MODELLBASIERTE SYSTEMENTWICKLUNG HYBRIDELEKTRISCHER ANTRIEBSSTRÄNGE

Rohwer, J., Albrecht, T., Traulsen, F., Kochan, K., Netzel, T., Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Deutschland

Zusammenfassung

Die Elektrifizierung der Antriebe von Leichtflugzeugen birgt ein erhebliches Potenzial zur Emissionsminderung, da Brennstoffzellen während des Betriebs keine Emissionen erzeugen. Allerdings wird der Einsatz solcher Brennstoffzellen durch ihr hohes Gewicht eingeschränkt, wobei insbesondere die schwere Flüssigkeitskühlung als wesentliches Hindernis gilt. Eine vielversprechende Alternative sind luftgekühlte Brennstoffzellen, die ohne zusätzliche Komponenten wie Pumpen auskommen. Diese bieten jedoch nur bis zu einer Leistung von ca. 5 kW Gewichtsvorteile, da bei höheren Leistungen die Kühlöffnungen vergrößert werden müssen, was eine Erhöhung des Strömungswiderstand des Flugzeugs zur Folge hat.

Ein innovatives Antriebskonzept auf Basis eines sechspoligen Elektromotors, der von sechs modularen luftgekühlten Brennstoffzellensystemen angetrieben wird, ermöglicht es, auch höhere Leistungsanforderungen mit Brennstoffzellen zu erfüllen. Im Rahmen des Verbundprojektes BeHyPSy (B4 INNOVATIVE HYDROGEN PROPULSION SYSTEM) des Luftfahrtforschungsprogramms wird dieses Konzept für Ultraleichtflugzeuge untersucht. Das Teilprojekt der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg unterstützt die Auslegung, Entwicklung, Erprobung, Optimierung und Anwendung des Antriebssystems durch modellbasierte Systementwicklung. Der Schwerpunkt liegt auf dem methodischen Zusammenwirken virtueller und realer Entwicklungsumgebungen und der effizienten Anwendung der eingesetzten Tools. Der Beitrag umfasst u.a. den Einsatz des System Composer™ und der Requirements Toolbox™ von MATLAB® zur Erfassung der Systemarchitektur sowie zur Erstellung und Verwaltung der Anforderungen. Besonderes Augenmerk wird auf die Modellierung des Systems in Simulink®/Simscape™ sowie die Validierung mit einem speziell an der HAW Hamburg aufgebauten Antriebs-Teststand gelegt. Dabei kommen Methoden der statistischen Versuchsplanung und eine dazu gehörige DoE-Software (Design-of-Experiment) zur Anwendung. Dieses Vorgehen soll auf den Verbunddemonstrator übertragen werden. Damit wird die frühzeitige Bereitstellung validierter Simulationen ermöglicht, auf deren Basis weiterführende Untersuchungen des dynamischen Systemverhaltens durchgeführt werden können und ist damit ein wichtiger Baustein, um Frontloading zu realisieren.

1. MOTIVATION

Die Europäische Kommission strebt bis zum Jahr 2050 Klimaneutralität an und formulierte bereits im Jahr 2011 das Ziel, die CO_2-Emissionen pro Passagier im Luftverkehr um 75 % zu reduzieren [1] [2] [3]. Dieses anspruchsvolle Ziel steht in Kontrast zu einer durchschnittlichen jährlichen Effizienzsteigerung von lediglich 1,5 Prozent, was die dringende Notwendigkeit neuer Technologien unterstreicht [4] [5].

Obgleich Sustainable Aviation Fuel (SAF) zur Reduzierung der CO_2-Emissionen beitragen kann, mindert es nicht die Emissionen von Stickoxiden oder Ruß. In diesem Kontext erweisen sich Brennstoffzellen-Flugzeuge, die Wasserstoff als Energieträger nutzen, insbesondere für den Einsatz in kleineren Flugzeugen als vielversprechende Alternative. Die erfolgreiche Anwendung von Wasserstofftechnologie wurde bereits anhand mehrerer Beispiele demonstriert. Hierzu zählen zum Beispiel das viersitzige Passagierflugzeug HY4 [6], das Leichtflugzeug Taifun 17 H² [7], die Antares DLR-H2 [8], Universal Hydrogen [9], Zero Avia [10] und weitere. Im Rahmen des Projekts "BALIS 2.0" erfolgt die Entwicklung eines 350-kW-Brennstoffzellensystems für Regionalflugzeuge [11]. Des Weiteren plant Airbus die Erprobung eines wasserstoffbetriebenen Triebwerks am A380 mit dem Ziel, bis 2035 emissionsfreie Passagierflugzeuge auf den Markt zu bringen [12].

Im Vergleich zu modernen Linienflugzeugen emittieren Kleinstflugzeuge etwa das Zehnfache an CO_2 pro Personenkilometer [13]. Daher kommt der Kombination von Wasserstoff-Brennstoffzellen mit Batteriesystemen sowie rein elektrischen Antrieben eine besondere Bedeutung für größere Reichweiten zu. Derartige Systeme leisten demnach einen signifikanten Beitrag zur Steigerung der Leistungsdichte sowie zur Reduktion von Emissionen.

Die modellbasierte Systementwicklung (MBSE) stellt einen effizienten Ansatz zur Gestaltung der Entwicklung solcher Antriebssysteme dar. Durch die strukturierte, methodenbasierte Vorgehensweise lässt sich die damit einhergehende Komplexität beherrschen, sodass potenzielle Gefahrenquellen frühzeitig identifiziert und Optimierungspotenziale genutzt werden können.

2. STAND DER TECHNIK

Die modellbasierte Systementwicklung (MBSE) bietet einen strukturierten Ansatz, um der zunehmenden Komplexität moderner technischer Systeme gerecht zu werden. Anstatt ausschließlich auf textbasierte Spezifikationen zu setzen, fördert MBSE die Verwendung von präzisen und konsistenten Modellen, um die Entwicklung, Analyse und Verifikation von Systemen zu unterstützen. In diesem Zusammenhang beschreibt das Buch SysML for Systems Engineering die sogenannten "Three Evils of Engineering", die

CC BY-ND 4.0

doi: 10.25967/630138

typischen Herausforderungen in der Systementwicklung: Komplexität, mangelndes Verständnis und schlechte Kommunikation [14]. Komplexität entsteht durch die zunehmende Größe und Vernetzung von Systemen. Mangelndes Verständnis bezieht sich auf die Schwierigkeit, alle Beteiligten auf dasselbe Wissensniveau zu bringen, was oft zu Fehlern und Missverständnissen führt. Schlechte Kommunikation zwischen verschiedenen Teams und Disziplinen verstärkt diese Probleme zusätzlich. MBSE adressiert diese "drei Übel", indem es eine gemeinsame, modellbasierte Grundlage schafft, die den Austausch fördert, Verständnis vertieft und Komplexität beherrschbar macht. Die Verwendung von Modellen erleichtert zudem die Wiederverwendbarkeit von Komponenten und Designs, was zu einer Reduzierung der Entwicklungskosten und einer Verkürzung der Markteinführungszeit beitragen kann. [14]

In Erweiterung dazu wurde in [15] gezeigt, wie reale und virtuelle Entwicklungsumgebungen vernetzt eingesetzt werden können, um hardwarenahe Entwicklungsschritte in frühe Entwicklungsphasen vorverlagern zu können (Frontloading).

Die beschriebenen Vorteile der MBSE-Methodik sind bereits in einigen Forschungsarbeiten zur Elektrifizierung des Antriebstrangs implementiert wurden. Eine Arbeit hatte zur Frage, wie die Integration von elektrischen Motoren im Kontext eines elektrisch betriebenen Flugzeugs mit Hilfe von MBSE realisiert werden kann. Es konnte gezeigt werden, dass die MBSE-Methodik Informationen aus verschiedenen Disziplinen bündelt und übersichtlich zusammenfasst, sodass ein geteiltes Verständnis des Projekts entstand. Außerdem konnten die eindeutige Verfolgbarkeit und Zuordnung der Projektanforderungen an das System und die Subsysteme genutzt werden, um diese begleitend zur Entwicklung zu validieren und Ressourcen zu sparen [16]. Eine weitere Arbeit hat untersucht, wie die Designphase eines elektrischen VTOL-Flugzeugs mit der MBSE-Methodik effizient gestaltet werden kann. Es hat sich gezeigt, dass in einem iterativen Entwurfsprozess die Verfolgbarkeit der Projektparameter und die Anforderungsvalidierung gegenüber eines herkömmlichen Ansatzes verbessert werden konnte [17]. Eine zusätzliche Arbeit haben ebenfalls gezeigt, dass die Modularität und Flexibilität der Methodik Vorteile bringt, wenn dynamische Modelle und verschiedene Systeme betrachtet werden müssen [18].

Die Integration von Brennstoffzellen in Kleinflugzeugen stellt spezifische Herausforderungen dar, insbesondere im Bereich des Kühlsystems. Dieses ist erforderlich, um die während des Betriebs der Brennstoffzellen entstehende Wärme effizient abzuleiten. Ein zentrales Problem besteht dabei im zusätzlichen Gewicht, das durch das Kühlsystem selbst verursacht wird.

Um die Effizienz der Brennstoffzelle zu gewährleisten und ihre optimale Betriebstemperatur zu erhalten, ist eine kontinuierliche Wärmeabfuhr erforderlich. Im Vergleich zu Verbrennungsmotoren liegt das Temperaturniveau der Brennstoffzellen jedoch niedriger, sodass eine größere Menge an Wärmeabfuhr durch das Kühlsystem notwendig ist. In Brennstoffzellenflugzeugen wird daher auf eine Flüssigkühlung gesetzt, welche diverse Komponenten wie Pumpen, Wärmetauscher und Kühlmittel beinhaltet. Diese erhöhen jedoch das Gesamtgewicht des Flugzeugs, was insbesondere bei Kleinflugzeugen eine Herausforderung darstellt, da diese strikten Gewichtsbeschränkungen unterliegen, um die Flugleistung nicht zu beeinträchtigen. Zusätzlich muss das Kühlsystem so ausgelegt sein, dass es auch unter den variierenden Umgebungsbedingungen in großen Höhen effizient arbeitet. [19] [20]

Ein Luftkühlsystem stellt eine gewichtssparende Alternative zur Flüssigkühlung dar. Dabei wird Umgebungsluft über Luftkanäle zu den kühlbedürftigen Komponenten der Brennstoffzelle geleitet. Der Verzicht auf zahlreiche gewichtserhöhende Komponenten, wie Pumpen und Kühlmittel, erlaubt eine deutliche Reduktion des Gesamtgewichts des Flugzeugs. Allerdings benötigt die Brennstoffzelle bei höheren Leistungen deutlich mehr Kühlluft, was eine Vergrößerung der Kühlöffnungen erforderlich macht, was wiederum den Strömungswiderstand des Flugzeugs erhöht. Dies resultiert in einer Zunahme des Volumens und des Gewichts. Daher findet die Luftkühlung vorwiegend bei Anwendungen mit geringer Leistung Anwendung, wobei die typische Leistungsgrenze bei etwa 5 kW liegt [21].

3. DAS LUFO-PROJEKT BEHYPSY

Das Verbundprojekt BeHyPSy (B4 INNOVATIVE HYDROGEN PROPULSION SYSTEM) greift die Herausforderungen der Luftkühlung auf und erforscht hybrid-elektrische Antriebsstränge für Flugzeuge, die auf Wasserstoff-Technologie basieren. Da Brennstoffzellen bis zu einer Leistung von 5 kW effektiv luftgekühlt werden können, setzt das Projekt auf ein neuartiges Architekturkonzept, bei dem eine Brennstoffzelle direkt einen Motorstrang eines mehrsträngigen Motors versorgt [21]. Die einzelnen Motorstränge werden dabei von separaten Brennstoffzellensystemen (Brennstoffzelle mit Wechselrichter) versorgt, was Vorteile hinsichtlich der gravimetrischen und volumetrischen Leistungsdichte bietet. Jedes System erzeugt dabei nur einen Teil des Drehmoments des Propellermotors. Dies wird durch den Einsatz eines Motors mit mehreren Polpaargruppen ermöglicht. Diese Integration spart Platz, da auf Zwischenwandler verzichtet werden kann, und die Leistungselektronik insgesamt kompakter dimensioniert wird.

Das Projekt zielt darauf ab, die optimale Anzahl und Größe der Brennstoffzellensysteme zu bestimmen und gleichzeitig effiziente Betriebsstrategien zu entwickeln. Dabei kommen innovative naturanaloge Optimierungsverfahren sowie statistische Methoden zum Einsatz, um die bestmögliche Systemkonfiguration zu finden. Als Grundlage für die Untersuchungen dient das Ultraleichtflugzeug Breezer B400-6.

Das Teilvorhaben der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW Hamburg) im Rahmen des BeHyPSy-Projekts fokussiert sich auf die modellbasierte Systementwicklung hybrid-elektrischer Antriebsstränge. Ziel ist es, die Auslegung, Optimierung, den Test und die Applikation des Antriebssystems zu unterstützen und dabei innovative methodische Ansätze zur Anwendung zu bringen. Durch den Einsatz modellbasierter Entwicklungsmethoden soll ein Modell des Antriebsstrangs erstellt werden, das es ermöglicht, verschiedene Konfigurationen und Betriebsstrategien effizient zu simulieren und zu bewerten. Um praxisnah die Erprobung von modellbasierten Entwicklungsmethoden und die Validierung der Modelle zu ermöglichen, wird ein eigener skalierter Teststand aufgebaut. Neben der technischen Optimierung wird auch eine Ökobilanzierung durchgeführt, um die Klimawirkung der verschiedenen

CC BY-ND 4.0

Systemkonfigurationen zu betrachten. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen in Zukunft in die Lehre integriert werden.

4. METHODEN ZUR MODELLBASIERTEN TESTSTANDSENTWICKLUNG

Die im Folgenden vorgestellten Methoden und Ergebnisse beziehen sich allesamt auf das HAW Hamburg eigene Vorhaben, einen eigenen Teststand aufzubauen. Dieser bildet zunächst die Plattform, um die genutzten MBSE-Tools anzuwenden und zu optimieren, ehe diese für das Verbundvorhaben zum Einsatz kommen. Im Rahmen des Teilvorhabens wird mit der MATLAB®/Simulink® Umgebung gearbeitet. Diese stellt die für die Modellierung, Simulation und Analyse komplexer Systeme essenziellen Werkzeuge bereit. Die MATLAB® Requirements Toolbox™ in Kombination mit dem System Composer™ erlaubt eine effiziente Verwaltung von Anforderungen und die Verknüpfung mit physikalischen Komponenten der Systemarchitektur. Zusätzlich ermöglicht der System Composer™, die Umweltbilanz der Komponenten und der resultierenden Systeme geordnet zu speichern, sodass die Ergebnisse der Life Cycle Analysis (LCA) zentral kategorisiert werden können. Simulink® ermöglicht die modellbasierte Entwicklung durch grafische Programmierung und Simulation dynamischer Systeme. Zudem bietet die Umgebung Schnittstellen zu gängigen Tools, wodurch die Interoperabilität und Zusammenarbeit in Entwicklungsprojekten ermöglicht wird. Weitere Methodiken aus der statistischen Versuchsplanung erweitern das Projekt zu einem ganzheitlichen Ansatz. Im nachfolgenden Kapitel werden die eingesetzten Tools und Methoden sowie die bisherigen Ergebnisse im Rahmen des Teilvorhabens kurz vorgestellt.

Die Anforderungen an den Teststand ergeben sich zum einen aus den Vorgaben des Verbundvorhabens, zum anderen aus den technischen Möglichkeiten, die sich aus der Infrastruktur an der HAW Hamburg ableiten lassen, sowie aus den Anforderungen, die an den künftigen Einsatz in der Lehre gestellt werden. Die allgemeine Systemarchitektur entspricht der des Verbunds und definiert die einzelnen Komponenten sowie deren Konfiguration. Als Grundlage dient das Missionsprofil des Referenzflugzeugs (siehe BILD 1). Diesbezüglich sei beispielsweise die Verwendung eines sechs-phasigen Motors oder die Verwendung einer Pufferbatterie zur Erhöhung der Leistung in leistungsintensiven Flugphasen genannt. Der Grad der Skalierung ist wiederum abhängig von den technischen Gegebenheiten des Teststands sowie den finanziellen Rahmenbedingungen des Projektes. Da lediglich eine Brennstoffzelle zu beschaffen ist und die übrigen fünf Stränge über das Stromnetz des Teststands gespeist werden sollen, ist die Skalierung abhängig von der verfügbaren Leistung des Stromnetzes. Darüber hinaus ist vorgesehen, den Prüfaufbau über mit 16 A abgesicherten einphasigen Steckdosen zu versorgen. Dies bedingt eine Begrenzung der zulässigen Gesamtleistung inklusive weiterer Komponenten und einer gewissen Sicherheit auf 3,68 kW.

4.1. Anforderungsmanagement mit der MATLAB® Requirements Toolbox™

Die Requirements Toolbox™ von MATLAB® stellt ein leistungsstarkes Tool für das Anforderungsmanagement dar, welches die Verwaltung und Verfolgung von Anforderungen im Entwicklungsprozess unterstützt. Die grundlegenden Eigenschaften einer Anforderung können durch benutzerdefinierte Attribute ergänzt werden, welche spezifische Informationen wie beispielsweise Prioritäten, Verantwortlichkeiten oder Testkriterien speichern. Des Weiteren ist die Toolbox mit Schnittstellen zu gängigen Anforderungsmanagement-Tools wie IBM DOORS ausgestattet, sodass eine nahtlose Integration in bestehende Entwicklungsumgebungen möglich ist. [22]

Ein wesentlicher Vorteil der Requirements Toolbox™ besteht in der Möglichkeit, den Validierungsprozess abzubilden. Dazu können Anforderungen direkt mit Systemmodellen in System Composer™ oder Simulink® verknüpft werden. Dies gewährleistet eine lückenlose Rückverfolgbarkeit vom Entwurf bis zur Validierung. [22]

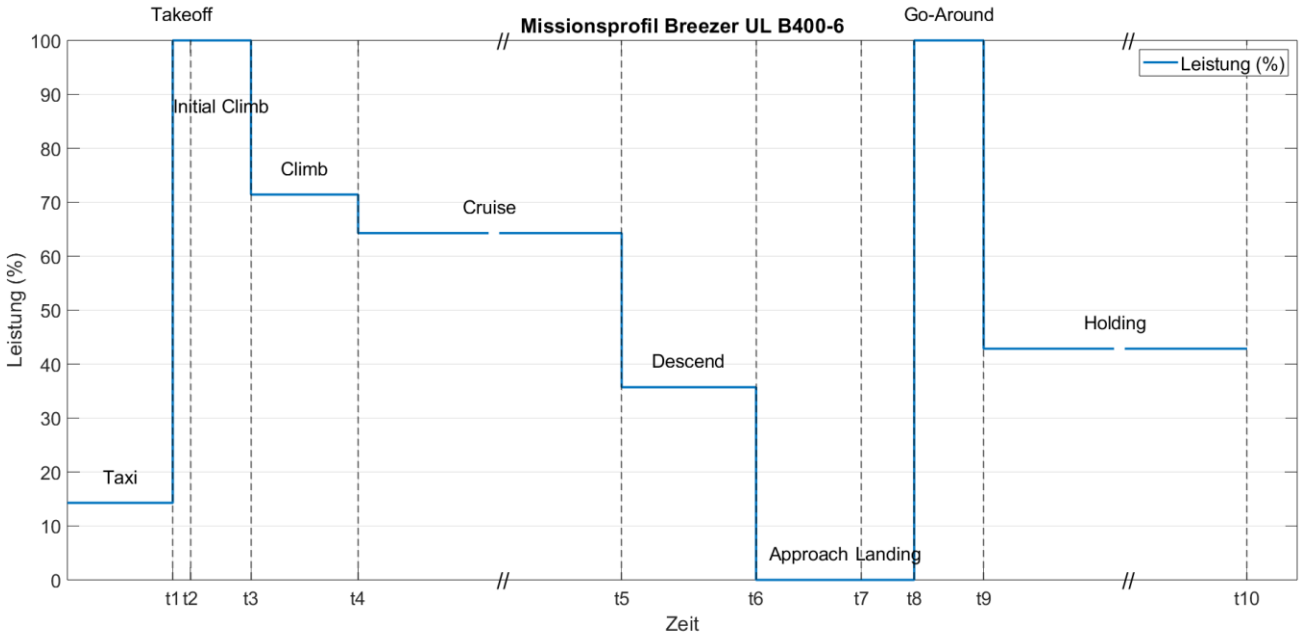

BILD 1. Missionsprofil Breezer UL B400-6

CC BY-ND 4.0

Die Anforderungen an den Teststand lassen sich in drei Hauptkategorien unterteilen: die allgemeinen Anforderungen an den Teststand, die spezifischen Anforderungen an die einzelnen Komponenten und die Sicherheitsanforderungen. Die Erfassung aller gesammelten Anforderungen erfolgt in der Requirements Toolbox™ (BILD 2).

In einem weiteren Schritt besteht die Möglichkeit, die Anforderungen mit dem System Composer™-Modell zu verknüpfen. Dabei kann der Implementierungs- und Verifizierungsfortschritt in der Requirements Toolbox™ eingesehen werden (BILD 2). Dies führt zu einer verbesserten Übersichtlichkeit und erlaubt die unmittelbare Erkennung von Lücken und Abweichungen.

Index	ID	Summary	Implemented	Verified
Prüfstandrequirements				
1	#1	Teststand zentral steuerbar		
2	#2	Transportfähig		
3	#3	Gewährleistung der Sicherheit		
4	#4	Skalierung		
5	#5	Energiebereitstellung für Teststand		
6	#7	Purgen der H2 Komponenten		
7	#8	Motor mit 6 Strängen		
8	#10	PEM Brennstoffzelle		
9	#11	Luftkühlung für FC		

BILD 2. Darstellung der Teststandanforderungen in der Requirements Toolbox™

4.2. Systemarchitekturentwicklung mit dem MATLAB® System Composer™

Der MATLAB® System Composer™ ist ein Tool zur Entwicklung und Analyse von funktionalen und physikalischen Systemarchitekturen. Es ermöglicht die Definition von Komponenten, Schnittstellen und deren Interaktionen. Durch Stereotypen lassen sich spezifische Eigenschaften für Komponenten festlegen, und Varianten bieten Flexibilität im Designprozess. Die Verknüpfung von Anforderungen erfolgt über die Requirements Toolbox™, während das Verhalten durch Integration von Simulink®-Modellen beschrieben werden kann. Verschiedene Analysemethoden helfen bei der Bewertung von Designansätzen und unterstützen die Identifikation optimaler Entscheidungen im frühen Entwicklungsstadium. [23]

Die Systemarchitektur eines Ultraleichtflugzeuges ist in BILD 3 veranschaulicht und zeigt die Modellierung des Gesamtsystems sowie die Unterteilung in verschiedene Subsysteme mithilfe des System Composer™. Diese tragen den Stereotyp System, da sie ihrerseits aus vielen Einzelkomponenten bestehen. Eine Teilarchitektur, welche sich auf das Brennstoffzellensystem bezieht, erlaubt eine präzise Modellierung der Komponente (siehe BILD 4). Dabei können verschiedene Stereotypen unterschieden werden. Neben den physischen Komponenten (orange), gibt es unter anderem Aktoren (gelb), Verbindungen (blau) und Sensoren (grün).

Die Modellierung von Varianten auf Komponenten- bzw. Systemebene (vgl. BILD 5) ermöglicht die Abbildung unterschiedlicher Systemarchitekturen und Komponentenkombinationen innerhalb eines Modells. Die unterschiedlichen Varianten mit ihren Kombinationen können mithilfe von Analysemethoden hinsichtlich verschiedener Parameter untersucht werden, was eine Bewertung verschiedener Designansätze ermöglicht.

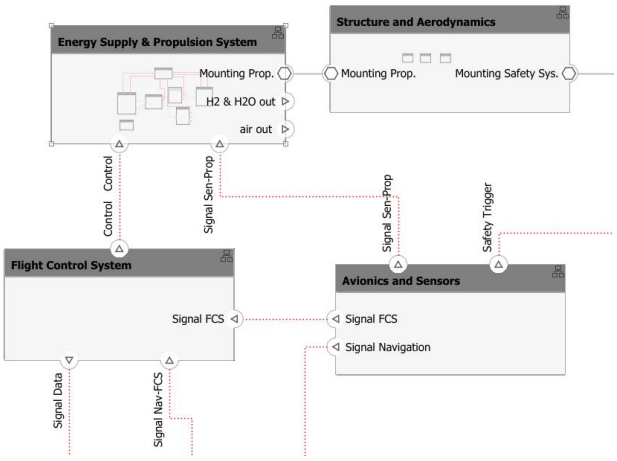

BILD 3. Ausschnitt der Architekturbeschreibung im System Composer™ (UL-Flugzeug)

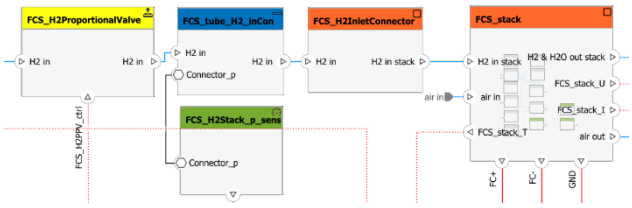

BILD 4. Ausschnitt der Teilarchitektur der Brennstoffzelle

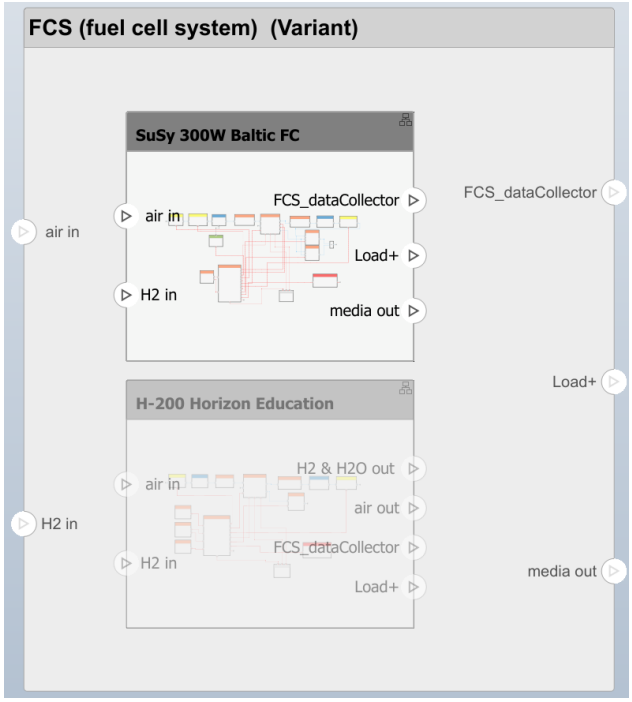

BILD 5. Variantenbildung der Brennstoffzelle

Um die Systemarchitektur als Wissensspeicher im Projekt nutzen zu können, werden den eingeführten Stereotypen individuelle Eigenschaften zugewiesen (BILD 6). Weitere Informationen und Ablageorte können ebenfalls hinterlegt werden.

CC BY-ND 4.0

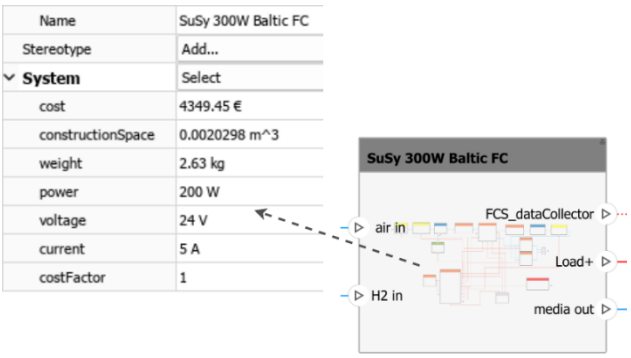

BILD 6. Brennstoffzellenkomponente mit zugewiesenen Eigenschaften

Zur Berechnung von Gesamtparametern sowie zur Einbeziehung von Kostenfaktoren wurden spezifische Analysemethoden entwickelt. Diese erlauben beispielsweise eine ganzheitliche Evaluierung der Systemleistung und der Wirtschaftlichkeit, was für die Entscheidungsfindung im Entwicklungsprozess von essenzieller Bedeutung ist.

In BILD 7 ist die Darstellung verknüpfter Anforderungen aus der Requirements Toolbox™ im System Composer™-Modell zu sehen. Dies gewährleistet eine unmittelbare Einsicht in die Zuordnung einzelner Anforderungen.

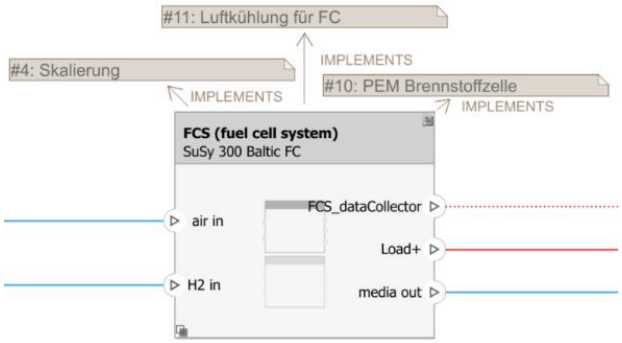

BILD 7. Verknüpfung von Anforderungen im System Composer™

4.3. Architekturbewertung mittels LCA

Nachdem die Systemarchitekturentwicklung erste Arbeitserkenntnisse liefert, erfolgt im Rahmen des Projekts parallel zur weiteren Ausarbeitung der möglichen Architekturen eine Life Cycle Analysis (LCA). Diese wird durchgeführt, um Umweltauswirkungen definierter Architekturvariationen des Antriebstrangs zu beurteilen. Dadurch werden Architekturentscheidungen nicht nur hinsichtlich gängiger Parameter wie Kosten, Effizienz und Lieferzeiten getroffen, sondern ebenfalls die Umweltbelastung als ein weiterer wichtiger Parameter berücksichtigt, welcher im Optimierungsprozess der Architektur des Systems betrachtet wird.

Bisherige Untersuchungen der Brennstoffzellen einschließlich BoP (Balance of Plant) erfolgen in zwei getrennten Schwerpunkten, der Umweltbilanzierung während der Herstellung und während des Betriebs. Die Werte werden zur Standardisierung auf ein 1-kW-System gerechnet. Zu der Herstellungsphase gehört die Identifikation, Klassifizierung und Bewertung aller verwendeten Materialien über den gesamten Lebenszyklus. Die Ergebnisse zeigen, dass die Platinmetalle in der Brennstoffzelle den höchsten Einfluss auf die Umweltbilanz erzielen, im BoP-System sind Polyethylen, Aluminium und Chromstahl treibend. Der Elektrizitätsbedarf spielt eine untergeordnete Rolle. Nachhaltige Recyclingkonzepte bieten im Herstellungsprozess eine Reduzierung der Umweltauswirkungen, für Platinmetalle und Kupfer bietet sich hier das höchste Einsparpotenzial. [24]

In der Betriebsphase ist die Prozesswahl zur Wasserstoffgewinnung entscheidend. An der Gesamtbilanz hat in bisherigen Untersuchungen mit einer angenommenen Betriebszeit von 20.000h die Elektrolyse eine entscheidende Rolle. Durch Rahmenbedingungen des Projekts kann hier jedoch kein Einfluss genommen werden, außerdem werden erheblich geringere Mengen Wasserstoff bei kürzerer Betriebszeit verwendet. Daraus resultiert, dass die Systemarchitektur deutlich an Bedeutung gewinnt in Hinblick auf die Einflussverteilung in der Gesamtbilanzierung der Umweltverträglichkeit.

Im Projekt werden, neben der Brennstoffzelle und der BoP, die weiteren Komponenten des Antriebstrangs untersucht. Zur Untersuchung werden in einem Versuchsplan sinnvolle Systemarchitekturen definiert und anschließend im Standardverfahren der Untersuchungsrahmen festgelegt, eine Sachbilanz und Wirkungsabschätzung durchgeführt und die Ergebnisse ausgewertet. Dabei wird untersucht, inwiefern sich die Mengenverhältnisse der kritischen Stoffe bei einer Adaption der Architektur für jedes betroffene Bauteil verändern, bezogen auf 1 kW Leistung. Beispielsweise wird eine Architektur, bestehend aus einer großen Batterie mit sechs kleineren Brennstoffzellen gegenüber einer Architektur mit großen Brennstoffzellen und einer kleinen Batterie untersucht. Oder eine Architektur mit einer flüssiggekühlten Brennstoffzelle gegenüber einer Mehrzahl von kleineren luftgekühlten Brennstoffzellen betrachtet. Somit lässt sich die Beziehung zwischen Architekturdesign und der Umweltbelastung quantifizieren und ökologische Aspekte direkt mit dem Entwicklungsprozess verknüpfen.

4.4. Modelbildung des physikalischen Verhaltens mit dem MATLAB® Simulink®/Simscape™

Weiterführend im Projekt können nun einige wenige Architekturen, die sich aus den vorherigen Arbeitsschritten als am vielversprechendsten herausgestellt haben, modelliert werden. Das Ziel dieses Arbeitsschrittes ist es, Modelle zu erzeugen, welche effizient und Ressourcen sparend genutzt werden können, um mit den gewonnenen Messwerten das Systemverhalten und Zusammenhänge bestimmen zu können. Die Modelbildung des Antriebstrangs erfolgt mit Hilfe von Simulink® und Simscape™. Das physikalische Modell ergibt durch die Verbindung von physikalischen Blöcken ein Netzwerk, welches dem realen Architekturaufbau möglichst entspricht. Zwischen den Blöcken werden Informationen in Form von physikalischen Größen, wie Energie, ausgetauscht. Die Integration von diversen Funktionsblöcken aus der Simulink®-Umgebung erlaubt, das Modell nach definierten Vorgaben zu parametrieren, sowie Eingangsgrößen vorzugeben und Ergebnisse der Simulation auszulesen [25].

Durch die Verknüpfung der Werkzeuge zu einem virtuellen Modell lässt sich dieses bestmöglich an die

CC BY-ND 4.0

Randbedingungen der reellen Architektur des Antriebsstrangs anpassen und ist fähig, über Schnittstellen zum realen Teststand Daten auszutauschen. So kann beispielsweise die reale Brennstoffzelle per Hardware-in-the-Loop (HIL) eingebunden werden, um durch Vorgabe definierter simulierter Lastprofile anhand der am realen System gemessenen Zustandsgrößen eine Validierung des Simulationsmodells durchzuführen.

Dabei lässt sich außerdem ermitteln, in welchem Arbeitsbereich des Simulationsmodells die zu modellierenden Eigenschaften des realen Systems anforderungsgemäß abgebildet werden und welche zusätzlichen - noch nicht modellierten Effekte - am realen System auftreten. Das Simulationsmodell kann daraufhin angepasst, erweitert oder auch ggf. vereinfacht werden.

Dem entsprechend wurde das erste virtuelle Modell des Antriebstrangs in einer Form aufgesetzt, dass die Brennstoffzelle sowie die angeschlossenen Komponenten zur Versorgung der Brennstoffzelle simuliert werden. Dazu wurde ein bereits existierendes Modell aus der MATLAB®-Dokumentation herangezogen, die Programmierung der chemischen Prozesse für die Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff und Spurengasen im MATLAB® Skript überprüft und anschließend Parameter, wie die Anzahl an Zellen des Brennstoffzellenstapels, adaptiert. Die Schnittstellen an dem Brennstoffzellenstapel sind mittels Simscape™ simuliert, sodass die Umgebung der Brennstoffzelle mit demselben Werkzeug simuliert wurde. Dadurch werden durch Einstellung korrekter Randbedingungen ebenfalls physikalische Effekte simuliert, wie etwaige Druckverluste in den Leitungen. Blöcke aus der Simulink® Umgebung wurden genutzt, um Messdaten zu erzeugen und das System und Teilsysteme nach Sollwerten zu regeln. Die Versorgung der Kathode mit Luft dient neben der Zufuhr von Sauerstoff zum chemischen Prozess zur Kühlung des Systems und wird mit einem Ventilator durch das System gesaugt. Daraus folgte, dass die Temperatur sowie der Massenstrom der Luft für beide Aufgaben (Kühlung und Reaktionspartner) gekoppelt sind. Diese Abhängigkeit stellt sich bisher als unproblematisch heraus, da der benötigte Massenstrom zur Kühlung (ab Erreichen der Betriebstemperatur) größer ist als zur Versorgung der Kathode mit Sauerstoff, denn eine schädliche Überversorgung der Brennstoffzelle ist hier nicht möglich. Die Simulationsergebnisse bewegen sich dann nur außerhalb des idealen stöchiometrischen Verhältnisses und es wird mehr Luft als von Reaktionsseite notwendig umgesetzt. Die Versorgung der Anode mit Wasserstoff erfolgt über einen Tank sowie einen Druckminderer, wodurch der Wasserstoff mit dem geforderten Systemdruck in die Brennstoffzelle gelangt. Der Druckminderer funktioniert über eine geregelte Querschnittsveränderung. Am Anodenausgang ist keine Rezirkulation eingesetzt, sodass die aktuelle Simulation nahe am stöchiometrischen Punkt für die Wasserstoffversorgung läuft, jedoch stets über dem Wert liegt, um eine Beschädigung der Zellen zu verhindern. Drei verschiedene Lasten zur Anregung der Brennstoffzelle wurden bisher untersucht, eine dynamische Last, eine Rampe sowie ein Lastsprung, um das System und die Systemregelung zu bewerten. Dabei hat sich gezeigt, dass die Teilsysteme ein funktionstüchtiges Gesamtsystem bilden und somit im ersten Schritt ein funktionierendes Modell der Brennstoffzelle mit BoP geschaffen wurde. Dieses Modell wird mit fortschreitendem Projekt um die weiteren Komponenten des Antriebstrangs ergänzt. Parallel dazu werden die fertigen Teilsysteme gegen den Teststand validiert.

4.5. Modellvalidierung mittels statistischer Versuchsplanung

Die statistische Versuchsplanung findet in diesem Projekt einerseits Anwendung, um das Systemverhalten des Antriebstrangs durch die Auswertung von effizienten Versuchsplänen zu quantifizieren. Dadurch ergibt sich ein umfassendes Verständnis darüber, wie relevante Einflussgrößen (Faktoren) die Qualitätsmerkmale des Systems beeinflussen. Bei der Durchführung ergibt sich durch eine Mittelwertberechnung jedes Faktors eine Quantifizierung der Veränderung der Qualitätsmerkmale, wenn die Faktoreinstellungen in Stufen variiert werden. Dieses ist in BILD 8 exemplarisch als Effektdiagramm dargestellt und es ist zu erkennen, wie sich ein Qualitätsmerkmal in Bezug zu den Faktoren “A” bis “C” verhält. Diese Darstellung bieten also eine gute erste Übersicht über das Systemverhalten. [26]

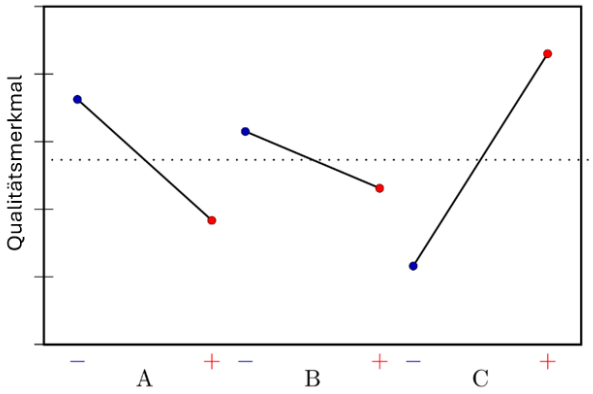

BILD 8. Effektdiagramm, exemplarisch für drei Faktoren bei einem Qualitätsmerkmal [26]

Durch das korrekte Design der Versuchspläne werden außerdem Wechselwirkungen zwischen den Faktoren sichtbar, sowie nicht lineare Zusammenhänge mit Einfluss auf die Qualitätsmerkmale. Andererseits ermöglicht die möglichst vollständige Identifikation des Systemverhaltens im Anschluss, die Qualitätsmerkmale hinsichtlich ihrer Optima (z.B. hohe Effizienz, geringer Verbrauch, geringe Lärmemission) zu optimieren. Dies geschieht durch eine Reduktion der mehrdimensionalen Systembewertung, bei Kombination der Qualitätsmerkmale, auf eine einzige Dimension, den bestmöglichen Betriebspunkt und möglichen Nebenbedingungen. Anschließend werden Algorithmen genutzt, um die beste Einstellung zu finden, in der jedes Qualitätsmerkmal ein Extremum erreicht. Dadurch können für verschiedene Betriebspunkte, wie sie im Flugprofil zu finden sind, die Einstellungen des Antriebsstrangs optimiert werden oder eine insgesamt optimierte Einstellung gefunden werden. Zusätzlich zur Optimierung bietet eine Sensitivitätsanalyse der Faktoren (Faktor-Screening) die Möglichkeit, die Faktoren nach ihrem Einfluss auf die Qualitätsmerkmale zu kategorisieren.

Die errechneten Daten und Zusammenhänge werden dauerhaft mit den Ergebnissen aus dem realen Teststand abgeglichen und zusätzliche Modelle mit den Werten aus den Realtests aufgebaut, sodass Rückschlüsse auf mögliche Fehler im Simulationsmodell, Unstetigkeiten der Simulationssoftware durch beispielsweise nicht vorhergesehene Phänomene im Realbetrieb getroffen werden können. Das Abgleichen und die gewonnene Vergleichbarkeit der

CC BY-ND 4.0

eindeutig bestimmten Systemverhalten aus dem simulierten Modell und dem Teststand erlaubt es, die Simulationsmodelle hiermit zu validieren.

Eine erste Analyse des Systemverhaltens wurde am Modell des Kühlsystems der Brennstoffzellen durchgeführt. Dieses ist ein klar abgestecktes Subsystem der Simulation der Brennstoffzelle aus dem vorherigen Kapitel. Zur gezielt systematischen Untersuchung des Systems wurde zunächst definiert, welche Eingangsgrößen gezielt veränderbar sind, welche nicht veränderbar sind und welche Ergebnisse, respektive Qualitätsmerkmale, vorhanden sind. Bei der Untersuchung des Kühlsystems waren die gemessene Temperatur des Stacks, die Temperatur sowie der Massenstrom der abströmenden Kühlluft die definierten Qualitätsmerkmale. Veränderbare Eingangsgrößen, welche betrachtet wurden, waren die Zieltemperatur des Stacks, Umgebungstemperatur- und Druck, die Geometrie der Kühlkanäle sowie die initiale Stacktemperatur und eine Wärmezufuhr in das System. Diese entsteht aufgrund der Abwärme während des Betriebs der Brennstoffzelle, welche durch das Kühlsystem, bei möglichst geringen Abweichungen vom Qualitätsmerkmal „Zieltemperatur des Stacks“, abgeführt werden soll. Die betrachteten Eingangsgrößen werden Faktoren genannt.

Aus diesen Vorgaben und der Vorgabe von zwei Stufen pro Faktor (-/+) ergibt sich der Versuchsplan mit 12 Versuchen und 6 Faktoren. Im Vergleich dazu würde ein herkömmlicher Vollfaktorplan 64 Versuche benötigen. Die Ausführung des reduzierten Versuchsplans liefert anschließend in erster Näherung eine Beschreibung des Systemverhaltens in Form eines Interaction Diagramms (siehe BILD 9), wie in folgender Abbildung dargestellt.

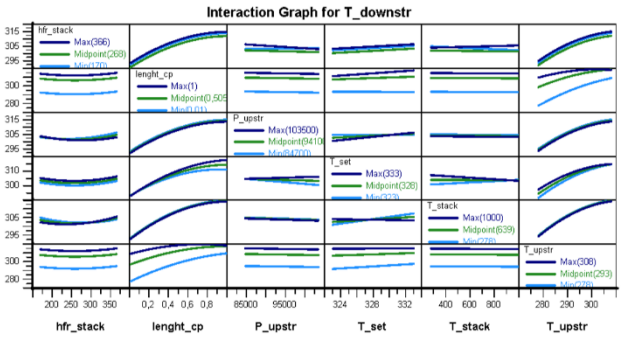

BILD 9. Wechselwirkungsdiagramm Kühlsystem

Es wird deutlich, wie die Faktoren innerhalb der gewählten Stufen die Temperatur der Kühlluft am Ausgang beeinflussen. Beispielsweise erhöht sich, wie zu erwarten war, der die Temperatur der Kühlluft bei erhöhter Umgebungstemperatur (T_upstr) und vice versa. Somit wird das zu erwartende Systemverhalten quantitativ belegt und kann genauer ausgewertet werden. Im nächsten Arbeitsschritt des Projekts wird jedoch zunächst untersucht, welche Unschärfen in den Ergebnissen durch Wechselwirkungen und nicht lineare Zusammenhänge vorhanden sind. Daraus folgt ein weiter optimierter Versuchsplan sowie eine Detailuntersuchung der Berechnungsmethode. Dadurch werden die Ergebnisse mit Abschluss dieses Schrittes noch einmal schärfer und es kann besser das Verhalten des Systems vorhergesagt werden.

4.6. Entwicklung eines skalierten Teststands

Die Konzeption und Realisierung eines eigenständigen Teststands umfasst neben dem Versuchsaufbau selbst auch die Schaffung einer adäquaten Testumgebung, welche für den Einsatz von Wasserstoff ausgelegt ist. Dies erfordert die präzise Definition aller Anforderungen sowie die Erstellung eines umfassenden Sicherheitskonzepts, welches eine detaillierte Sicherheitsanalyse beinhaltet.

Der Teststandentwurf wird durch eine CAD-Modellierung unterstützt, welche eine präzise Abschätzung der baulichen Abmaße sowie eine nahtlose Integration der zu testenden Komponenten in den Teststand ermöglicht. Darüber hinaus erlaubt die Modellierung die Analyse der mechanischen Belastungen, die durch Motor und Bremse induziert werden. Dies dient der Evaluierung der Auswirkungen auf andere Komponenten sowie der Gewährleistung der Sicherheit des gesamten Versuchsaufbaus. Im Rahmen der Modellierung wird die Software Inventor genutzt.

Die vorliegende Abbildung (BILD 10) zeigt eine vorläufige Version des Teststandentwurfs. Der modulare Aufbau erlaubt einen schnellen und einfachen Austausch einzelner Komponenten. Über dem Teststand wird ein Zelt installiert, um austretenden Wasserstoff aufzufangen und über ein Belüftungssystem abzusaugen. Zusätzlich wird ein Wasserstoffsensor an der Zeltdecke angebracht, der im Gefahrenfall die Wasserstoffzufuhr automatisch abschaltet.

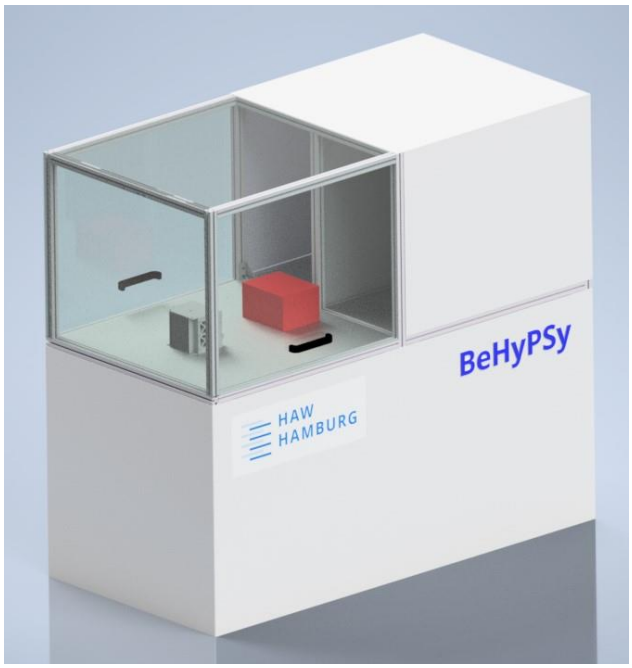

BILD 10. Teststandlayout

5. PROJEKTINTEGRATION

Die im eigenen Teststand entwickelten Methoden werden gezielt in das Verbundprojekt integriert und finden dort wie folgt Anwendung:

Die im Rahmen des Verbundprojekts identifizierten Subsysteme werden in einem Architekturmodell abgebildet. Im Modell werden die Zuständigkeiten der einzelnen

CC BY-ND 4.0

Projektpartner eindeutig definiert und den relevanten ATA-Kapiteln (Air Transport Association) entsprechend zugeordnet. Die Schnittstellen zwischen den Verbundpartnern und Subsystemen, welche für eine effiziente Zusammenarbeit und Kommunikation im Projekt wichtig sind, werden visualisiert.

Der Export des Modells als HTML-Datei ermöglicht die gemeinsame Nutzung der Ergebnisse sowie den Zugriff auf das Modell als Wissensspeicher. Die HTML-Datei lässt sich direkt im Browser öffnen. Die Resultate der Analysemethoden sind als Attribute der höchsten Systemebene einsehbar und können als Excel-Datei exportiert werden.

Das Anforderungsmanagement im Projekt erfolgt durch einen strukturierten Import- und Export-Workflow. Dabei wird die ursprünglich in Excel erstellte Anforderungsliste in die Requirements Toolbox™ als Requirement Set importiert. Im Anschluss erfolgt die Verknüpfung der einzelnen Anforderungen mit dem Verbundmodell. Das Requirement Set wird in regelmäßigen Abständen über Git versioniert, um eine konsistente Historie sicherzustellen. Der gesamte Workflow, der den Import und Export der Anforderungen sowie die Updates des Modells umfasst, wird in festgelegten Zeitabständen durchgeführt, um die Aktualität und Konsistenz der Projektinformationen zu gewährleisten.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen dieser Arbeit wurden erste Ansätze zur modellbasierten Systementwicklung im Kontext eines Forschungsprojekts mit mehreren Projektpartnern erörtert. Im Rahmen der Untersuchung wurden diverse Methoden präsentiert, die den Entwurfsprozess fördern, die Fähigkeit besitzen, komplexe Zusammenhänge abzubilden, zu verarbeiten und dabei Frontloading zu ermöglichen. Des Weiteren wurde auf das eigene Vorhaben mit dem Aufbau eines Teststandes sowie der dazugehörigen Modellierung in MATLAB® und die Anwendung der DoE-Methode mit einer dazu gehörigen Software eingegangen.

Nach erfolgreicher Validierung sollen die entwickelten Modelle auf den Verbunddemonstrator angewandt werden. Mithilfe der Simulationen ist zudem eine umfangreiche Sicherheitsanalyse vorgesehen, bei der einzelne Fehler in das System induziert und deren Auswirkungen überprüft werden.

7. DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Forschungsprojekts "BeHyPSy – B4 INNOVATIVE HYDROGEN PROPULSION SYSTEM" erstellt, welches durch das Luftfahrtforschungsprogramm Klima (LuFo Klima) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert wird. Zu den Projektpartnern zählen das Zentrum für Angewandte Luftfahrtforschung GmbH (ZAL), Breezer Aircraft GmbH & Co. KG, die Helmut-Schmidt-Universität der Bundeswehr Hamburg, Rostock System-Technik GmbH (RST) sowie das Zentrum für Brennstoffzellen-Technik GmbH.

LITERATUR

[1] Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, *Richtlinie (EU) 2023/958 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 10. Mai 2023*. 2023. Zugegriffen: 29. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023L0958

[2] European Commission: Directorate-General for Mobility and Transport and Directorate-General for Research and Innovation, *Flightpath 2050 - Europe's vision for aviation - Maintaining global leadership and serving society's needs*. Luxembourg: Publications Office, 2012. Zugegriffen: 29. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://data.europa.eu/doi/10.2777/15458

[3] International Air Transport Association (IATA), „Aircraft Technology Roadmap to 2050", International Air Transport Association (IATA), Montreal, März 2023. Zugegriffen: 29. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/aircraft-technology-net-zero-roadmap.pdf

[4] Roland Berger GmbH, „Analyse der Drop-in-Kraftstoffe für die Luftfahrt im Hinblick auf Verfügbarkeit, technische Eignung und ökologische Auswirkungen", Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV), Berlin, Feb. 2021. Zugegriffen: 29. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS-Wissenschaftliche-Untersuchungen/studie-drop-in-kraftstoffe-luftfahrt.pdf?__blob=publicationFile

[5] Küstner, Knut; Spitzbart, Magdalena; Winter, Jürgen; et al., „Umweltschonender Luftverkehr: Maßnahmen und Instrumente zur Verringerung der Umweltauswirkungen des Luftverkehrs", Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau, Texte 130/2019, Nov. 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-11-06_texte-130-2019_umweltschonender_luftverkehr_0.pdf

[6] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), „DLR Hy4: Wasserstoff-Brennstoffzellenflugzeug", Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Köln, Nov. 2019. Zugegriffen: 29. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dlr.de/de/tt/downloads/dokumente/esi/DLR_Hy4_Broschure_DEUTSCH_ONLINE_191115.pdf

[7] THWS, „Projekt Taifun 17 H_2: Technische Hochschule Würzburg-Schweinfurt", THWS – Fakultät Maschinenbau und Sicherheitstechnik. Zugegriffen: 18. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://fm.thws.de/fakultaet/labore/thermodynamik-und-energietechnik/projekt-taifun-17-h2/

[8] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), „Antares DLR-H2 stellt Höhenrekord auf". Zugegriffen: 19. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2009/20091124_antares-dlr-h2-stellt-hoehenrekord-auf_21170

CC BY-ND 4.0

[9] Universal Hydrogen, „Universal Hydrogen Successfully Completes First Flight of Hydrogen Regional Airliner“. Zugegriffen: 19. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://hydrogen.aero/press-releases/universal-hydrogen-successfully-completes-first-flight-of-hydrogen-regional-airliner/

[10] ZeroAvia, „ZeroAvia Flight Testing Hydrogen-Electric Powerplant“. Zugegriffen: 19. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://zeroavia.com/flight-testing/

[11] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), „Wasserstoff-Brennstoffzellen-Technologie für eine emissionsfreie Mobilität: BALIS 2.0“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Zugegriffen: 29. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dlr.de/de/tt/aktuelles/nachrichten/2024/wasserstoff-brennstoffzellen-technologie-fuer-eine-emissionsfreie-mobilitaet-balis-2.0

[12] Airbus, „Airbus ZEROe: Hydrogen for a cleaner future“, Airbus. Zugegriffen: 29. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.airbus.com/en/innovation/energy-transition/hydrogen/zeroe

[13] M. Janson, „Privatflieger haben eine schlechte Klimabilanz“, Statista Daily Data. Zugegriffen: 12. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://de.statista.com/infografik/30126/co2-emissionen-ausgewaehlter-flugzeuge

[14] J. Holt und S. Perry, *SysML for Systems Engineering: A Model-Based Approach*, 2nd Edition. Institution of Engineering and Technology, 2013. doi: 10.1049/PBPC010E.

[15] L. Priebe-Keller, T. Netzel, und H. Ihme-Schramm, „Front-loading in powertrain development involving hybrid (virtual and real) development environments“, *Transportation Engineering*, Bd. 12, S. 9, Juni 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.treng.2023.100169.

[16] K. Abhishek, Z. Bahareh, K. Timoleon, und R. J. Nunes Dos Reis, „Application of Model-Based Systems Engineering for the Integration of Electric Engines in Electrified Aircraft“, IOP Publishing Ltd, 2023. doi: https://doi.org/10.1088/1742-6596/2526/1/012025.

[17] U. Cakin und H. Altay, „MBSE APPROACH FOR CONCEPTUAL DESIGN OF HYBRID ELECTRIC VTOL AIRCRAFT“, gehalten auf der European Rotorcraft Forum, Sep. 2021.

[18] H. Saada und A. G. Garriga, „A MBSE-based framework for aircraft systems design and evaluation“, gehalten auf der Aerospace Europe Conference 2023 – 10TH EUCASS – 9TH CEAS, 2023. doi: https://doi.org/10.13009/EUCASS2023-298.

[19] M. Reichler, „Theoretische Untersuchungen zur Kühlleistungssteigerung durch innovative Kühlsysteme für Brennstoffzellen- Elektrofahrzeuge“, Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2009. Zugegriffen: 29. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: http://dx.doi.org/10.18419/opus-1792

[20] T. L. Kösters, X. Liu, D. Kožulović, S. Wang, J. Friedrichs, und X. Gao, „Comparison of phase-change-heat-pump cooling and liquid cooling for PEM fuel cells for MW-level aviation propulsion“, *International Journal of Hydrogen Energy*, Bd. 47, Nr. 68, S. 29399–29412, Aug. 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.235.

[21] J. Larminie und A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*. Wiley, 2003. Zugegriffen: 16. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118878330

[22] MathWorks, „Requirements Toolbox - MATLAB“. [Online]. Verfügbar unter: https://de.mathworks.com/products/requirements-toolbox.html

[23] MathWorks, „System Composer - MATLAB“. [Online]. Verfügbar unter: https://de.mathworks.com/products/system-composer.html

[24] R. Stropnik, A. Lotrič, A. Bernad Montenegro, M. Sekavčnik, und M. Mori, „Critical materials in PEMFC systems and a LCA analysis for the potential reduction of environmental impacts with EoL strategies“, *Energy Science & Engineering*, Bd. 7, Nr. 6, S. 2519–2539, 2019, doi: https://doi.org/10.1002/ese3.441.

[25] I. Baselt und A. Malcherek, „Simulink und Simscape zur Modellierung von Rohrsystemen“, gehalten auf der Wasserbausymposium 2012, Graz, Jan. 2012.

[26] K. Siebertz, D. van Bebber, und T. Hochkirchen, *Statistische Versuchungsplanung, Design of Experiments (DoE)*, 2. Aufl. Springer Vieweg.

CC BY-ND 4.0