

# EINSATZ VON ECHTZEITSIMULATIONEN ZUR INTEGRATION ELEKTRISCHER FLUGZEUGSYSTEME AN EINEM FLUGZEUGSYSTEMPRÜFSTAND

G. Hofer<sup>1</sup>, M. Ayeb<sup>2</sup>, H. Theuerkauf<sup>2</sup>

<sup>1</sup> DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
Institut für Robotik und Mechatronik  
Oberpfaffenhofen 82234 Wessling

<sup>2</sup> IEE Institut für Elektrische Energietechnik - Antriebstechnik – Universität Kassel  
Wilhelmshöher Allee 71, 34109 Kassel

## 1. ÜBERSICHT

Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit der Integration elektrischer Flugzeugsysteme an einem Flugzeugsystemprüfstand. Es wird ein Integrationskonzept vorgestellt, welches am Prüfstand eine repräsentative Darstellung von elektrischen Flugzeugsystemen durch simulierte Lasten ermöglicht. Das Konzept basiert auf dem Einsatz von Echtzeitmodellen und einer Echtzeitsimulationsumgebung, die die elektrischen Flugzeugsysteme am Prüfstand abbilden. Der Entwurf entsprechender Echtzeitmodelle und deren Integration am Prüfstand werden im Beitrag ausführlich diskutiert. Abschließend wird auf Erkenntnisse der Prüfstandsanwendung eingegangen.

## 2. EINLEITUNG

Flugzeugsysteme werden heutzutage in modernen Mittelstreckenflugzeugen mit pneumatischer, elektrischer und hydraulischer Energie versorgt. Die verschiedenen Energieformen werden vom Triebwerk entweder direkt in Form von Zapfluft oder mit Hilfe von Generatoren und hydraulischen Pumpen durch eine mechanische Kopplung entnommen (Bild 1).

Neueste Entwicklungen im Bereich der Flugzeugsysteme befassen sich mit dem verstärkten Einsatz von elektrischen Technologien im Flugzeug. Moderne Konzepte wie „More Electric Aircraft (MEA)“ und „All Electric Aircraft (AEA)“ sehen dabei vor, traditionell hydraulisch und pneumatisch betriebene Systeme durch elektrisch versorgte Flugzeugsysteme zu ersetzen.

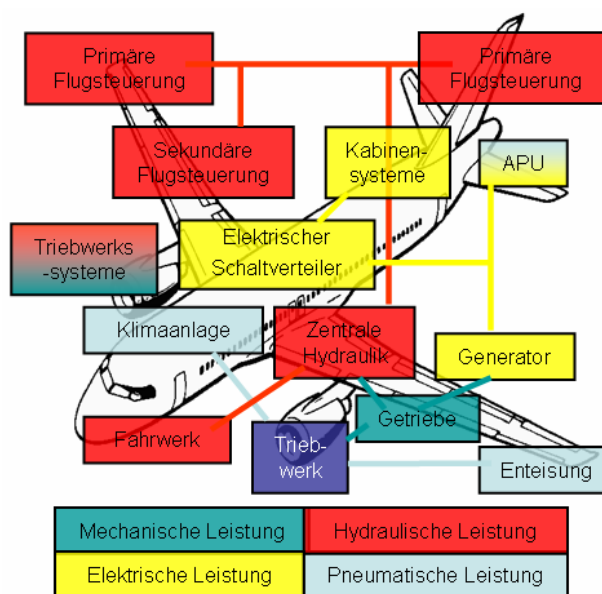


BILD 1. Energieversorgung heutiger Flugzeugsysteme

Ziel dieser Konzepte ist es, den Sekundärleistungsverbrauch an Bord eines Flugzeugs zu reduzieren und zugleich die Betriebskosten durch eine Steigerung der Zuverlässigkeit und eine Vereinfachung der Wartung der elektrischen Systeme zu senken.

Die Entwicklung solcher Konzepte wird unter anderem im EU-Forschungsprojekt „Power Optimised Aircraft (POA)“ [1] vorangetrieben. Dabei handelt es sich um ein Forschungsprojekt aus dem 5. europäischen Rahmenprogramm für Technologien und Forschung. Es befasst sich mit den Einsatzmöglichkeiten neuartiger elektrischer Flugzeugsystemtechnologien in einem konventionellen Mittelstreckenflugzeug, die zur Senkung des Sekundärleistungsverbrauchs und der Betriebskosten beitragen sollen. Im Rahmen des Projekts wurden dafür unter Berücksichtigung elektrischer Flugzeugsystemtechnologien

mehrere Flugzeugsystemarchitekturen entwickelt, die es hinsichtlich der gestellten Ziele objektiv zu analysieren gilt.

Die Analysen und Bewertungen des energetischen Verhaltens der entwickelten „Power by Wire“ Konzepte erfolgten im Rahmen des Projekts, wie im Bild 2 dargestellt, einerseits mittels einer Simulations- und Optimierungsumgebung („VIB Virtual Iron Bird“) [2], andererseits mit Hilfe eines Flugzeugsystemprüfstands („ASVR Aircraft System Validation Rig“).

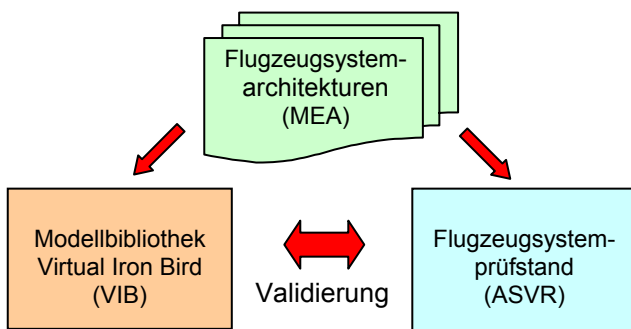


BILD 2. Vorgehen zur Analyse der Flugzeugsystemarchitekturen

Ein wesentlicher Teil der Simulations- und Optimierungsumgebung VIB bildet eine Modellbibliothek in der Modellierungssprache Modelica, die zur Modellierung der entsprechenden Flugzeugsystemarchitekturen eingesetzt wird. Die Architekturmodelle besitzen eine objektorientierte hierarchische Struktur und lassen sich in System- und Komponentenmodelle untergliedern (Bild 3). Sie werden zur Ermittlung des Leistungsverhaltens jedes einzelnen Flugzeugsystems und deren Einfluss auf die gesamte Flugzeugsystemarchitektur verwendet.

Neben der Möglichkeit zur Analyse der verschiedenen Architekturkonzepte bietet der VIB mit seinen Modellen die Grundlage für eine Leistungsoptimierung der verschiedenen Flugzeugsystemarchitekturen [3].

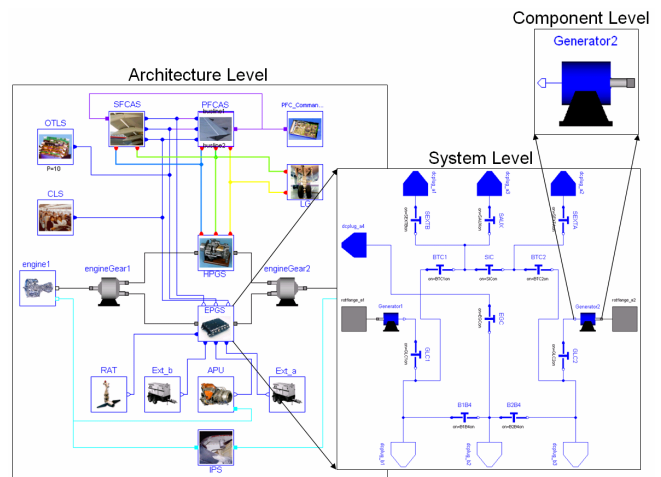


BILD 3. Hierarchisches Modelica Model einer VIB Flugzeugsystemarchitektur

Beim Flugzeugsystemprüfstand „ASVR Aircraft System Validation Rig“ (Bild 4) handelt es sich um einen elektrischen Netzwerkprüfstand, der im Rahmen des Projekts eingesetzt wird, um das energetische Verhalten elektrischer Flugzeugsysteme und -komponenten zu analysieren. Die Testergebnisse werden zum einen zur Analyse und Bewertung der entwickelten Systemarchitekturen verwendet, zum anderen bilden sie die Grundlage für die Validierung der Simulationsmodelle und -ergebnisse der Simulations- und Optimierungsumgebung VIB [2].



BILD 4. Flugzeugsystemprüfstand „ASVR Aircraft System Validation Rig“ (Quelle: Hispano-Suiza)

Der Prüfstand setzt sich aus ausgewählten elektrischen Systemkomponenten der entwickelten Flugzeugsystemarchitekturen zusammen. Sie stellen die gemeinsame Basisstruktur der zu betrachtenden elektrischen Netzwerkarchitekturen dar. Zur Analyse der Flugzeugsystemarchitekturen werden am Prüfstand die installierten elektrischen Systemkomponenten durch simu-

lierte Lasten erweitert. Hierfür werden Echtzeitmodelle eingesetzt, die anhand einer Echtzeitsimulationsumgebung das elektrische Verhalten der fehlenden Systeme und Komponenten darstellen. Dieses Vorgehen ermöglicht eine realitätsnahe Abbildung der fehlenden Flugzeugkomponenten und gewährleistet damit eine Analyse der Flugzeugsystemarchitekturen am Prüfstand.

Die Integration der fehlenden Komponenten und Systeme erfolgt entsprechend dem in Bild 5 dargestellten Integrationskonzept. Der „VIB Virtual Iron Bird“, der im oberen Teil der Abbildung zu sehen ist, bietet mit seinen Simulationsmodellen die Möglichkeit die Flugzeugsystemarchitekturen umfassend zu analysieren. Im unteren Teil von Bild 5 ist hingegen der Flugzeugsystemprüfstand mit seiner installierten

Hardware und den Echtzeitsimulationen schematisch skizziert. Die Echtzeitmodelle werden, wie aus der Grafik ersichtlich ist, aus dem Virtual Iron Bird generiert. Sie dienen dazu, den Prüfstand zu komplettieren, der lediglich aus einer elektrischen Netzwerkbasisstruktur besteht und damit nur einen Teil der Flugzeugsystemarchitekturen abdecken würde. Durch einen solchen Einsatz von Echtzeitmodellen lassen sich nach dem vorgestellten Integrationskonzept elektrische Flugzeugsysteme am Prüfstand integrieren und eine vollständige Darstellung der Flugzeugsystemarchitekturen erreichen.

Auf diese Art und Weise ist ein mit den numerischen Simulationen vergleichbarer Test der Flugzeugsystemarchitekturen am Flugzeugsystemprüfstand durchführbar.

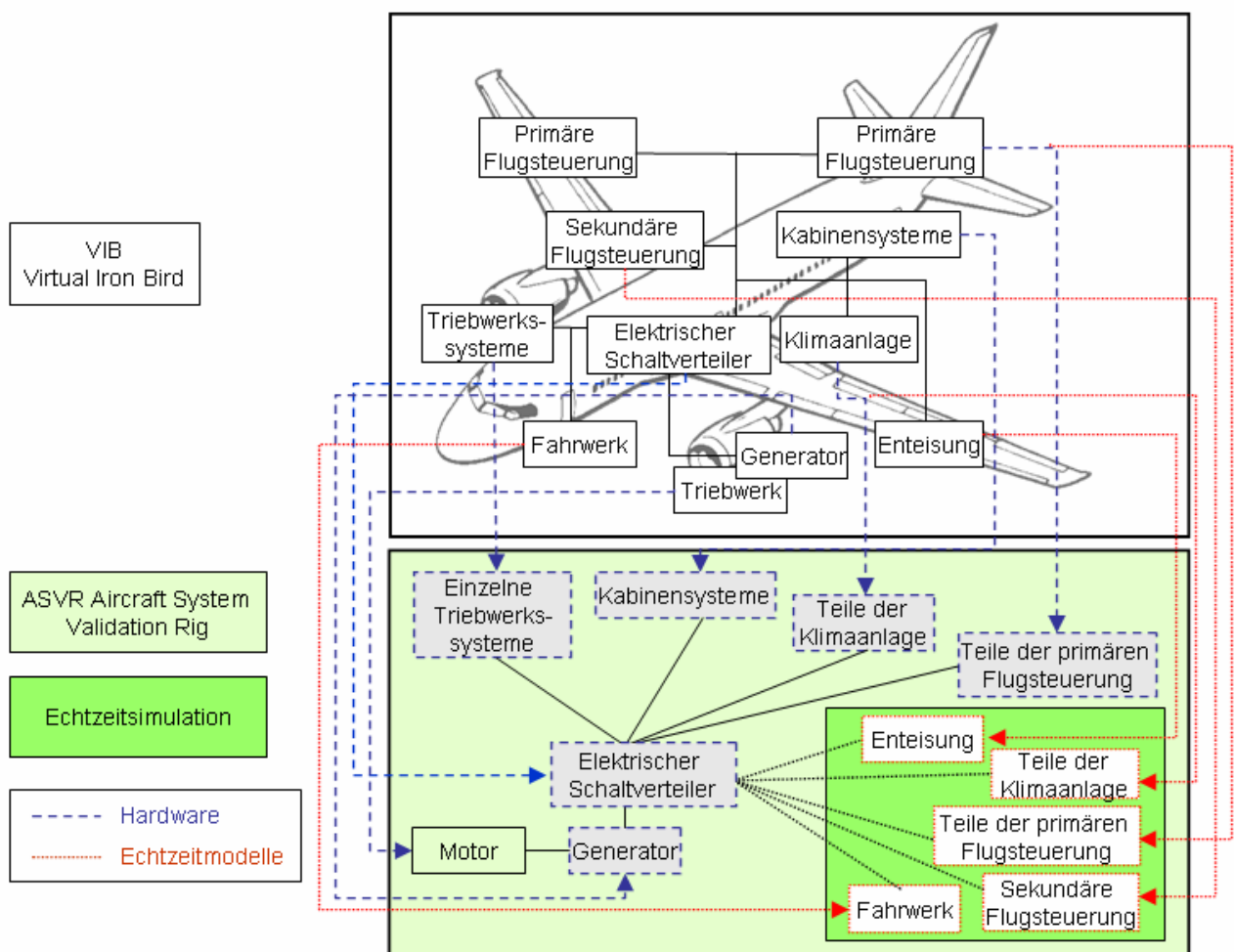


BILD 5. Integrationskonzept am Flugzeugsystemprüfstand ASVR

### 3. FLUGZEUGSYSTEMPRÜFSTAND

Der Flugzeugsystemprüfstand ASVR ist ein elektrischer Systemnetzwerkprüfstand, der zur Analyse elektrischer Systemkomponenten und elektrischer Systemarchitekturen eingesetzt wird. Er besteht aus bestimmten Systemkomponenten einer Netzwerkhälfte, die die Basisstruktur der verschiedenen zu betrachtenden Flugzeugsystemarchitekturen abbilden (Bild 6). Die Netzwerkbasisstruktur repräsentiert ein 350VDC Gleichstromnetzwerk, das von zwei Triebwerksgeneratoren versorgt wird. Die Triebwerksgeneratoren werden am Prüfstand von zwei elektrischen Industriemotoren angetrieben, die den thermodynamischen Triebwerksbetrieb simulieren. Sie sind über Stromleitungen (Feeders) mit dem elektrischen Schaltverteiler EPC verbunden und versorgen über ein Schaltnetzwerk die elektrischen Triebwerks- und Flugzeugverbraucher mit elektrischer Leistung.

Diese Verbraucher, die im Normalbetrieb von jeweils einem Generator versorgt werden, sind über Flugzeugkabel mit dem elektrischen Schaltverteiler EPC verbunden.

Die Kabel entsprechen in Art und Länge denen eines realen Flugzeugs. Bei den installierten Triebwerksverbrauchern handelt es sich um eine elektrische Treibstoffpumpe und ein elektrisch betriebenes Ölfiltersystem. Die Flugzeugverbraucher setzen sich zum einen aus drei elektrohydrostatischen Aktuatoren unterschiedlicher Leistungsklassen und zum anderen aus zwei Klimaanlagekomponenten zusammen. Die drei elektrohydrostatischen Aktuatoren werden am Prüfstand als Querruder-, Höhenruder- und Seitenruderaktuatoren betrieben. Bei den beiden Klimaanlagekomponenten handelt es sich um einen motorbetriebenen Umlaufventilator und einen motorbetriebenen Verdichter. Sie sind Teil einer hybrid betriebenen Klimaanlage, die im Flugzeug teils mit Zapfluft von den Triebwerken, teils mit elektrischer Energie betrieben wird. Zur realitätsnahen Belastung aller installierten Prüfstandskomponenten werden am Prüfstand entsprechende Lastvorrichtungen eingesetzt.

Alle Komponenten sind mit einer echtzeitfähigen Datenverbindung ausgestattet und werden über einen zentralen Rechner angesteuert. Diese

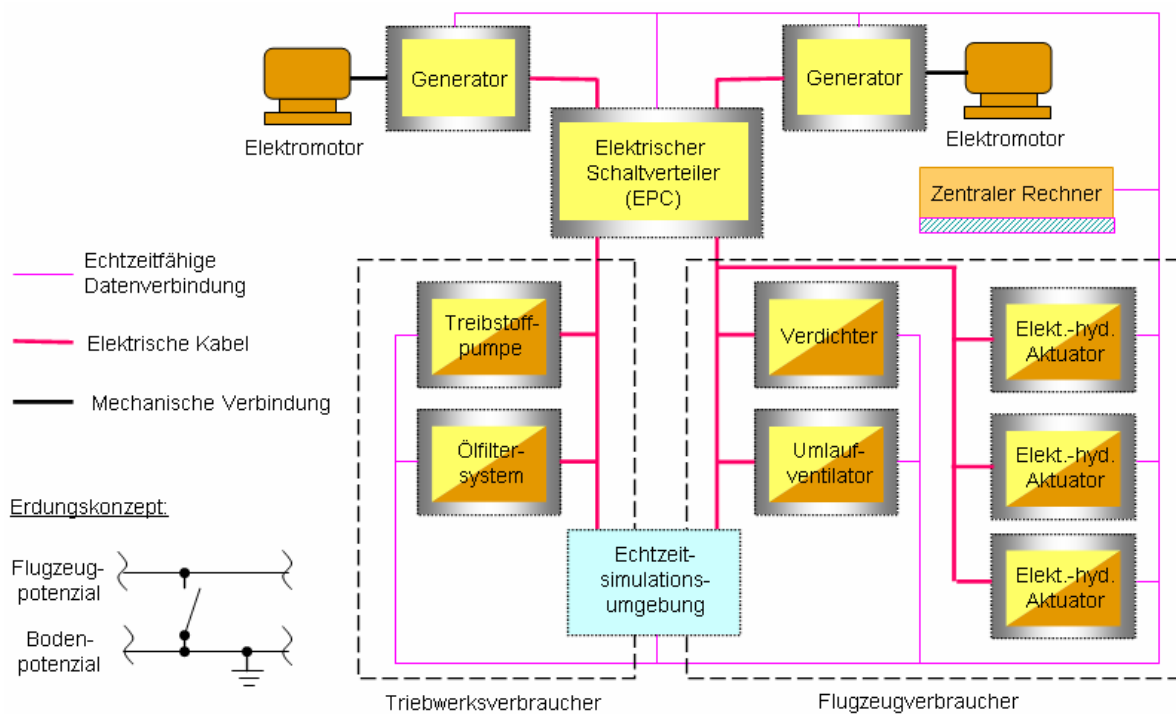


BILD 6. Schematisch der Aufbau des Flugzeugsystemprüfstands

Verbindung ermöglicht zudem den Datenaustausch zwischen den Prüfstandskomponenten während des Testbetriebs und dient so zur Aufzeichnung der Testergebnisse am zentralen Rechner. Am ASVR werden verschiedene Flugsequenzen anhand von vordefinierten Flugprofilen getestet. Dies geschieht sowohl für den Flug- als auch für den Bodenbetrieb. Zur Simulation eines Flug- und Bodenbetriebs am Prüfstand wurde ein entsprechendes Netzwerkkonzept entwickelt, das eine Trennung des Flugzeug- und Bodenpotentials ermöglicht. Alle installierten Netzwerkkomponenten sind am Prüfstand dem Flugzeugpotential zugeordnet, welches sich über einen elektrischen Schalter vom Bodenpotential wahlweise trennen lässt (Bild 6).

Das elektrische Prüfstandsnetzwerk stellt jedoch nur die Basisstruktur der im Rahmen des Projektes entworfenen Flugzeugsystemarchitekturen dar und muss abhängig von den darzustellenden Netzwerkarchitekturen durch Flugzeugsystemverbraucher erweitert werden. Eine Erweiterung durch entsprechende Hardware ist im Rahmen des Projektes aus technischen und finanziellen Gründen jedoch nicht möglich. Auch eine Integration beispielsweise des Fahrwerksystems, oder der Klimaanlage würde den Rahmen der Möglichkeiten übersteigen, da hierfür besondere Umgebungs- und Testbedingungen erforderlich sind, die lediglich mit einem hohen technischen und finanziellen Aufwand realisierbar wären. Um aber dennoch diejenigen Flugzeugnetzwerke, die im Mittelpunkt des Interesses stehen, abbilden zu können, wird, wie in Bild 6 veranschaulicht, eine Echtzeitumgebung für die energetische Darstellung der fehlenden Flugzeugsysteme und -komponenten eingesetzt.

#### **4. ECHTZEITSIMULATION AM FLUGZEUGSYSTEMPRÜFSTAND**

##### **4.1. Echtzeitsimulationsumgebung**

Das elektrische Verhalten der fehlenden Komponenten und Systeme einer halben Flugzeugsystemarchitektur wird am Prüfstand mit Hilfe einer Echtzeitsimulationsumgebung dargestellt. Sie besteht aus einem Echtzeitsimulator sowie

aus vier steuerbaren elektronischen Lasten (Bild 7), die jeweils paarweise als Flugzeugverbraucher und als Triebwerksverbraucher im elektrischen Prüfstandsnetzwerk integriert sind. Die Lasten bilden die physikalische Schnittstelle zum elektrischen Netzwerk und sind über Kabel jeweils mit dem elektrischen Schaltverteiler EPC verbunden. Sie werden am Prüfstand vom Echtzeitsimulator über eine echtzeitfähige Glasfaserdatenverbindung angesteuert und ermöglichen das elektrische Netzwerk gemäß den Steuergrößen zu belasten. Die dafür erforderlichen Steuergrößen werden im „closed-loop“ Betrieb mit dem Prüfstandsnetzwerk auf dem Echtzeitsimulator ermittelt. Hierfür werden Echtzeitmodelle eingesetzt, die aus aktuellen Prüfstandsdaten und gespeicherten Flugprofilen die elektrische Leistung der fehlenden Komponenten und Systeme der Architekturen berechnen.

Beim Echtzeitsimulator handelt es sich um einen VME-Echtzeitrechner der Firma CARTS [4]. Er besteht aus 2 MVME 5500 Power PC Karten und einer Haupt-CPU. Die beiden Power PC Rechenknoten werden zur Simulation der Echtzeitsimulationsmodelle, die Haupt-CPU hingegen zur Systemsteuerung und zur Kommunikation eingesetzt. Der Rechner ist mit zwei echtzeitfähigen I/O-Systemen ausgestattet, die zum Datenaustausch zwischen Echtzeitsimulator und Gleichstromlasten genutzt werden. Die Kommunikation zwischen VME-Recheneinheit und einem externen Bediener-PC wird über eine Ethernet TCP/IP Schnittstelle ermöglicht. Der Simulator wird unter dem echtzeitfähigen Betriebssystem OS9 betrieben und ermöglicht eine parallele Berechnung der Simulationsmodelle auf den Power PC Rechenknoten. Die dafür notwendigen Prozessdaten bzw. Flugprofildaten werden von den I/O-Systemen oder von den Speichermedien des VME-Echtzeitrechners bezogen.

Die vier Gleichstromlasten besitzen jeweils eine elektrische Leistung von 25 kW und sind paarweise in einer Master-Slave Hierarchie angeordnet. Die Lastaufteilung zwischen einem Lastgerätpaar erfolgt über eine programmierbare Schnittstelle im Mastergerät. Für den Flug-

zeugsystemprüfstand wurde eine gleichmäßige Lastaufteilung gewählt, um eine proportionale Belastung der Geräte zu erwirken. Solche elektronischen Gleichstromlasten der ZS-Serie [5] lassen sich grundsätzlich auf vier verschiedene Arten betreiben (Strom-, Spannungs-, Leistungs- und Widerstandsbetrieb). Für den ASVR-Prüfstand wurde der Strombetrieb gewählt. Die Dynamik der Geräte liegt im ms-Bereich. Am Prüfstandsnetzwerk lässt sich somit innerhalb 1 ms eine dynamische Leistungsänderung von 100 kW realisieren.

In Bild 7 ist schematisch der Aufbau der Echtzeitsimulationsumgebung und deren Integration am Prüfstandsnetzwerk dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die Gleichstromlasten am Netzwerk einmal als Triebwerksverbraucher und einmal als Flugzeugverbraucher integriert werden. Sie sind, wie alle installierten Komponenten, dem Flugzeugpotenzial zugeordnet. Jedes Gleichstromlastenpaar ist zudem über eine galvanisch getrennte Master-Slave Verbindung miteinander verbunden. Somit kann eine gegen-

seitige Beeinflussung der Lastgeräte untereinander verhindert werden. Die Ansteuerung der Gleichstromlasten durch den Echtzeitsimulator erfolgt über eine echtzeitfähige Glasfaserdatenverbindung. Sie ermöglicht die galvanische Trennung der Gleichstromlasten vom Echtzeitsimulator. Damit kann der Echtzeitsimulator, ohne Einfluss auf den Prüfstandsbetrieb dem Bodenpotenzial zugeordnet werden.

#### 4.2. Echtzeitmodelle

Die Grundlage für den Entwurf der Echtzeitmodelle bildet die Modellbibliothek der Simulations- und Optimierungsumgebung VIB. Es handelt sich um eine hierarchisch strukturierte, objektorientierte Modellbibliothek in der Modellierungssprache Modelica.

Die verwendete Modellierungssprache Modelica ist eine objektorientierte Sprache und eignet sich besonders zur Modellierung von komplexen multiphysikalischen Systemen [6]. Sie unterstützt eine übergreifende einheitliche Model-

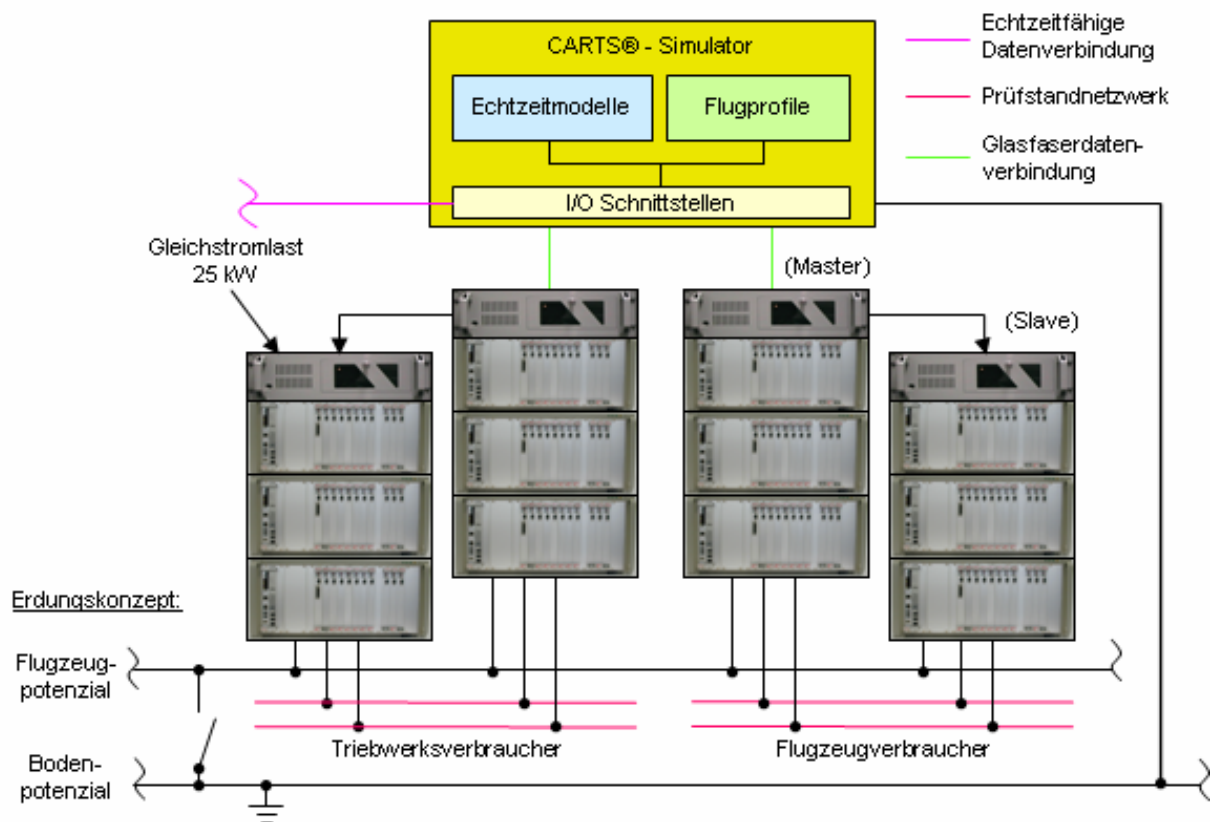


BILD 7. Schematischer Aufbau der Echtzeitsimulationsumgebung

lierung verschiedener physikalischer Fachgebiete, wie z.B. Elektrik, Hydraulik, Mechanik, usw.. Durch die fachübergreifend konsistente Syntax und Semantik ermöglicht Modelica die Modellierung von Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Fachgebieten und ermöglicht somit eine einheitliche Gesamtbetrachtung bzw. -analyse komplexer multiphysikalischer Systeme. Zur Darstellung der physikalischen Systeme steht sowohl eine gleichungsorientierte als auch eine strukturorientierte Beschreibung zur Verfügung.

Für die Auswertung der Modelle wird das kommerzielle Softwaretool Dymola eingesetzt. Mit Hilfe von Transformationsalgorithmen und symbolischen Manipulationen lassen sich hiermit Modelica-Modelle in eine effiziente auswertbare Form überführen. Es können damit kontinuierliche, unstetige, strukturvariable und diskrete Systeme ausgewertet werden. Die Simulationsumgebung Dymola besitzt eine Programmieroberfläche in Form eines graphischen Modelleditors, mit dem sich Verhaltens- und Strukturmodelle generieren und in Modellbibliotheken ablegen lassen. Die Ergebnisdaten der Simulationen werden in Form einer Matlab-Datei gespeichert und können damit zur Weiterverarbeitung exportiert werden. Darüber hinaus besteht eine Schnittstelle zu Matlab/Simulink, die es ermöglicht Modelica-Modelle in Simulink zu implementieren. Diese Modellschnittstelle wird zur Implementierung von Modelica-Echtzeitmodellen in Matlab/Simulink genutzt.

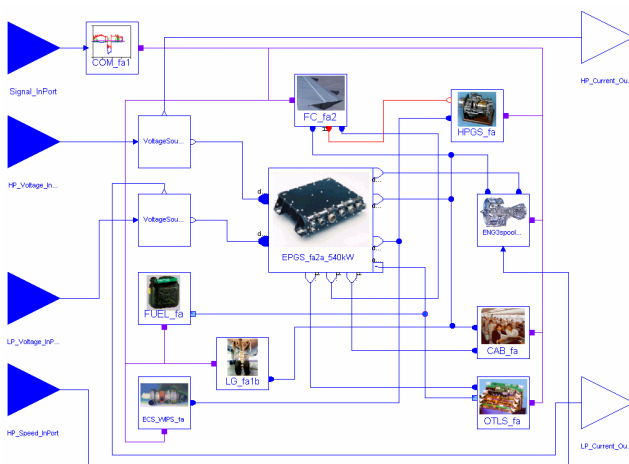


BILD 8. Echtzeitsimulationsmodell in Modelica

Der Entwurf der Echtzeitmodelle erfolgt dabei anhand der VIB-Modellbibliothek. Im ersten Schritt werden dazu die Komponenten- und Systemmodelle der am Flugzeugsystemprüfstand zu integrierenden elektrischen Flugzeugsystemnetzwerke spezifiziert. Unter Berücksichtigung des Aufbaus der Echtzeitsimulationsumgebung und deren Zuordnung am elektrischen Verteilerzentrum EPC wird in einem zweiten Schritt der Umfang der Modellarchitekturen festgelegt. Nach der Definition der Simulationsgrenzen mit ihren Echtzeitkopplungen werden schließlich in einem dritten Schritt unter Berücksichtigung der gestellten Echtzeitbedingungen die Echtzeitmodelle aus den Komponenten- und Systemmodellen der VIB-Modellbibliothek erstellt. Sie besitzen eine hierarchische Modellstruktur und lassen sich in Systeme, Teilsysteme und Komponenten untergliedern. Die höchste Hierarchieebene (Bild 8) legt die Struktur der Systemarchitekturmodelle und deren Simulationsgrenzen zum Echtzeitsimulator fest. Durch die Simulationsgrenzen werden die Signale und Daten definiert, die vom Prüfstand über die I/O-Systeme und von den Speichermedien in das Modell ein- und ausgelesen werden.

Die Echtzeitkopplung zwischen dem Modell und dem CARTS-Simulator erfolgt über die Software Matlab/Simulink. Dafür wird das Echtzeitmodell aus Dymola unter Nutzung der Dymola/Simulink-Schnittstelle in die Software Matlab/Simulink exportiert und in Form einer S-Function in ein Simulink-Modell eingebunden. Die Echtzeitkopplung zu den I/O-Systemen des Simulators und zum Echtzeitmodell in Simulink wird mittel der vordefinierten CARTS-CAPE-Modelle festgelegt (Bild 9).

Es handelt sich dabei um standardisierte Schnittstellenmodelle für das CARTS-Echtzeitsystem in Matlab/Simulink. Für die Simulation werden für das heterogene Echtzeitsimulationsmodell die Einstellungen, wie z.B. Integrator, Rechenschrittweite usw. in Simulink festgelegt. Um die Echtzeitmodelle am CARTS-Echtzeitsimulator ausführen zu können, müssen die Echtzeitmodelle in einen ausführbaren C-Code überführt werden. Dies geschieht unter

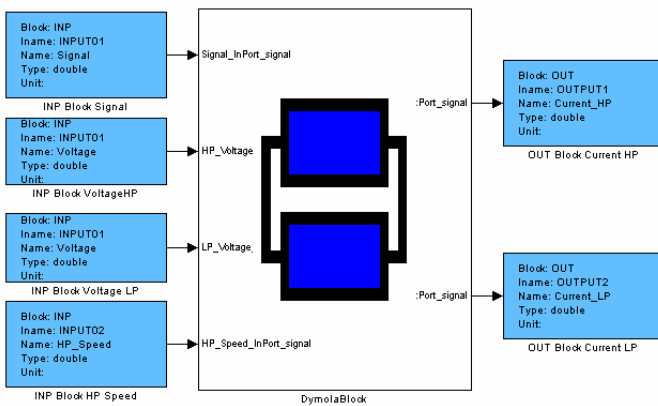


BILD 9. Modelica Echtzeitsimulationsmodell in Matlab/Simulink mit CARTS-CAPE-Modellen

Matlab/Simulink mit Hilfe des Softwareprodukts Real-Time-Workshop, das aus Simulink-Modellen echtzeitfähigen C-Code produziert. Für das CARTS Echtzeitsystem wurde im Real-Time-Workshop ein geeigneter C-Compiler verwendet, der aus dem heterogenen Simulink Modell echtzeitfähigen C-Code für das CARTS-Echtzeitsystem generiert.

## 5. EINSATZ DER ECHTZEITSIMULATIONEN FÜR DIE SYSTEMINTEGRATION

Das vorgestellte Integrationskonzept zur Integration elektrischer Flugzeugsysteme an einen Netzwerkprüfstand bietet eine Reihe von Vorteilen. Hervorzuheben sind dabei:

- Das elektrische Verhalten von Komponenten, Systemen und Systemarchitekturen kann durch den Einsatz von Echtzeitmodellen am Prüfstandsnetzwerk realitätsnah dargestellt werden.
- Die Integration und der Test verschiedener Systemarchitekturen können mit Hilfe von unterschiedlichen Modellen flexibel ohne Änderung der Prüfstands aufgebauten durchgeführt werden.
- Zur Integration von Systemen, wie z.B. Fahrwerk oder Klimaanlage sind am Prüfstand keine speziellen Umgebungsbedingungen, wie z.B. Temperatur, Druck etc. erforderlich.

- Realitätsnahe Generatorentests können ohne kostspielige Hardware mit Hilfe der simulierten Lasten durchgeführt werden.
- Schon in frühen Entwicklungsphasen sind Integrationstests auch ohne Hardware möglich.
- Eine sichere Integration kann durch eine umfangreiche Analyse der entwickelten Modelle am PC und durch ein passives Verhalten der eingesetzten Gleichstromlasten gewährleistet werden.

Bei der Integration von elektrischen Flugzeugsystemen mit Hilfe einer Echtzeitsimulationsumgebung ist im Vergleich zur Verwendung von realer Hardware mit Einschränkungen zu rechnen. In Abhängigkeit von der Güte der Echtzeitmodelle und den elektrischen Eigenschaften der Gleichstromlasten lässt sich das elektrische Verhalten realer Systeme lediglich bedingt abbilden. Zur Darstellung mehrerer Systeme bzw. Systemarchitekturen ist es unter Umständen erforderlich weitere Gleichstromlasten zu integrieren und durch zusätzliche Rechenknoten eine Steigerung der Rechenleistung am Echtzeitrechner zu erreichen.

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag wird ein Konzept zur Integration elektrischer Flugzeugsysteme an einem Prüfstandsnetzwerk vorgestellt. Dieses Konzept sieht den Einsatz einer Echtzeitsimulationsumgebung mit entsprechenden Echtzeitmodellen vor, die das elektrische Verhalten einzelner Komponenten, Systeme und Systemarchitekturen realitätsnah an einem elektrischen Prüfstandsnetzwerk darstellen. Im Beitrag werden das Konzept und deren Umsetzung ausführlich besprochen. Die Erkenntnisse aus der Entwicklung der Echtzeitmodelle und den Test am Echtzeitsimulator schließen den vorliegenden Artikel ab. Umfassende Integrationstests und Analysen der Flugzeugsystemarchitekturen werden nach Abschluss der Aufbauarbeiten des Prüfstandsnetzwerks erwartet.



- [1] L. Failero  
Power Optimised Aircraft – The Future of Aircraft Systems. AIAA/ICAS International Air and Space Symposium and Exposition: The next 100 years
- [2] J. Bals, G. Hofer, A. Pfeiffer, C. Schallert  
Virtual Iron Bird – A multidisciplinary modeling and simulation platform for new aircraft system architectures, DGLR Jahrestagung 2005 Friedrichshafen, DGLR-2005-243
- [3] C. Schallert, A. Pfeiffer, J. Bals  
Generator power optimisation for a more-electric aircraft by use of a virtual iron bird, ICAS Conference 2006 Hamburg, zur Veröffentlichung eingereicht
- [4] CARTS Real-Time Solutions GmbH,  
Computer Aided Realtime Test System, Handbuch und Bedienungsanleitung, V 4.9
- [5] Höcherl & Hackl GmbH, ZS Gleichstromlasten,  
<http://www.hoecherl-hackl.de/>
- [6] P. Fritzson  
Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 2.1, IEEE-Press, ISBN 0-471-47163-1