

DIE LUFTVERSORGUNG VON PEM-BRENNSTOFFZELLEN IN GROSSEN FLUGHÖHEN

T. Wittmann*, T. Hertwig*, S. Lück*, I. Zenyuk†, J. Friedrichs*

* Technische Universität Braunschweig, Institut für Flugantriebe und Strömungsmaschinen,
 Hermann-Blenk-Str. 37, Braunschweig, Deutschland

† University of California, Irvine, National Fuel Cell Research Center, Irvine, CA 92697, USA

Zusammenfassung

Das Luftmanagementsystem eines Brennstoffzellenflugzeugs versorgt die Brennstoffzelle mit verdichteter, befeuchteter und erwärmter Umgebungsluft. Die Wahl der optimalen Betriebsparameter und der besten Systemarchitektur ist insbesondere in großen Flughöhen eine komplexe Optimierungsaufgabe. Diese Arbeit untersucht auf Grundlage eines analytischen Modells den Entwurfsraum eines solchen Luftmanagementsystems. Als wichtigste Freiheitsgrade konnten die Wahl des Verdichtungsverhältnisses, der Sauerstoffstöchiometrie und der Befeuchtung stromauf der Brennstoffzelle identifiziert werden. Die wesentlichen Limitierungen des Entwurfsraums sind die Wasserbilanzen von Brennstoffzelle und System, sowie die maximal mögliche Befeuchtung. Für zwei Anwendungsfälle wurden optimale Betriebsparameter und Systemarchitekturen bestimmt. Es wurde gezeigt, dass Turbinen von grundlegender Bedeutung für den Wasserhaushalt und die Effizienz des Systems sind. Außerdem ist in den meisten Fällen eine Verdampfungskühlung der verdichteten Luft ausreichend. Ein Wärmetauscher wird nicht benötigt.

Keywords

Brennstoffzelle; Luftversorgung; Befeuchtung; Wasserhaushalt; Kondensation; Verdichter; Turbine

NOMENKLATUR

Formelzeichen

α	Ladungstransferkoeffizient	
ASR_{GDL}	Flächenspezifischer Widerstand der Gasdiffusionsschicht	$\Omega \text{ m}^{-2}$
δ_M	Membrandicke	m
E	Reversible Zellspannung	V
η_{act}	Aktivierungsverluste	V
η_{conc}	Konzentrationsverluste	V
η_{ohm}	Ohmsche Verluste	V
F	Faraday-Konstante	C mol^{-1}
j	Stromdichte	A m^{-2}
j_0	Austauschstromdichte	A m^{-2}
j_L	Grenzstromdichte	A m^{-2}
j_{leak}	Leckagestromdichte	A m^{-2}
λ	Wassergehalt	
φ	Relative Feuchte	
R	Gaskonstante	$\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$

σ	Leitfähigkeit	$\Omega \text{ m}^{-1}$
T	Temperatur	K
V_{cell}	Zellspannung	V
z	Membrandickenkoordinate	m

Abkürzungen

BZ	Brennstoffzelle
PEMBZ	Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle

1. EINFÜHRUNG

Wasserstoffbasierte Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen (PEMBZ) gehören zu den vielversprechendsten Technologien für den nachhaltigen Antrieb von Luftfahrzeugen. Das Luftmanagementsystem ist ein wichtiger Teil des Brennstoffzellensystems und hat die Aufgabe die Brennstoffzelle (BZ) mit Luft bei geeigneter Temperatur, Druck und Feuchtigkeit zu versorgen. Außerdem ist es dafür zuständig das bei der Brennstoffzellenreaktion entstehende Flüssigwasser abzuführen [1]. Während das Tanksystem den Wasserstoff bei nahezu konstantem Druck bereitstellen kann, variieren auf der Luftseite die Umgebungsbedingungen in großem Maße mit der Flughöhe. Insbesondere in großen

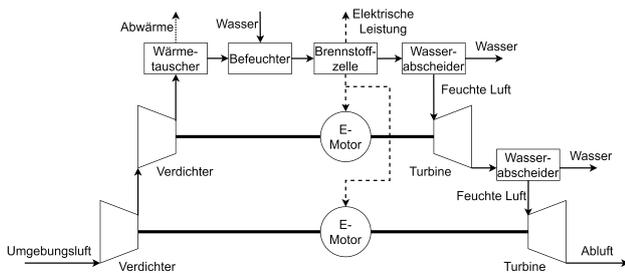


BILD 1. Beispiel für ein PEMZ-Luftmanagementsystem mit je zwei Verdichter- und Turbinenstufen.

Flughöhen sind Umgebungsdruck und -temperatur dabei zu niedrig als das eine Brennstoffzelle sinnvoll betrieben werden könnte. Vor einer Nutzung in der Brennstoffzelle muss die Umgebungsluft daher durch Kompression verdichtet und erwärmt werden [2]. Abbildung 1 zeigt das Beispiel eines PEMZ-Luftmanagementsystem für die Luftfahrt. Nach der Komprimierung in dem zweistufigen Verdichter ist die Lufttemperatur typischerweise deutlich größer als die Brennstoffzellentemperatur. Die Luft wird daher zunächst in einem Wärmetauscher und dann mittels Verdampfung von Wasserdampf in einem Befeuchter gekühlt. Nach der Brennstoffzelle wird anfallendes Flüssigwasser abgeschieden. Die Verdichtungsarbeit kann teilweise durch den Einsatz einer Turbine zurückgewonnen werden. Die Differenz zwischen Verdichter- und Turbinenleistung wird durch Elektromotoren bereitgestellt. Die Abluft der Brennstoffzelle ist mit Wasserdampf gesättigt. Die Expansion in der Turbine führt zur Übersättigung und schließlich zur Kondensation des Wasserdampfs. Dabei werden erhebliche Mengen latenter Wärme freigesetzt. Das anfallende Flüssigwasser wird nach den Turbinenstufen ebenfalls abgeschieden. Das abgeschiedene Flüssigwasser wird dem Befeuchter zugeführt und steht auch an anderer Stelle im Brennstoffzellensystem zur Verdampfungskühlung zur Verfügung.

Der Einsatz von PEMZ für Luftfahrtanwendungen ist in den letzten Jahren zu einem wichtigen Forschungsthema geworden. In vielen Publikationen findet bei der Systemauslegung jedoch keine explizite Betrachtung des Luftmanagementsystems statt [3, 4]. Aktuelle Arbeiten befassen sich beispielsweise mit der Optimierung der Eintrittsbedingungen unter Maximierung der Brennstoffzelleneffizienz [5], der Minimierung des Systemgewichts und des Treibstoffverbrauchs [6] oder der Maximierung der Systemleistung [7]. Bahari et al. [7] konnte zeigen, dass sich in einem hybriden Antriebssystem der Brennstoffverbrauch durch ein größeres Verdichterdruckverhältnis reduziert lässt. Ferner führte ein höherer Dampfanteil in der Brennstoffzellenabluft zu einer Erhöhung der Turbinenleistung. Schröter et al. haben besonders für Brennstoffzellenanwendungen in großen Flughöhen einen starken Einfluss von Druckverlusten auf das Verdichterkennfeld, die Verdichtereffizienz und die

maximal erreichbare Leistung beobachten können. Werner et al. haben den Einfluss von Brennstoffzellendruck und -temperatur, sowie der Sauerstoffstöchiometrie auf den Wasserhaushalt des Systems untersucht [8]. Demnach ist bei einer Druckänderung eine Anpassung der Brennstoffzellentemperatur oder der Stöchiometrie nötig, um eine Flutung oder Dehydration der Membran zu vermeiden. Filsinger et al. haben verschiedene Systemarchitekturen für die Luftversorgung von Brennstoffzellen in Kraftfahrzeugen verglichen [9]. Nur wenige der vorgenannten Arbeiten berücksichtigten Turbinen als Komponenten des Luftmanagementsystems. Der Einfluss der Kondensation wurde in keiner der Arbeiten explizit betrachtet. Die Autoren haben kürzlich den Einfluss der Kondensation auf das Luftmanagementsystem eines Brennstoffzellenflugzeugs diskutiert und dabei das auch hier verwendete Modell eingeführt [10]. Die Grundlage hierfür bildeten numerische Arbeiten zur Kondensation in der Turbine eines Brennstoffzellenturbochargers für Kraftfahrzeuge [11–13].

Das Ziel dieser Arbeit ist es, grundlegende Erkenntnisse über den Entwurfsraum von Luftmanagementsystemen für PEMZ in großen Flughöhen zu erlangen. Im Fokus der Betrachtung stehen die Betriebsparameter, wie etwa das Verdichtungsverhältnis oder die Befeuchtung der Brennstoffzelle, sowie verschiedene Systemarchitekturen. Diese Betrachtungen werden auf Grundlage eines analytischen Modells durchgeführt, welches im nächsten Abschnitt vorgestellt wird. Es werden ausschließlich stationäre On-Design-Betriebspunkte betrachtet. Gewicht, Bauraum und Kosten des Systems sind nicht Teil der Untersuchung. Der Entwurfsraum wird anhand zweier Beispielanwendungen untersucht. Diese werden im nachfolgenden Fall A und Fall B genannt. Fall A repräsentiert ein klassisches 19-sitziges Passagierflugzeug auf einer Flughöhe von 7 km mit einer Fluggeschwindigkeit von Mach 0,4 [14]. In jüngster Zeit werden vermehrt unbemannte, sehr hochfliegende, brennstoffzellenbetriebene Flugzeugkonzepte diskutiert, welche Telekommunikationsdienstleistungen anbieten sollen [15]. Für die vorliegende Arbeit sind diese von besonderem Interesse. Für Fall B wird daher eine Flughöhe von 18 km und eine Fluggeschwindigkeit von Mach 0,2 angenommen. Es werden keine konkreten Flugzeuge, Leistungsbedarfe oder Brennstoffzellenstapel betrachtet. Im Sinne der Vergleichbarkeit werden daher alle Ergebnisse normiert angegeben. Wie im Folgenden erläutert wird, ist die Stromdichte eine entscheidende Größe für den Betrieb einer Brennstoffzelle. Die optimale Stromdichte lässt sich nur unter Einbeziehung des Flugzeugentwurfs und der Flugmission berechnen. Für Fall A und B werden daher konstante Stromdichten von 1 A cm^{-2} bzw. $0,5 \text{ A cm}^{-2}$ angenommen. Letzteres trägt den längeren Flugmissionen von Fall B Rechnung. Wenn nicht anders beschrieben, wird für Fall A die in Abb. 1 gezeigte Systemarchitektur vorausgesetzt. Für Fall B wird, wenn nicht anders angegeben, die selbe Architektur verwendet,

allerdings auf Grund der größeren Druckverhältnisse mit jeweils drei Verdichter- und Turbinenstufen. Im Folgenden wird zunächst das analytische Modell vorgestellt und auf ein Beispielsystem angewandt. Anschließend werden der Entwurfsraum, sowie dessen Freiheitsgrade und Limitierungen vorgestellt. Danach werden optimale Betriebsparameter bestimmt und der Einfluss verschiedener Systemarchitekturen untersucht, gefolgt von einer Zusammenfassung der Ergebnisse.

2. MODELLIERUNG

Die Untersuchung wird mit einem analytischen Modell durchgeführt. Dieses ist in Matlab 2021R1 implementiert und nutzt einen objektorientierten Ansatz. Im Fokus der Modellentwicklung stand Robustheit, ein weiter Gültigkeitsbereich und eine hohe Flexibilität zur Anpassung an verschiedene Systemarchitekturen. Das Modell wurde bereits in einer früheren Publikation vorgestellt [10]. Im Folgenden wird daher nur eine verkürzte Beschreibung wiedergegeben. Das Modell berechnet thermodynamische Zustände entlang des Gaspfades des Luftmanagementsystems. Die Zustandsobjekte werden entlang des Gaspfades mit analytischen Gleichungen manipuliert, welche die einzelnen Systemkomponenten darstellen. Es werden ausschließlich stationäre On-Design-Betriebspunkte betrachtet. Das Modell nutzt Realgasgleichungen. Druckverluste werden vernachlässigt. Die wichtigsten Systemkomponenten für diese Studie sind die Brennstoffzelle und die Turbine mit Kondensation. Für diese werden detaillierte analytische Modelle verwendet. Alle anderen Komponenten werden durch bekannte thermodynamische Gleichungen repräsentiert.

Die Brennstoffzelle bildet den Kern des Luftmanagementsystems und muss daher mit dem größten Genauigkeitsanspruch modelliert werden. Gleichung 1 beschreibt die Zellspannung als Funktion der reversiblen Zellspannung und der Aktivierungs-, ohmschen und Konzentrationsverluste. Alle zugrundeliegenden Gleichungen berücksichtigen vollständig die Auswirkungen von Temperatur, Druck, Sauerstoffstöchiometrie und Feuchtigkeit. Die Sauerstoffstöchiometrie ist dabei das Verhältnis zwischen der bereitgestellten Sauerstoffmenge und der an der Brennstoffzellenreaktion beteiligten Menge. Alle Gleichungen sind den Arbeiten von O'Hayre et al. [16], Fuller und Harb [17], sowie Balliet [18] entnommen.

$$\begin{aligned}
 V_{cell} &= E - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{conc} \\
 &= E - \left[-\frac{RT}{\alpha F} \ln j_0 + \frac{RT}{\alpha F} (j + j_{leak}) \right] \\
 (1) \quad &- \left[j \cdot \left(\int_0^{\delta_M} \frac{dz}{\sigma(\lambda(z))} + ASR_{GDL} \right) \right] \\
 &- \left[-\frac{RT}{F} \cdot \ln \left(1 - \frac{j + j_{leak}}{j_L} \right) \right]
 \end{aligned}$$

Die Kalibrierung des Modells repräsentiert eine Brennstoffzelle auf dem Stand der Technik. Neben den oben genannten Arbeiten wurden dazu auch die Eigenschaften des Brennstoffzellenfahrzeugs „Toyota Mirai“ [19] berücksichtigt. Die wichtigsten Parameter für den Betriebspunkt der Brennstoffzelle sind Temperatur, Sauerstoffstöchiometrie, Druck und Feuchtigkeit des Gasstroms, sowie die Stromdichte des Brennstoffzellenstapels. Die Zellspannung, maximale Stromdichte und der Wirkungsgrad profitieren prinzipiell von einer höheren Temperatur, welche hauptsächlich durch Materialparameter begrenzt wird. Eine Temperatur von 85 °C ist typisch und wird auch in dieser Arbeit angenommen. Eine Sauerstoffstöchiometrie größer eins erhöht die mittlere Sauerstoffkonzentration und dadurch die Grenzstromdichte, erfordert jedoch einen größeren Luftstrom und damit mehr Verdichtungsleistung. Ein hoher Betriebsdruck der Brennstoffzelle steigert die Zellspannung und damit den Wirkungsgrad. Allerdings benötigt ein größerer Druck ebenfalls mehr Verdichtungsleistung. In Bezug auf die Feuchtigkeit ist eine möglichst gesättigte Zellmembran vorteilhaft, da dadurch die ohmschen Verluste in der Brennstoffzelle minimiert werden. Der letzte wichtige Betriebsparameter ist die Stromdichte in der Brennstoffzelle. Die Zellspannung und damit der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle sind bei niedrigen Stromdichten am größten. Niedrige Stromdichten führen allerdings zu einem größeren und schwereren Brennstoffzellensystem. Die optimale Stromdichte ergibt sich im Minimum des Gesamtgewichts von Brennstoffzellensystem mit Tanksystem und Wasserstoff. Wie bereits eingangs ausgeführt werden in dieser Studie für den Fall A eine Stromdichte von 1,0 A cm⁻² und für Fall B von 0,5 A cm⁻² angenommen. Abbildung 2 zeigt die Polarisationskurven des Brennstoffzellenmodells für vier verschiedene Betriebsdrücke zwischen 0,7 bar und 3,0 bar. Die relative Luftfeuchtigkeit am Eintritt beträgt 20 % und am Auslass 100 %. Ein höherer Betriebsdruck steigert die Zellspannung und die maximale Stromdichte. Dies ist nur zu einem geringen Teil auf die Druckabhängigkeit der Brennstoffzellenreaktion zurückzuführen. Wichtiger ist der Effekt der konstanten relativen Luftfeuchtigkeit. Der Sättigungsdruck ist für alle Betriebsdrücke konstant. Bei voller Sättigung und 0,7 bar beträgt der Wasserdampfanteil 75 %. Bei 3,0 bar sind es nur 13 %. Daher ist der molare Anteil von Sauerstoff bei höheren Drücken größer, was die Brennstoffzellenreaktion unterstützt und die Zellspannung stark erhöht.

Die Expansion in der Turbine führt zu Kondensation, wodurch latente Wärme freigesetzt wird. Dadurch erhöht sich die Strömungstemperatur, was wiederum das Ausmaß der Kondensation reduziert. Folglich kann die Turbine nicht mit einer einfachen Gleichung berechnet werden. Der zur Modellierung der Turbine mit Kondensation verwendete Algorithmus ist eine vereinfachte Version des von Roumeliotis und Mathioudakis [20] beschriebenen Ansatzes. Bei diesem Ansatz wird zunächst der Druck, bei welchem

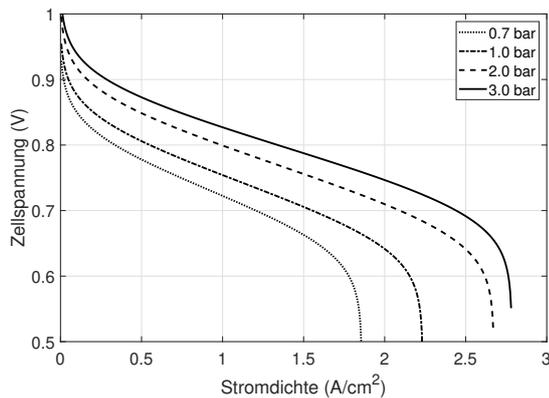


BILD 2. Polarisationskurven des Brennstoffzellenmodells für vier Betriebsdrücke.

Kondensation auftritt, berechnet. Anschließend wird eine polytrope Expansionsrechnung der Turbine durchgeführt. Schließlich wird der thermodynamische Gleichgewichtszustand nach der Expansion berechnet. Hierfür wird eine isentrope Kondensation unmittelbar nach der Expansion angenommen. Eine detailliertere Beschreibung ist in [10] und [13] zu finden. Für den Verdichter wird eine einfache Polytropenbeziehung verwendet. Für die Verdichter- und Turbinenstufen werden polytrope Wirkungsgrade von 85 % bzw. 90 % angenommen. Der Wärmetauscher und der Befeuchter dienen dazu, die Feuchtigkeit und die Temperatur des Gasstroms entsprechend den erforderlichen Eintrittsbedingungen der Brennstoffzelle zu konditionieren. Auf der Grundlage dieser Anforderung wird die zu verdampfende Wassermenge bestimmt. Dann wird die erforderliche Eintrittstemperatur des Befeuchters aus der Eintrittstemperatur der Brennstoffzelle und der durch die Verdampfung umgesetzten latenten Wärme berechnet. Der Wärmetauscher ist schließlich das Bindeglied zwischen Verdichteraustrittstemperatur und Befeuchtereintrittstemperatur.

3. BETRACHTUNG EINES BEISPIELSYSTEMS

Im folgenden sollen anhand eines Beispiels die für diese Arbeit grundlegenden Zusammenhänge vorgestellt werden. Abbildung 3 zeigt die Totaltemperatur und den Totaldruck entlang des Gaspfads eines Luftmanagementsystems entsprechend Abb. 1, angewendet auf Fall A. Hier beträgt die Umgebungstemperatur -31 °C und der -druck 0,41 bar. Die Brennstoffzelle wird mit einem Druck von 2,75 bar, einer Sauerstoffstöchiometrie von zwei und einer relativen Eintrittsfeuchte von 20 % betrieben. In diesem Beispiel wurde noch keine Optimierung der Betriebsparameter durchgeführt. Das Turbinendruckverhältnis von 6,7 ist gleichmäßig auf die Stufen verteilt. Selbiges gilt für das, auf Grund des Staudrucks kleinere, Verdichterdrukverhältnis von 6,0. Im Sinne der Vergleichbarkeit wurden alle folgenden Angaben zu Massenströmen und Lei-

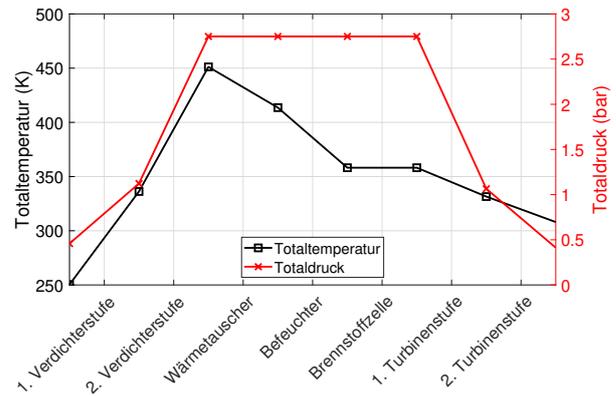


BILD 3. Totaltemperatur und -druck in einem Luftmanagementsystem entsprechend Abb. 1, angewendet auf Fall A.

stungen auf einen Sauerstoffreaktionsstrom von 1 mol s^{-1} normiert. Der Luftmassenstrom beträgt damit am Brennstoffzelleneintritt 276 g s^{-1} und nach der Brennstoffzellenreaktion 245 g s^{-1} . Durch die Verdampfungs-befeuchtung und die Reaktion werden 8 g s^{-1} bzw. 33 g s^{-1} Wasserdampf zugeführt. Zusätzlich werden nach der Brennstoffzelle und nach der Turbine 3 g s^{-1} bzw. 18 g s^{-1} Flüssigwasser abgeschieden. Das in der Turbine kondensierte Wasser ist also zwingend notwendig um den Wasserbedarf des Befeuchters zu decken. Eine Betrachtung des Totaltemperaturverlaufs in Abb. 3 zeigt einen deutlich flacheren Temperaturgradienten in der Turbine als im Verdichter. Der Grund hierfür ist die durch die Kondensation freigesetzte latente Wärme, welche zu einer signifikanten Aufheizung der Strömung führt. Ohne diesen Effekt würde die Austrittstemperatur des Luftmanagementsystems -53 °C betragen [10]. Im Vergleich zu einer trockenen Luftströmung hat die Turbine zudem eine 12 % größere Leistungsabgabe. Die Gründe hierfür sind die höhere spezifische Wärmekapazität einer feuchten Strömung, sowie das durch die freigesetzte latente Wärme höhere Temperaturniveau. Zuletzt sei angemerkt, dass die Turbine in diesem Beispiel 79 % der Verdichterleistung bereitstellt und somit entscheidend zu einem effizienten Betrieb beiträgt. Die mit einem Sauerstoffreaktionsstrom von 1 mol s^{-1} normierte Systemleistung beträgt ohne Turbine 259 kW und mit Turbine 304 kW [10].

4. ENTWURFSRAUM, FREIHEITSGRADE UND LIMITIERUNGEN

Nach der Betrachtung eines Beispielsystems werden in diesem Abschnitt der Entwurfsraum, sowie die Freiheitsgrade und Limitierungen des Entwurfs definiert. Als Entwurfsraum werden im Sinne dieser Arbeit die Auswahl der Systemarchitektur und die Wahl der Betriebsparameter verstanden. Flughöhe, Fluggeschwindigkeit und auch die Stromdichte der Brennstoffzelle sind nicht Teil der Betriebsparameter, sondern werden durch die eingeführten Fälle A

und B vorgegeben. Im Rahmen einer gründlichen Parameter- und Sensitivitätsanalyse konnten für die Betriebsparameter drei wesentliche Freiheitsgrade identifiziert werden. Den größten Einfluss haben das Verdichterdruckverhältnis und die Sauerstoffstöchiometrie der Brennstoffzelle. Das Verdichterdruckverhältnis bestimmt den Betriebsdruck der Brennstoffzelle und das Turbinendruckverhältnis. Die Stöchiometrie beeinflusst neben der Brennstoffzellenreaktion auch den Massenstrom aller Komponenten des Systems. Der dritte Freiheitsgrad ist der Grad der Befeuchtung vor der Brennstoffzelle. Diese beeinflusst den Wasserhaushalt der Brennstoffzelle und dient als Bindeglied zwischen Verdichteraustritt und Brennstoffzelleneintritt.

Es konnten drei zentrale Limitierungen des Entwurfsraums ermittelt werden. Die erste betrifft die maximal mögliche Befeuchtung vor der Brennstoffzelle. Die Verdampfung benötigt eine Temperaturdifferenz zwischen Verdichteraustritt und Brennstoffzelleneintritt, siehe Abb. 3. Je größer das Verdichtungsverhältnis, desto größer ist die Temperaturdifferenz und damit auch die maximal erreichbare relative Luftfeuchtigkeit nach der Befeuchtung. Eine Befeuchtung mit Abkühlung auf Temperaturen unterhalb der Brennstoffzellentemperatur hat auf Grund der schnell abnehmenden Sättigungstemperatur nur wenig Potential zur Steigerung der zugeführten Wassermenge. Die beiden weiteren Limitierungen betreffen die Wasserbilanz der Brennstoffzelle und des Systems. Zur Visualisierung sind in Abb. 4 die Flüssigwasserüberschüsse und -bedarfe der Systemkomponenten in Abhängigkeit des Brennstoffzellendrucks aufgetragen. Auch hier werden die Werte auf einen Sauerstoffreaktionsstrom von 1 mol s^{-1} normiert. Der dargestellte Flüssigwasserhaushalt der Brennstoffzelle (blau) ergibt sich aus der Bilanzierung des zugeführten Wasserdampfs, des durch die Reaktion gebildeten Wassers und des abgeführten Wasserdampfs. Die Systemwasserbilanz (schwarz) ergibt sich aus dem nach der Brennstoffzelle und der Turbine abgeschiedenen Flüssigwassers, abzüglich des im Befeuchter verdampften Wassers. Nur wenn im System und in der Brennstoffzelle ein Wasserüberschuss vorliegt sind die Limitierungen erfüllt. Beide Bilanzen profitieren von einem höheren Brennstoffzellendruck. Der Grund hierfür ist das bereits im Kontext von Abb. 2 angesprochene Verhältnis von Wasserdampf zu Luft. Bei höheren Drücken wird im Verhältnis zur Luft weniger Wasserdampf zur Sättigung der Strömung benötigt. Dies zeigt sich besonders am abnehmenden Wasserbedarf des Befeuchters (rot). Interessant ist der abnehmende Wasserüberschuss durch die Turbinenkondensation. Zwar profitiert die Turbine (grün) von einem höheren Druckverhältnis. Allerdings wird dies überkompensiert durch das abnehmende Wasserdampf-zu-Luft-Verhältnis. Auch die Sauerstoffstöchiometrie hat einen großen Einfluss auf die Wasserbilanz. Eine hohe Stöchiometrie bedingt einen großen Massenstrom und damit einen großen Wasserbedarf. Eine größere Sauerstoffstöchiometrie

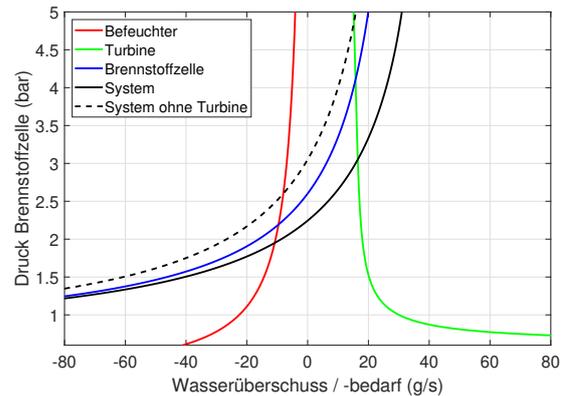


BILD 4. Flüssigwasserüberschuss und -bedarf der Systemkomponenten in Abhängigkeit des Brennstoffzellendrucks bei einer Sauerstoffstöchiometrie von zwei und einer Befeuchtung auf 20 % rel. Feuchte. Werte normiert auf einen Sauerstoffreaktionsstrom von 1 mol s^{-1} .

benötigt somit einen größeren Betriebsdruck für eine ausgeglichene Wasserbilanz. Eine stärkere Befeuchtung führt zu einem größeren Wasserüberschuss in der Brennstoffzelle. Die Befeuchtung hat somit keinen Einfluss auf die Systemwasserbilanz. Allerdings beeinflusst sie, ob die Brennstoffzellenwasserbilanz oder die Systemwasserbilanz kritischer ist.

Im Folgenden werden Visualisierungen der Entwurfsräume für die beiden Fälle A und B vorgestellt. Hierzu wird die Systemleistung mit einem Sauerstoffreaktionsstrom von 1 mol s^{-1} normiert und in Abhängigkeit des Brennstoffzellendrucks und der Sauerstoffstöchiometrie geplottet, siehe Abb. 5 und Abb. 6. Der Grad der Befeuchtung hat als dritter Freiheitsgrad nur einen relativ geringen Einfluss auf die erreichbaren Systemleistungen und führt nur zu einer Verschiebung der dargestellten Ergebnisse. Die beiden Abbildungen zeigen zudem die Limitierungen durch die Befeuchtung und die Wasserbilanz. Die erreichbare Befeuchtung ist abhängig von der Verdichteraustrittstemperatur und damit dem Brennstoffzellendruck, nicht jedoch von der Stöchiometrie. Die Limitierung durch die Wasserbilanz ist hingegen von Druck und Stöchiometrie abhängig. Betriebspunkte mit einem niedrigen Brennstoffzellendruck und einer großen Sauerstoffstöchiometrie sind ausgeschlossen. Der Entwurfsraum für Fall A in Abb. 5 zeigt einen Grat an dessen Spitze sich das Leistungsmaximum befindet. Dieser Grat repräsentiert Betriebspunktkombinationen an welchen die mittlere Feuchte der Brennstoffzellenmembran gerade voll gesättigt ist. Des weiteren kann festgestellt werden, dass entlang dieses Grates höhere Drücke mit niedrigeren Stöchiometrien und umgekehrt kombiniert werden können und trotzdem nahezu maximale Systemleistungen erzielt werden. Zudem fällt auf, dass die Leistungsspanne zwischen dem schlechtesten Betriebspunkt und dem Optimum kaum 5 % beträgt. Es bestehen im Fall A also erhebliche Gestaltungsräume für die anderen

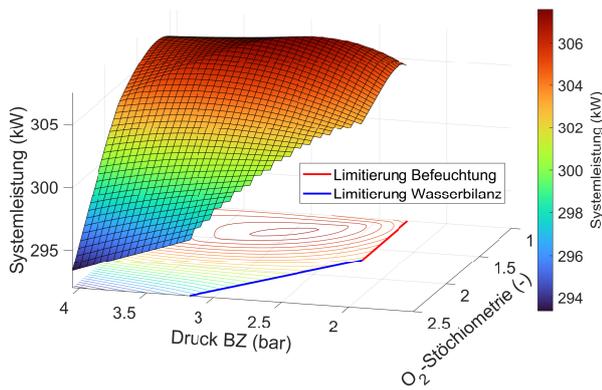


BILD 5. Visualisierung des Entwurfsraums für Fall A. Werte normiert auf einen Sauerstoffreaktionsstrom von 1 mol s^{-1} .

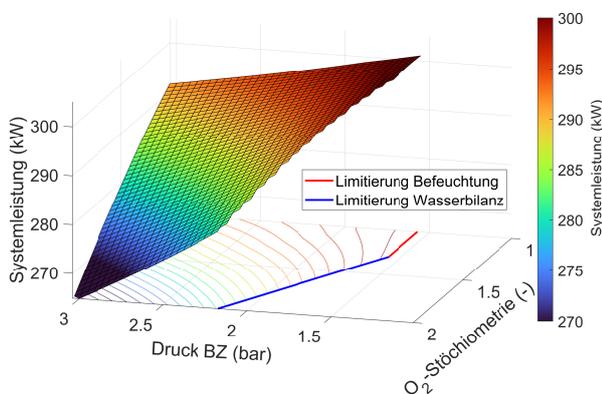


BILD 6. Visualisierung des Entwurfsraums für Fall B. Werte normiert auf einen Sauerstoffreaktionsstrom von 1 mol s^{-1} .

Elemente eines Brennstoffzellensystems. Für die nachfolgenden Optimierungen sind insbesondere die Betriebspunkte direkt an der Befeuchtungslimitierung von Bedeutung. In diesen Betriebspunkten wird die gesamte Kühlung zwischen Verdichteraustritt und Brennstoffzelle durch die Verdampfungsbefeuchtung realisiert. Ein Wärmetauscher wird nicht benötigt.

Der Entwurfsraum für Fall B in Abb. 6 stellt sich als schiefe Ebene dar. Das Leistungsmaximum findet sich im Punkt mit der geringsten Verdichterleistung bei dem niedrigst möglichen Druck und der geringst mögliche Stöchiometrie von eins. Offensichtlich überwiegt in dieser großen Flughöhe die notwendige Verdichterarbeit jegliche Vorteile der Brennstoffzellenreaktionskinetik bei höheren Drücken und Stöchiometrien. Im Fall B ist auch die Leistungsspanne zwischen dem besten und dem schlechtesten Betriebspunkt deutlich größer als noch in Fall A. Es sei angemerkt, dass die Brennstoffzelle in Fall B bei einer relativ geringen Stromdichte von $0,5 \text{ A cm}^{-2}$ betrieben wird. Bei einer größeren Stromdichte nimmt die Bedeutung der Sauerstoffkonzentration zu. In diesem Fall wäre das Leistungsmaximum bei größeren Drücken und Stöchiometrien zu finden.

5. OPTIMIERUNG IM ENTWURFSRAUM

In diesem Abschnitt wird zur Ermittlung der Betriebspunkte mit der höchsten Systemleistung ein Optimierer eingesetzt. Zur Vermeidung lokaler Optima wird ein globaler Suchalgorithmus angewendet. Abbildung 7 zeigt die maximal erzielbare Systemleistung in Abhängigkeit der Stromdichte für die Fälle A und B. Die maximal erzielbare normierte Systemleistung nimmt mit zunehmender Stromdichte ab, da die Verluste der Brennstoffzelle steigen. Ohne Normierung und bei konstanter Zellfläche würde die Systemleistung mit wachsender Stromdichte zunehmen. Ein Vergleich der beiden Fälle zeigt kleinere Systemleistungen für Fall B. Dies war zu erwarten, da in größerer Flughöhe mehr Verdichtungsarbeit aufgewendet werden muss, welche nur zum Teil in der Turbine zurückgewonnen werden kann. Der Abstand zwischen den erzielbaren Systemleistungen von Fall A und B zeigt eine interessante Abhängigkeit von der Stromdichte. Während bei einer Stromdichte von $0,5 \text{ A cm}^{-2}$ die Systemleistung von Fall B nur 7% unter der von Fall A liegt, sind es bei $2,0 \text{ A cm}^{-2}$ bereits 14%. Daraus lässt sich schließen, dass hohe Stromdichten mit zunehmender Höhe ungünstiger werden. Die ebenfalls dargestellten optimalen Brennstoffzellendrücke und Sauerstoffstöchiometrien liefern die Erklärung. Prinzipiell steigen beide Parameter mit der Stromdichte an, um den zunehmenden Konzentrationsverlusten der Brennstoffzelle bei höheren Stromdichten entgegenzuwirken. Entsprechend nimmt die Bedeutung der Verdichtungsarbeit mit der Stromdichte zu. In großer Flughöhe wirkt sich die Verdichtungsarbeit negativer aus, was zu einem stärkeren Leistungsrückgang in Fall B führt. Der vierte Graph in Abbildung 7 zeigt die optimale Befeuchtung stromauf der Brennstoffzelle. Mit zunehmender Stromdichte steigt das Verdichtungsverhältnis und damit auch die verfügbare Temperaturdifferenz für die Befeuchtung. Tatsächlich ist der Wärmestrom im Wärmetauscher bis auf zwei Ausnahmen in allen Betriebspunkten gleich null, was bedeutet, dass die gesamte Temperaturdifferenz für die Befeuchtung genutzt wird. Durch die gleichzeitig steigende Sauerstoffstöchiometrie wird die mittlere Feuchte der Brennstoffzelle bei genau 100% gehalten. Die erste Ausnahme betrifft die geringste Stromdichte im Fall A. Hier findet ein Wechsel zwischen einem lokalen und globalen Maximum im Entwurfsraum statt. Bei der geringen Stromdichte von $0,25 \text{ A cm}^{-2}$ haben die ohmschen Verluste in der Zellmembran und damit die Feuchtigkeit der Zellmembran eine kleinere Bedeutung als bei höheren Stromdichten. Das Betriebsoptimum findet sich daher bei einem niedrigeren Druck, einer höheren Sauerstoffstöchiometrie und einer nur teilweise gesättigten Zellmembran. Die Kühlung nach dem Verdichter wird hierbei nicht mittels Verdampfungsbefeuchtung, sondern durch einen Wärmetauscher realisiert. Die zweite Ausnahme ist die größte Stromdichte des Fall B. Hier ist die Zellmembran ebenfalls nicht vollständig gesättigt. Der

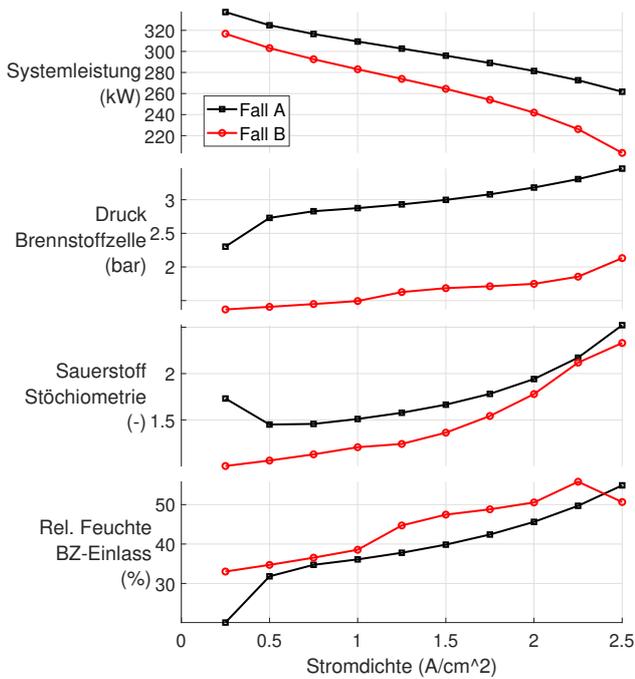


BILD 7. Maximal erzielbare Systemleistung in Abhängigkeit der Stromdichte mit korrespondierenden Betriebsparametern. Werte normiert auf einen Sauerstoffreaktionsstrom von 1 mol s^{-1} .

Grund hierfür ist, dass bei einer höheren Feuchtigkeit die Sauerstoffkonzentration abnimmt und damit die Konzentrationsverluste ansteigen. Dies kann hier nahe der Grenzstromdichte nicht durch die abnehmenden ohmschen Verluste ausgeglichen werden. Die Kühlung nach dem Verdichter wird in diesem Fall durch eine Kombination von Verdampfungsbefeuchtung und Wärmetauscher realisiert.

6. BETRACHTUNG VERSCHIEDENER SYSTEMARCHITEKTUREN

In Abschnitt 4 wurde gezeigt, dass verschiedene Kombinationen von Brennstoffzellendruck und Sauerstoffstöchiometrie nahezu optimale Systemleistungen liefern können. In Abschnitt 5 wurde ausgeführt, dass in vielen Betriebspunkten kein Wärmetauscher benötigt wird. In diesem Abschnitt soll daher untersucht werden, ob alle in Abb. 1 gezeigten Komponenten des Luftsystems zwingend notwendig sind und welche Optima mit verschiedenen Systemarchitekturen erreicht werden können. Diese Frage ist für den Systementwurf von großer Bedeutung, denn jede Komponente erhöht die Komplexität und das Gewicht des Systems. Tabelle 1 zeigt die Betriebsparameter für drei Systemarchitekturen, angewendet auf den Fall A.

Die Parameter jeder Architektur wurden mit dem zuvor beschriebenen Optimierer bestimmt. Die Architektur A1 ist das auch in Abb. 7 gezeigte globale Optimum. Ein Wärmetauscher wird hier nicht benötigt, da die Kombination aus Befeuchter und Wärmetauscher in diesem Fall keine Vorteile bietet. Wird statt des Befeuchters ein Wärmetauscher

Systemarchitektur	A1	A2	A3
Verdichter	ja	ja	ja
Turbine	ja	ja	nein
Befeuchter	ja	nein	nein
Wärmetauscher	nein	ja	ja
Druck Brennstoffzelle (bar)	2,88	3,41	2,76
Sauerstoffstöchiometrie (-)	1,51	1,23	1,00
Rel. Feuchte BZ-Einlass (%)	36	0	0
Systemleistung (kW)	309	309	288
Abwärmestrom (kW)	249	268	267

TAB 1. Vergleich verschiedener Systemarchitekturen für Fall A. Werte normiert auf einen Sauerstoffreaktionsstrom von 1 mol s^{-1} .

verwendet ergibt sich die Architektur A2. Hier sind der optimale Betriebsdruck höher und die optimale Sauerstoffstöchiometrie niedriger als bei der Architektur A1. Auf diese Weise kann trotz der fehlenden Befeuchtung eine gesättigte Zellmembran sichergestellt werden. Überraschenderweise ergibt sich nach der mathematischen Rundung die gleiche normierte Systemleistung wie für die Architektur A1. Der Grund hierfür sind die angesprochenen Kombinationen verschiedener Drücke und Stöchiometrien mit nahezu optimaler Systemleistung. Allerdings weist die Architektur A2 einen größeren Abwärmestrom auf. Dieser ergibt sich aus der Summe der Abwärme des Wärmetauschers und der Brennstoffzelle und ist ebenfalls normiert auf einen Sauerstoffreaktionsstrom von 1 mol s^{-1} . Der Grund für die größere Abwärme ist die geringere Menge verdampften Wassers. Die Kühlung von Brennstoffzellensystemen ist eine große Herausforderung. Daher ist im direkten Vergleich die Architektur A1 vorzuziehen. Allerdings hat die Architektur A2 einen größeren Flüssigwasserstrom, welcher an anderer Stelle im System genutzt werden könnte, z.B. zur Verdampfungskühlung. Die Architektur A3 entspricht der Architektur A2 ohne Turbine. Die fehlende Energierückgewinnung führt zu einer 7% geringeren Systemleistung. Das gefundene Optimum benötigt keinen Befeuchter, da dieser ohne das in der Turbine kondensierte Wasser nicht betrieben werden kann. Das Optimum erfordert allerdings auch hier eine gesättigte Zellmembran. Dies wird auf Grund der nicht zurückgewonnenen Verdichterarbeit durch eine sehr niedrige Sauerstoffstöchiometrie von eins erreicht. In der Realität werden Brennstoffzellen typischerweise mit einem Sauerstoffüberschuss betrieben. Die reale Systemleistung der Architek-

tur A3 ist daher kleiner als angegeben. Trotz der im Vergleich zu A2 geringeren Zellspannung von Architektur A3 ist deren Abwärmestrom nicht größer, da auf Grund des niedrigen Drucks mehr Wasser verdampft werden kann. Dieser Effekt wird zwar durch die geringere Stöchiometrie gedämpft, aber nicht ausgeglichen.

In Tab. 2 werden drei verschiedene Systemarchitekturen für den Fall B verglichen. Die Architektur B1 entspricht wiederum dem in Abb. 7 gezeigten globalen Optimum und benötigt ebenfalls keinen Wärmetauscher. Diese und auch die anderen beiden Architekturen für den Fall B weisen sehr kleine Sauerstoffstöchiometrien von eins auf. Der in der realen Umsetzung notwendige Sauerstoffüberschuss führt zu geringeren Systemleistungen als in Tab. 2 angegeben. Es kann jedoch festgehalten werden, dass in großen Flughöhen das Optimum bei der geringst möglichen Sauerstoffstöchiometrie zu finden ist. Der im Vergleich von B1 und A1 geringere Abwärmestrom von B1 ist auf die geringere Stromdichte des Fall B zurückzuführen. Die mittlere Feuchtigkeit der Zellmembran beträgt für B1 nur 67%, da die bei voller Sättigung geringeren ohmschen Verluste die dafür notwendige Verdichterarbeit nicht ausgleichen können. Die Architektur B2 weist anstatt des Befeuchters einen Wärmetauscher auf. Die mittlere Feuchtigkeit der Zellmembran beträgt für B2 50%. Die Systemleistung von B2 ist im Vergleich zu B1 um 1% niedriger und der Abwärmestrom ist um 18% größer. Die Architektur B3 entspricht wiederum der Architektur B2 ohne Turbine. Auf Grund der nicht zurückgewonnenen Verdichterarbeit ist in der Brennstoffzelle ein Druck von 0,96 bar optimal. Bei diesem Druck beträgt die mittlere Feuchtigkeit der Zellmembran 31%. Selbst die in allen anderen diskutierten Fällen voll gesättigte Brennstoffzellenabströmung ist nur noch zu 62% gesättigt. Offensichtlich kann auch hier eine Reduktion der ohmschen Verluste in der Zellmembran die anderen Nachteile nicht ausgleichen. Folglich ist die Systemleistung von B3 im Vergleich zu B1 um 12% geringer. Gleichzeitig ist der Abwärmestrom auf Grund der schlechteren Zellspannung und der geringeren Verdampfungskühlung um 35% größer. Der Einsatz einer Turbine verbessert also nicht nur die Systemleistung, sondern reduziert auch den Kühlbedarf des Systems.

Zusätzlich zu den beschriebenen Architekturen für die Fälle A und B wurden auch Architekturen ohne Befeuchter und ohne Wärmetauscher untersucht. In diesen Architekturen besteht keine Kühlungsmöglichkeit vor der Brennstoffzelle, sodass die Verdichteraustrittstemperatur die Brennstoffzeleintrittstemperatur nicht überschreiten darf. Dies führt zu einer starken Limitierung des Verdichterdrukverhältnisses, insbesondere für Fall B. Der Grund hierfür ist die Schichtung der Atmosphäre. Fall B ist in der Tropopause angesiedelt. Dort nimmt der Druck mit steigender Flughöhe ab, die Umgebungstemperatur jedoch nicht. Folglich weist z.B. die Architektur B1 bei einem Brennstoffzellendruck von

Architektur	B1	B2	B3
Verdichter	ja	ja	ja
Turbine	ja	ja	nein
Befeuchter	ja	nein	nein
Wärmetauscher	nein	ja	ja
Druck Brennstoffzelle (bar)	1,41	1,67	0,96
Sauerstoffstöchiometrie (-)	1,06	1,00	1,00
Rel. Feuchte BZ-Einlass (%)	35	0	0
Systemleistung (kW)	303	299	266
Abwärmestrom (kW)	172	203	232

TAB 2. Vergleich verschiedener Systemarchitekturen für Fall B. Werte normiert auf einen Sauerstoffreaktionsstrom von 1 mol s^{-1} .

1,41 bar eine Verdichteraustrittstemperatur von 565 K auf. Die niedrigere Flughöhe von Fall A befindet sich hingegen noch in der Troposphäre. Dort nehmen Umgebungsdruck und -temperatur mit der Flughöhe ab. Daher beträgt die Verdichteraustrittstemperatur von Architektur A1 trotz eines Drucks von 2,88 bar nur 458 K. Ohne Kühlungsmöglichkeit kann im Fall B daher nur ein unrealistisch kleiner Brennstoffzellendruck von 0,34 bar erreicht werden. Für Fall A konnten stabile Betriebspunkte bestimmt werden. Allerdings weisen diese niedrige Brennstoffzellendrücke, Sauerstoffstöchiometrien, Systemleistungen und sehr trockene Zellmembranen auf. Diese werden daher nicht eingehender betrachtet.

7. ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wurde der Entwurfsraum von Luftversorgungssystemen für Brennstoffzellenflugzeuge untersucht. Auf Grundlage eines analytischen Modells wurden optimale Betriebsparameter bestimmt und verschiedene Systemarchitekturen verglichen. Zwei zentrale Aspekte der Modellierung sind die möglichst exakte Berechnung der Brennstoffzellenspannung in Abhängigkeit von Druck, Temperatur, Sauerstoffstöchiometrie und Feuchtigkeit, sowie die Berücksichtigung der Kondensation in der Turbine. Als wichtigste Freiheitsgrade konnten die Wahl des Verdichtungsverhältnisses, der Sauerstoffstöchiometrie der Brennstoffzellenreaktion und der Befeuchtung stromauf der Brennstoffzelle identifiziert werden. Die wesentlichen Limitierungen des Entwurfsraums sind die Wasserbilanzen von Brennstoffzelle und System, sowie die maximal mögliche Befeuchtung. Im Rahmen der Arbeit wurden zwei Anwendungsfälle

betrachtet, ein Passagierflugzeug auf 7 km Flughöhe und ein unbemanntes Flugzeug für Telekommunikationsdienste auf 18 km Flughöhe. In beiden Fällen sind die optimalen Betriebsparameter abhängig von der Stromdichte. Je größer die Stromdichte, desto größer sind der optimale Druck, die optimale Sauerstoffstöchiometrie und die optimale Befeuchtung stromauf der Brennstoffzelle. Ein Vergleich der beiden Anwendungsfälle zeigte, dass in größerer Höhe niedrigere Drücke und Sauerstoffstöchiometrien optimal sind. Außerdem gilt, dass in größeren Flughöhen höhere Stromdichten zu größeren Verlusten führen als in niedrigeren Flughöhen. Der Grund hierfür ist die höhere notwendige Verdichterarbeit. Nahezu alle Optima finden sich zudem in Betriebspunkten mit einer gesättigten Zellmembran. Ein Vergleich verschiedener Systemarchitekturen zeigte, dass zwei klar abgegrenzte Optima existieren. Im ersten wird nur ein Verdampfungsbefeuchter und kein Wärmetauscher benötigt, im zweiten ist dies umgekehrt. Während beide Optima die gleiche Leistung erzielen können, benötigt das zweite Optimum einen größeren Kühlaufwand. Der Grund hierfür ist, dass im ersten Optimum mehr Wasser verdampft wird. Außerdem wurde festgestellt, dass Turbinen von grundlegender Bedeutung für den Wasserhaushalt und die Effizienz des Systems sind.

In dieser Arbeit wurden die beschriebenen Phänomene mit analytischen Modellen untersucht. Diese können viele Aspekte nicht abbilden. Insbesondere Brennstoffzellenbetriebspunkte mit niedriger Sauerstoffstöchiometrie und trockener Zellmembran müssen in einem nächsten Schritt genauer modelliert werden. Aufbauend auf den hier präsentierten Ergebnissen sollte auch das Off-Design-Verhalten aller Komponenten berücksichtigt werden. Schließlich müssen die Erkenntnisse noch durch Experimente und höherwertige numerische Berechnungen bestätigt werden. Zudem gibt es möglicherweise noch vorteilhaftere Systemarchitekturen. Zum Beispiel verspricht eine Aufheizung der Turbinenzuluft eine Steigerung der Turbinenleistung. Mögliche Ansätze hierfür sind eine Verbrennung von Wasserstoff stromauf der Turbine oder ein Wärmeübergang von Verdichterabluft zu Turbinenzuluft.

Kontaktadresse:

t.wittmann@ifas.tu-braunschweig.de

Literatur

- [1] Benjamin Blunier and Abdellatif Miraoui. Proton exchange membrane fuel cell air management in automotive applications. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 7(4):727, 2010. DOI: [10.1115/1.4000627](https://doi.org/10.1115/1.4000627).
- [2] Stefano Campanari, Giampaolo Manzolini, Andrea Beretti, and Uwe Wollrab. Performance assessment of turbocharged pem fuel cell systems for civil aircraft onboard power production. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 130(2):239, 2008. DOI: [10.1115/1.2772636](https://doi.org/10.1115/1.2772636).
- [3] D. Guida and M. Minutillo. Design methodology for a pem fuel cell power system in a more electrical aircraft. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 192:446–456, 2017. DOI: [10.1016/j.apenergy.2016.10.090](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.090).
- [4] Thomas Kadyk, Christopher Winnefeld, Richard Hanke-Rauschenbach, and Ulrike Krewer. Analysis and design of fuel cell systems for aviation. *Energies*, 11(2):375, 2018. DOI: [10.3390/en11020375](https://doi.org/10.3390/en11020375).
- [5] M. Schröder, F. Becker, J. Kallo, and C. Gentner. Optimal operating conditions of pem fuel cells in commercial aircraft. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(66):33218–33240, 2021. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2021.07.099](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.099).
- [6] Mohammad J. Salehpour, Omid Zarenia, Seyyed Mohammad Hosseini Rostami, Jin Wang, and Se-Jung Lim. Convex multi-objective optimization for a hybrid fuel cell power system of more electric aircraft. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 30(7):1, 2020. DOI: [10.1002/2050-7038.12427](https://doi.org/10.1002/2050-7038.12427).
- [7] Mehran Bahari, Majid Rostami, Ashkan Entezari, Sheida Ghahremani, and Melika Etminan. Performance evaluation and multi-objective optimization of a novel uav propulsion system based on pem fuel cell. *Fuel*, 311:122554, 2022. DOI: [10.1016/j.fuel.2021.122554](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122554).
- [8] Claudia Werner, Lucas Busemeyer, and Josef Kallo. The impact of operating parameters and system architecture on the water management of a multifunctional pemfc system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(35):11595–11603, 2015. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2015.02.012](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.02.012).
- [9] Dietmar Filsinger, Gen Kuwata, and Nobuyuki Ikeya. Tailored centrifugal turbomachinery for electric fuel cell turbocharger. *International Journal of Rotating Machinery*, 2021(1):1–14, 2021. DOI: [10.1155/2021/3972387](https://doi.org/10.1155/2021/3972387).
- [10] Tim Wittmann, Sebastian Lück, Tim Hertwig, and Jens Friedrichs. On the importance of condensation for the thermodynamic cycle of fuel cell turbochargers in aviation. In *Proceedings of the ISABE Conference 2022 (in Print)*. International Society of Air Breathing Engines, 2022.
- [11] Tim Wittmann, Sebastian Lück, Christoph Bode, and Jens Friedrichs. Modelling the condensation phenomena within the radial turbine of a fuel cell turbocharger. *International Journal of Turbo-machinery, Propulsion and Power*, 6(3):23, 2021. DOI: [10.3390/ijtpp6030023](https://doi.org/10.3390/ijtpp6030023).

- [12] Tim Wittmann, Sebastian Lück, Tim Hertwig, Christoph Bode, and Jens Friedrichs. The influence of condensation on the performance map of a fuel cell turbocharger turbine. In *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2021*. American Society of Mechanical Engineers, 2021. DOI: [10.1115/GT2021-58472](https://doi.org/10.1115/GT2021-58472).
- [13] Sebastian Lück, Tim Wittmann, Jan Göing, Christoph Bode, and Jens Friedrichs. Impact of condensation on the system performance of a fuel cell turbocharger. *Machines*, 10(1):59, 2022. DOI: [10.3390/machines10010059](https://doi.org/10.3390/machines10010059).
- [14] *Pilot Operating Handbook Beechcraft 1900D*. Raytheon Aircraft Company, 2006.
- [15] *High Altitude Platform Stations (HAPS): A Future Key Element of Broadband Infrastructure: White Paper*. Leichtwerk AG, 2021.
- [16] Ryan O'Hayre, Suk-Won Cha, Whitney G. Colella, and Fritz B. Prinz. *Fuel cell fundamentals*. John Wiley & Sons Incorporated and John Wiley & Sons, Somerset and Hoboken, NJ, 2006. ISBN: 9781119114208.
- [17] Thomas F. Fuller and John Naim Harb. *Electrochemical engineering*. Wiley, Hoboken, 2018. ISBN: 978-1-119-00425-7.
- [18] Ryan James Balliet. *Modeling Cold Start in a Polymer-Electrolyte Fuel Cell*. University of California, Berkeley, 2010.
- [19] *Technology Assessment of a Fuel Cell Vehicle: 2017 Toyota Mirai: Report ANL/ESD-18/12*. Argonne National Laboratory, 2018.
- [20] I. Roumeliotis and K. Mathioudakis. Analysis of moisture condensation during air expansion in turbines. *International Journal of Refrigeration*, 29(7):1092–1099, 2006. DOI: [10.1016/j.ijrefrig.2006.03.001](https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2006.03.001).