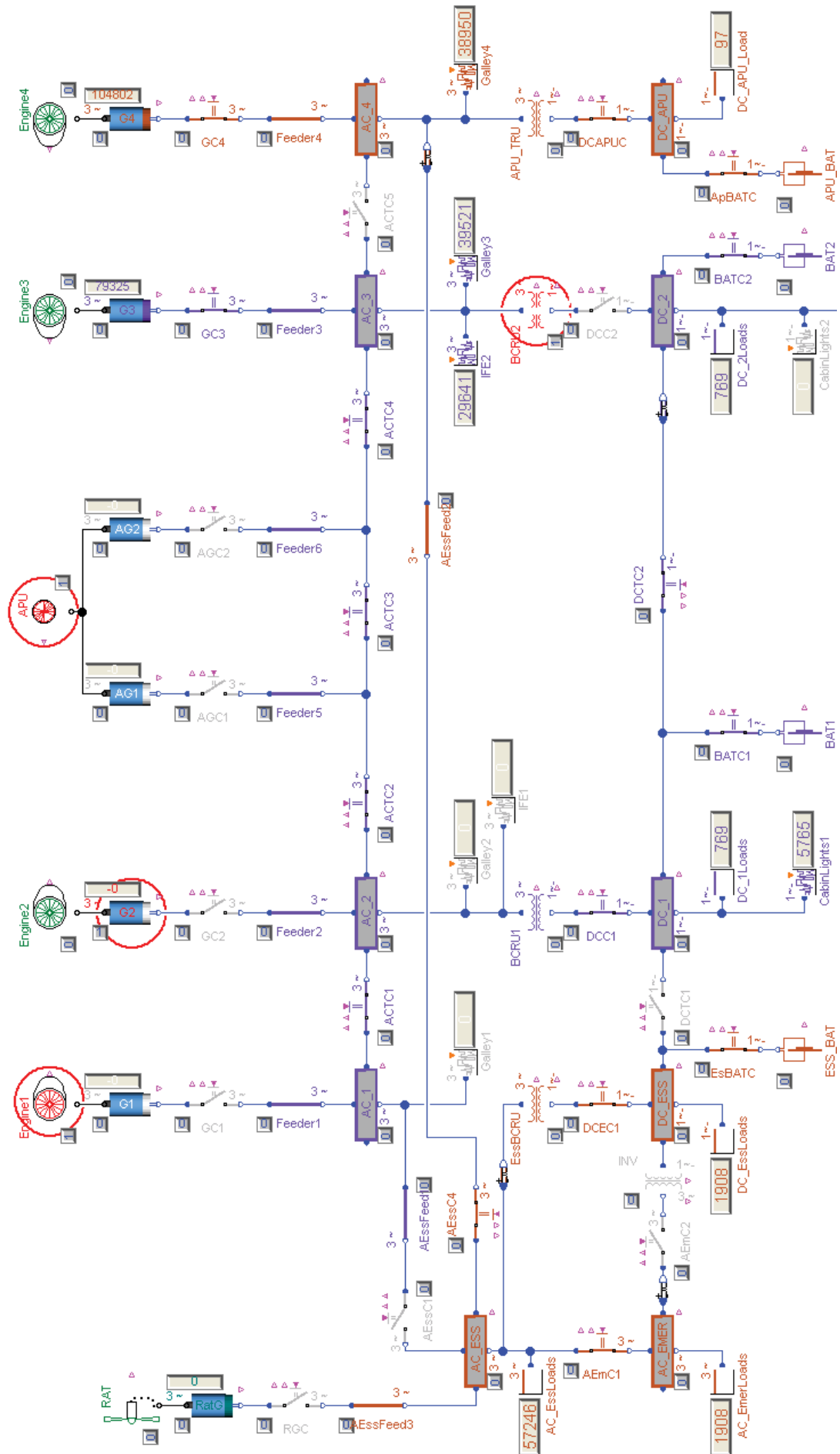


BILD 5: Modell des Elektrischen Bordsystems, Schema zeigt abnormalen Betrieb im Flug nach Ausfall von Engine1, G2, APU und BCRU2

3.3. Zuverlässigkeit der Stromversorgung

Dieses Kapitel zeigt das Ergebnis der Zuverlässigkeitsanalyse für die AC_1 Sammelschiene des vorgestellten elektrischen Bordsystems. Auf einen vollständigen Sicherheitsnachweis, d.h. die Berechnung der Zuverlässigkeiten aller Sammelschienen des elektrischen Bordnetzes, wird nur aus Platzgründen verzichtet.

Die BILDer 6 bis 11 stellen die sechs ermittelten Minimalpfade dar. Nach Ablauf der Analyseprozedur werden diese grafisch und direkt im Modelldiagramm angezeigt. Zu einem Minimalpfad gehörende, d.h. intakte, Komponenten erscheinen in der Farbe des angeschlossenen Generators, ausgefallene Komponenten in grau.

Im Normalfall wird AC_1 durch den Generator G1 versorgt (BILD 6), bei abnormalem Betrieb kann AC_1 auch durch einen anderen Triebwerks- oder APU-Generator gespeist werden. Somit besteht für die Versorgung von AC_1 mehrfache Redundanz hinsichtlich der Stromquellen.

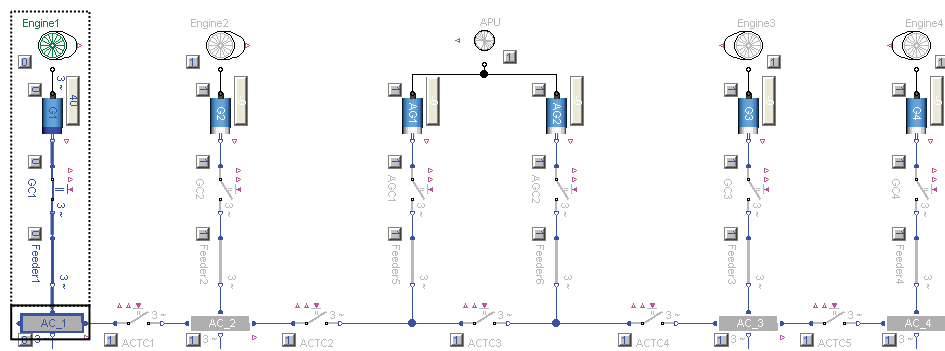
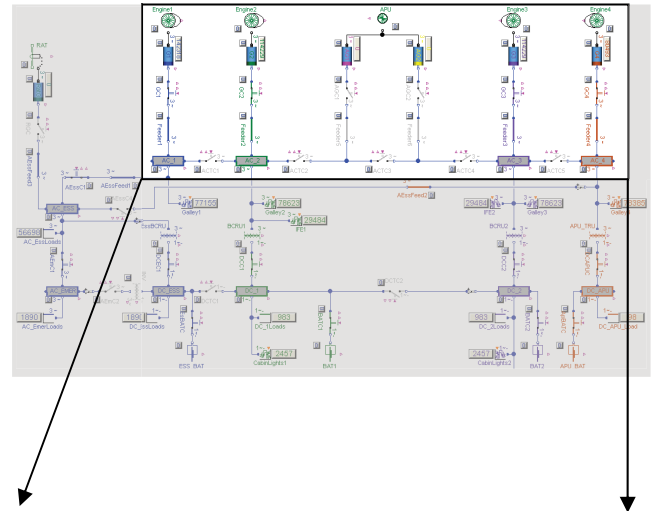


BILD 6: Minimalpfad 1 - Versorgung der AC_1 Sammelschiene durch G1

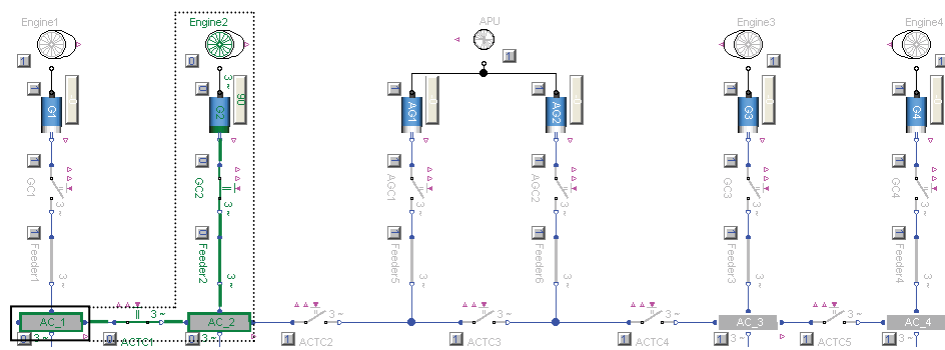


BILD 7: Minimalpfad 2 - Versorgung von AC_1 durch G2 über AC_2

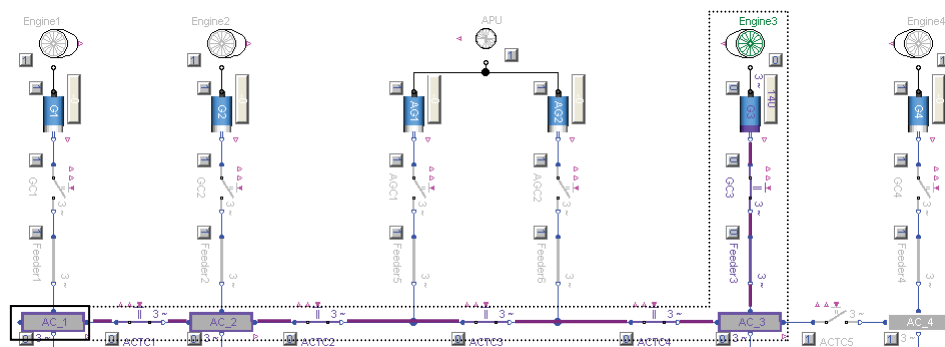


BILD 8: Minimalpfad 3 - Versorgung von AC_1 durch G3 über AC_3 und AC_2

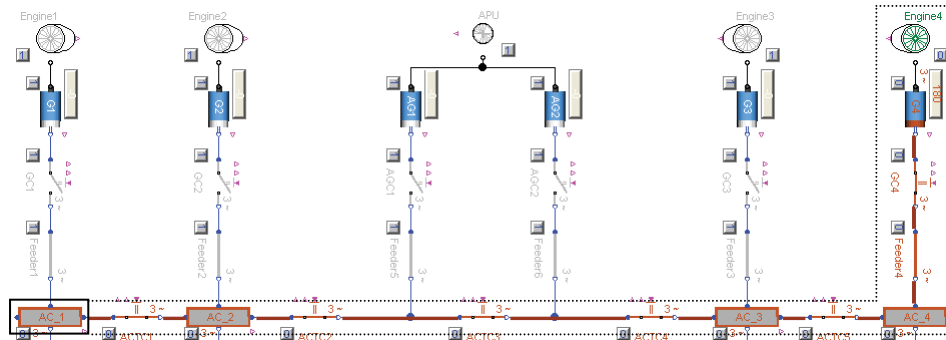


BILD 9: Minimalpfad 4 - Versorgung von AC_1 durch G4 über AC_4, AC_3 und AC_2

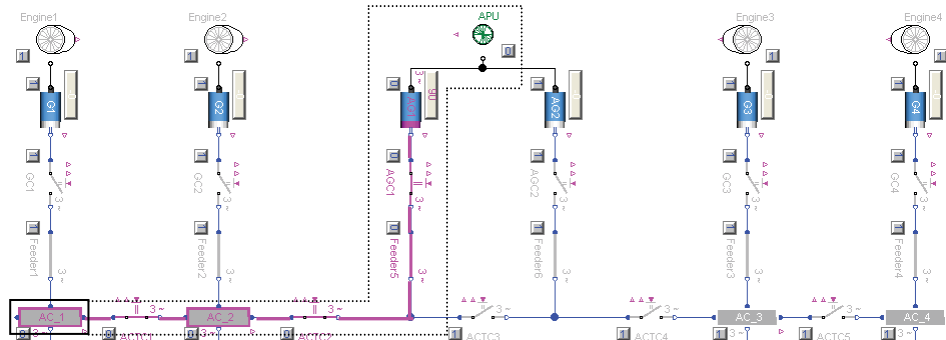


BILD 10: Minimalpfad 5 - Versorgung von AC_1 durch AG1 über AC_2

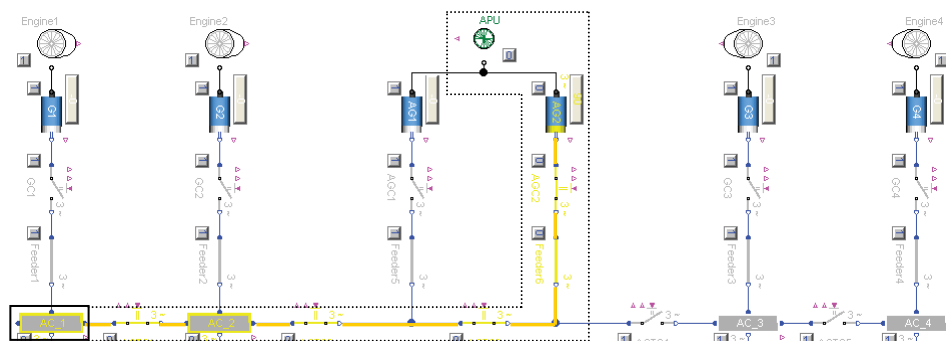


BILD 11: Minimalpfad 6 - Versorgung von AC_1 durch AG2 über AC_2

In der Minimalpfadanalyse wurden die Verbindungen von Komponenten, deren Ausfallmöglichkeiten sowie Netzwerkschaltlogiken berücksichtigt. Somit ist das Ergebnis, die sechs Minimalpfade für Sammelschiene AC_1, auch eine Kontrolle der korrekten Funktionalität des Systems und seiner Abbildung als Modell.

Wie bereits dargelegt, berücksichtigt die Minimalpfadanalyse pro Komponente zwei Zustände, intakt oder ausgefallen. Für viele Komponenten treten jedoch zwei oder mehr verschiedene Ausfallarten auf; u.a. sind die folgenden in der Modellierung realisiert: für ein Kabel bzw. eine Sammelschiene jeweils die zwei Ausfallarten „durchtrennt“ und „Kurzschluß“, für einen Schalter die zwei Möglichkeiten „klemmt offen“ und „klemmt geschlossen“, für einen Generator der Defekt „keine Ausgangsspannung“. Die Minimalchnittanalyse berücksichtigt nun alle Ausfallarten sämtlicher Komponenten und ihre Auswirkungen auf das elektrische Bordsystem.

Insgesamt wurden durch die Analyseprozedur 5 Minimal-schnitte erster Ordnung und 21 zweiter Ordnung identifiziert, die in TAB 2 vollständig aufgelistet sind. Die BILDer 12 bis 18 zeigen einige für das Szenario „AC_1 ohne Spannung“ charakteristische Fälle.

Neben den zwei möglichen Defekten der AC_1 Sammelschiene selbst – unterbrochener Stromkreis (BILD 14) oder Kurzschluß – gibt es weitere Minimalschnitte erster Ordnung, die zum Ausfall von AC_1 führen: z.B. ein Kurzschluß im Kabel Feeder1 (BILD 13), das direkt an die Sammelschiene angeschlossen ist, oder auf die gleiche Weise ein Kurzschluß im Kabel AEssFeed1 (BILD 12).

Typische Minimalschnitte zweiter Ordnung, d.h. Kombinationen zweier ausgefallener Komponenten, sind Defekte solcher Komponenten, durch die AC_1 im Normalfall versorgt wird, sowie ein weiterer Komponenten-Ausfall, der den Quertransfer über AC_2 und ACTC1 verhindert. Beispiele dafür sind in den BILDern 15 und 17 zu sehen.

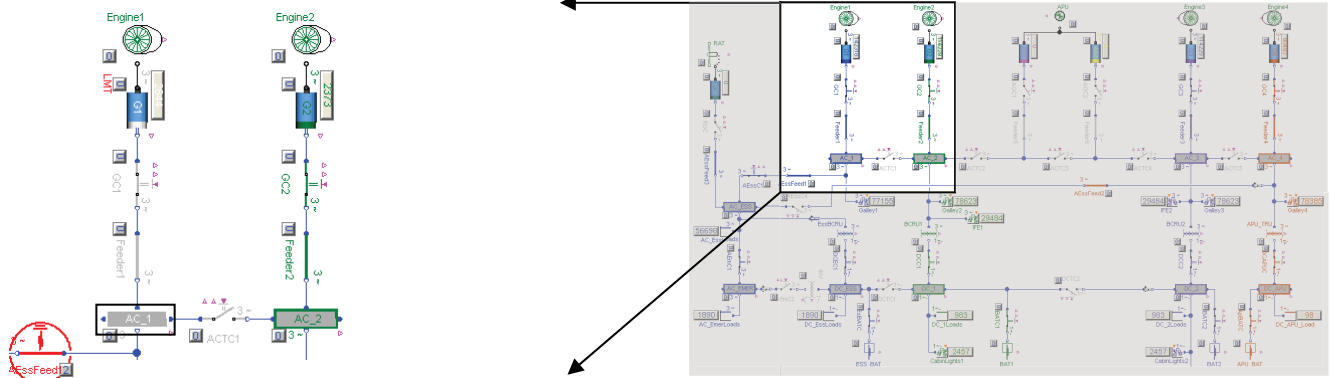


BILD 12: Minimalschnitt 1-2: Kurzschluß im Kabel führt zu Ausfall der AC_1 Sammelschiene

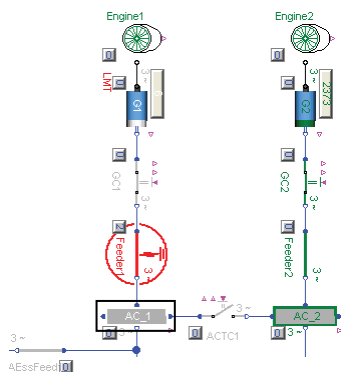


BILD 13: Minimalschnitt 1-3: Kurzschluß im Kabel führt zu Ausfall von AC_1

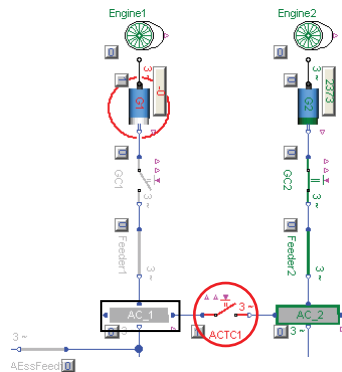


BILD 15: Minimalschnitt 2-7: Ausfall von G1 und offener Schalter führen zu Ausfall von AC_1

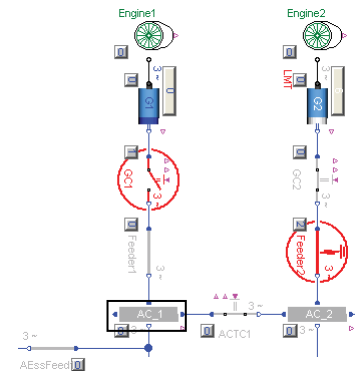


BILD 17: Minimalschnitt 2-5: offener Schalter und Kurzschluß im Kabel führen zu Ausfall von AC_1

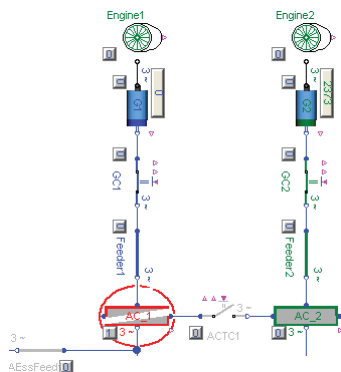


BILD 14: Minimalschnitt 1-5: unterbrochener Stromkreis führt zu Ausfall von AC_1

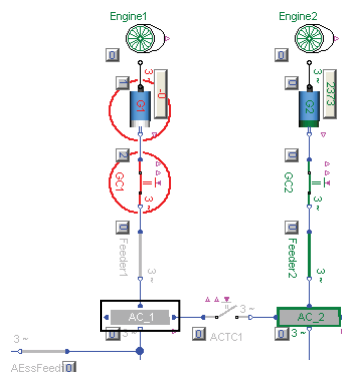


BILD 16: Minimalschnitt 2-14: Ausfall von G1 und geschlossen klemmender Schalter führen zu Ausfall von AC_1

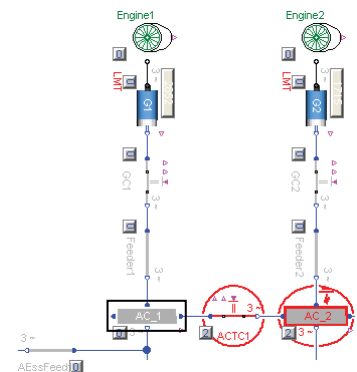


BILD 18: Minimalschnitt 2-21: Kurzschluß in AC_2 und geschlossen klemmender Schalter führen zu Ausfall von AC_1

Des weiteren kann auch ein geschlossen klemmender (stuck closed - s.c.) Schalter in Kombination mit einem defekten Generator (BILD 16) oder in Kombination mit einem Kurzschluß (BILD 18) die Ursache für den Ausfall der AC_1 Sammelschiene sein, dessen Wahrscheinlichkeit mit $4,0 \cdot 10^{-4}$ berechnet wurde.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit von AC_1 wird im wesentlichen durch die angeschlossenen Kabel bestimmt. Wenn

erforderlich, kann dies verbessert werden, indem zwischen die Kabel und die Sammelschiene Schalter mit Überschutz eingesetzt werden, welche im Fall eines Kurzschluß-Defekts dessen Ausbreitung verhindern. Somit würde für die meisten einfachen Komponentenausfälle verhindert werden, daß diese zum Ausfall von AC_1 führen. Da hinsichtlich der Stromquellen mehrfache Redundanz besteht, ist die Verbesserung der Ausfallwahrscheinlichkeit von AC_1 dann nur durch die möglichen Defekte der Sammelschiene selbst begrenzt.

Minimalschnitte 1. Ordnung:

1-1	Feeder1	O/C	0.0002
1-2	AEssFeed1	S/C	0.0001
1-3	Feeder1	S/C	0.0001
1-4	AC_1	S/C	$2 \cdot 10^{-7}$
1-5	AC_1	O/C	$1 \cdot 10^{-7}$

Minimalschnitte 2. Ordnung:

2-1	G1	loss	Feeder2	O/C	$8 \cdot 10^{-9}$
2-2	G1	loss	Feeder2	S/C	$4 \cdot 10^{-9}$
2-3	GC1	O/C	Feeder2	O/C	$2 \cdot 10^{-9}$
2-4	Engine1	loss	Feeder2	O/C	$2 \cdot 10^{-9}$
2-5	GC1	O/C	Feeder2	S/C	$1 \cdot 10^{-9}$
2-6	Engine1	loss	Feeder2	S/C	$1 \cdot 10^{-9}$
2-7	G1	loss	ACTC1	O/C	$4 \cdot 10^{-10}$
2-8	GC1	O/C	ACTC1	O/C	$1 \cdot 10^{-10}$
2-9	Engine1	loss	ACTC1	O/C	$1 \cdot 10^{-10}$
2-10	AEssC1	s.c.	AEssFeed3	S/C	$1 \cdot 10^{-11}$
2-11	ACTC1	s.c.	Feeder2	S/C	$1 \cdot 10^{-11}$
2-12	G1	loss	AC_2	S/C	$8 \cdot 10^{-12}$
2-13	G1	loss	AC_2	O/C	$4 \cdot 10^{-12}$
2-14	G1	loss	GC1	s.c.	$4 \cdot 10^{-12}$
2-15	GC1	O/C	AC_2	S/C	$2 \cdot 10^{-12}$
2-16	Engine1	loss	AC_2	S/C	$2 \cdot 10^{-12}$
2-17	GC1	O/C	AC_2	O/C	$1 \cdot 10^{-12}$
2-18	Engine1	loss	AC_2	O/C	$1 \cdot 10^{-12}$
2-19	Engine1	loss	GC1	s.c.	$1 \cdot 10^{-12}$
2-20	AC_ESS	S/C	AEssC1	s.c.	$2 \cdot 10^{-14}$
2-21	AC_2	S/C	ACTC1	s.c.	$2 \cdot 10^{-14}$

TAB 2. Liste der Minimalschnitte, nach Wahrscheinlichkeiten sortiert, für den Ausfall von AC_1

4. FAZIT

Das vorliegende Paper beschreibt die Fähigkeiten des integrierten modellbasierten Werkzeugs ENADOT für den Entwurf und die Optimierung elektrischer Bordsysteme, deren Bedeutung, installierte Leistung und Kritikalität in Transportflugzeugen zuletzt stark zugenommen haben.

ENADOT stellt eine Modellierungsumgebung für solche Bordsysteme bereit, mithilfe einer in der Modelica-Sprache entwickelten Modellbibliothek elektrischer Komponenten. Die Modellierungstiefe umfaßt das stationäre elektrische Verhalten im Normalbetrieb oder bei Defekten, Ausfallwahrscheinlichkeiten und parametrisierte Gewichte. Auf Systemebene sind, durch die Modellierung der Steuerlogiken von Netzwerkschaltern, verschiedene mögliche Betriebszustände eines Bordnetzes abgebildet.

ENADOT stellt in einem interaktiven Simulationsmodus die Schaltzustände der Netzwerkschalter und die sich daraus ergebenden elektrischen Kreise grafisch und farbig im Modelldiagramm dar. Komponenten können durch Mausklick zwischen dem normalen und Ausfallzuständen hin- und hergeschaltet werden, zur einfachen und unmittelbaren Überprüfung des resultierenden Systemverhaltens.

Aus dem Modell eines Bordsystems können mithilfe mehrerer automatischer Analysefunktionen in ENADOT die maximalen elektrischen Lasten jeder Netzwerkkomponente, die jeweiligen Gewichte und das Gesamtgewicht berechnet werden. Somit wird die Auslegung der Komponenten des elektrischen Systems weitgehend automatisiert, was auch die Minimierung des gesamten Systemgewichts unterstützt.

Weiterhin kann eine Zuverlässigkeitsanalyse für die Stromversorgung einzelner oder mehrerer Sammelschienen durchgeführt werden, an die elektrische Verbraucher

insbesondere mit sicherheitskritischer Funktion angeschlossen sind. Die Berechnung der Zuverlässigkeit auf der Basis ermittelter Minimalschnitte entspricht im Ergebnis einer Fehlerbaumanalyse. Somit kann für die Nachweisführung von Bordsystemen ein sog. System Safety Assessment (SSA), das neben der Analyse von Ausfällen mit gemeinsamer Ursache (Common Cause Analysis - CCA) erforderlich ist, nun automatisch erstellt werden.

Durch graphentheoretische Methoden wird in ENADOT der Aufwand der rechenintensiven Zuverlässigkeitsanalyse bei trotzdem vollständiger Betrachtung aller relevanten Fälle so begrenzt, daß die Auswertung eines Systemmodells in der gezeigten Komplexität auf einem üblichen Desktop-Computer nur wenige Minuten benötigt.

Insgesamt wird durch ENADOT der Entwicklungsprozess für elektrische Bordsysteme verbessert und verkürzt.

5. DANKSAGUNG

Diese Arbeit wurde bzw. wird im Rahmen der Europäischen Projekte MOET (More-Open Electrical Technologies) [6] und CleanSky [7] durchgeführt. Der Autor möchte sich bei Airbus-France, Electrical Engineering, für die freundliche Unterstützung und Begleitung bedanken.

ABKÜRZUNGEN

AC	Alternating Current
APU	Auxiliary Power Unit
BCRU	Battery Charger Rectifier Unit
CF	Constant Frequency
DC	Direct Current
EHA	Electro-Hydrostatic Actuator
EMER	Emergency
ENADOT	Electric Network Architecture Design Optimisation Tool
ESS	Essential
FTA	Fault Tree Analysis
G	Generator
INV	Inverter
O/C	Open Circuit
RAT	Ram Air Turbine
RBD	Reliability Block Diagram
RMS	Root Mean Square
s.c.	stuck closed
S/C	Short Circuit
V	Volt
VA	Volt Ampere
VF	Variable Frequency

SCHRIFTTUM

- [1] Modelica, <http://www.modelica.org>
- [2] Dymola, <http://www.3ds.com/products/catia/portfolio/dymola>
- [3] A. Meyna, B. Pauli, F.J. Brunner (Herausgeber), „Taschenbuch der Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik“, 2003 Carl Hanser Verlag München Wien
- [4] A. Birolini, „Reliability Engineering - Theory and Practice“, Fifth Edition, 2007 Springer Verlag Berlin
- [5] I. Moir, A. Seabridge, „Aircraft Systems - Mechanical, electrical and avionics subsystems integration“, 2008 John Wiley & Sons Ltd
- [6] MOET Projekt, <http://www.eurtd.com/moet/>
- [7] CleanSky Projekt, <http://www.cleansky.eu/>