

Problemstellung, Chancen und Risiken von Brennstoffzellen APU's

Prof. Dr. rer. nat. Angelika Heinzl^{1,2}, Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Jens Mathiak¹,
Dipl.-Ing. Michael Dokupil¹, Dr.-Ing. Jürgen Roes^{1,2},

¹Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH Duisburg
Carl-Benz-Str. 201
D-47058 Duisburg
www.zbt-duisburg.de

²Gerhard-Mercator-Universität Duisburg
Institut für Energie- und Umweltverfahrenstechnik
Lotharstrasse 1-21
D-47057 Duisburg

1. Einleitung

Die Verfügbarkeit von elektrischer Energie wird heutzutage von den Verbrauchern als selbstverständlich empfunden. Ob im Haus, Auto oder Handy, die Bereitstellung geschieht auf unterschiedlichste Weise, aber der Verbraucher hat stets den geforderten Strom zur Verfügung. Allenfalls wird das Aufladen von Akkus oder die geringe Kapazität der Auto-Batterie im Standbetrieb als Einschränkung empfunden. Diese hohen Anforderungen der Verbraucher werden kontinuierlich durch höheren Strombedarf zur Ergänzung des Kundennutzens intensiviert. So wird sich Hochrechnungen zufolge beispielsweise der Bedarf an elektrischer Energie im Auto in den nächsten 10 Jahren verdoppeln. Diese neuen Herausforderungen auf der einen Seite und die durch die Brennstoffzellentechnik verfügbaren Möglichkeiten auf der anderen Seite erfordern, konventionelle Lösungen zur Strombereitstellung zu hinterfragen und alternative Brennstoffzellenlösungen zu entwickeln.

2. Potentielle Märkte

Bevor jedoch Lösungsstrategien entwickelt werden können, muss zunächst der gesamte Markt hinsichtlich spezifischer Anforderungen untersucht und klassifiziert werden. Die einzige Einschränkung erfolgt in Bezug auf mobilen Strombedarf mit einer Leistung zwischen ca. 500 W und 15 kW. Es soll demnach nicht der Batterieersatz in Kleingeräten wie Handy oder Laptop einbezogen werden, da dieser sich wiederum fundamental von dem skizzierten Anwendungsbereich unterscheidet.

Der größte und bekannteste potenzielle Einsatzbereich ist die Bordstromversorgung von Kraftfahrzeugen. In diesem Segment wiederum ist es sinnvoll, nach Pkw und Nutzfahrzeugen (Nfz) zu unterscheiden. Dies ist zum einen im Benutzerverhalten begründet, welches im Nutzfahrzeugbereich durch ausgeprägten Strombedarf auch bei Stillstand des Motors gekennzeichnet ist. Die elektrische Energie muss für das Wohlbefinden des Fahrers (Klimaanlage, Multimedia) in manchen Fällen auch für die Konditionierung des Transportgutes (Kühlung, Heizung) aufgebracht werden. Zum anderen sind die Anforderungen an Bauvolumen und Gewicht unterschiedlich. Das Marktvolumen kann repräsentativ durch die Neuanmeldungen ermittelt werden. So wurden im Jahr 2001 in Deutschland etwa 3,5 Mio Pkw neuangemeldet. Darauf entfielen etwa 900.000 Stück auf die Marken Audi, DaimlerChrysler und BMW, die die gehobene Mittelklasse und Oberklasse repräsentieren, wo ein erster Einsatzbereich gesehen werden kann. Im Bereich der Nutzfahrzeuge wurden im selben Zeitraum etwa 280.000 neue Busse, Lkw und Sattelschlepper angemeldet.

Weitere Einsatzgebiete mobiler Stromversorger sind in allen Bereichen zu sehen, wo eine Anbindung an das öffentliche Stromnetz nur eingeschränkt oder nicht möglich ist. Beispielhaft sei hier der Camping-Caravan oder das Boot genannt. Da die Anforderungen ähnlich gelagert sind und ein konkurrenzfähiges Produkt nur durch adäquate Produktionsstückzahlen erreicht werden können, wird ein universell einsetzbares Produkt zur Befriedigung eines kumulierten Marktes gesucht. Das

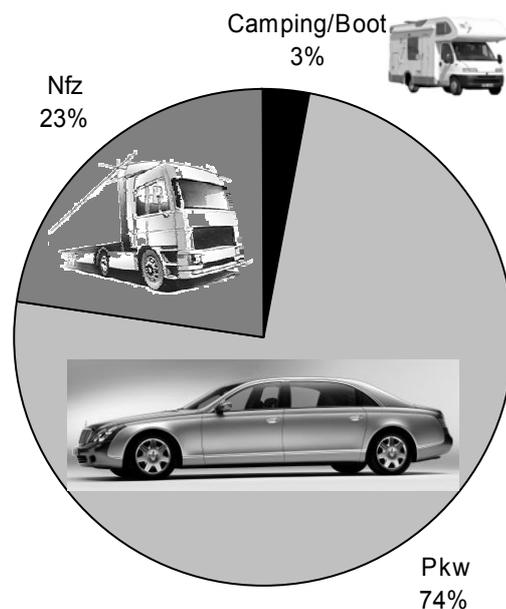


Abb. 1: Marktpotenziale von BZ-APU's
 Marktpotential kann hier durch die Caravan-Neuanmeldungen im Jahr 2001 mit 18.000 Stück abgeschätzt werden. Damit auch die weiteren Absatzmärkte berücksichtigt werden, soll angenommen werden, dass der Caravan-Markt die Hälfte

der sonstigen mobilen Stromversorger annimmt. Somit hat dieser Teilmarkt ein Potenzial von jährlich etwa 36.000 Stück.

In Summe lässt sich das Marktvolumen mit 1,2 Mio. Stück pro Jahr mit einer Aufteilung entsprechend der Grafik abschätzen. Zusammenfassend werden demnach drei Segmente (Nfz, Pkw und sonstige Anwendungen) unterschieden, die im Weiteren betrachtet werden. Für jeden Teilmarkt werden die Anforderungen umrissen, Lösungsansätze vorgestellt und aktuelle Entwicklungen präsentiert.

3. Nfz

Anforderungen

Derzeit werden die Motoren zahlreicher Nutzfahrzeuge über Nacht im Stand betrieben, sei es um das Transportgut zu konditionieren oder Strom für den Fahrer bereit zu stellen. Dass diese Energiekette mit einem extrem niedrigen Wirkungsgrad des Dieselmotors im Standbetrieb (<10%) und einer nicht viel effektiveren Lichtmaschine Schwächen hat, ist offensichtlich, wobei zusätzlichen Belastungen durch Lärm, Vibration und Abgase dazu kommen. Die Situation wird durch aktuelle Bestrebungen der Gesetzgebung einiger US-amerikanischer Staaten forciert, die den Nachtbetrieb der Motoren im Stand in den nächsten Jahren verbieten wollen.

Auf der technischen Seite kommt als Energieträger ausschließlich Diesel in Betracht. Der Nennleistungsbedarf lässt sich nur ungenau mit etwa 5 kW_{el} wegen der breiten Streuung der Anwendungen abschätzen. Es ist jedoch eine große Leistungsmodulation von mehr als 1:10 erforderlich. Die Anforderungen an die Dynamik bei Lastwechsel oder Anfahren sind gering, da in dem System ohnehin eine Batterie als Puffer vorzusehen ist. Ebenso stehen Größe und Gewicht des Produktes weniger im Vordergrund der Entwicklung. Hingegen sind die Emissionen und die Lebensdauer von erhöhter Bedeutung. Die vertretbaren Kosten sind im Zusammenhang mit der Konkurrenzsituation zu bewerten. Sollte der Gesetzgeber den Betrieb des Verbrennungsmotors im Stand verbieten, so kann ein wesentlich höherer Preis für das System vertreten werden.

Aktuelle Entwicklungen

Derzeit ist noch kein kommerzielles Produkt verfügbar, dennoch werden Prototypen, die teilweise fahrenden Labors ähneln vorgestellt. Bereits im Jahr 2000 stellte die Firma Freightliner LLC (Tochterunternehmen von DaimlerChrysler) einen Lkw mit einem Ballard PEM-Stack als APU vor. Ende 2002 präsentierte die Firma General Dynamics eine ebenfalls 5 kW APU auf



Abb. 2: Foto eines Lkw der Firma Freightliner mit Brennstoffzellen-APU

Basis einer SOFC. Die veröffentlichten Projekte werden durch Zuschüsse der Regierungen stark subventioniert.

4. Pkw

Anforderungen

Verglichen mit dem zuvor skizzierten Lastenheft einer Nfz-APU unterscheiden sich die Anforderungen an eine Pkw-Bordstromversorgung nur wenig. Die Lebensdauererwartungen sind jedoch geringer, da der Nachbetrieb nicht erforderlich ist. Dafür steigen die Ansprüche nach geringerem Bauvolumen, variablem Packaging und Gewicht. Zudem sind zweierlei Energieträger, Diesel und Benzin, zu betrachten. Ebenso sind die Kostenziele ambitionierter, da die Batterie/Lichtmaschinen-Einheit substituiert werden muss. Ein erfolgreicher Markteintritt ist hier demnach trotz eines gewissen Zusatznutzens ausschließlich über geringere Kosten möglich. Im Folgenden soll durch eine Abschätzung aufgezeigt werden, welche zusätzlichen Investitionskosten eines Pkw am Markt realisiert werden können, so dass aufgrund der geringeren Betriebskosten der Einsatz einer Brennstoffzellen-APU wirtschaftlich ist. Obgleich diese Kostenanalyse nicht spezifisch für den Pkw-Markt ist, erfordert die Konkurrenzsituation gerade in diesem Segment eine entsprechende Untersuchung.

Die Betriebskosten einer konventionellen Bordstromversorgung lassen sich wie folgt berechnen: Ausgehend von einem Leistungsbedarf wird dieser durch den

Wirkungsgrad der Lichtmaschine und des Verbrennungsmotors dividiert, um den erforderlichen Benzin- bzw. Diesel-Verbrauch¹ in der Einheit Kilowatt zu ermitteln.

$$P_{\text{Benzin / Diesel}} = \frac{P_{\text{Bedarf}}}{\eta_{\text{Lichtm.}} \cdot \eta_{\text{Motor}}}$$

Mit einer angenommenen Durchschnittsgeschwindigkeit kann daraus der Energieverbrauch pro Kilometer berechnet werden.

$$\text{Verbrauch} = \frac{P_{\text{Benzin / Diesel}}}{\bar{v} \cdot 42000 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0,76 \frac{\text{kg}}{\text{l}}}$$

Wird der Benzinverbrauch mit dem Benzin-/Dieselpreis multipliziert, so erhält man die Betriebskosten der konventionellen Bordstromversorgung pro Kilometer. Zur Kostenkalkulation der Brennstoffzellen-APU muss nur die Bedarfsleistung durch den APU-Wirkungsgrad dividiert werden, um den Energieverbrauch zu erhalten. Die Bestimmung der Betriebskosten erfolgt anschließend analog.

Die Differenz der beiden Betriebskosten pro Kilometer multipliziert mit der Laufleistung ergibt die Einsparung in den Betriebskosten. Da die Einsparung während der gesamten Betriebszeit anfällt, könnte man den Barwert ermitteln, um Rückschlüsse auf die erlaubten Mehrkosten einer Brennstoffzellen-APU schließen zu können. Da jedoch der Benzinpreis mindestens der gleichen Teuerungsrate unterliegt, kann auf diese Umrechnung verzichtet werden. Es wird derzeit nicht davon ausgegangen, dass beim Einsatz einer Brennstoffzellen-APU herkömmliche Komponenten im Pkw nicht mehr eingesetzt werden müssen (z.B. Lichtmaschine). Daher entsprechen die Einsparungen dem tolerablen Mehrwert des Autos.

Die variablen Größen in diesem Kostenmodell sind neben der Bedarfsleistung der Benzinpreis und die Laufleistung. Die Durchschnittsgeschwindigkeit (60 km/h), die Wirkungsgrade der Lichtmaschine (30%), des Verbrennungsmotors (20%) und der APU (30%) werden als konstant angenommen. Damit die Auswertung übersichtlich erfolgen kann, wird das Modell pro Kilowatt Bedarfsleistung analysiert.

¹ Im Weiteren wird ausschließlich allgemeingültig der Begriff Verbrauch verwendet.

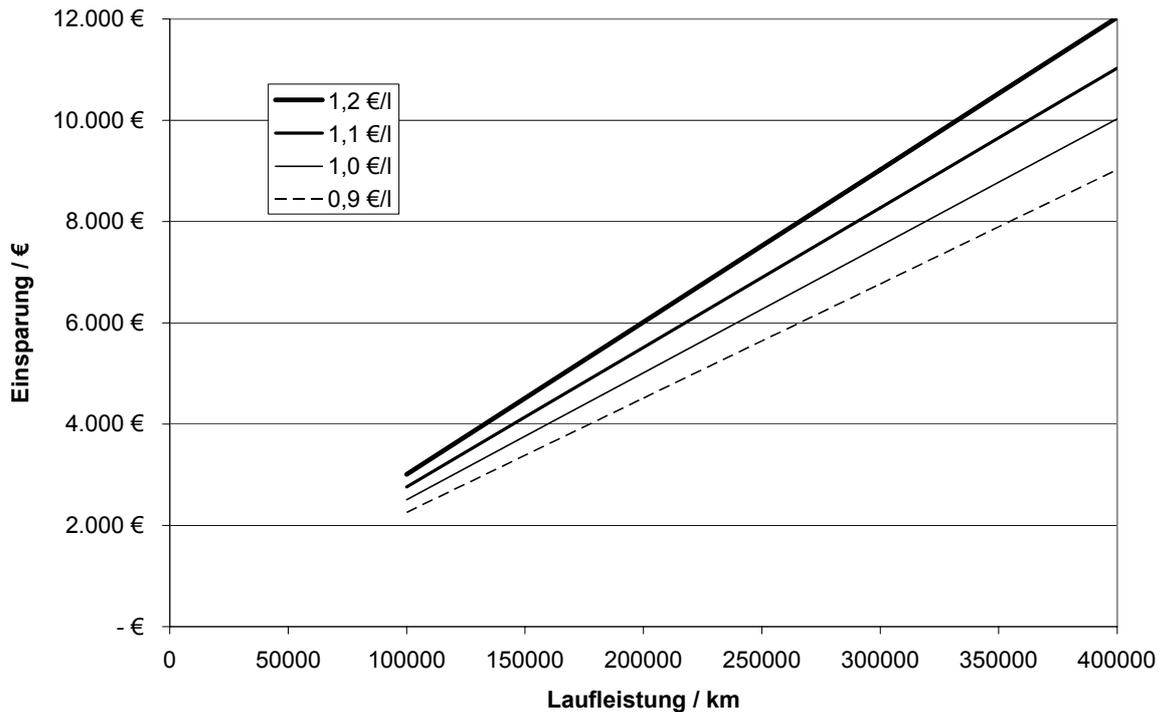


Abb. 3: Betriebskosteneinsparung / Kostenrahmen von Brennstoffzellen-APU's

Aus dem Diagramm kann z.B. abgelesen werden, dass bei 1 kW Bedarfsleistung, einer Laufleistung von 200.000 km und einem Benzinpreis von 1,1 €/l etwa 5.500 € Einsparungspotential beim Einsatz einer Brennstoffzelle statt der konventionellen Technik erreicht werden. Darüber hinaus wird deutlich, dass die Einsparung linear mit dem Leistungsbedarf ansteigt und somit Pkw der gehobenen Klasse sich eher als Einsatzgebiet eignen, zumal die Mehrkosten im Vergleich zum Anschaffungspreis unbedeutend werden. Obgleich dieses Modell nicht sämtliche Einflüsse erfasst, wurde durch konservative Abschätzung der Randbedingungen versucht, ein repräsentatives Ergebnis zu erreichen. Sollte es demnach gelingen, eine Brennstoffzellen-APU zu dem genannten Preis bei entsprechender Lebensdauer anbieten zu können, wäre dessen Einsatz wirtschaftlich.

Aktuelle Entwicklungen

Zur Expo 2000 hat BMW eine SOFC mit Wasserstoffversorgung und 5,5 kW vorgestellt. In Zusammenarbeit mit Delphi Automotive Systems entwickelt BMW auch eine benzin-betriebene Bordstromversorgung auf SOFC-Basis (**Abb. 4**). Über die Aktivitäten anderer Hersteller wie DaimlerChrysler oder VW bzw. Zulieferern wie Webasto sind keine Details über die Entwicklungen veröffentlicht.



Abb. 4: SOFC-APU im BMW

5. Sonstige Anwendungen

Anforderungen

Bei dem oben grob umrissenen Marktsegment Camping/Freizeit sind die Anforderungen auch nur entsprechend vage zu formulieren. So sollte der Energieträger der APU sich nach der vorhandenen Infrastruktur richten. Auf Booten oder im Camping ist Flüssiggas (LPG) verbreitet; mancherorts wird jedoch auch Diesel verwendet. Die elektrische Nennleistung und die Modulation muss gemäß der installierten Leistung dimensioniert werden, die zwischen 1 kW und 10 kW liegt. Auch ein solches System wird beim Anfahren und im Lastwechsel nicht dem Bedarf unmittelbar folgen können, so dass die Stromversorgung um eine Batterie ergänzt werden muss. Diese kompakte APU muss nicht über eine ausgeprägte Lebensdauer verfügen, jedoch muss sie für den Verbraucher erschwinglich sein. Bei den hier zusammengefassten Anwendungen kann zusätzlich noch die Auskopplung und Nutzung von Wärme interessant sein.



Abb. 5: Boot mit einem BZ-Antrieb

Aktuelle Entwicklungen

Die Bonner Firma etaing GmbH, die inzwischen in Konkurs geraten ist, hat im Jahr 2000 das erste Passagierschiff mit Brennstoffzellenantrieb gebaut (**Abb. 5**). Diese wurde mit einer AFC und Wasserstoff betrieben, der in einem Metallhydridspeicher gespeichert wurde. Am 11. August 2003 wurde im Brennstoffzellen-Newsletter von

einer gemeinsamen Entwicklung seitens Crystop Display und Ballard mit Unterstützung des Kompetenz und Innovationszentrums Brennstoffzelle der Region Stuttgart berichtet. Ziel ist ein 1200 W System, welches zunächst mit Wasserstoff später mit einem Propan- oder Methanolreformer betrieben wird.

6. Systemaufbau und aktuelle Entwicklungen

Es soll nun ein tieferer Einblick in die Technik erfolgen, auch vor dem Hintergrund, aktuelle Probleme und Entwicklungsziele vorstellen zu können. Unabhängig von der Anwendung unterteilt man die Brennstoffzellen-APU in die Teilbereiche Gasprozesstechnik, Brennstoffzelle, elektrische Anbindung und Peripherie/Systemtechnik.

Brennstoffzelle

Im oben skizzierten aktuellen Entwicklungsstand werden zwei verschiedene Brennstoffzellen-Typen eingesetzt: Solid-Oxide-Fuel-Cell (SOFC) oder Polymerelektrolyte-Membrane-Fuel-Cell (PEMFC). Ihren Namen tragen diese Energiewandler aufgrund des verwendeten Elektrolyten. Die SOFC arbeitet mit einer bei hohen Temperaturen (800 °C - 1000 °C) elektrisch leitfähigen Keramik. Wegen der hohen Temperatur ist diese Brennstoffzelle in der Lage, neben Wasserstoff auch Kohlenmonoxid als Brenngas umzusetzen. Die PEM-Brennstoffzelle wird herkömmlich bei ca. 80 °C betrieben, neue Hochtemperatur-Membranen erlauben auch einen Betrieb bei bis zu 200 °C. Die erhöhte Temperatur hat vor allem den Vorteil, dass die Empfindlichkeit gegenüber dem bei der Wasserstofferzeugung gebildeten Kohlenmonoxid drastisch reduziert wird und die Wärme leichter gegenüber der Umgebungstemperatur ausgekoppelt werden kann.

Gasprozesstechnik

Der Energieträger (z.B. LPG oder Benzin) muss für den Einsatz in der Brennstoffzelle aufbereitet werden. Für die SOFC ist ausschließlich die Umsetzung des Energieträgers, wofür verschiedene konkurrierende Verfahren bekannt sind (Dampfreformierung, autotherme Reformierung und partielle Oxidation) erforderlich. Bei der Verwendung einer PEM hingegen ist zusätzlich eine weitere Gasaufbereitung zur Reduzierung des Kohlenmonoxids notwendig.

Dampfreformierung

Die Dampfreformierung ist ein endothermer Prozess, wobei die Reaktionswärme in der Regel durch einen Brenner realisiert wird. Wenn beide Prozesse (Dampfreformer und Brenner) zusammen betrachtet werden, handelt es sich gleichsam um einen autothermen Prozess, bei dem die Teilschritte durch eine Wand getrennt sind (links in Abb. 6). Diese Trennung hat verschiedene Auswirkungen, so hat z.B. die Wärmeübertragung einen höheren thermischen Widerstand. Weil dies der limitierende Einfluss für die Reaktionsgeschwindigkeit ist, können die Auswirkungen entscheidend für eine Beurteilung sein. Des Weiteren sind zwei verschiedene Gaswege bei der Dampfreformierung vorhanden. Dadurch wird der konstruktive Aufwand zur gasdichten Trennung der Medien erhöht.

Autotherme Reformierung

Bei der autothermen Reformierung kommt nur ein Medienraum vor, so dass eine gasdichte Konstruktion einfacher ist. Die Aufteilung der Prozesse kann jedoch auch als Reinigungsstufe interpretiert werden, da der Stickstoff und die Verbrennungsprodukte separat vom Prozessgas geführt werden.

Partielle Oxidation

Bei der exothermen partiellen Oxidation ist eine effektive Verwendung der Reaktionswärme fraglich. Wenn diese zur Verdampfung von Wasser für eine nachgeschaltete Shift-Reaktion verwendet wird, handelt es sich bei dem Gesamtprozess wiederum um eine autotherme Reformierung mit dem Unterschied der Wasserzufuhr (rechts in Abb. 6).

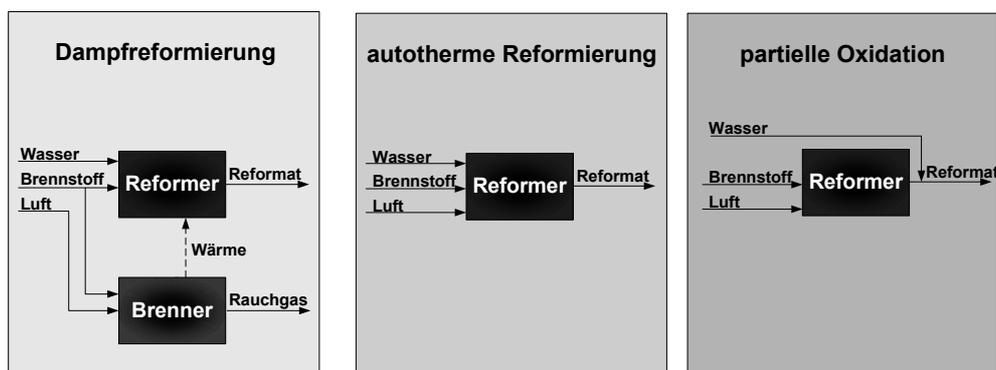


Abb. 6: Vergleich der Verfahren zum Umsatz des Energieträgers

Durch diesen Vergleich werden die Beziehungen der Verfahren untereinander dargestellt und über verschiedene Sichtweisen deren Gemeinsamkeiten verdeutlicht.

Shift

Unabhängig vom ausgewählten Verfahren der Wasserstofferzeugung schließt sich ein sogenannter Shift-Bereich an, bei dem auf niedrigerem Temperaturniveau der Großteil des gebildeten Kohlenmonoxids mit Wasser zu CO_2 und Wasserstoff umgesetzt wird.

Gasfeinreinigung

Das hinter der Shift-Reaktion noch vorhandene Kohlenmonoxid würde eine PEM-Brennstoffzelle noch zu stark schädigen, so dass eine Feinreinigungsstufe notwendig ist. Dies wird entweder durch eine semipermeable Membran, die ausschließlich wasserstoffdurchlässig ist, oder durch eine selektive Oxidation (SelOx) von CO realisiert. Wenn eine Membran als Feinreinigungsverfahren ausgewählt wird, muss der vorgelagerte Prozess bei einem Überdruck durchgeführt werden, damit ein Partialdruckgefälle an der Membran zur Gasreinigung aufgebaut wird. Neben dem Permeat kommt es zur Abscheidung des Retentates, welches noch weiteren Wasserstoff enthält. Wenn die selektive CO-Oxidation als Gasfeinreinigungsverfahren ausgewählt wird, sind in dem Brennstoffzellen-Feed Inertgasbestandteile. Daher muss aus der Brennstoffzelle ebenfalls ein Gasstrom abgeführt werden, welches mit dem Retentat der Membranreinigung vergleichbar ist.

Systeme

Aus den skizzierten Verfahren ergeben sich folgende Systemvarianten. Die in Abb. 7 dargestellte Verschaltung beschreibt eine PEM-APU mit selektiver Oxidation als Gasfeinreinigungsverfahren. Neben dem oben bereits beschriebenen Systemaufbau ist ein Brenner zur Umsetzung der im Anodenoffgas enthaltenen Brenngase vorgesehen. Das Ziel einer effektiven Wärmeintegration ist es, diese Energie und die in der Verfahrenstechnik anfallenden Wärmeströme zu verschalten. Dabei ist auffällig, dass aufgrund des Anodenoffgases ein Brenner in jedem System erforderlich ist. Aus diesem Umstand lassen sich Vorzüge für die Dampfreformierung ableiten. Der eingezeichnete Luftkompressor steht repräsentativ für die Systemtechnik (Balance of Plant). Detailliertere Informationen dazu sind in [1]. In dem

eingezeichneten Reformer kann eine der in Abb. 6 genannten Reformierungsverfahren eingesetzt werden. Im Falle der partiellen Oxidation oder autothermen Reformierung muss dem Gasprozess der gestrichelt skizzierte Luftstrom zugeführt werden.

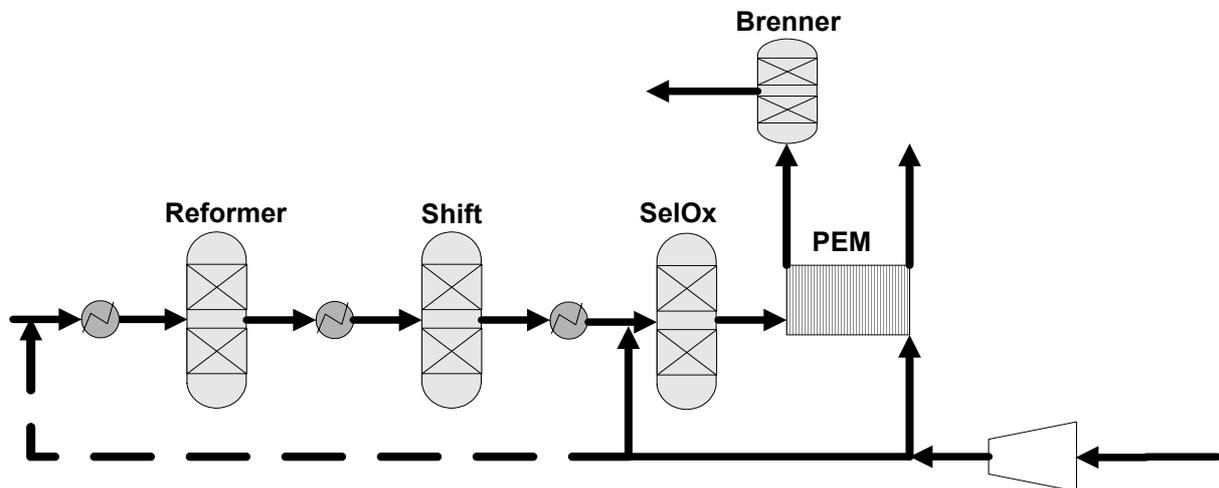


Abb. 7: Systembild einer PEMFC-APU mit selektiver Oxidation

Im Vergleich zum Einsatz einer Membranreinigung statt einer selektiven Oxidation wird der Brennstoffzelle reiner Wasserstoff zugeführt, so dass das Retentat der Membran im Brenner umgesetzt wird und kein Anodenoffgas existiert. Außerdem ist die Luftzufuhr zur Gasfeinreinigung nicht mehr erforderlich. Vom apparativen und reglungstechnischen Aufwand sind diese Systeme somit vergleichbar.

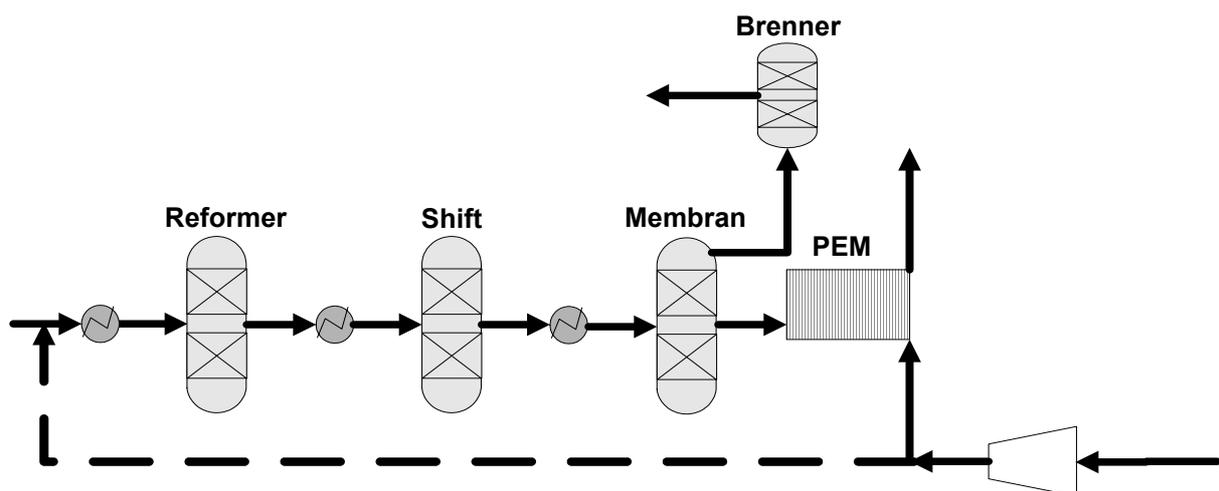


Abb. 8: Systembild einer PEMFC-APU mit Membranreinigung

Ein einfacherer Systemaufbau ergibt sich beim Einsatz einer SOFC statt einer PEMFC, da ausschließlich ein Reformer und keine Gasreinigung (Shift und Gasfeinreinigung) erforderlich sind. Zudem kann bei einem endothermen Reformierverfahren die Wärme neben dem Brenner auch durch die Hochtemperaturbrennstoffzelle bereitgestellt werden. Neben diesen Vorzügen hat die SOFC noch mit technischen Problemen zu kämpfen. Die hohe Betriebstemperatur und der sensible keramischen Werkstoffe erfordert eine lange Anfahrtszeit. Zudem wird derzeit an der Minderung der Degradation gearbeitet; so wird von Anlagen der Firma Sulzer Hexis mit einer Degradation von 35% in 6 Monaten berichtet [2].

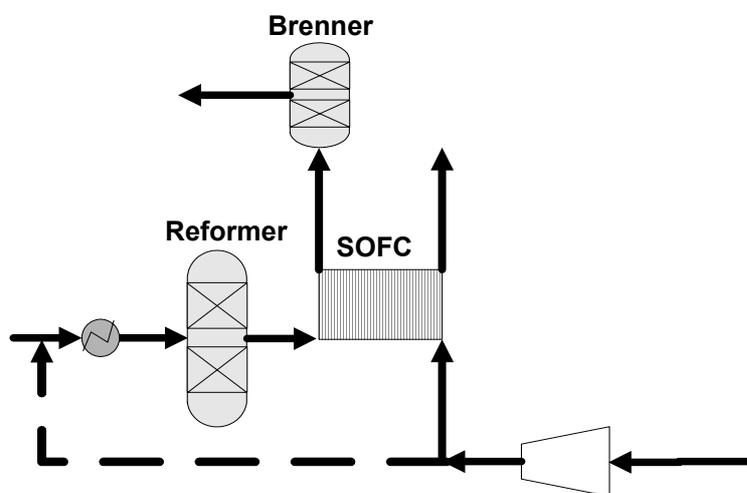


Abb. 9: Systembild einer SOFC-APU

Allen Systemen sind folgende technische Schwierigkeiten gemein, an denen derzeit gearbeitet wird:

- Katalysatoraktivität, -stabilität und -selektivität
- Entschwefelung
- Optimierung der Peripherie in Bezug auf Bauvolumen und Leistungsaufnahme
- thermische Verschaltung
- Leistungsmodulation
- Startzeit / Dynamik
- Integration / Packaging
- Kostenreduktion der Komponenten und der Fertigung

7. Zusammenfassung

In der vorliegenden Untersuchung wurde die Einsatzmöglichkeit von Brennstoffzellen als Energieversorgung im mobilen Bereich analysiert. Zunächst wurde der potentielle Gesamtmarkt segmentiert und herausgearbeitet, dass die Marktsegmente sich im Bedarfsprofil nicht wesentlich unterscheiden. Es wird jedoch auch nicht möglich sein, mit einem Produkt in allen Bereichen die Bedürfnisse befriedigen zu können. Allerdings könnten Komponenten aus den APU's identisch sein, was aufgrund größerer Produktionsstückzahlen zu einer Kostenreduktion führt.

Aus den aktuellen Entwicklungen lässt sich erkennen, dass kein Unternehmen auf den Einsatz von Wasserstoff setzt, sondern vorhandene Energieträger wie Diesel oder LPG eingesetzt werden sollen.

Es werden derzeit Systeme mit zwei unterschiedlichen Brennstoffzellentypen entwickelt. APU's mit SOFC haben den Charme eines einfachen Aufbaus und Probleme hinsichtlich der Anfahrzeiten und Lebensdauer. PEM-Aggregate zeichnen sich durch einen komplexen Aufbau aber längerer Lebensdauer und schneller Startzeit aus. Hinsichtlich des geeignetsten Systems (Art der Brennstoffzelle und Gasfeinreinigung) herrscht noch keine Einigung. Neben den spezifischen Problemen wurden die aktuellen technischen Herausforderungen dargestellt.

8. Literaturverzeichnis

- [1] Pischinger, S. et. al.: *Bordenergieversorgung (APU) und stationäre Brennstoffzellensysteme – Synergien und Peripherie*. Stationäre Brennstoffzellen, VDI-Berichte 1752, VDI-Verlag, Düsseldorf 2003
- [2] Wismann, G.: *Erfahrungen der Thyssengas GmbH mit dem 1 kW-SOFC-System der Firma Sulzer Hexis*. Stationäre Brennstoffzellen, VDI-Berichte 1752, VDI-Verlag, Düsseldorf 2003