
Vorwort

Brennstoffzellen sind besonders effiziente und saubere Energiewandler. Sie haben deshalb breiten Eingang in verschiedene Forschungs- und Entwicklungsarbeiten weltweit für stationäre und mobile Anwendungen gefunden. Anfang der 1990er Jahre erlebte die Entwicklung von Brennstoffzellenantriebssystemen – zunächst auf Basis von Methanol als Energieträger, zwischenzeitlich mit den Kraftstoffen Benzin und Diesel und bis heute mit Wasserstoff als Kraftstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge einen neuen Aufschwung. In diesem Jahrzehnt werden nach 25-jährigen Forschungs- und Entwicklungsarbeit die ersten Fahrzeuge mit einer Brennstoffzelle im Antriebsstrang zu kaufen sein. Dabei stellen die Kostenziele dieser Technik noch immer eine Herausforderung dar.

Neben der mobilen Anwendung wurden in den vergangenen Jahren auch Kleinsysteme zur Strom- und Wärmeversorgung in Häusern, dezentrale Blockheizkraftwerke, Notstromaggregate und Systeme zur Bordstromversorgung in LkW, Schiffs- und Flugzeuganwendungen in Betracht gezogen. Speziell in Nischenmärkten werden immer wieder neue Anwendungsmöglichkeiten für Brennstoffzellensysteme identifiziert. Häufig werden die dafür notwendigen Entwicklungsarbeiten u. a. aus Kostengründen vorzeitig beendet. Bisher haben es in diesen Nischen nur Brennstoffzellen als Bordstromaggregate in Raumfahrzeugen, als Element einer Antriebseinheit in U-Booten oder zur Stromversorgung im Freizeitbereich in Form von Direktmethanol-Brennstoffzellen mit 40–100 W_e in den Markt geschafft.

Im Luftfahrtbereich starteten erste Aktivitäten 2000 mit generellen Überlegungen und Studien. Es folgten zahlreiche Projektaktivitäten, die sich im Wesentlichen mit drei verschiedenen Brennstoffzellentypen, den unterschiedlichen Energieträgern Wasserstoff und Kerosin sowie einer Reihe von Anwendungen im Flugzeug beschäftigt haben. Bekannte Verbundvorhaben, an denen sich das Forschungszentrum Jülich und die jetzige Airbus Operation GmbH beteiligten, oder die sie führten, waren *APAWAGS*, *ELFA*, *ELBASYS* und *EFFESYS*. Das Verbundvorhaben *APAWAGS* beinhaltete Aktivitäten zur Wasseraufbereitung und Nutzung im Flugzeug sowie Reformerentwicklungen für SOFC und PEFC mit einer entsprechenden CO-Membranreinigung. Die Arbeiten im Teilprojekt *BREZEN* unter dem Verbund *ELFA* hatte bereits die HT-PEFC mit der Entwicklung von kompakten Brenngaserzeugungseinheiten im Fokus. Im Verbund *ELBASYS* wurden verschiedene zunächst eher randständige Themen wie die Kerosinentschwefelung, die katalytische Ver-

brennung und die Systemauslegung im Teilprojekt *BATI* zusammengefasst. Der Verbund *EFFESYS* beinhaltete ein Teilprojekt *BRINKS*, welches sich schwerpunktmäßig mit der Reformierung von BTL-Kerosin, der HT-PEFC Stackentwicklung und der Entwicklung von 5 kW_e-Systemen beschäftigte. Zudem wurde für den autothermen Reformer und den Wasser-Gas-Shift Reaktor, zwei Kernkomponenten der Brenngaserzeugung, die Hochskalierung von 28 kW_{th} (10 kW_e) auf 140 kW_{th} (50 kW_e) erfolgreich demonstriert.

Nach 15 Jahren intensiver und in weiten Bereichen erfolgreicher Forschungs- und Entwicklungsarbeit soll mit diesem Fachbuch über den Zwischenstand der Brennstoffzellen in luftfahrttechnischen Anwendungen berichtet werden. Es wurde eine Fülle von technischen Daten errechnet, bewertet, für Auslegungen und Konstruktionen verwendet oder auch wieder verworfen. Es wurden zahlreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt, die enormes Wissen über Brennstoffzellen und die benötigten Systemkomponenten hervorgebracht haben. Die oben beschriebenen Projekte zeichnen dabei eine nicht immer gerade Entwicklungslinie auf, die auch neben den Erfolgen durch äußere Umstände und Rückschläge geprägt ist. Als Fazit kann an dieser Stelle angeführt werden, dass Energieforschung längeren Zeitskalen folgt und eine enorme Beharrlichkeit bei der Verfolgung von innovativen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten von Nöten ist. Die an diesem Buchprojekt beteiligten Firmen haben dies in der Vergangenheit bewiesen und werden dies auch in Zukunft tun. Dies mag in der Zukunft wohlmöglich auch den einen oder anderen Richtungswechsel mit sich bringen.

Dieses Buch ist mehr als eine Ansammlung von Ergebnissen aus Projektberichten. Als Fachbuch enthält es am Beispiel der Projektergebnisse zahlreiche Hintergrundinformationen und die Beschreibung von praktischen und theoretischen Methoden. Die hier verwendeten Werkzeuge lassen sich auf alle Brennstoffzellentypen und auf andere Anwendungsfelder übertragen. Im Fokus der einzelnen Kapitel steht ein Brennstoffzellentyp immer im Fokus: die HT-PEFC. Die Gründe für deren Bevorzugung liegen in den Erfahrungen abgeschlossener Projekte und den sichtlichen Vor- und Nachteilen der verschiedenen Zelltypen und Technologielinien. Die starke Fokussierung auf eine derzeit verfolgte Technologielinie gilt im Wesentlichen für deren technische Umsetzung. In den beiden abschließenden Kapiteln des Buches, die sich mit Brennstoffzellen-Systemen und der Entwicklung beschäftigen, wird die Sicht wieder auf SOFC und PEFC-Systeme erweitert. In den Systemeigenschaften finden sich auch die Gründe die HT-PEFC-Technologie voranzutreiben. Aus systemtechnischer Sicht kann es für Brennstoffzellen-Systeme in der Luftfahrt in bestimmten Anwendungsszenarien durchaus sinnvoll sein, diese in Form der PEFC in Kombination mit Wasserstoff zu betreiben.

Kapitel 1 gibt einerseits einen Überblick auf die Optionen alternative Kraftstoffe in der Luftfahrt einzusetzen, andererseits werden Bedingungen und Risiken beim Einsatz neuer Energiewandler für zukünftige Bordsysteme diskutiert.

Für Brennstoffzellenanwendungen in der Luftfahrt sind die in Zukunft verfügbaren Kraftstoffe zu identifizieren. In Anbetracht der politischen Ziele zur CO₂-Minderung, die Treibhausgasemissionen in der Europäischen Union bis 2050 um 80–95 % gegenüber 1990 zu senken und der ACARE-Ziele, die CO₂-Emissionen bis 2020 um 50 % pro Fluggast-

kilometer zu mindern, ist die Einführung von Biokerosin eine Option. In Kap. 2 werden verschiedene Herstellungspfade aufgezeigt und auf Ihre Eignung für die Luftfahrt geprüft. Wasserstoff kann für einzelne Anwendungen als zusätzlicher Kraftstoff an Bord ebenfalls von Interesse sein. In einer Übergangsphase werden sowohl kommerzielles Kerosin als auch Biokerosin eingesetzt. Für Test- bzw. Demonstrationsflüge wurden in den letzten Jahren Mischungen bis zu einem 50 %-igen Bioanteil verwendet. Kommerzielles Kerosin enthält aber einen hohen Schwefelanteil, der für die in der Brennstoffzellentechnik eingesetzten Materialien nicht verträglich ist. Abschnitte 2.4.2 und 2.4.3 beschäftigen sich daher detailliert mit Entschwefelungsverfahren, die prinzipiell für die Kerosinent Schwefelung geeignet sind. Da es sich bei diesen Verfahren nur um eine Überbrückungstechnologie hin zum schwefelarmen Biokerosin handelt, spielt die Thematik der Entschwefelung bei der Langfristigkeit der Entwicklungen nur eine untergeordnete Rolle.

In Kap. 3 wird die Brennstoffzelle allgemein und die Hochtemperatur-Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle (HT-PEFC) im speziellen zunächst technisch und energetisch eingeordnet. Die Entwicklung der HT-PEFC wurde initiiert, um die spezifischen Nachteile bestehender Technologien für die Anwendung im Luftfahrtbereich zu vermeiden. Um die Betriebsweise und die Betriebsgrenzen zu verstehen, werden im nächsten Abschnitt die thermodynamischen und elektrochemischen Grundlagen gelegt. Von besonderer Bedeutung für die Funktion einer HT-PEFC ist das dynamische Zusammenspiel der Komponenten Phosphorsäure, Wasser und Polymermatrix im Bereich der Membran-Elektroden-Einheit. Ein wesentlicher Vorteil der HT-PEFC gegenüber der Niedertemperaturvariante ist die erhebliche Toleranz des Zellbetriebes bei Anwesenheit von CO aus dem Kerosinreformat. Die Quantifizierung der Zellperformance bei (reversibler) CO-Vergiftung und Brenngasverdünnung ist Thema des folgenden Abschnittes. Das Kapitel schließt mit einer Analyse des Betriebsverhaltens auf Stackebene. Dabei wird deutlich, dass die Medienführung (Reaktanten und Kühlmittel) einen deutlichen Einfluss auf die lokale Stromdichteverteilung ausübt. Dies wirkt sich geringfügig auf die Stackleistung aber dramatisch auf die Langzeitstabilität des Stacks aus.

Aufbauend auf dem vorherigen Kapitel, in dem die physikalischen, chemischen und elektrochemischen Grundlagen zur Funktionsweise einer Hochtemperatur-Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle gelegt werden, folgen in Kap. 4 die wesentlichen ingenieurmäßigen Aspekte zur Auslegung, zum Aufbau und zum Betrieb von Stacks als zentrales Element des Gesamtsystems. Nach einer Beschreibung der grundsätzlichen Betriebsweise und dem prinzipiellen Aufbau eines Stacks werden die Anforderungen der einzelnen Stackelemente definiert und mögliche Werkstoffe diskutiert. Im zweiten Teil dieses Kapitels erfolgt die Darstellung verfahrenstechnischer Konzepte für den Stackaufbau und -Betrieb. Neben den Möglichkeiten zur Verspannung der Stackbauteile und deren interner und externer Abdichtung werden Aspekte zum Wärmemanagement und zur Medienverteilung auf Zell- und Stackebene erläutert.

Unter dem Begriff „Brenngaserzeugung“ wird die Umwandlung von Kraftstoffen in ein Gasgemisch verstanden, das zu einem erheblichen Anteil aus Wasserstoff besteht und in die Anode einer Brennstoffzelle geleitet werden kann. In Kap. 5 werden die drei we-

sentlichen Komponenten der Brenngaserzeugung vorgestellt. Der autotherme Reformer, wandelt den flüssigen Kraftstoff in einem katalytischen Prozess zusammen mit Wasserdampf und Luft in ein wasserstoffreiches Gasgemisch, das sogenannte Reformat, um. Der Wasser-Gas-Shift Reaktor hat die Funktion, die Konzentration an Kohlenmonoxid im Reformat deutlich zu verringern. Zu hohe Konzentrationen an Kohlenmonoxid im Eduktgasstrom der Brennstoffzelle führen zu einer adsorptiven Vergiftung der katalytisch aktiven Zentren in der Anode der Brennstoffzelle. Der katalytische Brenner hat zwei wesentliche Funktionen. Zum einen werden in seinem katalytischen Teil die brennbaren Komponenten Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Methan im aus der Anode der Brennstoffzelle austretenden Abgas zu Kohlendioxid und Wasser umgesetzt, so dass das Brennstoffzellensystem keine giftigen oder brennbaren Substanzen emittiert. Zum anderen wird im Wärmeaustauscher des katalytischen Brenners mit Hilfe des Enthalpiestroms aus der katalytischen Verbrennung ein wesentlicher Teil des Wasserstroms, der für die autotherme Reformierung benötigt wird, verdampft und überhitzt.

Bei der Entwicklung der Reaktoren für ein Brenngaserzeugungssystem ist eine Vielzahl an Vorgaben zu erfüllen. Dabei sind zunächst die rechtlichen Anforderungen an die Sicherheit der als Druckgeräte ausgeführten Apparate zu berücksichtigen. Dazu wird in Kap. 6 ein Einblick in die Auflagen an die Apparate durch die Druckgeräterichtlinie gegeben. Die Reaktoren müssen aber weitere äußere und verfahrenstechnische Randbedingungen erfüllen, um im Zusammenspiel miteinander in einem Brenngaserzeugungssystem optimal zu funktionieren. Aufbauend auf den rechtlichen und verfahrenstechnischen Anforderungen werden exemplarisch die Wandstärken einzelner Bauteile von Apparaten eines Brenngaserzeugungssystems berechnet. Hierzu wird das AD 2000-Regelwerk, ein einfaches FEM-Tool für eine Belastungsanalyse in einem CAD-Programm und eine vollwertige FEM-Software eingesetzt. Die verschiedenen Berechnungsmethoden für die Wandstärken der Bauteile werden gegenübergestellt und nach ihrer Verwendbarkeit und Praktikabilität bewertet. Dies geschieht mit dem Ziel, die Anforderungen durch die Druckgeräterichtlinie einzuhalten. Weiterhin werden einige der verfahrenstechnischen Randbedingungen, denen die Apparate genügen müssen, dargestellt und diskutiert.

Kapitel 7 befasst sich mit der Entwicklung eines integrierten Brennstoffzellensystems für die multifunktionale Anwendung in der Luftfahrt. In den Abschn. 7.2 bis 7.3 werden die notwendigen Schritte der Systementwicklung erläutert. Diese bestehen in der Erarbeitung des Systemkonzepts und der Systemmodellierung. Anschließend erfolgen der Systemaufbau und der Systemtest in den Abschn. 7.5 und 7.6. Die in Kap. 7 erläuterte Methodik zur Systementwicklung wird anhand praktischer Beispiele erläutert, indem ein Hochtemperatur-Polymerelektrolyt-Brennstoffzellensystem mit Kerosinreformierung von der Konzepterarbeitung bis zum Systemtest begleitet wird.

Für die Nutzung von Brennstoffzellen-Systemen in Flugzeugen wird deren Multifunktionalität gerne als Vorteil dargestellt. Brennstoffzellen produzieren neben Strom, Wärme, Wasser und sauerstoffreiche Abgase. Kapitel 8 analysiert welche Systemleistungen für die einzelnen Größen benötigt werden. Die Wasserbilanz eines Brennstoffzellensystems hängt von einer Reihe von Betriebsparametern, äußeren Randbedingungen und Betriebsarten im

Flug ab. In Abschn. 8.4 werden verschiedene Methoden dargestellt, um die Potentiale zu Wasserproduktion für unterschiedliche Systemkonfigurationen, mittel- und langfristig, herauszukristallisieren. Abschnitt 8.5 geht noch der Frage des Einsatzes von Wasserstoff und/ oder Biokerosin nach.

Jülich, im Januar 2015

Ralf Peters

<http://www.springer.com/978-3-662-46797-8>

Brennstoffzellensysteme in der Luftfahrt

Peters, R. (Hrsg.)

2015, XXI, 409 S. 198 Abb., 20 Abb. in Farbe.,

Hardcover

ISBN: 978-3-662-46797-8