

MODELLBASIERTER ENTWURFSPROZESS FÜR BRENNSTOFFZELLENSYSTEME UNTER VERWENDUNG EINES MEHRSTUFIGEN BIBLIOTHEKSKONZEPTS

J. Grymlas, H.P. Lüdders, H. Strummel, F. Thielecke
Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Flugzeug-Systemtechnik
Neßpriel 5, 21129 Hamburg, Deutschland

Kurzfassung

Der Entwurfsprozess für komplexe Brennstoffzellensysteme in der Luftfahrt kann durch modellbasierte Ansätze unterstützt werden, wodurch gerade in frühen Phasen eine Reduktion von Fehlentwicklungen möglich ist. In diesem Artikel wird ein durchgängiger modellbasierter Entwurfsprozess beschrieben, der sowohl die Optimierung und Auslegung der Systemarchitektur als auch den Entwurf und die virtuelle Integration der erforderlichen Regelungs-, Steuerungs- und Überwachungssysteme berücksichtigt. Die einzelnen Entwicklungsschritte basieren dabei auf einer speziell angepassten Modellbibliothek, die aus drei Modellstufen besteht. Die Anforderungen an die einzelnen Modellstufen, die verwendeten Modellierungsansätze und der Aufbau eines Brennstoffzellenmodells werden detailliert beschrieben. Abschließend erfolgt die Anwendung der dreistufigen Modellbibliothek, um ein Brennstoffzellensystem exemplarisch auszulegen und virtuell zu testen.

1 EINLEITUNG

Die zivile Luftfahrt wird nicht nur durch ökonomische Aspekte herausgefordert, sondern auch durch ökologische Anforderungen. Beispiele dafür sind die Einführung eines Emissionshandels in der Europäischen Union, Abgaben auf umweltbelastende Emissionen im Bereich von Flughäfen und steigende Kerosinpreise. Im Rahmen der ACARE 2020 Ziele [8] und des Flightpath 2050 [9] werden deshalb Anforderungen aufgestellt, die sowohl eine signifikante Reduktion von Kohlenstoffdioxid- und Stickoxidemissionen vorsehen als auch eine Minderung von Lärm. Zudem wird ein schadstofffreier Bodenbetrieb verlangt. Aus diesen Gründen werden nachhaltige und effiziente Technologien verstärkt untersucht, wie beispielsweise die Integration der Brennstoffzellentechnologie in ein Verkehrsflugzeug.

Neben der hohen Effizienz einer Brennstoffzelle ist der schadstofffreie und geräuscharme Betrieb vielversprechend. In einer luftatmenden Brennstoffzelle reagiert der Sauerstoff aus der Luft mit dem zugeführten Wasserstoff zu Wasser. Das überwiegend gasförmige Wasser wird anschließend mit der sauerstoffreduzierten Luft als Abgas von der Brennstoffzelle abgegeben. Neben der Verlustwärme wird bei der elektrochemischen Reaktion insbesondere elektrische Leistung erzeugt. Aufgrund dieser Funktion erscheint es sinnvoll, ein System von mehreren Brennstoffzellen als Ersatz für die Hilfsgasturbine in ein Verkehrsflugzeug zu integrieren. Da eine Brennstoffzelle ein höheres Leistungsgewicht im Vergleich zu einer Gasturbine hat, führt diese Substitution allerdings zu einem höheren Gesamtsystemgewicht. Aus diesem Grund besteht ein erweiterter Ansatz darin, neben der elektrischen Leistung weitere Reaktionsprodukte der Brennstoffzelle zu nutzen [3]. Eine Übersicht über mögliche Funktionen dieses multifunktionalen Brennstoffzellensystems ist in Bild 1 dargestellt.

Das getrocknete sauerstoffarme Abgas kann für die Iner-

tisierung des Treibstofftanks verwendet werden, wodurch explosionsfähige Gasgemische im Tank verhindert werden. Falls es im Frachtraum zu einem Brand kommt, ist zudem vorgesehen, das sauerstoffarme Abgas für die Feuerunterdrückung zu verwenden. Da das Abgas einen hohen Anteil an Wasser aufweist, ist es sinnvoll dieses abzuscheiden und dem Wassersystem zuzuführen. Auf diese Weise kann die Menge des mitgeführten Wassers reduziert werden, da während des Fluges Wasser produziert wird. Zudem ist es möglich, die thermische Energie der Brennstoffzellen beispielsweise für die Enteisierung der Flügelvorderkanten zu verwenden [6].

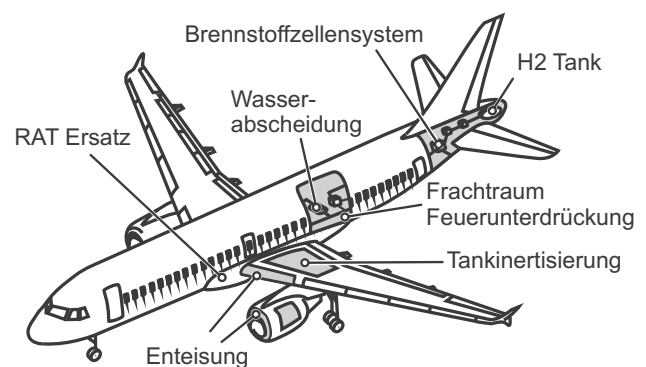


BILD 1: Integration des multifunktionalen Brennstoffzellensystems [11]

Wenn alle genannten Funktionen berücksichtigt werden sollen, wird deutlich, dass diese Integration einen Eingriff in mehrere konventionelle Flugzeugsysteme zur Folge hat. Insbesondere multidisziplinäre Aspekte bei der Entwicklung eines so komplexen mechatronischen Systems stellen eine

Herausforderung dar. In diesem Artikel wird zunächst eine geeignete modellbasierte Vorgehensweise für die Entwicklung von komplexen Brennstoffzellensystemen vorgestellt. Ein Kern dieser Vorgehensweise wird durch eine dreistufige Modellbibliothek gebildet. Die Eigenschaften der einzelnen Modellstufen und deren Verknüpfungen werden am Beispiel eines Brennstoffzellenstacks beschrieben. Anschließend werden Ergebnisse vorgestellt, die die Optimierung und virtuelle Integration eines einfachen Brennstoffzellensystems veranschaulichen. Abgeschlossen wird dieser Artikel mit einem Ausblick auf weiterführende Entwicklungen.

2 MODELLBASIERTER ENTWURFSPROZESS

Die multifunktionale Integration eines Brennstoffzellensystems führt zu einer komplexen Gesamtsystemarchitektur [3]. Aus diesem Grund stellen der Entwurf einer optimalen Architektur und die Entwicklung der eingebetteten Software eine besondere Herausforderung dar [6]. Ein modellbasierter Ansatz bietet hier mehrere Vorteile gegenüber dem klassischen dokumentenbasierten Prozess:

- Durchführung von Simulationen und frühzeitigen Bewertungen, um gestellte Anforderungen abzusichern und zu detaillieren,
- Erhöhung der Übersichtlichkeit und Transparenz von komplexen Zusammenhängen,
- Nutzung der Modelle als Wissensspeicher, der für zukünftige Entwicklungen wiederverwendet werden kann.

Die Entwicklung von mechatronischen Flugzeugsystemen wird typischerweise in einzelne Schritte unterteilt, die in einem V-Modell angeordnet werden. Bild 2 zeigt eine Übersicht über den verwendeten Entwicklungsprozess, der durch einen durchgängigen modellbasierten Ansatz erweitert ist.

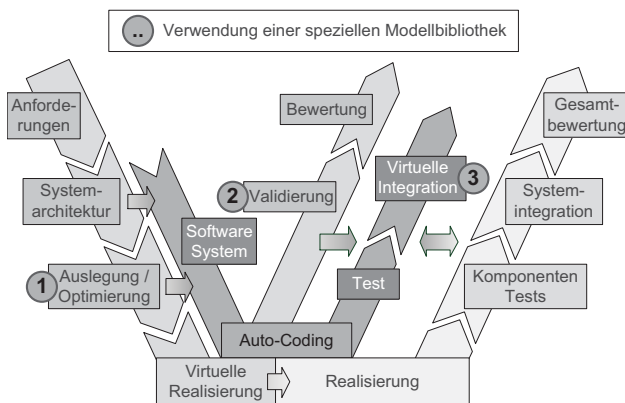


BILD 2: Durchgängiger modellbasierter Entwurfsprozess

Der Ausgangspunkt für die Entwicklung eines multifunktionalen Brennstoffzellensystems besteht in der Definition von übergeordneten Anforderungen. Diese beinhalten neben den erforderlichen Betriebszuständen und Funktionen auch die Umgebungsbedingungen und dimensionierende Flugszenarien [15].

Aus diesen Anforderungen werden anschließend mögliche Systemarchitekturen erstellt, die zunächst modellbasiert ausgelegt und bewertet werden sollen. Die Auslegung

der einzelnen Systemkomponenten erfolgt mit dem Ziel, das integrierte Gesamtsystem optimal zu realisieren. Folglich werden die Komponenten nicht einzeln optimiert, sondern es steht das Zusammenwirken der Komponenten im Vordergrund. Die Optimierung eines Brennstoffzellensystems ist komplex, da viele physikalische Abhängigkeiten eine implizite Auslegung erfordern. Die verwendete Methodik zur Systemoptimierung ist in Bild 3 dargestellt [7].

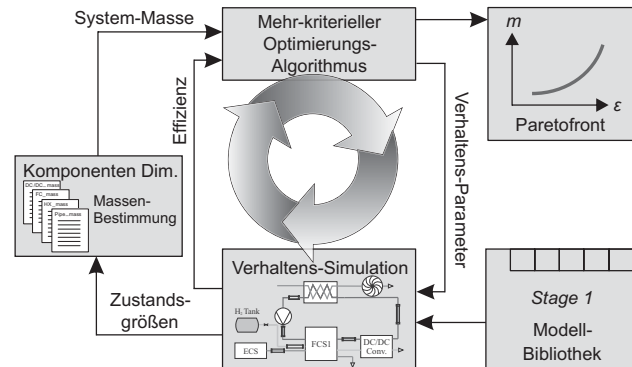


BILD 3: Optimierungsumgebung [7]

Die Basis für die Optimierung bilden die Modelle der Stage 1 Bibliothek. Diese Modelle verfügen über keine geometrischen Randbedingungen, sondern basieren auf Verhaltensparametern wie beispielsweise der Effizienz. Folglich sind diese Modelle einfach, numerisch robust und ermöglichen somit kurze Berechnungszeiten, die für Optimierungsalgorithmen erforderlich sind [5]. Im Rahmen des iterativen Optimierungsprozesses erfolgt die Dimensionierung der Komponenten auf Basis eines konsistenten Systemverhaltens, welches durch die vorangegangene Simulation bestimmt wurde. Die Paretofront stellt abschließend das Ergebnis der Optimierung dar.

Nach der Auslegung und Optimierung erfolgt die Bewertung des Gesamtsystems bezüglich der Anforderungen. Für diesen Schritt werden die Modelle aus der Stage 2 Bibliothek verwendet, um das Verhalten des Brennstoffzellensystems während einer Referenzflugmission zu simulieren. Die Modelle enthalten dazu alle relevanten geometrischen Parameter, wie zum Beispiel die aktive Fläche der Brennstoffzellen. Analog zur Stage 1 Bibliothek berücksichtigen die Stage 2 Modelle nur quasistatisches Verhalten [5].

Damit das multifunktionale Brennstoffzellensystem alle Anforderungen erfüllen kann, sind neben einer optimierten Systemarchitektur eingebettete Software Module erforderlich. Diese enthalten sowohl dynamische Regelungen, als auch zustandsbasierte Steuerungs- und Überwachungskomponenten. Wie in Bild 2 dargestellt kann der modellbasierte Entwicklungsprozess für dieses System in das V-Modell integriert werden. Es ist sinnvoll, den Entwurf und funktionalen Test der Software möglichst früh im Entwicklungsprozess zu beginnen, um Fehler in den Spezifikationen und somit Kosten zu vermeiden. Aus diesem Grund sieht der modellbasierte Ansatz die Verwendung von Modellen in Form von ausführbaren Spezifikationen vor. Dieses Vorgehen erlaubt die Simulation von zum Beispiel Steuerungs- und Überwachungsfunktionen bevor zertifizierbarer Programmcode geschrieben wird [10].

Aufgrund der Systemkomplexität wird die eingebettete Software in einer modularen Weise hierarchisch aufgebaut. Die einzelnen Module können zunächst separat getestet werden, um Funktionen und Anforderungen lokal zu evaluieren [4]. Um das Zusammenwirken aller Module zu testen, wird der Ansatz der virtuellen Integration (→ Bild 4) verfolgt. Dazu werden die Software Module mit einem Gesamtsystemmodell verschaltet, um es in einem geschlossenen Wirkkreis (*Software-in-the-Loop*) zu simulieren [10].

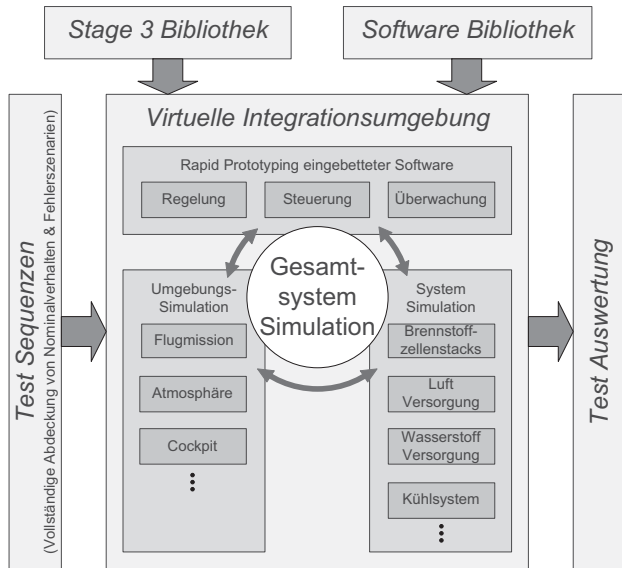


BILD 4: Virtuelle Integrationsumgebung

Im Rahmen der virtuellen Integration werden Modelle der *Stage 3 Bibliothek* verwendet. Diese Modelle berücksichtigen dynamische Effekte, um zeittransientes Verhalten simulieren zu können. Zusätzlich zum Nominalverhalten der Systemkomponenten können Fehlerfälle in die Modelle integriert werden. Auf diese Weise können Anforderungen an das dynamische Gesamtsystemverhalten zum Beispiel bei komplexen Schaltprozessen oder die Auswirkungen im Fehlerfall bewertet werden.

In Anschluss an den modellbasierten Entwurfs-, Bewertungs- und Testprozess können die Modelle als Erweiterung der textuellen Spezifikationen verwendet werden. Auf dieser Basis kann der Aufbau und Test des realen Systems erfolgen.

3 DREISTUFIGE MODELLBIBLIOTHEK

Die Umsetzung des vorgestellten modellbasierten Entwicklungsprozesses erfordert eine dreistufige Modellbibliothek. Unabhängig von der Stufe wird für den Aufbau der Modelle SIMSCAPE verwendet. Dabei handelt es sich um eine objektorientierte und akasale Modellierungssprache, die in MATLAB/SIMULINK integriert ist. Die Gleichungen, die das physikalische Verhalten der Komponenten beschreiben, werden in einzelne Blöcke implementiert. Die Komponenten können anschließend über *Domains* verbunden werden, in denen die SchnittstellenvARIABLEN definiert sind. Dabei wird zwischen Flussgrößen Φ und Potentialgrößen Ψ unterschieden. Zusätzlich kann eine *Domain* Verzweigung

gen beinhalten, an deren Knotenpunkte folgende Gleichungen gelten:

$$(1) \quad \Psi_1 = \Psi_2 = \Psi_3 = \dots \quad ,$$

$$(2) \quad \sum_{i=1}^n \Phi_i = 0 \quad .$$

In diesem Abschnitt werden der Ansatz und die Eigenschaften der einzelnen Modellstufen vorgestellt. Eine Übersicht über die speziellen Anforderungen an die Modellstufen ist in Tabelle 1 gegeben.

TAB 1: Anforderungen an die drei Stufen der Modellbibliothek ([7], [10])

Anforderungen	Stage		
	1	2	3
Berücksichtigung aller relevanten physikalischen Domänen und deren Verknüpfungen	✓	✓	✓
Statisches Verhalten für Auslegungspunkt	✓	✓	✓
Statisches Verhalten für beliebige Betriebspunkte	-	✓	✓
Berücksichtigung von dynamischem Verhalten	-	-	✓
Robuste Initialisierung der Simulation	✓	✓	✓
Einfach parametrisierbar für schnelle Berechnungszeiten	✓	-	-
Berücksichtigung von Komponenten-geometrien und Kennfeldern	-	✓	✓
Realistische Schnittstellen von Aktuatoren und Sensoren für die Integration von komplexen Regelungskonzepten	-	-	✓
Berücksichtigung von Fehlerverhalten	-	-	✓

Da die Modelle der *Stage 3 Bibliothek* die höchste Komplexität aufweisen, wird diese Stufe als erstes betrachtet. Anschließend erfolgt die Beschreibung der *Stage 2* und *Stage 1* Bibliothek. Um die Unterschiede der Modellstufen zu verdeutlichen, wird das dreistufige Modell eines Brennstoffzellenstacks detailliert beschrieben.

3.1 Stage 3 Bibliothek

Das Ziel der *Stage 3 Bibliothek* besteht darin, Modelle für die virtuelle Integration zur Verfügung zu stellen. Die Anforderungen an diese Modellstufe können Tabelle 1 entnommen werden. Die Herausforderung bei der Simulation von komplexen Modellen, die dynamische Effekte beinhalten, besteht darin, dass ein differential-algebraisches Gleichungssystem (DAE-System) entsteht, das numerisch gelöst werden muss [10]. Ein DAE-System beinhaltet gewöhnliche Differentialgleichungen (ODEs), die zusammen mit algebraischen Randbedingungen in einem Gleichungssystem gekoppelt sind.

Ein Modell des multifunktionalen Brennstoffzellensystems führt zu einem DAE-System, da implizite Abhängigkeiten

vorhanden sind. Das Lösen von DAE-Systemen ist aufwendiger als bei ODEs, weil die Lösung auch die algebraischen Randbedingungen erfüllen muss. Insbesondere die Berechnung von konsistenten Anfangsbedingungen im Rahmen der Initialisierung führt zu Problemen [2]. In SIMULINK/SIMSCAPE sind spezielle Solver verfügbar, die für solche Gleichungssysteme angepasst wurden [13]. Wenn allerdings die Komplexität des Modells ansteigt, muss zusätzlich eine Modellierungsstrategie gewählt werden, um das DAE-System zu strukturieren und so die Initialisierung zu erleichtern [10].

Der im Folgenden vorgestellte Ansatz basiert dabei auf der systematischen Aufteilung des Gesamtsystemverhaltens in grundlegende physikalische Effekte [1]. Allgemein ist ein physikalischer Fluss Φ die Folge eines Unterschiedes zwischen zwei oder mehreren Potentials (Ψ_1, \dots, Ψ_n). Dieser resistive Effekt kann durch die allgemeine Gleichung

$$(3) \quad \Phi = f(\Psi_1, \dots, \Psi_n)$$

beschrieben werden. Dynamisches Systemverhalten kann durch kapazitive und induktive Effekte berücksichtigt werden. Ein kapazitiver Effekt wird allgemein durch den Zusammenhang

$$(4) \quad \frac{d\Psi}{dt} = f(\Phi_1, \dots, \Phi_m)$$

gegeben. Gleichung 4 zeigt, dass die zeitliche Änderung eines Potentials von der Größe der beteiligten Flüsse abhängt. Der induktive Effekt kann durch die Gleichung

$$(5) \quad \frac{d\Phi}{dt} = f(\Psi_1, \dots, \Psi_p)$$

dargestellt werden. Folglich führt die Änderung eines Flusses zu einem Unterschied zwischen den beteiligten Potentials. Die Funktion f ist je nach Effekt und Domain unterschiedlich und kann neben einfachen Zusammenhängen auch komplexe Berechnungsvorschriften enthalten.

Neben den einzelnen physikalischen Effekten ist insbesondere deren systematische Anordnung und der Aufbau der verknüpfenden Domains von Bedeutung. Im Folgenden werden diese Aspekte am Beispiel eines PEM (Polymer Elektrolyt Membran) Brennstoffzellenstacks beschrieben. In Bild 5 ist zunächst der strukturelle Aufbau dieses Modells in der Stage 3 Bibliothek dargestellt.

Die Blöcke stellen die Aufteilung der physikalischen Effekte dar und geben an, welche Größen dort berechnet werden. Da die Massenträgheit in den Fluiden vernachlässigt wird, kommen nur Blöcke mit resistivem und kapazitivem Verhalten zur Anwendung. In einem kapazitiven Block werden alle lokal erforderlichen Potentialgrößen initialisiert und berechnet. In den resistiven Blöcken findet dagegen die Berechnung der Flussgrößen in Abhängigkeit der angrenzenden Potentiale statt. Die Anordnung dieser Blöcke erfolgt immer abwechselnd, damit in jedem Simulationsschritt ein eindeutiger Zustand ermittelt werden kann.

Die Schnittstellen zwischen den Blöcken werden durch sogenannte *Balanced Domains* realisiert. In einer Domain werden allgemein die verknüpfenden Potential- und Flussgrößen definiert. Eine *Balanced Domain* zeichnet sich dadurch aus, dass für jede Potentialgröße eine korrespondierende Flussgröße definiert wird.

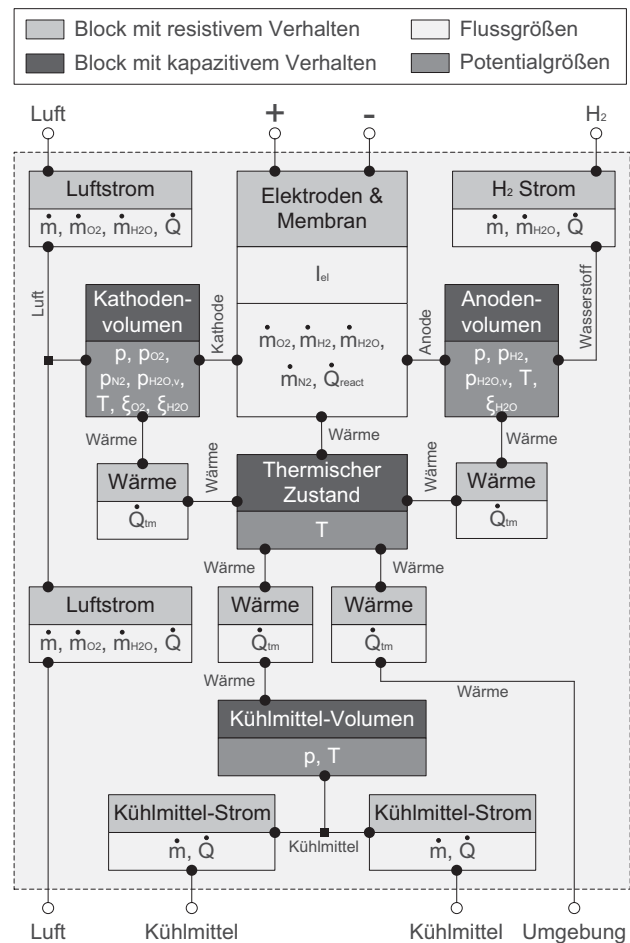


BILD 5: Aufbau des PEM Brennstoffzellenmodells in der Stage 3 Bibliothek

Auf diese Weise entsteht ein DAE-System, das aus numerischer Sicht leichter zu lösen ist [10]. Eine Übersicht über alle im Brennstoffzellenmodell verwendeten Domains ist in Tabelle 2 gegeben.

Kathodenvolumen: Dieser Block stellt die kompakte Betrachtungsweise aller Strömungskanäle auf der Luftseite dar. In diesem Volumen werden die erforderlichen Potentialgrößen des enthaltenen Fluides bestimmt. Die in der Kathode vorhandenen Massen an Sauerstoff, Wasser und Stickstoff werden durch folgende Bilanzgleichungen bestimmt:

$$(6) \quad \frac{dm_{O_2}}{dt} = \dot{m}_{O_2,in} - \dot{m}_{O_2,out} - \dot{m}_{O_2,react} \quad ,$$

$$(7) \quad \frac{dm_{H_2O}}{dt} = \dot{m}_{H_2O,in} - \dot{m}_{H_2O,out} + \dot{m}_{H_2O,react} \dots + \dot{m}_{H_2O,mem} \quad ,$$

$$(8) \quad \frac{dm_{N_2}}{dt} = (\dot{m}_{air,in} - \dot{m}_{air,out}) - (\dot{m}_{O_2,in} - \dot{m}_{O_2,out}) \dots - (\dot{m}_{H_2O,in} - \dot{m}_{H_2O,out}) \quad .$$

Die Gesamtmasse in der Kathode ergibt sich nach

$$(9) \quad m_{air} = m_{O_2} + m_{H_2O} + m_{N_2} \quad .$$

TAB 2: Übersicht über die im PEM Brennstoffzellenmodell verwendeten *Domains*

Domain	Potential	Fluss: Stage	
		3	1 & 2
Luft	p_{air}	\dot{m}_{air}	\dot{m}_{air}
	$\xi_{O_2,air}$	$\dot{m}_{O_2,air}$	
	$\xi_{H_2O,air}$	$\dot{m}_{H_2O,air}$	
	T_{air}	\dot{Q}_{air}	
Wasserstoff	p_{fuel}	\dot{m}_{fuel}	\dot{m}_{fuel}
	T_{fuel}	\dot{Q}_{fuel}	
	$\xi_{H_2O,fuel}$	$\dot{m}_{H_2O,fuel}$	
Kathode	$p_{O_2,ca}$	$\dot{m}_{O_2,ca}$	$\dot{m}_{O_2,ca}$
	$p_{N_2,ca}$	$\dot{m}_{N_2,ca}$	
	$p_{H_2O,v,ca}$	$\dot{m}_{H_2O,ca}$	
Anode	$p_{H_2,an}$	$\dot{m}_{H_2,an}$	$\dot{m}_{H_2,an}$
	$p_{H_2O,v,an}$	$\dot{m}_{H_2O,an}$	
Wärme	T_h	\dot{Q}_h	\dot{Q}_h
Kühlmittel	p_{cool}	\dot{m}_{cool}	\dot{m}_{cool}
	T_{cool}	\dot{Q}_{cool}	
Elektrizität	U_{el}	I_{el}	I_{el}

Abhängig von der Wassermenge und dem Sättigungsdruck kann ein Teil des Wassers auskondensieren und in der flüssigen Phase vorliegen. Die Masse des Wasserdampfs ergibt sich nach folgender Fallunterscheidung [12]:

$$(10) \quad m_{H_2O,v} = \begin{cases} m_{H_2O}, & \text{für } m_{H_2O} \leq m_{H_2O,sat} \\ m_{H_2O,sat}, & \text{für } m_{H_2O} > m_{H_2O,sat} \end{cases}$$

Bei $m_{H_2O,sat}$ handelt es sich um die von der Temperatur abhängige Sättigungswassermasse. Aus den einzelnen Massen ergeben sich die Partialdrücke:

$$(11) \quad p_i = \frac{m_i \cdot R_i \cdot T}{V_{cat}} \quad \text{mit } i \in \{O_2, N_2, H_2O, v\}.$$

R_i beschreibt die spezielle Gaskonstante des entsprechenden Gases und V_{cat} das Gesamtvolumen der Kathode. Die relative Feuchte in der Kathode ergibt sich nach

$$(12) \quad \varphi = \frac{p_{H_2O,v}}{p_{sat}},$$

wobei der Sättigungsdruck p_{sat} berücksichtigt werden muss. Der Gesamtdruck in der Kathode berechnet sich zu

$$(13) \quad p_{air} = p_{O_2} + p_{N_2} + p_{H_2O,v}.$$

Die Massenanteile von Sauerstoff und Wasser ergeben sich anhand der Gleichung

$$(14) \quad \xi_i = \frac{m_i}{m_{air}} \quad \text{mit } i \in \{O_2, H_2O\}.$$

Für die Berechnung der Temperatur ist die innere Energie in der Kathode erforderlich. Diese ergibt sich nach folgender Bilanzgleichung:

$$(15) \quad \frac{dW}{dt} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} + \dot{Q}_{tm}.$$

Die Temperatur berechnet sich nach

$$(16) \quad T = \frac{W}{\sum c_i \cdot m_i} + T_0 \quad \text{mit } i \in \{O_2, N_2, H_2O, v\}.$$

Dabei müssen die spezifischen Wärmekapazitäten c_i der Gase berücksichtigt werden. Die Gleichungen 6 bis 16 ermöglichen es, alle lokalen Potentialgrößen der *Domains* zu bestimmen, die mit dem Kathodenvolumen verbunden sind.

Luftstrom: In diesem Block werden die lokalen Flussgrößen der Luft bestimmt. Der Luftmassenstrom in den Brennstoffzellenstack kann nach folgender Gleichung berechnet werden [5]:

$$(17) \quad \dot{m}_{air} = n_{cell} \cdot \sqrt{\frac{(p_{air,in} - p_{air,out}) \cdot p_{air,in}}{K_{air}}}$$

Der Parameter K_{air} stellt den von der Geometrie der Strömungskanäle abhängigen Druckverlustkoeffizienten einer Brennstoffzelle dar, der vom Stack-Hersteller bereitgestellt werden muss. Es wird angenommen, dass die Hälfte des Druckverlustes am Einlass und die andere Hälfte am Auslass entsteht. Da weiter angenommen wird, dass die Versorgung der einzelnen Brennstoffzellen mit Luft parallel angeordnet ist, wird mit der Anzahl der Zellen n_{cell} multipliziert. Die Massenströme von Sauerstoff und Wasser ergeben sich nach

$$(18) \quad \dot{m}_i = \xi_i \cdot \dot{m}_{air} \quad \text{mit } i \in \{O_2, H_2O\}.$$

Der mit der strömenden Luft transportierte Wärmestrom berechnet sich durch

$$(19) \quad \dot{Q}_{air} = \dot{m}_{air} \cdot c_{mix} \cdot (T_{air,in} - T_0).$$

Anodenvolumen & H₂ Strom: Die Wasserstoffseite ist prinzipiell wie die Luftseite aufgebaut. An dieser Stelle werden deshalb nur die Bilanzgleichungen für die Wasserstoff- und Wassermasse in der Anode angegeben:

$$(20) \quad \frac{dm_{H_2}}{dt} = \dot{m}_{fuel,in} - \dot{m}_{H_2O,in} - \dot{m}_{H_2,react}$$

$$(21) \quad \frac{dm_{H_2O}}{dt} = \dot{m}_{H_2O,in} - \dot{m}_{H_2O,mem}$$

Elektroden & Membran: Dieser Block beinhaltet alle Gleichungen, die die elektrochemische Reaktion in der Brennstoffzelle beschreiben. Dabei handelt es sich um die Berechnung von Flussgrößen, die den Austausch zwischen Kathode, Anode, thermischer Masse und elektrischer Last bestimmen. Die an der Reaktion beteiligten Massenströme ergeben sich nach:

$$(22) \quad \dot{m}_{i,react} = \frac{I_{el} \cdot M_i \cdot n_{cell}}{z_i \cdot F} \quad \text{mit } i \in \{H_2, O_2, H_2O\}.$$

Bei M_i handelt es sich um die molare Masse des entsprechenden Stoffes, F ist die Faraday Konstante und z_i gibt die Anzahl der aufgenommenen Elektronen pro reagierendem Atom an.

Aufgrund des elektro-osmotischen Effektes in der Membran und einer unterschiedlichen Feuchte in der Kathode und

Anode ergibt sich ein Wassermassenstrom durch die Membran [12]:

$$\dot{m}_{H_2O,mem} = (N_{v,os} - N_{v,dif}) \cdot A_{cell} \cdot M_{H_2O,v} \cdot n_{cell}$$

(23) mit: $N_{v,os} = f_1(p_{H_2O,ca}, p_{H_2O,an}, I_{el})$,
 $N_{v,dif} = f_2(p_{H_2O,ca}, p_{H_2O,an}, T_{fc})$.

Neben der molaren Masse von Wasserdampf $M_{H_2O,v}$ beinhaltet Gleichung 23 die durch die genannten Transporteffekte verursachten molaren Wasserströme $N_{v,i}$. Eine detaillierte Beschreibung der Funktionen f_1 und f_2 ist in [12] zu finden.

Aufgrund von Verlusten in der Brennstoffzelle kommt es zu einem Wärmestrom [5]:

$$(24) \quad \dot{Q}_{react} = H_{uH_2} \frac{\dot{m}_{H_2,react}}{M_{H_2}} - U_{el} \cdot I_{el} \quad .$$

Bei H_{uH_2} handelt es sich um den unteren Heizwert von Wasserstoff.

Der Zusammenhang zwischen dem elektrischen Strom I_{el} und der Spannung U_{el} wird bei einer Brennstoffzelle durch die charakteristische Polarisationskurve gegeben. Die Spannung setzt sich dabei aus der Leerlaufspannung E , der Durchtrittsüberspannung V_{act} , dem ohmschen Spannungsabfall V_{ohm} und der Konzentrationsüberspannung V_{conc} zusammen:

$$U_{el} = (E - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc}) \cdot n_{cell}$$

mit: $E = f_3(T_{fc}, p_{O_2}, p_{H_2})$,
 (25) $V_{act} = f_4(I_{el}, T_{fc}, p_{O_2}, p_{N_2}, p_{H_2O,v})$,
 $V_{ohm} = f_5(I_{el}, T_{fc}, p_{H_2O,ca}, p_{H_2O,an})$,
 $V_{conc} = f_6(I_{el}, T_{fc}, p_{O_2}, p_{N_2}, p_{H_2O,v})$.

Die Funktionen f_3 bis f_6 stellen eine Kennfeldapproximation dar und können [12] entnommen werden.

Thermischer Zustand: Dieser Block stellt die thermische Masse des Brennstoffzellenstacks dar, in der Wärme abhängig von der spezifischen Wärmekapazität des Zellmaterials c_{fc} gespeichert werden kann. Die Änderung der Stacktemperatur ergibt sich nach

$$(26) \quad \frac{dT_{fc}}{dt} = \frac{\dot{Q}_{air} + \dot{Q}_{fuel} + \dot{Q}_{react} + \dot{Q}_{cool} + \dot{Q}_{env}}{m_{fc} \cdot c_{fc}} \quad .$$

Wärme: In diesem Block wird der lokale Wärmeübergang nach der Gleichung

$$(27) \quad \dot{Q}_{tm} = A \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

berechnet, wobei A die wärmeübertragende Fläche und α den lokalen Wärmeübergangskoeffizienten darstellt.

Kühlmittel-Volumen: Dieser Block fasst alle Kanäle in der Brennstoffzelle zusammen, die mit Kühlmittel gefüllt sind. Die im Volumen vorhandene Kühlmittel-Masse ergibt sich nach der Bilanzgleichung

$$(28) \quad \frac{dm_{cool}}{dt} = \dot{m}_{cool,in} - \dot{m}_{cool,out} \quad .$$

Der Druck berechnet sich nach der Gleichung

$$(29) \quad p = \left(\frac{m_{cool}}{V_{cool} \cdot \rho_{cool,norm}} - 1 \right) \cdot E_l + p_{amb} \quad .$$

Dabei wird die Kompressibilität des Kühlmittels mit dem Parameter E_l berücksichtigt.

Kühlmittel-Strom: Der Kühlmittel-Massenstrom und der mitgeführte Wärmestrom werden analog zum Luftstrom berechnet.

3.2 Stage 2 Bibliothek

Die *Stage 2* Bibliothek soll Modelle zur Verfügung stellen, mit denen das stationäre Verhalten des Brennstoffzellensystems unter verschiedenen Bedingungen simuliert werden kann. Ziel ist es, ein konsistentes Systemverhalten während einer Referenzflugmission nachzuweisen.

Die Anforderungen an die Modelle der *Stage 2* Bibliothek (→ Tabelle 1) führen dazu, dass die Modelle im Gegensatz zur *Stage 3* Bibliothek nur das quasistatische Verhalten der Komponenten abbilden. Quasistatisch bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Modelle zwar das Betriebsverhalten des Systems bei sich ändernden Randbedingungen abbilden können, aber angenommen wird, dass sich unendlich schnell ein statisches Gleichgewicht im System einstellt. Diese Eigenschaft ermöglicht es, sehr schnell große Betriebsbereiche des Systems zu simulieren und somit zu überprüfen, ob das System in jedem geforderten Betriebspunkt stationär operieren kann.

Da die *Stage 2* Bibliothek für die Bewertung und Validierung möglicher Systemarchitekturen in einem frühen Entwicklungsstadium vorgesehen ist, soll auf die Integration komplexer Regelungskonzepte verzichtet werden. Damit die Simulation der *Stage 2* Modelle trotzdem möglich ist, müssen die einzelnen Komponenten so modelliert werden, dass anders als in Gleichung 3 der Fluss vorgegeben wird:

$$(30) \quad \Delta\Psi = f(\Phi) \quad .$$

Abhängig von der Funktion f führt der vorgegebene Fluss zu einer Potentialdifferenz. Diese Form der Modellierung unterstellt, dass es sich bei den Modellen, die die Flüsse im System definieren, um ideal geregelte Komponenten handelt. Eine mögliche Überschreitung der zulässigen Grenzen einer solchen Komponente wird durch das Setzen von Warn-Hinweisen in der Simulation berücksichtigt. Im Gegensatz zur *Stage 3* Bibliothek müssen die quasistatischen Modelle der *Stage 2* Bibliothek keine kapazitiven und induktiven Effekte berücksichtigen.

Ein Systemmodell, das aus der *Stage 2* Bibliothek aufgebaut ist, stellt mathematisch betrachtet ein algebraisches Gleichungssystem dar, welches aufgrund der oben aufgeführten Form der Modellierung eine relativ schwach besetzte Systemmatrix aufweist. Bei komplexen Modellen kann es jedoch vorkommen, dass die Initialisierung der Simulation fehlschlägt, da der bei der Lösung verwendete Newton-Algorithmus nicht konvergiert [13]. Um dennoch die geforderte robuste Initialisierung zu erreichen, ist der Einsatz von Homotopie-Verfahren notwendig [14]. Homotopie-Verfahren ermöglichen die Initialisierung der Simulation mit vereinfachten Hilfsgleichungen. Schritt für Schritt werden darauf

folgend die vereinfachten Gleichungen durch die komplexeren Gleichungen ersetzt. Auf diese Weise werden die Algorithmen beim Finden der Lösung unterstützt.

Im Folgenden wird beispielhaft das *Stage 2* Modell für den Brennstoffzellenstack beschrieben. Bild 6 zeigt den allgemeinen Aufbau des Modells analog zu der Darstellung des *Stage 3* Modells in Bild 5. Da in den *Stage 2* Modellen keine kapazitiven Blöcke vorhanden sind, ergibt sich ein vereinfachter Aufbau aus Blöcken mit quasistatischem Verhalten. Die dargestellten physikalischen *Domains* sind in Tabelle 2 beschrieben. Hinsichtlich der verwendeten Potentialgrößen gibt es bei den drei Modellstufen keine Unterschiede. Da in der *Stage 2* Bibliothek nur quasistatisches Verhalten berücksichtigt wird, müssen im Gegensatz zu den *Stage 3* Modellen keine *Balanced Domains* verwendet werden, sondern es reicht aus pro *Domain* nur eine Flussgröße zu definieren. Die verwendeten geometrischen Größen sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

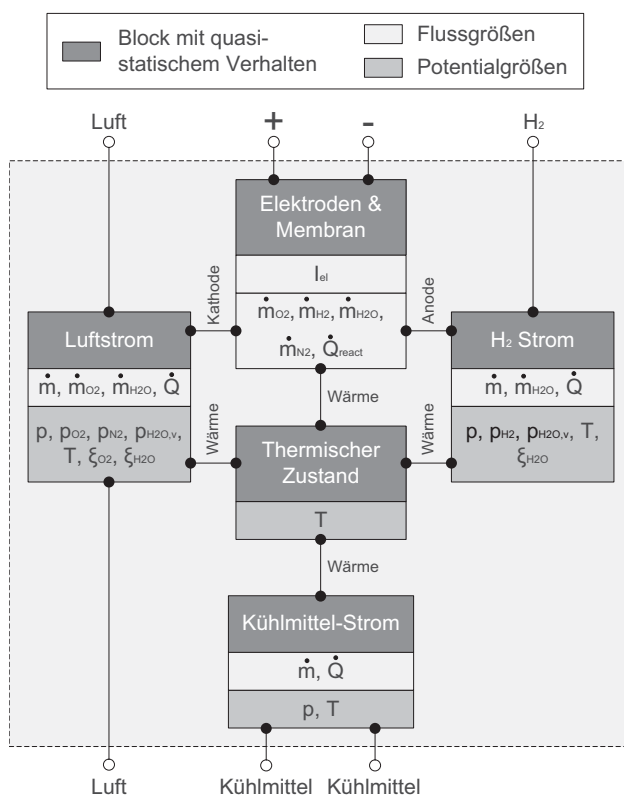


BILD 6: Aufbau des PEM Brennstoffzellenmodells in der *Stage 2* und *1* Bibliothek

Luft-, H₂ & Kühlmittel-Strom: Die Massenströme ergeben sich analog zum *Stage 3* Modell nach den Bilanzgleichungen 6 bis 8, 20 und 21 sowie 28, wobei im *Stage 2* Modell die zeitlichen Ableitungen aufgrund des quasistatischen Verhaltens nicht berücksichtigt werden. Die Druckverluste im Luft- und Kühlmittelstrom ergeben sich unter Verwendung von Gleichung 17 nach [5]

$$(31) \quad \Delta p_i = \frac{K_i}{\rho_{i,in}} \cdot \left(\frac{\dot{m}_{i,in}}{n_{cell}} \right)^2 \quad \text{mit } i \in \{air, cool\}.$$

Auf der Anodenseite wird kein Druckverlust berücksichtigt.

TAB 3: Geometrische Parameter Brennstoffzellenstack-Modell *Stage 2* Bibliothek [7]

Beschreibung		Parameter
Zellenanzahl		n_{cell}
Aktive Zellfläche		A_{cell}
Kathodenkanäle	Querschnittsfläche	A_{cat}
	Länge	l_{cat}
Kühlkanäle	Querschnittsfläche	A_{cool}
	Länge	l_{cool}

Elektroden & Membran: Dieser Block beinhaltet analog zum *Stage 3* Modell alle notwendigen Gleichungen, um die elektrochemische Reaktion zu beschreiben. Entsprechend sind hier die Gleichungen 22 bis 25 abgebildet.

Thermischer Zustand: Der wesentliche Unterschied zum *Stage 3* Modell wird bei der Bestimmung des thermischen Zustands deutlich. In diesem Block wird die Brennstoffzellenstack-Temperatur durch Bildung der thermischen Bilanzgleichung bestimmt [7]:

$$(32) \quad \dot{Q}_{react} + \dot{Q}_{air,in} + \dot{Q}_{fuel,in} + \dot{Q}_{cool,in} = \dots \\ \dots \dot{Q}_{air,out} + \dot{Q}_{fuel,out} + \dot{Q}_{cool,out}$$

Die in den Fluiden transportierten Wärmeströme ergeben sich analog zum *Stage 3* Modell nach dem Zusammenhang

$$(33) \quad \dot{Q}_i = \dot{m}_i \cdot c_i \cdot (T_i - T_0)$$

Dabei wird die Annahme getroffen, dass alle Medien den Stack mit der Stacktemperatur verlassen [7]:

$$(34) \quad T_{air,out} = T_{fuel,out} = T_{cool,out} = T_{fc}$$

3.3 Stage 1 Bibliothek

Die *Stage 1* Bibliothek beinhaltet sogenannte Verhaltensparameter-Modelle. Diese Modelle werden für die Auslegung und Optimierung des Systems benötigt. Aufgrund ähnlicher Anforderungen an die *Stage 1* und *Stage 2* Bibliothek (→ Tabelle 1), berücksichtigen auch die *Stage 1* Modelle nur quasistatisches Verhalten. Komplexe Regelungskonzepte können durch analoge Vereinfachungen ebenfalls vermieden werden.

Der wesentliche Unterschied zwischen der *Stage 1* und *Stage 2* Bibliothek wird in der Parametrisierung deutlich. Die *Stage 1* Modelle werden mit sogenannten Verhaltensparametern parametrisiert und nicht mit geometrischen Parametern. Bei einem Verhaltensparameter handelt es sich allgemein um einen dimensionslosen oder zumindest Geometrie-unabhängigen Parameter, welcher die Änderungen der physikalischen Potentiale unabhängig von der Größe einer Komponente beschreibt. Ein klassisches Beispiel für einen Verhaltensparameter ist die Effizienz eines Brennstoffzellenstacks. Die *Stage 1* Modelle erhalten durch die Form der Parametrisierung die Fähigkeit selbstdimensionierend zu sein, da die Form der Parametrisierung keine geometrischen Randbedingungen setzt. Deutlich wird dieses zum Beispiel bei der Betrachtung des Brennstoffzel-

lenstacks. Der Parameter Effizienz legt zwar das allgemeine Verhalten fest, er sagt aber nichts darüber aus, wie groß die bereitgestellte elektrische Leistung tatsächlich ist.

Diese Form der Parametrisierung bringt einige bedeutende Vorteile mit sich [7]. Die Anzahl an benötigten Optimierungsgrößen wird deutlich reduziert, da eine geringere Anzahl von Verhaltensparametern notwendig ist, um eine Komponente zu parametrisieren [5]. Durch die selbst-dimensionierende Fähigkeit der Komponenten muss nicht jeder Verhaltensparameter einer Simulation gleichzeitig auch Optimierungsparameter sein. Die numerische Robustheit der Systemsimulation wird verbessert, da die Modelle eine geringere Komplexität aufweisen. Die Implizität des Brennstoffzellensystems kann durch die selbst-dimensionierenden Eigenschaften der Modelle deutlich einfacher gehandhabt werden, was sich unter anderem in einer schnelleren Konvergenz des Optimierungsproblems zeigt [7].

Wie ein Modell der *Stage 2* Bibliothek stellt ein Simulationsmodell aus Komponenten der *Stage 1* Bibliothek ein algebraisches Gleichungssystem dar. Da die Modelle jedoch eine deutlich reduzierte Komplexität aufweisen, stellt dieses kein Problem für die numerischen Lösungsverfahren dar. Lediglich an wenigen Stellen sind Homotopie-Verfahren notwendig [14].

Jedes *Stage 1* Modell wird mit einem entsprechenden Auslegungs-Skript bereitgestellt. Diese Auslegungs-Skripte werden nach einem Simulationsdurchgang gestartet, um die Komponenten so zu dimensionieren, dass das simulierte Verhalten erfüllt werden kann (→ Bild 3). Die Aufteilung der Berechnung in mehrere Schritte ermöglicht es, dass jedes Dimensionierungs-Skript unabhängig von den anderen ausgeführt werden kann und somit eine Verkürzung der Berechnungszeiten durch Parallelisierung möglich ist [5].

Im Folgenden wird analog zu den anderen Stufen der Bibliothek das Modell des Brennstoffzellenstacks beschrieben. Der allgemeine Aufbau des *Stage 1* Modells gleicht dem Aufbau des *Stage 2* Modells (→ Bild 6). Der wesentliche Unterschied wird bei der Parametrisierung deutlich. Wie in Tabelle 4 aufgeführt, werden nur vier Verhaltensparameter benötigt, um das Stack-Verhalten zu parametrisieren.

TAB 4: Parameter des Brennstoffzellenstack-Modells in der *Stage 1* Bibliothek [7]

Beschreibung	Parameter
Stack Effizienz	ϵ_{fc}
Stack Spannung	U_{el}
Druckverlust Kathode	Δp_{air}
Druckverlust Kühlmittel	Δp_{cool}

Luft-, H₂ & Kühlmittel-Strom: In diesem Block ergibt sich keine Änderung im Vergleich zum *Stage 2* Modell.

Elektroden & Membran: Dieser Block, der im *Stage 2* und *Stage 3* Modell die größte Komplexität aufweist, kann im *Stage 1* Modell deutlich vereinfacht dargestellt werden. Die Gleichungen 23 und 25 werden sehr vereinfacht abgebildet, da die Stackspannung U_{el} als Parameter vorgegeben wird. Die benötigte Anzahl der Zellen für Gleichung 22 bestimmt

sich aus der parametrisierten Effizienz des Stacks ϵ_{fc} und der vorgegeben Stackspannung U_{el} wie folgt [7]:

$$(35) \quad u_{cell} = \epsilon_{fc} \cdot u_{cell,th} \quad \text{mit} \quad u_{cell,th} = 1,23 \text{ V} \quad ,$$

$$(36) \quad n_{cell} = \left\lceil \frac{U_{el}}{u_{cell}} \right\rceil .$$

Thermischer Zustand: Da das *Stage 1* Modell die energetische Bilanz vollwertig abbilden muss, ist dieser Block identisch zu dem entsprechenden Block im *Stage 2* Modell.

4 ANWENDUNGSBEISPIEL

Der in Abschnitt 2 beschriebene modellbasierte Entwurfsprozess kann unter Verwendung der in Abschnitt 3 vorgestellten dreistufigen Modellbibliothek durchgeführt werden. Das Vorgehen und ausgewählte Ergebnisse der einzelnen Schritte sollen im Folgenden anhand eines einfachen Beispielsystems (→ Bild 7) erläutert werden.

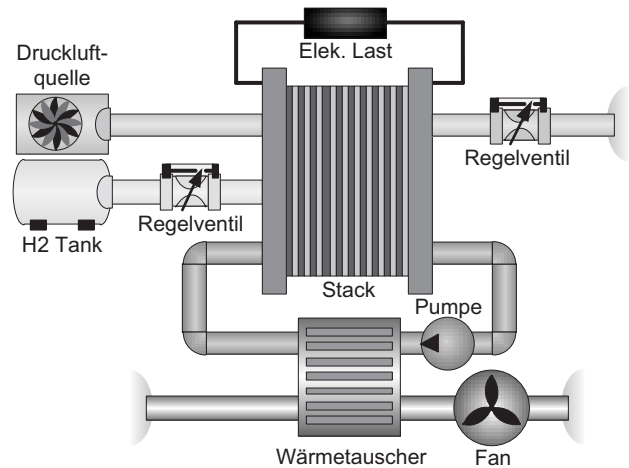


BILD 7: Aufbau des Beispielsystems

In einem ersten Schritt muss die betrachtete Systemarchitektur in der Umgebung von MATLAB/ SIMULINK/SIMSCAPE aufgebaut werden. Dabei werden abhängig von der Entwurfsphase die Komponentenmodelle der verschiedenen Bibliotheksstufen geladen. Zwischen den Modellstufen können die relevanten Parameter der Komponenten und die ausgelegten Größen übergeben werden.

Das Beispielsystem besteht aus einem Brennstoffzellenstack, der erforderlichen Luft- und Wasserstoffversorgung sowie eines einfachen Kühlsystems. Für die Regelung der Reaktantenströme in die Kathode und Anode sind zwei Regelventile vorgesehen. Das Kühlsystem besteht aus einem inneren Kühlkreislauf, der mit einem flüssigen Kühlmittel gefüllt ist. Die mit dem Kühlmittel transportierte Wärme kann durch einen Wärmetauscher an die Umgebungsluft abgegeben werden. Um die elektrochemische Reaktion in der Brennstoffzelle beeinflussen zu können, wird zudem eine regelbare elektrische Last berücksichtigt.

Die Auslegung der Systemkomponenten erfolgt unter Verwendung der *Stage 1* Bibliothek. Das Ergebnis des itera-

tiven Optimierungsprozesses (→ Bild 3) ist die in Bild 8 dargestellte Paretofront. Die leichteste Auslegungsvariante hat eine Systemmasse von 229 kg und einen Gesamtwirkungsgrad von ungefähr 55%. Der Wirkungsgrad des Gesamtsystems kann auf 56% gesteigert werden, wenn eine Erhöhung der Systemmasse von 1 kg akzeptabel ist. Eine weitere Erhöhung des Wirkungsgrades führt aufgrund der Komponenten-Eigenschaften zu einem nicht-linearen Anstieg der Gesamtsystemmasse [7]. Aus diesem Grund stellt die leichte Systemvariante mit 230 kg einen akzeptablen Kompromiss dar, der als Ergebnis der Optimierung weiter verwendet wird.

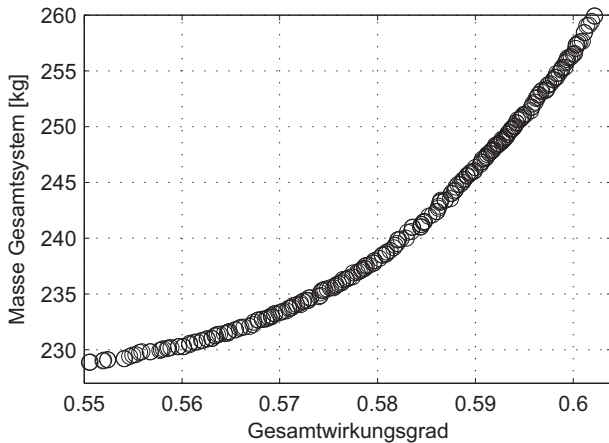


BILD 8: Paretofront als Ergebnis der Systemauslegung

Der nächste Schritt im Entwicklungsprozess (→ Abschnitt 2) besteht in der Validierung des ausgewählten Systems anhand einer Referenzflugmission. Dazu wird das Beispielsystem mit den Modellen der *Stage 2* Bibliothek und den ausgewählten Parametern geladen. In Bild 9 ist die Referenzflugmission und das verwendete Lastprofil qualitativ dargestellt. Eine zu validierende Anforderung ist zum Beispiel die Größe des Wasserstofftanks. Anhand von Bild 9 kann der Wasserstoffverbrauch und der Füllstand des Tanks während der Referenzflugmission nachvollzogen und somit validiert werden.

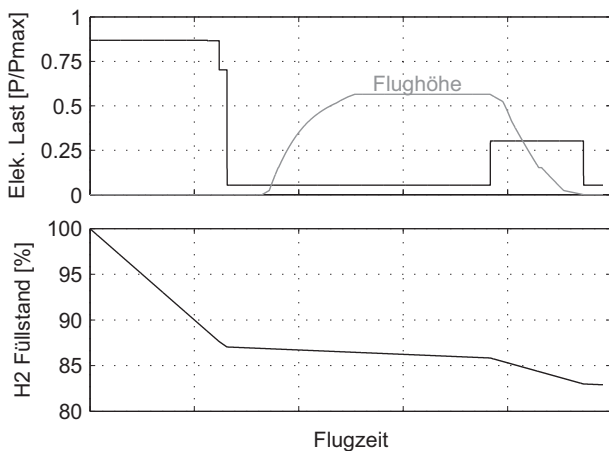


BILD 9: Exemplarische Darstellung von Simulationsergebnissen der Architekturvalidierung

Nach der Validierung der ausgewählten Systemvariante erfolgt der Entwurf und Test des erforderlichen Steuerungs-, Überwachungs- und Regelungssystems. Die *Stage 3* Bibliothek wird anschließend für die virtuelle Integration und Validierung dieser Software Module sowie für die Simulation und Bewertung von System- und Komponentenfehlfunktionen verwendet. Dazu wird das Beispielsystem mit den Modellen der *Stage 3* Bibliothek geladen und mit den Software Modulen, die in Bild 10 dargestellt sind, verschaltet.

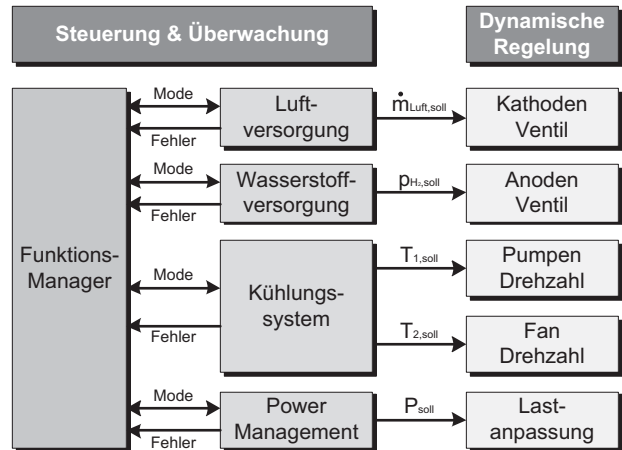


BILD 10: Konzept der Steuerung, Überwachung und Regelung des Beispielsystems

Die Anordnung der Module erfolgt nach einem hierarchischen Konzept. Auf der untersten Ebene befinden sich die dynamischen Regelungen. Auf der Kathodenseite wird der zugeführte Luftmassenstrom geregelt, damit die Brennstoffzelle abhängig von der variierenden elektrischen Leistung in einem festen Arbeitspunkt betrieben werden kann. Zu diesem Zweck wird auf der Anodenseite durch die Ventilregelung ein konstanter Wasserstoffdruck eingestellt. Die Regelung der Betriebstemperatur der Brennstoffzelle erfolgt über die Pumpe des inneren Kühlkreislaufes und über den Fan, der den Kühlluftstrom durch den Wärmetauscher bereitstellt. Die Pumpe und der Fan werden abhängig vom Betriebszustand des Gesamtsystems auf einer Minimaldrehzahl betrieben und abhängig von der Wärmeentwicklung in der Brennstoffzelle dynamisch hochgefahren. Die Auslegung der dynamischen Regelungen erfolgt unter Verwendung der in der *Stage 3* Bibliothek enthaltenen Komponentenmodelle.

Die Steuerung und Überwachung der beschriebenen Subsysteme erfolgt auf der nächsten Ebene des hierarchischen Konzepts. Die implementierten Zustandsautomaten realisieren das Hochfahren, die nominalen Betriebszustände und das Herunterfahren des entsprechenden Subsystems sowie eine Notabschaltung, sobald eine Fehlfunktion detektiert wird. Die Ansteuerung und Überwachung der einzelnen Automaten erfolgt durch einen übergeordneten Funktionsmanager. Dieser organisiert die einzelnen Systemfunktionen während der verschiedenen Betriebsphasen [4].

In Bild 11 sind exemplarisch ausgewählte Simulationsergebnisse der virtuellen Integration dargestellt. Auf der Abszisse werden die einzelnen Betriebsphasen abgebildet. Neben dem Betrieb des Systems werden bei der virtuellen

Integration auch der Start, das Aufwärmen und das Herunterfahren des Brennstoffzellensystems sowie ein erweitertes Lastprofil berücksichtigt.

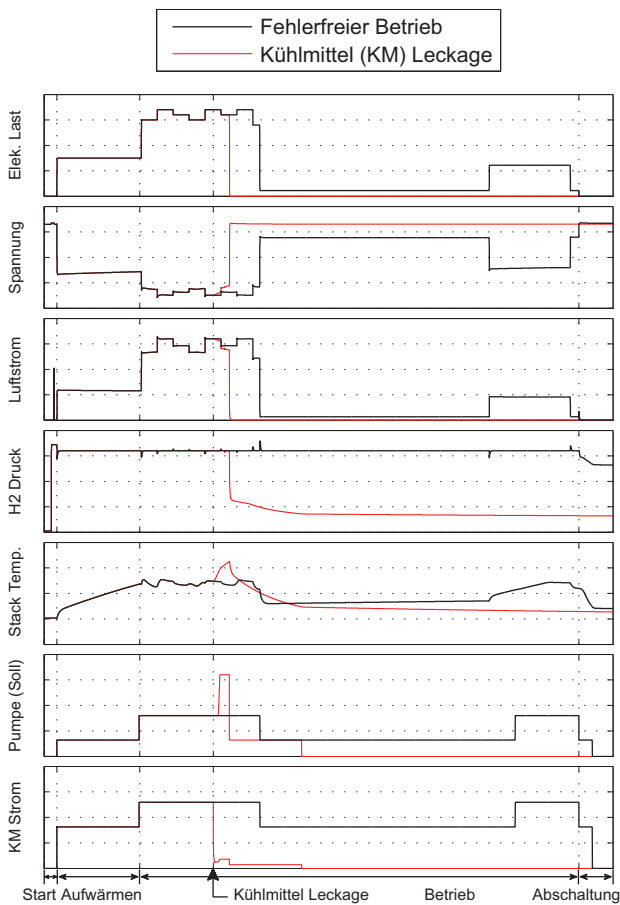


BILD 11: Exemplarische Darstellung von Simulationsergebnissen der virtuellen Integration

Während der Startphase werden die Ventile für die Reaktanzufuhr geöffnet und das System somit betriebsbereit gemacht. Zu Beginn der Aufwärmphase erfolgt die Aktivierung des inneren Kühlkreislaufes bei einer konstanten Pumpendrehzahl. Anschließend wird eine konstante elektrische Last gezogen, um den Stack und das flüssige Kühlmittel aufzuwärmen. Wenn der Stack die Betriebstemperatur erreicht hat, erfolgt der Wechsel in die nominale Betriebsphase. Ab diesem Zeitpunkt kann eine variierende Last mit elektrischer Leistung versorgt werden. Die dynamischen Regelungen der Luft- und Wasserstoffversorgung sowie der Kühlung realisieren den Betrieb in einem festen Arbeitspunkt. Nach der Betriebsphase wird das Brennstoffzellensystem heruntergefahren, wobei die Kühlung für einen kurzen Zeitraum weiter aktiv bleibt.

Als Beispiel für eine Fehlfunktion wird die Leckage am Ausgang der Kühlmittelpumpe simuliert. Bild 11 zeigt anschaulich, dass nach Auftreten der Leckage die Pumpe zunächst versucht den Kühlmittelstrom zu erhöhen. Aufgrund der Leckage ist dieses aber nicht in ausreichendem Maße möglich. Die Verlustwärme bei der Erzeugung der elektrischen Leistung führt folglich dazu, dass sich der Stack zunehmend erwärmt. Ab einer kritischen Stacktemperatur er-

folgt die Notabschaltung des Brennstoffzellensystems, um den Stack vor Schäden zu schützen.

Anhand der durchgeführten Simulationen können die Regelungs-, Steuerungs- und Überwachungsfunktionen getestet werden, ohne das kostenintensive und aufwändige Tests an einem realen Prüfstand notwendig sind.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In diesem Artikel wird ein durchgängiger modellbasierter Entwurfsprozess für komplexe Brennstoffzellensysteme beschrieben, der auf dem V-Modell aufbaut und durch die Verwendung einer mehrstufigen Modellbibliothek erweitert ist. Der Entwurfsprozess berücksichtigt dabei sowohl die Auslegung und Optimierung der Systemarchitektur als auch den Entwurf und virtuellen Test der erforderlichen Automatisierungssysteme. Die drei Stufen der Modellbibliothek sind speziell auf die Anforderungen der einzelnen Entwicklungsschritte angepasst. Die verwendeten Modellierungsansätze werden am Beispiel eines dreistufigen Brennstoffzellenstack-Modells detailliert beschrieben. Je nach Entwicklungsschritt kann die erforderliche Modellstufe in das entworfene Systemmodell geladen werden, wobei alle erforderlichen Parameter übergeben werden.

Die *Stage 1* Bibliothek beinhaltet einfache Modelle, die mit Verhaltensparametern, wie zum Beispiel der Effizienz, parametrisiert werden. Diese Modelle können mit deutlich reduziertem Rechenaufwand simuliert werden und sind somit für Optimierungsalgorithmen geeignet. Basierend auf einem Systemmodell aus der *Stage 1* Bibliothek werden die Komponenten hinsichtlich eines optimierten Gesamtsystemverhaltens ausgelegt. Das Ergebnis dieses Entwicklungsschrittes ist eine Paretofront, anhand derer eine Systemauslegung ausgewählt werden kann.

Die Modelle der *Stage 2* Bibliothek bilden genau wie die Modelle der *Stage 1* Bibliothek das quasistatische Verhalten des simulierten Systems ab. Der wesentliche Unterschied besteht in der Parametrisierung, die bei der *Stage 2* Bibliothek durch Geometriegrößen, wie zum Beispiel der aktiven Zellfläche, erfolgt. Auf diese Weise kann das Systemverhalten für alle spezifizierten Betriebsbereiche während einer Flugmission simuliert und dadurch validiert werden.

Nach dem Entwurf der erforderlichen Regelungs-, Steuerungs- und Überwachungssysteme erfolgt der Test und die virtuelle Integration dieser Systeme basierend auf den Modellen der *Stage 3* Bibliothek. Diese Modellstufe bildet das dynamische Verhalten der Komponenten ab und ist somit für die Simulation von transientem Verhalten wie der Regelung von Systemgrößen und Schaltprozessen geeignet. Neben dem nominalen Verhalten können zudem Systemfehler simuliert werden, die an einem realen Prüfstand nur mit großem Aufwand realisiert werden können.

Die Vorgehensweise wird anhand eines einfachen Brennstoffzellensystems demonstriert, wobei exemplarisch ausgewählte Ergebnisse dargestellt werden.

Im Rahmen aktueller Arbeiten erfolgt die Erweiterung des beschriebenen Entwurfsprozesses. Der Auslegungs- und Optimierungsprozess kann durch die Analyse der Robustheit von Systemlösungen bezüglich Parameteränderungen und Unsicherheiten ergänzt werden. Die Durchführung der virtuellen Integration wird um die automatisierte Erstellung und Auswertung von Testszenarien erweitert.

LITERATUR

- [1] BORUTZKY, W.: *Bond Graph Methodology - Development and Analysis of Multidisciplinary Dynamic System Models*. London : Springer-Verlag, 2010
- [2] BRENNAN, K. ; CAMPBELL, S. ; PETZOLD, L.: *Numerical Solution of Initial-Value Problems in Differential-Algebraic Equations*. New-York : Elsevier, 1989
- [3] ENZINGER, M.: *Technology Programs: Multifunctional Fuel Cell Application*. Deutscher Luft- und Raumfahrt Kongress, Hamburg, 2010
- [4] GRYMLAS, J. ; LÜDDERS, H.P. ; VREDENBORG, E. ; THIELECKE, F.: *Design and Verification Approach for a Complex State-Based Fuel Cell Control System*. SAE AeroTech Congress, Toulouse, 2011
- [5] LÜDDERS, H.P. ; GRYMLAS, J. ; VREDENBORG, E. ; THIELECKE, F.: *A Methodology for Rapid Evaluation and Sizing of Fuel Cell System Architectures for Commercial Aircraft*. SAE AeroTech Congress, Toulouse, 2011
- [6] LÜDDERS, H.P. ; GRYMLAS, J. ; VREDENBORG, E. ; THIELECKE, F. ; CLAUSSEN, S.: *Challenges faced by the integration of a fuel cell system in aircraft system architectures*. H2 Expo International, Hamburg, 2011
- [7] LÜDDERS, H.P. ; STRUMMEL, H. ; THIELECKE, F.: *Model-Based Development of Multifunctional Fuel Cell Systems for More-Electric-Aircraft*. – In Review Process for CEAS Aeronautical Journal
- [8] EUROPEAN COMMISSION: *European Aeronautics: A Vision for 2020*. Report of the High Level Group on Aviation Research, 2001
- [9] EUROPEAN COMMISSION: *Flightpath 2050 - Europe's Vision for Aviation*. Report of the Group of Personalities, 2011
- [10] MODEST, C. ; GRYMLAS, J. ; THIELECKE, F.: *Model-based Development of Control and Diagnosis Concepts for Multifunctional Fuel Cell Systems*. 9th European Workshop on Advanced Control and Diagnosis, Budapest, 2011
- [11] MODEST, C. ; SCHORIES, K. ; LÜDDERS, H.P. ; THIELECKE, F.: *A Model-based Development Approach for a Diagnostic System for a Multifunctional Fuel Cell System*. SAE AeroTech Congress, Toulouse, 2011
- [12] PUKRUSHPAN, J.T. ; STEFANOPOULOU, A.G. ; PENG, H.: *Control of Fuel Cell Power Systems*. London : Springer-Verlag, 2004
- [13] SHAMPINE, L.F. ; REICHEL, M.W.: *The Matlab ODE Suite*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1997
- [14] SIELEMANN, M.: *Device-Oriented Modeling and Simulation in Aircraft Energy Systems Design*, Technische Universität Hamburg-Harburg, Diss., Hamburg, 2012
- [15] VREDENBORG, E. ; LÜDDERS, H.P. ; THIELECKE, F.: *Methodik zur Auslegung und Simulation komplexer Brennstoffzellensysteme*. Deutscher Luft- und Raumfahrt Kongress, Hamburg, 2010