



Deutsches Zentrum
DLR für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft



UNIVERSITÄT STUTT GART
INSTITUT FÜR THERMODYNAMIK UND WÄRMETECHNIK
Kommissarischer Leiter: apl. Prof. Dr.-Ing. K. Spindler

Untersuchung möglicher Kopplungsvarianten von Brennstoffzellensystemen für Luftfahrtanwendungen

vorgelegt von

cand. mach. Daniel Auer

Matrikelnummer: 2416058

Diplomarbeit

Nr. 2013-13

im Studiengang Maschinenwesen an der
Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität
Stuttgart

Stuttgart, den 19.12.2013

Betreuer : M. Sc. Gerhard Schuller

Prüfer: Prof. Dr. rer. nat. K. Andreas Friedrich

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Diplomarbeit mit dem Thema „Untersuchung möglicher Kopplungsvarianten von Brennstoffzellensystemen für Luftfahrtanwendungen“ ohne unzulässige fremde Hilfe selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben.

Stuttgart, den 19. Dezember 2013

Daniel Auer

Danksagung

Die vorliegende Diplomarbeit wurde von Juni bis Dezember 2013 im Institut für Technische Thermodynamik am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in Stuttgart angefertigt.

Mein Dank gilt an dieser Stelle Herrn Prof. Dr. Ing. Klaus Spindler und Herrn Prof. Dr. rer. nat. K. Andreas Friedrich für die Möglichkeit, diese Arbeit zu verfassen.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinem Betreuer M. Sc. Gerhard Schuller für seine ausgezeichnete Betreuung und fachliche Unterstützung bedanken.

Ein nicht weniger großer Dank gilt Herrn Oliver Thalau, der mich während der experimentellen Phase meiner Arbeit sehr unterstützt hat.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Thomas Stephan und Herrn Felix Mletzko, die mich während meiner Arbeit mit Rat und Tat unterstützt haben, sowie bei allen Kolleginnen und Kollegen für die schöne Zeit am DLR.

Kurzfassung

Untersuchung möglicher Kopplungsvarianten von Brennstoffzellensystemen für Luftfahrtanwendungen

Um die Stromversorgung an Bord von Passagierflugzeugen effizienter zu machen, wird derzeit am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt der Einsatz von PEM-Brennstoffzellensystemen als APU (Auxiliary Power Unit) untersucht. Diese können mit einem hohen Wirkungsgrad Strom erzeugen und produzieren als Nebenprodukte sauerstoffabgereicherte Luft und Wasser. Um das Risiko eines Brandes in den Treibstofftanks zu minimieren, kann die sauerstoffabgereicherte Luft dort als Inertgas verwendet werden.

Um die Strom- und Inertgasproduktion für die Anwendung in der Luftfahrt weiter zu optimieren, wurden im Rahmen dieser Diplomarbeit Modifikationen und Kopplungsvarianten von kommerziell erhältlichen Brennstoffzellensystemen untersucht. Dazu wurden mehrere Modifikationen und Kopplungsvarianten erarbeitet und mittels eines Steady-State Simulationsmodells im Programm EES hinsichtlich unterschiedlicher Zielgrößen bewertet. Im Fokus stand, neben der Strom- und Inertgasproduktion, auch die mögliche Betriebsflexibilität der Brennstoffzellensysteme. Im Anschluss an die theoretische Betrachtung wurden einzelne Kopplungsvarianten an einem dafür errichteten Teststand überprüft. Abgeleitet aus Richtlinien der FAA zur Treibstofftanksicherheit wurden als Zielwerte der Inertgasparameter für die Sauerstoffkonzentration mit 11 % Vol. und der Inertgasmassenstrom mit 12,5 g/s festgelegt.

Zu Beginn wurden die Reduktion des stöchiometrischen Verhältnisses und die Absenkung der Sauerstoffkonzentration am Kathodeneingang durch eine Kathodengasrezirkulation betrachtet. Des Weiteren wurde die serielle Kopplung der Kathoden von zwei Brennstoffzellensystemen gleicher Art untersucht. Hierbei wurden mehrere Kopplungsmöglichkeiten zur Optimierung der Zielgrößen erarbeitet. In den theoretischen Betrachtungen konnten alle untersuchten Modifikationen und Kopplungsvarianten die Zielwerte erreichen. Hier zeigte sich, dass die modifizierten Einzelsysteme den, unter Einhaltung der Zielwerte, größtmöglichen Betriebsbereich aufweisen. Die experimentellen Untersuchungen konnten die theoretischen Ergebnisse qualitativ bestätigen. Weiter zeigten die Experimente, dass durch Modifizierung bzw. Kopplung der Brennstoffzellensysteme die elektrische Ausgangsleistung beeinträchtigt wird.

Abstract

Investigation of possible coupling types of fuel cell systems for aerospace applications

To make the power supply on board of passenger planes more efficient the use of PEM fuel cell systems as an APU (Auxiliary Power Unit) is currently being investigated at the German aeronautics and space research center (DLR). They effectively produce electricity and their byproducts are oxygen-depleted air and water. The oxygen-depleted air can be used as inert gas in the fuel tanks to minimize the risk of fire.

In order to optimize the production of electricity and inert gas for use in the aviation industry, modifications and coupling variants of commercially available fuel cell systems have been tested in this thesis. For this purpose several modifications and coupling variants have been developed and evaluated by means of a steady-state simulation model in the EES program with regard to different target figures. Here, the focus was not only placed on the production of electricity and inert gas but also on the possible operational flexibility of the fuel cell systems. Following the theoretical investigation individual coupling types were tested on a purpose-built test stand. In conformity with the directives of the FAA (Federal Aviation Administration) for the safety of fuel tanks the target figures of the inert gas parameters were set to 11% Vol (oxygen concentration) and 12,5 g/s (mass flow).

At first, the reduction of the stoichiometric ratio and of the oxygen concentration at the cathode inlet, induced by a cathode gas recirculation, were considered. Then, the serial coupling of the cathodes of two identical fuel cell systems was tested. In doing so, several coupling possibilities have been developed which optimized the target figures. In the theoretical investigations all tested modifications and coupling variants were able to reach the target values. Here, it could be seen that, in compliance with the target figures, the modified individual systems showed the greatest possible operating range. The experimental studies could confirm the theoretical results qualitatively. Furthermore, the experiments have shown that the electrical output power is affected by the modification or the coupling of the fuel cell systems.

10 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde die Optimierung der Inertgasproduktion durch multifunktionale Brennstoffzellensysteme (BZS) für die Inertisierung von Treibstofftanks in Passagierflugzeugen untersucht. Dazu wurden Modifikationen und verfahrenstechnische Kopplungsvarianten von Brennstoffzellensystemen erarbeitet und mittels eines, in EES aufgebauten Systemmodells untersucht und bewertet. Anschließend wurden ausgewählte Kopplungsvarianten an einem dafür errichteten Teststand überprüft. Als Brennstoffzellensystem diente das kommerziell erhältliche HyPM XR 12 von Hydrogenics. Die Zielwerte der Inertgasparameter wurden für die Sauerstoffkonzentration auf 11 % Vol. und für den Massenstrom auf 12,5 g/s festgelegt.

Die erste Betrachtung galt dem einzelnen Brennstoffzellensystem. Hier zeigte sich, dass dieses den Zielwert der Sauerstoffkonzentration unter Beibehaltung der Werkseinstellungen nicht erreichen kann.

Als erster Ansatz wurde die Reduktion des stöchiometrischen Verhältnisses betrachtet. Hierfür wurde in die Systemsteuerung des BZS eingegriffen und dieses schrittweise herabgesetzt. Um den Zielwert der Sauerstoffkonzentration zu erreichen, gibt die Betrachtung über das Systemmodell ein stöchiometrisches Verhältnis von $\lambda = 1,879$ vor. Dies konnte durch die experimentelle Untersuchung nicht bestätigt werden. Hier zeigte sich, dass das reale BZS zu dem eingestellten stöchiometrischen Verhältnis einen zusätzlichen Aufschlag hinzufügt. Damit konnte die Zielkonzentration erst mit einem eingestellten stöchiometrischen Verhältnis von $\lambda = 1,6$ erreicht und unterschritten werden. Der Zielwert des Inertgasmassenstromes konnte mit diesem stöchiometrischen Verhältnis experimentell ebenfalls nicht erreicht werden. Weiter zeigte die experimentelle Betrachtung, dass die Stackspannung mit dem reduzierten stöchiometrischen Verhältnis um bis zu 5 % gegenüber dem Betrieb mit den von Hydrogenics vorgesehenen stöchiometrischen Verhältnissen verringert wurde. Die Zielwerte könnten bei reduziertem stöchiometrischem Verhältnis mit zwei einzelnen BZS erreicht werden. Dabei müsste aber ein Verlust der ursprünglichen Nennleistung um ca. 5 % in Kauf genommen werden. Der Vorteil dieser Variante ist die, bei konstantem stöchiometrischem Verhältnis, konstante Sauerstoffkonzentration am Kathodenausgang über den Betriebsbereich. Dadurch wird der mögliche Betriebsbereich, in dem die Zielwerte erfüllt sind, nur durch den Massenstrom begrenzt.

Ein weiterer Ansatz am einzelnen BZS galt der Reduzierung der Sauerstoffkonzentration am Kathodeneingang durch eine Kathodengasrezirkulation. Dabei wurden die Werkseinstellungen beibehalten. Durch die teilweise Rückführung der sauerstoffreduzierten Kathodenabluft kann die Eingangskonzentration soweit gesenkt werden, dass die Zielkonzentration am Kathodenausgang erreicht wird. Hier zeigte sich, dass das ursprünglich vorgesehene stöchiometrische Verhältnis herabgesetzt wird. Über die im Steuermodul hinterlegten stöchiometrischen Verhältnisse wird der dafür notwendige Luftmassenstrom am Kathodeneingang berechnet. Dabei wird von einem Sauerstoffgehalt von 20,9 % Vol. (Umgebungsbedingungen) ausgegangen. Änderungen der Sauerstoffkonzentration am Kathodeneingang werden hier nicht mehr erfasst und der Luftmassenstrom für Umgebungsbedingungen beibehalten. Im Systemmodell konnte die Zielkonzentration mit dieser Systemmodifikation über den gesamten Betriebsbereich und der Zielmassenstrom bei einem Laststrom von $I_{BZS} = 320 \text{ A}$ erreicht werden. Diese Systemmodifikation konnte aufgrund der dafür nicht vorhandenen Mess- und Regelungstechnik nicht umgesetzt werden. Hierbei würde der im vorangegangenen Abschnitt erwähnte systeminterne Aufschlag keine Auswirkungen auf die Zielgrößen mit sich bringen. Der mit dem Aufschlag verbundene erhöhte Luftmassenstrom und die erhöhte Sauerstoffkonzentration am Kathodenausgang würden dabei zu einem erhöhten Rezirkulationsmassenstrom führen. Dadurch kann die Zielkonzentration auch bei einer Erhöhung des Kathodenluftmassenstromes erreicht werden. Ein großer Nachteil dieser Systemmodifikation besteht im Hydromanagement. Bei der Rückführung der Kathodenabluft muss die in der Kathodenabluft befindliche Feuchtigkeit vorher reduziert werden. Ohne diese Feuchtigkeitsreduzierung kann eine Überflutung der Brennstoffzelle und damit eine Degradation bzw. ein Ausfall derselben eintreten. Es ist auch davon auszugehen, dass durch die reduzierte Sauerstoffkonzentration am Kathodeneingang hier ebenfalls eine Verminderung der elektrischen Ausgangsleistung stattfindet. Wie auch bei der Modifikation mit der Lambdareduzierung wird hier die Zielkonzentration über den gesamten Betriebsbereich erreicht, welcher nur durch den Inertgasmassenstrom begrenzt wird.

Eine weitere Form der Reduzierung der Sauerstoffkonzentration am Kathodeneingang stellt die kathodenseitige serielle Kopplung von zwei Brennstoffzellen dar. Hier wird die durch das erste BZS sauerstoffreduzierte Kathodenabluft dem Kathodeneingang eines zweiten BZS zugeführt. Bei der direkten seriellen Kopplung (DSK) entsteht in der Verbindung der Kathoden kein Austausch von Stoffströmen mit der Umgebung. Dabei hat

das nachgeschaltete zweite BZS nur die Kathodenabluft des ersten BZS zur Verfügung. Daraus zeigte sich eine direkte Abhängigkeit des Betriebspunktes des zweiten BZS vom Betriebspunkt des ersten BZS. Durch diese Abhängigkeit der Betriebspunkte ergeben sich deutliche Einschränkungen in der Flexibilität der beiden BZS untereinander. Mit dieser Kopplungsvariante kann die Zielkonzentration schon bei niedriger Auslastung beider Systeme erreicht werden. Um die Abhängigkeit der Betriebspunkte der BZS aufzuheben, wurde die Luftzuführung bzw. die Kathodenabgasabführung in der Kathodenverbindung zwischen den beiden BZS betrachtet. Der durch das so genannte Airmix (Am) zu- bzw. abgeführte Stoffstrom zwischen den Kathoden der beiden BZS erlaubt eine unabhängige Variierung der Betriebspunkte der beiden BZS. Dadurch entsteht ein Betriebsfeld. Hierbei kann die Zielkonzentration ebenfalls schon bei geringen Lasten erreicht und bei höheren Lasten deutlich unterschritten werden. Durch die Flexibilität der BZS in der Kopplungsvariante DSK + Am kann gegenüber der DSK bei gleicher Gesamtlast ein Betriebspunkt mit einem höheren stöchiometrischen Verhältnis beider BZS gewählt werden. Der Inertgasmassenstrom ist bei den Kopplungsvarianten DSK und DSK + Am allein von dem Betriebspunkt des nachgeschalteten zweiten BZS abhängig und reduziert das mögliche Betriebsfeld auf hohe Lastströme des zweiten BZS. Im Versuch konnte die Unterschreitung der Zielkonzentration in einem großen Teil des Betriebsfeldes bestätigt werden. Dabei zeigte sich jedoch, dass bei höherer Auslastung beider BZS die Stackspannung des zweiten BZS zum einen deutlich reduziert wurde und zum anderen einen instabilen Verlauf annahm. Bei weiter ansteigender Last zeigte sich eine selbständige Abschaltung des zweiten BZS. Sowohl der instabile Verlauf der Stackspannung als auch der Systemabbruch wurde auf den Betrieb mit sauerstoffreduzierter Luft zurückgeführt. Weiter zeigte sich, dass die erhöhte Luftfeuchtigkeit am Kathodeneingang des zweiten BZS eine starke Auswirkung auf den Massenströmsensor hatte. Dieser als Hitzdrahtanemometer ausgelegte Sensor detektiert den erhöhten Wassergehalt der Zuluft als erhöhten Luftmassenstrom. Dadurch wurde vom Steuermodul die Verdichterleistung nach unten korrigiert wodurch der Luftmassenstrom reduziert wurde. Für die Erhöhung des Inertgasmassenstromes wurde anschließend die weitere Zuführung von Umgebungsluft zum Inertgasmassenstrom betrachtet. In denjenigen Betriebsbereichen, in denen die Zielkonzentration unterschritten wird, wird durch das so genannte Airplus (Ap) Umgebungsluft zugeführt. Es wird diejenige Menge zugeführt, die benötigt wird, um die Zielkonzentration zu erreichen. Dadurch kann der Inertgasmassenstrom in weiten Teilen des Betriebsfeldes deutlich erhöht werden. Mit dem zusätzlichen Airplus konnte der

mögliche Betriebsbereich der DSK + Am annähernd verdoppelt werden. Das Airplus stellte dabei lediglich eine berechnete Größe dar. Der experimentelle Nachweis wurde aufgrund der dafür benötigten Mess- und Regelungstechnik nicht durchgeführt.

Für eine weitere Optimierung des Inertgasmassenstromes wurde ein Bypass (Bp) um das zweite BZS geführt. Hierbei wird die überschüssige, schon sauerstoffreduzierte Kathodenabluft des ersten BZS direkt der Kathodenabluft des zweiten BZS zugeführt. Dadurch konnte eine Erweiterung des möglichen Betriebsbereiches zu niedrigeren Lastströmen des zweiten BZS gezeigt werden. Weiter zeigte sich, dass dadurch die Zielkonzentration weiterhin unterschritten werden kann. Dies konnte im Versuch bestätigt werden. Hierbei ergaben sich Abweichungen zum Simulationsmodell durch den oben bereits erwähnten Aufschlag des ersten BZS und durch die Fehlmessung des Massenstromsensors des zweiten BZS, hervorgerufen durch erhöhte Luftfeuchtigkeit.

Mit der Kombination aus Bypass und Airplus konnte der Inertgasmassenstrom nochmals erhöht werden. Der mögliche Betriebsbereich umfasst dann annähernd die Hälfte des gesamten Betriebsfeldes. Das Airplus stellte hier wieder eine rein berechnete Größe dar. Für den Vergleich der gemessenen Werte von der DSK + Am und der DSK + BP wurde bei beiden das Airplus hinzugerechnet. Daraus hat sich gezeigt, dass die Variante mit Bypass in dem für ihn relevanten Betriebsbereich einen höheren Inertgasmassenstrom erreichen kann.

Es wurde gezeigt, dass die Zielwerte mit jeder betrachteten Kopplungsvariante erreicht werden können. Für den Vergleich der Kopplungsvarianten wurde im Falle der einzelnen BZS dabei von einem parallelen Betrieb von zwei einzelnen BZS ausgegangen. Der Unterschied zwischen den Kopplungsvarianten bzw. Modifikationen besteht in der Ausdehnung des unter Einhaltung der Zielwerte möglichen Betriebsbereiches. Im direkten Vergleich der mit dem Systemmodell berechneten Ergebnisse stellt der parallele Betrieb von zwei einzelnen BZS mit reduziertem stöchiometrischen Verhältnis diejenige Variante mit dem größtmöglichen Betriebsbereich dar (vgl. Abbildung 5.12 Kap. 5.3). Gleichauf liegt die Modifikation mit Kathodengasrezirkulation. Unter den Kopplungsvarianten mit seriell verbundenen Kathoden zeigt eindeutig die DSK + Bp + Ap den größtmöglichen Betriebsbereich auf. Dieser liegt jedoch deutlich unterhalb der modifizierten einzelnen BZS.

Für die Bewertung der einzelnen Kopplungsvarianten und Modifikationen wurde der Kopplungswirkungsgrad eingeführt. Dieser berücksichtigt die Ausdehnung des möglichen Betriebsbereiches im Verhältnis zum gesamten Betriebsfeld. Weiter wird darin noch das Verhältnis zwischen dem möglichen Gesamtlaststrom beider BZS und des geringsten Laststromes bei Erreichen der Zielwerte mit berücksichtigt.

Daraus zeigt sich, dass die einzelnen BZS mit reduziertem stöchiometrischem Verhältnis und mit Kathodengasrezirkulation im Parallelbetrieb mit 31 % den mit Abstand höchsten Kopplungswirkungsgrad besitzen. Unter den Kopplungsvarianten mit seriell verbundenen Kathoden weist die DSK + Bp + Ap den mit 22,2 % höchsten Kopplungswirkungsgrad auf.

Die Stromversorgung der Bordelektronik bei gleichzeitiger Inertisierung der Treibstofftanks kann, unter Berücksichtigung der untersuchten Parameter, mit den modifizierten einzelnen Systemen am effizientesten durchgeführt werden. Mit Hinblick auf die Umsetzbarkeit stellt die Variante mit einem reduzierten stöchiometrischen Verhältnis die einfachste Methode dar. Hierbei müssen lediglich die werksseitigen Einstellungen in der Systemsteuerung geändert werden. Für die Variante mit Kathodengasrezirkulation müssen zusätzliche Leitungen und Regelventile eingesetzt werden. Dadurch entsteht ein wirtschaftlicher Mehraufwand für dasselbe Resultat wie bei der Variante mit reduziertem stöchiometrischem Verhältnis.

Die theoretischen und teils experimentellen Betrachtungen haben dennoch weitere Fragen aufgeworfen. Der Einfluss von sauerstoffreduzierter Luft auf die Leistung von Brennstoffzellensystemen sollte in weiteren Untersuchungen genauer untersucht werden. Des Weiteren sollte der Einfluss der Modifikationen auf die elektrische Dynamik getestet werden. Eine unzureichend schnelle Laständerung kann dabei ein Ausschlusskriterium einer Kopplungsvariante bzw. Modifikation sein.

11 Literaturverzeichnis

- [1] Luftfahrtcluster Metropolregion Hamburg e.V.:
Hintergrundinformation: Spitzencluster Leuchtturmprojekt Nr. 1,
Kabinentechnologie und multifunktionale Brennstoffzelle
Hamburg Aviation, Hamburg, 2012
- [2] Bräunling, W.:
Flugzeugtriebwerke 2, 2. Aufl., Springer Verlag, Hamburg, 2004
- [3] Federal Aviation Administration (FAA):
FUEL TANK FLAMMABILITY REDUCTION MEANS
Advisory Circular AC No. 25.981-2A (2008), p. 28
- [4] Kurzweil, P.:
Brennstoffzellentechnik, 1. Aufl., Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 2003
- [5] Eichlseder, H., Klell, M.:
Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik, 1. Aufl., Vieweg + Teubner Verlag,
Wiesbaden, 2008
- [6] Friedrich, K. A.:
Brennstoffzellentechnik 1, Manuskript zur Vorlesung, Universität Stuttgart, 2010
- [7] Hydrogenics Corporation:
HyPM XR 12 INSTALLATION AND OPERATION MANUAL, Version 1.0
- [8] Kaiser, R.:
Bipolarplatten für Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen aus thermisch und
elektrisch hochleitfähigen thermoplastischen Kunststoffen
Logos Verlag Berlin GmbH, Berlin, 2008
- [9] Heinzl, A., Mahlendorf, F., Roes, J.:
Brennstoffzellen Entwicklung, Technologie und Anwendung, 3. Aufl., Müller C.F.,
Duisburg, 2006
- [10] Berger, O.:
Thermodynamische Analyse eines Brennstoffzellensystems zum Antrieb von
Kraftfahrzeugen
Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2009
- [11] Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW):
Betrieb eines Batterie-Brennstoffzellen-Hybridsystems, Praktikums Unterlagen,
Universität Stuttgart, 2011

- [12] Söhn, M.:
Kohlenstoff-Nanoröhrchen als Elektrodenmaterial für PEM-Brennstoffzellen
TU Darmstadt, Dissertation, 2010
- [13] Lamm, A.:
PEM-BZ-Systeme für den Mobilen Einsatz
Präsentation Daimler Chrysler, Universität Stuttgart, 2003
- [14] Larminie, J., Dicks, A.:
Fuel Cell Systems Explained, 2nd Edition, Jhon Wiley & Sons, 2003
- [15] F-Chart:
EES Manual, v.4/7.01
- [16] ALBHORN:
Datenblatt ALMEMO Universalmessgerät 2890-9
- [17] ALBHORN:
Datenblatt Druckaufnehmer FDA 602 LxAK
- [18] ALBHORN:
Datenblatt Pt100 Temperaturfühler FPA 414
- [19] ALBHORN:
Datenblatt ELMEMO D6 Präzisionsfühler für Feuchte FHAD 36 Rx
- [20] J. D. ELECTRONIC:
Betriebsanleitung Sauerstoffmesssystem MF0-O-LC
- [21] Zentrum für Brennstoffzellentechnik gGmbH:
Systematische Untersuchung des Einflusses von Stromwelligkeit im hoch-
und niederfrequenten Bereich auf Polymer-Elektrolyt-Membrane in
Niedertemperatur-Brennstoffzellen
Abschlussbericht, Duisburg, 2010
- [22] Höntsch GmbH:
Vortex-Strömungssensoren VA DI Betriebsanleitung
- [23] TowiTek:
Differenztemperatursteuermodul Bedienungsanleitung