

METHODISCHER ANSATZ ZUR INTEGRATION VON MODELLEN, STATISTISCHEN VORUNTERSUCHUNGEN UND ARCHITEKTURVARIANTEN IN DEN FRÜHEN ENTWICKLUNGSPHASEN EINES HYBRIDELEKTRISCHEN TESTSTANDS

Rohwer, J., Traulsen-Pöschel, F., Netzel, T., Kochan, K. Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg, Deutschland

Zusammenfassung

Dieser Beitrag entwickelt eine Methodik zur Integration von Modellbildung, statistischer Analyse und Architekturuntersuchungen in frühen Entwicklungsphasen hybridelektrischer Antriebssysteme für die Luftfahrt. Die Zielsetzung ist, die Entwicklungszeit bezogen auf die Untersuchung des Antriebsstrangs angesichts zunehmender Systemkomplexität zu verkürzen und dazu hardwarebezogene Entwicklungsschritte mithilfe virtueller Entwicklungsumgebungen und Methoden in frühere Phasen vorzuziehen (Frontloading) und dabei agile Arbeitsmethoden anzuwenden. Ausgangspunkt ist die Notwendigkeit, klimaneutrale Antriebe zu realisieren und gleichzeitig den hohen technischen Anforderungen an Brennstoffzellen-Hbridsystemen gerecht zu werden. Besonders im Bereich der Ultraleichtflugzeuge eröffnen sich hier Chancen, neue Konzepte unter geringen regulatorischen Hürden zu erproben.

Das Untersuchungsobjekt ist ein modularer, luftgekühlter Brennstoffzellenantrieb, der als Multi-String-Architektur aufgebaut ist. Mehrere Brennstoffzellenstränge versorgen jeweils Teilbereiche des Motors und ermöglichen so Gewichtsvorteile, Redundanz und flexible Betriebsstrategien. Um die Komplexität beherrschbar zu machen, werden klare Systemgrenzen definiert und die Subsysteme – Brennstoffzelle, Batterie, Leistungselektronik und Elektromotor – zunächst in vereinfachten Simulationsmodellen abgebildet. Diese dienen der schnellen Integration und werden schrittweise zu detaillierten Modellen weiterentwickelt, die physikalische Effekte und Wechselwirkungen realitätsnah erfassen. Die Kopplung der Subsysteme erfordert besondere Maßnahmen, um Stabilität, Realisierbarkeit und Konvergenz sicherzustellen. Hierzu werden unter anderem Filtermechanismen eingesetzt, die numerische Schwingungen dämpfen, ohne die physikalischen Eigenschaften zu verfälschen. Parallel dazu werden verschiedene Solver-Einstellungen untersucht, um die Anforderungen an Genauigkeit, Rechenzeit und Echtzeitfähigkeit im Prüfstandbetrieb zu erfüllen. Ein automatisierter Prozess zur Auswertung und statistischen Analyse der Simulationsergebnisse stellt sicher, dass Einflussgrößen effizient identifiziert und Architekturentscheidungen fundiert getroffen werden können. Durch die Integration in ein dSPACE-System wird schließlich die Kopplung von Simulation und realem Teststand ermöglicht. Dies erlaubt Hardware-in-the-Loop-Experimente, mit denen Modelle validiert und Betriebsstrategien überprüft werden können. Die Arbeit zeigt damit einen durchgängigen methodischen Ansatz, der eine parallele Entwicklung von Simulation und Experiment erlaubt, Risiken frühzeitig adressiert und eine robuste Grundlage für die Auslegung hybridelektrischer Brennstoffzellenantriebe in der Luftfahrt schafft.

1. MOTIVATION

Die Reduktion klimarelevanter Emissionen stellt eine der größten Herausforderungen der zivilen Luftfahrt dar. Internationale Zielsetzungen, wie die Klimaneutralität bis 2050 [1], machen deutlich, dass konventionelle Antriebskonzepte nicht ausreichen, um den geforderten Transformationsprozess zu realisieren [2], [3]. Besonders die General Aviation und die Ultraleichtflugzeugklasse bieten aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Leistungsanforderungen und regulatorischen Hürden ein geeignetes Feld für die Erprobung und Einführung alternativer Antriebe [4].

Hybridelektrische Systeme auf Basis von Wasserstoff-Brennstoffzellen gelten hierbei als besonders vielversprechend. Sie verbinden die hohe gravimetrische

Energiedichte von Wasserstoff mit den Vorteilen elektrischer Antriebe und ermöglichen damit eine deutliche Reduktion der lokalen Emissionen bei gleichzeitig hoher operativer Flexibilität [5], [6]. Allerdings bringt die Integration solcher Systeme erhebliche technische Herausforderungen mit sich: Sowohl die thermische als auch die elektrische Kopplung von Brennstoffzellen, Batterien, Leistungselektronik und Motor erfordert eine systematische methodische Herangehensweise.

Ein wesentlicher Aspekt besteht darin, frühzeitig in der Entwicklung belastbare Modelle zu erstellen, die als Grundlage für die Bewertung von Architekturvarianten dienen. Nur durch die enge Verzahnung von Simulation, statistischer Voruntersuchung und Validierung am Prüfstand können potenzielle Risiken und Optimierungspotenziale frühzeitig identifiziert werden [7],

[8]. Klassische sequenzielle Entwicklungsprozesse stoßen hier schnell an Grenzen, da komplexe Wechselwirkungen zwischen Subsystemen oft erst in späten Phasen sichtbar werden und zu kostenintensiven Anpassungen führen.

Vor diesem Hintergrund verfolgt die vorliegende Arbeit das Ziel, eine Methodik zur Integration von Modellbildung, statistischer Analyse und architektonischen Variantenuntersuchungen in frühen Entwicklungsphasen hybridelektrischer Antriebsstränge zu entwickeln. Mit dieser Methodik soll eine Grundlage geschaffen werden, mit der in Zukunft verschiedene Systemarchitekturen effizient bewertet und robuste Simulationsmodelle generiert werden können. Mit diesem Ansatz wird ein Beitrag geleistet, um die Komplexität hybrider Brennstoffzellenantriebe beherrschbar zu machen und den Weg zu effizienten und emissionsfreien Luftfahrtanwendungen in der Ultraleichtklasse zu unterstützen.

2. ZIELSETZUNG

Die Entwicklung hybridelektrischer Antriebssysteme für die Luftfahrt ist durch eine hohe Systemkomplexität geprägt. Zahlreiche Subsysteme, von der Brennstoffzelle über die Leistungselektronik bis hin zum Motor sind thermisch und elektrisch miteinander gekoppelt und beeinflussen einander. Bereits in frühen Entwicklungsphasen müssen daher grundlegende Architekturentscheidungen getroffen werden, die auf Effizienz, Gewicht, Ökobilanzierung und Betriebssicherheit weitreichende Auswirkungen haben.

Vor diesem Hintergrund verfolgt die vorliegende Arbeit die Forschungsfrage:

Wie lässt sich eine strukturierte Methodik entwickeln, die Modellbildung, statistische Voruntersuchungen und die Bewertung von Architekturvarianten integriert, um die Auslegung hybridelektrischer Brennstoffzellenantriebe in frühen Entwicklungsphasen zu unterstützen? Wie sehen die konkreten Arbeitsschritte dafür im Projekt aus und welche Prozesse lassen sich automatisieren?

Ziel ist es, einen Ansatz zu erarbeiten, der die Vorteile modellbasierter Systementwicklung (MBSE) mit Methoden der statistischen Versuchsplanung und der Validierung am Prüfstand kombiniert. Dadurch sollen belastbare Modelle bereitgestellt werden, die sowohl eine effiziente Analyse der wesentlichen Einflussgrößen als auch eine fundierte Bewertung unterschiedlicher Architekturkonzepte ermöglichen. Die Methodik soll insbesondere dazu beitragen, Risiken frühzeitig zu identifizieren, Optimierungspotenziale aufzuzeigen und eine skalierbare Übertragung auf reale Teststände sicherzustellen.

Gestützt wird die Arbeit auf dem entwickelten Konzept aus vorangegangenen Studien [8], welche eine enge Verzahnung von virtueller und realer Entwicklungsumgebungen frühzeitig im Projekt versucht zu realisieren, indem einfache Simulationsmodelle mit Primärdaten aus dem Teststand validiert werden und iterative in-the-loop Verfahren genutzt wurden, um Erkenntnisse aus den realen Tests in die Modellweiterentwicklung zurückfließen zu lassen. Dieser Ansatz wird auf diese Arbeit übertragen und weiterentwickelt.

3. STAND DER TECHNIK

Die Elektrifizierung von Luftfahrtantrieben ist seit mehreren Jahrzehnten Gegenstand intensiver Forschungsaktivitäten. Batterieelektrische Konzepte, wie sie unter anderem in der Pipistrel Velis Electro demonstriert wurden, ermöglichen lokal emissionsfreien Flugbetrieb, sind jedoch durch die begrenzte Energiedichte aktueller Lithium-Ionen-Batterien in Reichweite und Einsatzprofil stark limitiert [5], [9]. Brennstoffzellenbasierte Antriebe bieten demgegenüber eine deutlich höhere gravimetrische Energiedichte von etwa 33 kWh/kg und werden bereits in mehreren Demonstratoren, wie HY4, Antares DLR-H2 oder ZeroAvia, erprobt [10], [11], [12]. Hybridelektrische Systeme kombinieren hierbei die Vorteile beider Technologien, indem Batterien transiente Lasten abdecken und Brennstoffzellen die Grundlast übernehmen und im optimalen Arbeitspunkt betrieben werden können. Dadurch steigt die Gesamteffizienz und die Lebensdauer der Brennstoffzellen wird erhöht.

Ein zentrales Problem der Brennstoffzellensysteme liegt im Thermomanagement. Flüssigkeitsgekühlte Systeme bieten hohe Leistungsdichten, gehen jedoch mit erheblichem Gewichtszuwachs einher. Luftgekühlte Systeme stellen eine leichtere Alternative dar, sind bislang jedoch auf Teilleistungen von etwa 5 kW beschränkt [13], [14]. Multi-String-Architekturen, bei denen mehrere kleinere luftgekühlte Brennstoffzellenstränge parallel betrieben werden, eröffnen daher neue Freiheitsgrade in der Architekturentwicklung. Sie ermöglichen Gewichtseinsparungen und Redundanz im Betrieb, stellen jedoch hohe Anforderungen an das thermisch-elektrische Management und die Dimensionierung der Subsysteme.

Zur Beherrschung dieser Komplexität werden zunehmend modellbasierte Entwicklungsansätze (MBSE) eingesetzt. Sie unterstützen die strukturierte Erfassung von Anforderungen, die Modellierung von Architekturen und die Integration von Simulations- und Testumgebungen. Methoden wie die statistische Versuchsplanung (DoE) werden genutzt, um wesentliche Einflussgrößen systematisch zu identifizieren und Optimierungspotenziale aufzuzeigen [7], [15], [16].

4. Systeme und Schnittstellen

Im Rahmen des Verbundprojekts BeHyPSy (B4 INNOVATIVE HYDROGEN PROPULSION SYSTEM) wird ein hybridelektrischer Antriebsstrang für Ultraleichtflugzeuge entwickelt, der auf modularen, luftgekühlten Brennstoffzellensystemen basiert. Das Antriebskonzept basiert auf sechs parallel betriebenen Brennstoffzellensträngen, jeweils bis 5 kW, von denen jeder ein Polpaar eines mehrsträngigen Elektromotors versorgt. Durch diese Multi-String-Architektur wird es möglich, die gravimetrischen Vorteile luftgekühlter Brennstoffzellen auch bei höheren Gesamtleistungen nutzbar zu machen.

Jeder Architekturstrang besteht aus einem Brennstoffzellenstapel einschließlich Balance-of-Plant (BoP), einer Batterie, zum Abdecken von transienten Lasten wie Start oder Steigflug, einschließlich eines Batterie-Management-Systems (BMS), einer Leistungselektronik, den Schnittstellen zur Regelung und Datenverarbeitung und einem Motorstrang (BILD 1).

Zunächst wird ein Architekturstrang einzeln betrachtet.

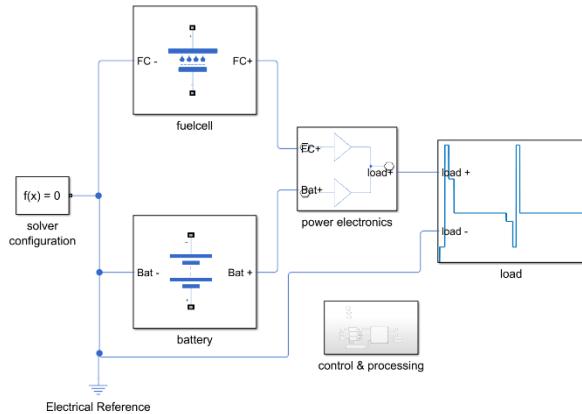


BILD 1. Einzelstrang-Architektur (repräsentativ für 1/6 der Motorleistung)

Zur methodischen Untersuchung ist es erforderlich, klare Systemgrenzen zu definieren. So kann die Komplexität der Gesamtarchitektur reduziert und ein Fokus auf die Teilsysteme gelegt werden, die maßgeblich die Effizienz, das Gewicht und die Sicherheit des hybridelektrischen Antriebs bestimmen. Im Fokus steht der hybridelektrische Antriebsstrang von der Brennstoffzelle bis zum Elektromotor. Nicht betrachtet werden hingegen flugzeugseitige Systeme wie Struktur, Aerodynamik oder Bordelektrik, da diese für die Fragestellung der Architekturauslegung des Antriebsstrangs nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Die Parametrierung der Modelle erfolgt durch eine virtuelle Applikation mit Hilfe des eigenen Teststands, welcher in skaliertter Form eine Kopie der Antriebsarchitektur des Gesamtsystems darstellt. Somit ergeben sich logischerweise deutlich reduzierte Werte bei der Auslegung, beispielsweise wird die Leistungsabgabe im eignen Teststand und dementsprechend im Modell auf 360W für eine Brennstoffzelle begrenzt. Im Gesamtprojekt liegt die Leistung einer Brennstoffzelle bei ~5kW.

Im späteren Projektverlauf ist auf Phänomene zu achten, welche aufgrund der Skalierung nicht berücksichtigt wurden oder auftraten, jedoch bei Betrachtung des Gesamtprojekts zu beachten sind.

5. MODELLIERUNG DER TEILSYSTEME

Für die erste Integration des hybridelektrischen Antriebsstrangs werden vereinfachte Simulink® Modelle herangezogen, welche die grundlegenden Effekte der realen Welt abbilden, jedoch Vereinfachungen zugunsten der Robustheit und Übersichtlichkeit beinhalten, und an die projektspezifischen Randbedingungen angepasst. Diese vereinfachten Modelle dienen als Grundlage, um das Zusammenspiel der Subsysteme frühzeitig zu überprüfen und Schnittstellen zwischen Simulation und Prüfstand abzugleichen. Auf diese Weise kann bereits in einer frühen Projektphase eine lauffähige Gesamtarchitektur erstellt werden, die als Ausgangspunkt für weiterführende Analysen und Validierungen dient.

Im weiteren Verlauf werden die Teilsysteme Brennstoffzelle

mit BoP, Batterie, Leistungselektronik sowie Last/Elektromotor detaillierter modelliert. Ziel ist es, durch eine schrittweise Verfeinerung belastbare Modelle zu entwickeln, die sowohl physikalische Effekte als auch relevante Wechselwirkungen abbilden und so eine realitätsnahe Simulation des Gesamtsystems ermöglichen.

5.1 MODELLIERUNG DER BRENNSTOFFZELLE

Die Brennstoffzelle bildet das zentrale Element des hybridelektrischen Antriebsstrangs. Für die erste Integrationsstufe wurde ein vereinfachtes Simscape™ Modell einer PEM-Brennstoffzelle (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) aus der MATLAB®-Bibliothek angepasst. Neben Parametern für Zellanzahl, Wirkungsgrad und thermischen Randbedingungen wurden aus dem Übergabeprotokoll der realen Brennstoffzelle für den Teststand markante Betriebspunkte aus der *U-I*-Kennlinie abgeleitet. Mit diesen Parametern lässt sich für das vereinfachte Simulink Modell eine *U-I*-Charakteristik hinterlegen (BILD 2). Im Leerlaufbereich und Überlastbereich werden die physikalischen Effekte durch das Modell nur vereinfacht dargestellt. Die vereinfachte Modellierung ermöglicht eine schnelle Kopplung mit den übrigen Subsystemen und erlaubt erste Untersuchungen zum Zusammenspiel der Komponenten. Die Leistungswerte spiegeln die skalierten Anforderungen wider, siehe Kapitel 4.

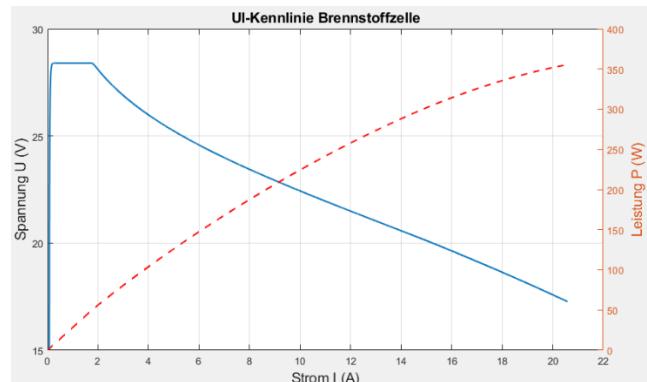


BILD 2. *U-I*-Kennlinie des vereinfachten Brennstoffzellenmodells

In einem zweiten Schritt erfolgt die detaillierte Modellierung des Brennstoffzellensystems, einschließlich BoP. Dazu gehören Komponenten wie Luftversorgung, Befeuchtung, Kühlung und Wasserstoffversorgung, deren Verhalten einen wesentlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit und Betriebssicherheit des Gesamtsystems hat.

Besonderes Augenmerk liegt dabei auf dem thermischen Management: Während die luftgekühlte Auslegung Gewichtsvorteile gegenüber einer Flüssigkeitskühlung bietet, steigt die Komplexität der Modellierung durch die Kopplung von Kühlung und Reaktionsluftzufuhr. Die Modelle berücksichtigen diese Kopplung und ermöglichen die Analyse kritischer Betriebsbereiche, um eine Überhitzung der Membran zu vermeiden und gleichzeitig den effizienten Betrieb im vorgesehenen Leistungsbereich

sicherzustellen.

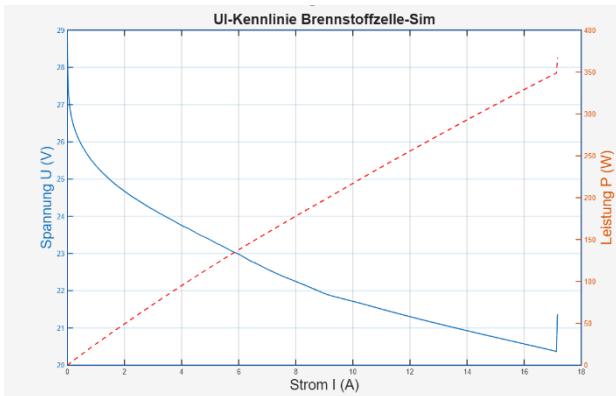


BILD 3. Batteriespannung über Entladestrom der modellierten Batterien im Vergleich

Die Simulationsergebnisse der erweiterten Brennstoffzelle zeigen, wie in BILD 3 dargestellt, dass das zu erwartende Verhalten aus der vorangegangenen Simulation abgedeckt wird. Es gibt jedoch eine leichte Verschiebung hin zu höheren Spannungen und niedrigen Strömen, sowie einen schnelleren Abfall des Spannungslevels bei sehr niedrigen Strömen. Der plötzliche Anstieg der Spannung und der damit verbundenen Leistung auf Seiten des höchsten Stroms ist nicht plausibel, lässt sich aber damit erklären, dass das Modell dort nicht mehr fähig ist, die Prozesse der Brennstoffzelle bei Überlastung korrekt wiederzugeben und kurzfristig vor Abbruch der Simulation nicht plausible Werte liefert bei dem Versuch, die Gleichungen zu lösen.

5.2 MODELLIERUNG DER BATTERIE

Für die erste Systemintegration wurde die Batterie mithilfe des Simscape™-Batterieblocks vereinfacht modelliert. Das Spannungsniveau wurde so angepasst, dass die Batterie bei einer Leistungsaufnahme der Brennstoffzelle von etwa 300 W automatisch in den Betrieb eintritt und dadurch transiente Lasten abdeckt. Um diese Funktion zu gewährleisten, wurde im Modell eine flache Entladekurve implementiert, die den kontinuierlichen Parallelbetrieb mit der Brennstoffzelle ermöglicht. Ein separates Batteriemanagementsystem (BMS) ist in dieser vereinfachten Modellvariante nicht enthalten. Dieses Modell erlaubt keine detaillierte Abbildung dynamischer Prozesse, sondern berücksichtigt die Systemdynamik ausschließlich über den Innenwiderstand der Batterie.

Aufbauend auf diesem Ansatz wurde ein detailliertes Simulink®-Modell entwickelt, das die relevanten Eigenschaften eines Lithium-Ionen-Speichers realitätsnah abbildet. In diesem erweiterten Modell wurden neben dem Innenwiderstand auch dynamische Effekte wie Spannungsrückgang unter Last, Lade- und Entladecharakteristiken sowie Schutzmechanismen berücksichtigt. Zudem wurde ein Batteriemanagementsystem (BMS) entworfen und integriert, welches Funktionen wie Systemüberwachung, Zellbalancing und sicherheitsrelevante Abschaltungen umfasst. Das Modell wurde anschließend an die geplante Betriebsstrategie angepasst und für die Integration in das Gesamtmodell des hybridelektrischen Antriebs optimiert. In BILD 4 ist zu erkennen, dass die Spannung der detailliert

modellierten Batterie über den Entladestrom etwas stärker abfällt als bei der vereinfachten Modellierung, was auf die Berücksichtigung von SoC-abhängigen Innenwiderständen, Zellungleichheiten sowie BMS- und Balancing-Effekten im detaillierten Modell zurückzuführen ist.

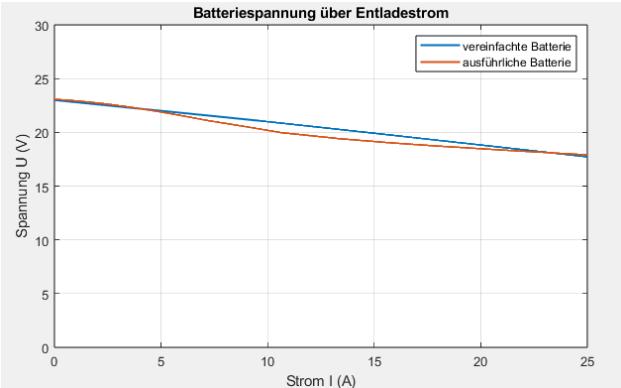


BILD 4. Batteriespannung über Entladestrom der modellierten Batterien im Vergleich

5.3 MODELLIERUNG LEISTUNGSELEKTRONIK

Die Leistungselektronik verknüpft die Brennstoffzelle, die Batterie sowie die elektrische Last bzw. den Motor miteinander. Für die erste Modellierung wird ein vereinfachtes Konzept gewählt (vgl. BILD 5), das aus zwei Dioden besteht. Diese Anordnung verhindert einerseits, dass die Batterie unkontrolliert von der Brennstoffzelle geladen wird und schützt andererseits die Brennstoffzelle vor potenziellen Rückströmen aus der Batterie. Durch diese Topologie ergibt sich eine passive Lastverteilung, bei der die Brennstoffzelle die Grundlast übernimmt, während die Batterie ausschließlich bei transienten Lastanforderungen und Leistungsspitzen unterstützt.

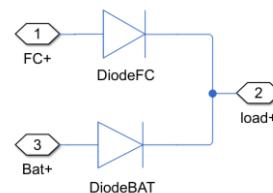


BILD 5. Vereinfachte Leistungselektronik: passive Dioden-Topologie

In anderen Studien [17] werden auch zusätzliche Ladepfade von der Brennstoffzelle zur Batterie vorgesehen. Über einen MOSFET als steuerbares Bauelement werden dabei gezielt Ladeprozesse ermöglicht. Dieser Ansatz wurde anfänglich untersucht, im Laufe des Projekts jedoch zugunsten einer vereinfachten Betriebsstrategie, in der kein Laden der Batterie im Flug vorgesehen ist, verworfen. So fällt die Systemarchitektur robuster und weniger komplex aus. Sollte das Laden im Flug dennoch erforderlich sein, wird dies perspektivisch über einen bidirektionalen DC/DC-Wandler realisiert.

5.4 MODELLIERUNG DER LAST/ELEKTROMOTOR

Für die aktuelle Integrationsstufe wird der Elektromotor im Simulink®-Modell durch eine dynamische Last repräsentiert. Das Lastprofil, dargestellt in BILD 6, wird dabei direkt als Leistungsparameter vorgegeben, sodass sich unterschiedliche Betriebspunkte des Motors flexibel abbilden lassen. Um unrealistische Sprünge zu vermeiden und die physikalische Trägheit des Antriebs zu berücksichtigen, werden Lastwechsel mithilfe von Rampenfunktionen implementiert.

Die implementierte Last ist hierbei repräsentativ für einen Motorstrang und entspricht mit 600 W einem Sechstel der skalierten Motorleistung. Ein vollständiges Motormodell mit sechs Strängen befindet sich derzeit in der Entwicklung und wird perspektivisch in das Simulationsumfeld integriert.

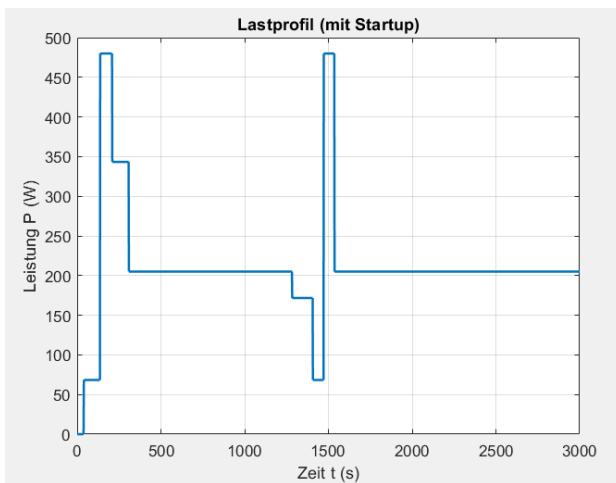


BILD 6. Simuliertes Lastprofil eines Motorstrangs

6. INTEGRATION DER TEILSYSTEME

Perspektivisch sollen die Modelle der Subsysteme, die von den Projektpartnern zu Verfügung gestellt werden, in Form von Functional Mock-up Units (FMUs) eingebunden werden. So werden eine standardisierte Kopplung und ein Austausch zwischen unterschiedlichen Modellierungsumgebungen ermöglicht. Für reine Simscape™ Modelle ist eine direkte Kopplung über FMUs nicht möglich, da diese als In- und Outputs statt physischen Signalen numerische Signale erwarten. Eine praktikable Lösung über Network-Coupler wird aktuell untersucht.

Eine direkte Kopplung der Teilsysteme führt trotz implementierter physikalischer Dynamiken im Batterie- und Brennstoffzellenmodell zu den in BILD 7 dargestellten Schwingungen, sobald beide Systeme parallel einspeisen. Ursache hierfür sind algebraische Schleifen, die bei der Signalübertragung zwischen den Modellen entstehen. Um diese zu vermeiden, reicht eine einfache zeitliche Verzögerung nicht aus. Stattdessen hat sich der Einsatz eines Tiefpassfilters erster Ordnung mit einer Zeitkonstanten von 0,1 s als praktikabel erwiesen (vgl. BILD 8).

Der Filter wird gezielt in die Signale eingebunden, die

zwischen den Teilsystemen ausgetauscht werden, und dient damit als numerisches Entkopplungselement. Auf diese Weise lassen sich Schwingungen an den Schnittstellen unterdrücken und ein stabiler Übergangsbetrieb sicherstellen. Da die realen Dynamiken bereits in den Subsystemmodellen berücksichtigt sind, ist der Tiefpass nicht als physikalische Näherung, sondern als modelltechnisches Hilfsmittel zu verstehen, das die Stabilität der Gesamtsimulation gewährleistet. Bei der Validierung durch den realen Prüfstand werden die Übergänge genau analysiert und beobachtete Effekte in das Modell eingearbeitet.

Darüber hinaus erweist sich die Wahl der Simulationszeit als maßgeblich für eine realistische Abbildung der Brennstoffzellendynamik. Das vorgesehene Lastprofil erstreckt sich über eine Gesamtdauer von rund 18.000 s, kann für Simulationszwecke jedoch auf etwa 3.000 s skaliert werden, ohne dass signifikante Abweichungen auftreten. Eine weitere Verkürzung führt hingegen zu deutlichen Modellfehlern: Die Rampen zur Abbildung der Lastübergänge werden in diesem Fall kürzer als die in den Modellen implementierten Zeitkonstanten. Dadurch kann die Brennstoffzelle nicht ausreichend schnell auf die Laständerungen reagieren, während die Batterie bereits in den Betriebspunkt einspringt. Dieses Missverhältnis zwischen Rampendynamik und Systemträgheit führt zu Schwingungen beider Teilsysteme, die einander verstärken und die Brennstoffzelle zeitweise in den Überlastbereich treiben.

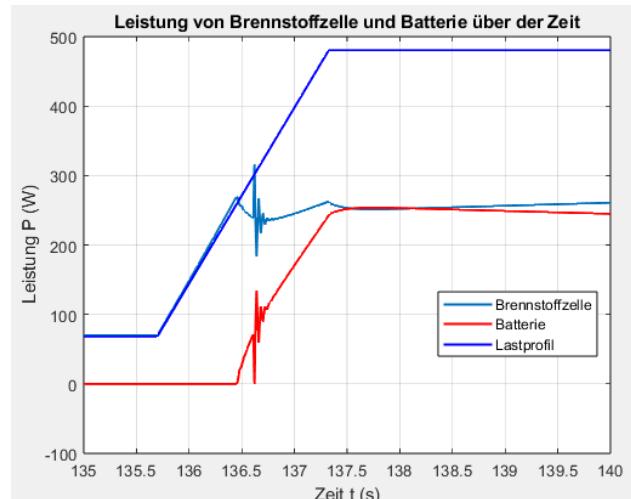


BILD 7. Schwingungen im Übergangsbetrieb bei Parallel einspeisung

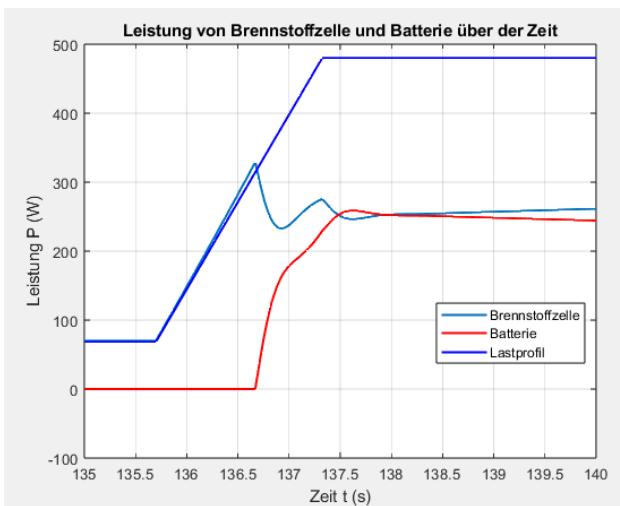


BILD 8. Gedämpftes Einschwingen bei Paralleleinspeisung

7. SOLVER EINSTELLUNGEN

Die Kombination aus realer Hardware und simulierten Komponenten am Prüfstand machte es erforderlich, dass die Simulationen in Echtzeit ausgeführt werden können. Die Ansteuerung der Hardware und der Informationsaustausch zwischen simulierter Umgebung und realen Komponenten muss mit gleicher Abtastrate und zeitsynchron erfolgen. Zunächst wird das Zusammenspiel aus dem vereinfachten Brennstoffzellenmodell in Kombination mit dem vereinfachten Batteriemodel getestet.

Für die getesteten Simscape™ Modelle kamen die Solver ode15s und ode23t zur Bestimmung der Referenzwerte zum Einsatz. Diese sind besonders für steife (ode15s) und moderat steife Systeme (ode23t) ausgelegt und gute Allrounder-Solver, die robust funktionieren. Zunächst wurde mit variabler Schrittweite simuliert und die Fehlertoleranz des Solvers sukzessive reduziert, bis sich die Ergebnisse nicht mehr signifikant unterschieden.

Es konnte beobachtet werden, dass die Simulationsergebnisse sich nicht mehr ab einer Reduzierung der Toleranzschwelle von $1 \cdot 10^{-4}$ auf $1 \cdot 10^{-5}$ unterscheiden. Eine geringere Toleranz erzeugt keine Ergebnisvariation mehr. Bei größeren Toleranzen beginnt die Abweichung zuzunehmen, bei einer Einstellung der Toleranz von $1 \cdot 10^{-3}$ auf einen Fehler von $\sim 1 \cdot 10^{-3}$, bei einer Toleranz von $1 \cdot 10^{-2}$ jedoch bereits zu $\sim 1\%$. Dabei wurde der relative Fehler betrachtet. Somit wurde eine Berechnung der Simulation mit weiteren größeren Toleranzen nicht verfolgt, da eine logische Zunahme des Simulationsfehlers als Ergebnis erwartet wurde. Für die Ermittlung der Referenzwerte und für die anschließende Analyse der Nulldurchgangsverläufe und anschließenden festen Schrittweiten wurde die Toleranz auf $1 \cdot 10^{-3}$ gesetzt.

Diese erzielten Resultate und Parameterverläufe dienten als Referenz. Besondere Aufmerksamkeit erforderten Nulldurchgangsereignisse, da diese sehr kleine Schrittweiten erzwingen und bei festen Schrittweiten

eventuell nicht zuverlässig erfasst werden. Diese Phänomene wurden durch Änderungen in den Modellen versucht entgegenzuwirken. Es konnte identifiziert werden, dass die Nulldurchgänge in der Solverauswertung des Models unter anderem mit den Sprüngen im Missionsprofil zusammenhängen (BILD 6). So ergibt eine plötzliche Leistungsanforderung an das System die Notwendigkeit, in sehr kleinen Schrittweiten zu rechnen, um das Ergebnis präzise aufzulösen. Entgegengewirkt wurde diesem Phänomen, indem die Rampen des Missionsprofils abgeschwächt wurden und der Berechnung für die Nulldurchgänge mehr Zeit eingeräumt wurde. Somit ließ sich die Gesamtzahl von 58 auf 48 reduzieren, wobei dabei auch bei der Initialisierung der Simulation die Nulldurchgänge auftraten. Die Nulldurchgänge sind im folgenden BILD 9 beispielhaft dargestellt.

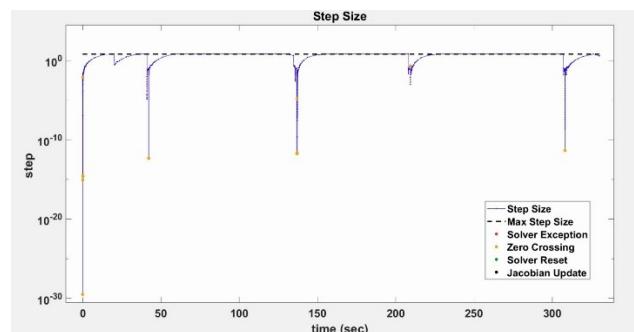


BILD 9. Nulldurchgänge der Simulation

Außerdem ist zu erkennen, dass die Schrittweite um diese Ereignisse am geringsten ist und sich auf eine Schrittweite auf bis zu 60 erhöht während einer gleichbleibenden Belastung im Missionsprofil. Daraus folgt eine mittlere Schrittweite von 2.19 bei einer Runtime von 3.77 Sekunden.

Auf Grundlage dieser Referenz wurde das Modell anschließend mit festen Schrittweiten sowie verschiedenen expliziten und impliziten Solvoren simuliert. Die erzielten Ergebnisse (vgl. TAB 1) wurden mit den Referenzwerten verglichen, und der Solver mit der besten Übereinstimmung wurde ausgewählt.

Solver	Imp/Exp	stepsize	Fehler	time (s)
Ode14x	Implizit	0.1	>1%	89.07
Ode14x	Implizit	0.01	<0.1%	358.53
Ode14x	Implizit	0.001	<0.01%	4636.27
BE	Implizit	0.1	~0.5%	18.74
BE	Implizit	0.01	<0.1%	186.17
BE	Implizit	0.001	<0.01%	1922.21
Ode3	Explizit	-	-	-
Ode8	Explizit	-	-	-

TAB 1. Auswertung fixed step-size

Es zeigte sich, dass aufgrund unterschiedlicher numerischer Rechenmethoden der implizite Algorithmus, welcher Matrixoperationen verwendet, um ein System von Gleichungen zu lösen, um die Lösung vorherzusagen, funktioniert, im Gegensatz zu dem expliziten Algorithmus, welcher die lokalen Gradienten zur Lösungsfindung nutzt. Dies zeigt an, dass es sich um ein steifes System handelt.

Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass die Simulationsergebnisse an kritischen Stellen um die angesprochenen Nulldurchgänge bei den Simulationen mit großen Schrittweiten am stärksten variierten, da die Simulation nicht fein genug zeitlich diskretisiert wurde, um Zustandsänderungen abzubilden. Bei einer Schrittweite von 0.1 waren deutliche Schwingungen im System nach der Anregung durch die Last zu erkennen, welche im Referenzmodell nicht auftreten. Bei einer Schrittweite von 0.01 wurde dieses Schwingungsverhalten bereits nicht mehr beobachtet, sodass hier festgestellt wurde, dass bereits diese Schrittweite ausreichend ist, um das Systemverhalten entsprechend der Referenz korrekt wiederzugeben.

Die Abweichung der Simulationsergebnisse der fixed-stepsize Untersuchung zu den Referenzwerten in Kombination mit der Simulationsdauer zeigt logisch zu erwartende Ergebnisse. So nimmt mit steigender Schrittweite der Fehler zu, dafür sinkt jedoch die Ausführungszeit der Simulation, da weniger Zeitpunkte zu betrachten sind. Die optimalen Solvereinstellungen wurden nach Bewertung der beschriebenen Verhältnisse beim Bachwards Euler Solver (BE) gefunden, mit einer Genauigkeit zur Referenz von <0.1% bei einer Schrittweite von 0.01 und einer Simulationsdauer von 186.17 Sekunden.

Da in einer Simscape-Simulation für jedes physikalische Simscape-Netzwerk mehrere Iterationen ausgeführt werden müssen, ist es wichtig sicherzustellen, dass die Abtastzeit signifikant länger ist als die Ausführungszeit des Simulationsschritts [18]. Hierfür kam eine Fixed-Cost Simulation zum Einsatz, bei der die Iterationen pro Zeitschritt begrenzt werden. Dabei wurde auf Grundlage von Erfahrungswerten und Empfehlungen aus der Literatur [18] die Anzahl der Iterationen auf 3 pro Zeitschritt begrenzt.

Diese Einstellungen werden bei anschließenden Tests mit Real-Time-Applikationen entsprechend verwendet.

Zur weiteren Reduktion des Rechenaufwands können zudem lokale Solver eingesetzt werden, bei denen steife Teilsysteme implizit und weniger kritische Subsysteme explizit gelöst werden. Diese Maßnahme wurde aufgrund der gefundenen Lösung hier nicht angewendet, bietet jedoch bei komplexeren Modellen ein probates Mittel.

8. AUTOMATISIERUNG DATENVERARBEITUNG UND AUSWERTUNG

Zur Aufbereitung und Analyse der Messwerte erfolgt unter Zuhilfenahme des Datenanalyseprogramms Cornerstone von camLine. Verschiedene statistische Untersuchungen, wie Hauptkomponentenanalyse oder Sensitivitätsanalysen, geben Rückschlüsse auf das Systemverhalten wieder und

liefern eine visuelle Aufarbeitung der Daten und eine intuitive Vergleichbarkeit des Systemverhaltens bei Parametervariation.

Die Verarbeitung der Simulationsergebnisse in Cornerstone erfolgt in diesem Ansatz vollständig automatisiert durch ein entwickeltes Skript. Auf diese Weise werden manuelle Eingriffe vermieden, sodass potenzielle menschliche Fehler in dieser Prozessphase ausgeschlossen sind. Darüber hinaus reduziert sich die Bearbeitungszeit erheblich, da die Auswertung und Datenübertragung deutlich schneller als bei einer manuellen Durchführung erfolgt. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die Bedienung nicht mehr unmittelbar vom individuellen Fachwissen des Anwenders abhängt. Dadurch können auch weniger erfahrene Nutzer konsistent korrekte und reproduzierbare Ergebnisse erzeugen. Insgesamt führt die Automatisierung zu einer gesteigerten Effizienz, Robustheit und Nachvollziehbarkeit des gesamten Simulations- und Auswerteprozesses.

Der Ansatz umfasst mehrere aufeinanderfolgende Schritte zur automatisierten Auswertung der Simulationsergebnisse. Zunächst wird eine strukturierte Datenbank aufgebaut, in der sämtliche Simulationsdaten konsistent gespeichert werden. Anschließend erfolgt eine systematische Identifikation von Ausreißern, um die Datenqualität sicherzustellen und Verzerrungen in der Analyse zu vermeiden. Darauf aufbauend werden statistische Signifikanzen berechnet und visualisiert, um die wichtigsten Einflussgrößen zu identifizieren. Abschließend werden automatisch Polynomfunktionen zwischen den relevanten Eingangs- und Ausgangsgrößen generiert, wodurch Response-Grafiken entstehen, die die Zusammenhänge zwischen den Einflussgrößen anschaulich darstellen.

Die Polynomfunktionen werden ebenso für die Messreihen aus den Simulationen sowie für jene aus dem Teststand gebildet. Die Auswertung der Modellgüte erfolgt durch eine Gegenüberstellung der Polynomfunktionen, welche Abweichungen im Systemverhalten aufzeigt.

9. D-SPACE INTEGRATION

Das dSPACE-System wird im Projekt eingesetzt, um Schnittstellen zur Regelung der relevanten Zustandsgrößen der Brennstoffzelle und der Last bereitzustellen, Messparameter aus dem Teststand zu empfangen, diese in Simulationsberechnungen in andere Systemparameter umzurechnen und als Output dem Teststand als Information zurückzuführen. Dadurch lassen sich komplexe Wechselwirkungen präzise abbilden.

Im ersten Schritt wurden einfache Simulink®-Modelle aufgebaut, welche elektrische Signale über zwei gewählte Pins am Analog/Digital Board empfangen und mit einfachen Rechenoperationen im Wert verändern, um anschließend über ein Digital/Analog Board die neue Information messbar einem nachfolgenden System mitzuteilen.

Das entsprechende Simulink®-Modell wurde dazu mit Schnittstellen zum dSPACE System entwickelt, mit Blöcken zur Modellierung des Messwertes sowie Blöcke zur

Signalüberwachung. Anschließend wurde das Modell in das ConfigurationDesk der dSPACE Software geladen, um dort die Kommunikation der dSPACE Hardware (Boards und Pins) mit den Blöcken des Simulationsmodells zu verbinden und abschließend die Anwendung in Code zu kompilieren. Im ControlDesk wurde zuletzt der Code ausgeführt und über ein GUI, welches über Diagramme relevante Parameter visualisiert und über Slider Parameter der Rechenoperationen variiert, sodass direkt der Zusammenhang zwischen Ausgangsgröße zur modifizierten Eingangsgröße sichtbar wurde.

Die Untersuchung der Simulationsmodelle von Brennstoffzelle, BMS und Leistungselektronik auf die Echtzeitfähigkeit erfolgt im nächsten Schritt bei der Integration dieser Modelle in die dSPACE-Anwendung. Können die optimierten Modelle innerhalb Zeiteinheit das Systemverhalten einer virtuellen Zeiteinheit simulieren, so können diese für in-the-loop Tests verwendet werden und über die Schnittstellen des dSPACE-Systems mit dem Teststand und realer Hardware verknüpft werden.

10. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die eingangs formulierte Forschungsfrage zielte darauf ab, eine strukturierte Methodik zu entwickeln, die Modellbildung, statistische Voruntersuchungen und die Bewertung von Architekturvarianten integriert, um die Auslegung hybridelektrischer Brennstoffzellenantriebe bereits in frühen Entwicklungsphasen zu unterstützen. Im Verlauf der Arbeit konnte ein Vorgehen gezeigt werden, dass durch die Kombination vereinfachter Simulationsmodelle mit einem Schema zur Überprüfung und Einstellung der Modelle zur Echtzeitfähigkeit, der Einbindung in die dSpace Umgebung und durch anschließende automatisierte Verarbeitung der Messdaten, Rückschlüsse auf das Zusammenspiel der Systemparameter ermöglicht und die Modellgüte für die Simulationen aufzeigt.

Somit wurden die entwickelten Modelle der Brennstoffzelle, Batterie und der Leistungselektronik erfolgreich gekoppelt und hinsichtlich Stabilität sowie Echtzeitfähigkeit untersucht und ergänzt durch automatisierte Auswertungsroutinen für eine objektive und effiziente Bewertung von Architekturvarianten.

Auf Basis der bisherigen Ergebnisse soll das entwickelte Vorgehen im nächsten Schritt praktisch erprobt werden, sobald Messwerte aus dem Teststand vorliegen. Zudem ist vorgesehen, die Modelle künftig über FMUs zu koppeln und geeignete Schnittstellen für die Integration der Simscape-Blöcke zu implementieren, um so ein modular aufgebautes Gesamtsystem zu realisieren.

11. 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 Energie 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] International Air Transport Association (IATA), „Policy Net Zero CO2 Emissions Roadmap“, IATA, Montréal, Kanada, Roadmap, Sep. 2024. Zugegriffen: 19. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/policy-net-zero-roadmap.pdf>
- [2] 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/MK_S-Wissenschaftliche-Untersuchungen/studie-drop-in-kraftstoffe-luftfahrt.pdf?__blob=publicationFile
- [3] 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
- [4] Luftfahrt-Bundesamt (LBA), *Bekanntmachung von Lufttüchtigkeitsforderungen für motorgetriebene, aerodynamisch gesteuerte Ultraleichtflugzeuge*, Bd. 2-547–20. 2020. Zugegriffen: 20. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dulv.de/sites/default/files/Downloads/NfL%20motorisierte%20UL%202-547-20.pdf>
- [5] T. Schmaltz, T. Wicke, L. Weymann, P. Voß, C. Neef, und A. Thielmann, „Solid-State Battery Roadmap 2035+“, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe, Deutschland, Roadmap, 2022. Zugegriffen: 20. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2022/SSB_Roadmap.pdf
- [6] M. J. Wolf u. a., „Wasserstoff-Verflüssigung, Speicherung, Transport und Anwendung von flüssigem Wasserstoff“, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2023. doi: 10.5445/IR/1000155199.
- [7] 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.
- [8] L. Priebe-Keller, T. Netzel, und H. Ihme-Schramm, „Frontloading in powertrain development involving hybrid (virtual and real) development environments“, *Transp. Eng.*, Bd. 12, S. 9, Juni 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.treng.2023.100169>.
- [9] Pipistrel d.o.o., „Velis Electro 2025“, Pipistrel d.o.o., Ajdovščina, Slowenien, 2024. Zugegriffen: 20. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.pipistrel-aircraft.com/products/velis-electro/>
- [10] 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
- [11] 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
- [12] ZeroAvia, „ZeroAvia Flight Testing Hydrogen-Electric Powerplant“. Zugegriffen: 19. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://zeroavia.com/flight-testing/>
- [13] M. Reichler, „Theoretische Untersuchungen zur Kühlleistungssteigerung durch innovative Kühlssysteme für Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge“, Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2009. Zugegriffen: 29. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.18419/opus-1792>
- [14] 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>
- [15] U. Cakin und H. Altay, „MBSE APPROACH FOR CONCEPTUAL DESIGN OF HYBRID ELECTRIC VTOL AIRCRAFT“, gehalten auf der European Rotorcraft Forum, Sep. 2021.
- [16] 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>.
- [17] A. Nishizawa, J. Kallo, O. Garrot, und J. Weiss-Ungethüm, „Fuel cell and Li-ion battery direct hybridization system for aircraft applications“, *J. Power Sources*, Bd. 222, S. 294–300, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.09.011.
- [18] MathWorks, „Real-Time Simulation of Physical Systems Using Simscape“. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.mathworks.com/company/technical-articles/real-time-simulation-of-physical-systems-using-simscape.html>