

UNTERSUCHUNGEN ZUR INTEGRATION VON ALKALISCHEN BRENNSTOFFZELLEN IN FAHRZEUGANTRIEBEN

Einleitung: Bei der Betrachtung aktueller Forschungsaktivitäten und Veröffentlichungen [1] renommierter Institute und Unternehmen wird deutlich, dass die größten Anstrengungen in der Entwicklung für Brennstoffzellen (BZ) im mobilen bzw. portablen Bereich bei der *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) bzw. der darauf aufbauenden *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC) zu beobachten sind. Dies gründet sich hauptsächlich darin, dass diese BZ-Typen mit Luftsauerstoff betrieben werden können und niedrige Betriebstemperaturen aufweisen (s. Tabelle 1). Ein weiterer BZ-Typ, der ähnliche Betriebstemperaturen aufweist, ist die *Alkaline Fuel Cell* (AFC), deren Entwicklung jedoch angesichts der CO₂-Unverträglichkeit und des flüssigen Elektrolyts mit erheblich geringerer Intensität betrieben wurde. In der AFC wird eine wässrige Kaliumhydroxid-Lösung (Kalilauge) als Elektrolyt verwendet. Das Kaliumhydroxid verbindet sich mit dem CO₂ aus der Luft zu Kaliumcarbonat (K₂CO₃), wodurch sich anfangs der Wirkungsgrad der BZ vermindert und letztendlich die elektrochemische Reaktion zum Erliegen kommt. Zum einen wird hierbei die Zufuhr der Reaktionsgase behindert und zum anderen wird die Leitfähigkeit des Elektrolyts gesenkt.

Durch Forschungsaktivitäten in der Membrantechnik sind in jüngster Zeit Membranen auf dem Markt erschienen, die in der Lage sind, das flüssige Elektrolyt in der AFC zu ersetzen. Es sind sowohl Membranen verfügbar, die als Träger für die Kalilauge dienen als auch solche, deren Funktionsweise der Membran in der PEMFC ähnelt. Die Forschungsaktivitäten des IBZ zielen darauf ab, eine alkalische Brennstoffzelle mit einer Membran als Elektrolytersatz aufzubauen und einer Anwendung im Fahrzeug zuzuführen.

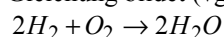
Historie der AFC: Die „Mutter“ aller BZ wird von William Robert Grove im Jahr 1839 entwickelt. Er bezeichnet sie als „galvanische Gasbatterie“. In den Jahren von 1860 bis 1889 kristallisieren sich aus dieser galvanischen Zelle mehrere BZ-Typen heraus, welche in Niedertemperatur- und Hochtemperatur-BZ eingruppiert werden (s. Tabelle 1).

Tabelle 1: Brennstoffzellentypen [4]

Niedertemperatur-Brennstoffzellen				
Typ	Alkaline Fuel Cell (AFC)	Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)	Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEMFC)	Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)
Betriebstemperatur	< 100 °C	160 – 220 °C	60 – 120 °C	60 – 120 °C
Hochtemperatur-Brennstoffzellen				
Typ	Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)		Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)	
Betriebstemperatur	600 – 800 °C		800 – 1000 °C	

Im Jahr 1902 meldet J. H. Reid ein Patent für eine BZ an, in der Kaliumhydroxid (KOH) in Verbindung mit Wasser als Elektrolyt verwendet wird - die erste AFC (vgl. Abbildung 1). 57 Jahre später stellt das Unternehmen ALLIS CHALMERS einen Traktor mit 15 kW Leistung auf Basis der AFC vor. Von 1961 - 70 arbeiten die Unternehmen PRATT & WHITNEY und ENERGY CONVERSION an einer Energieversorgungseinheit für das Apollo-Raumfahrtprogramm. 1976 nimmt das Konsortium ENELCO die Arbeit an der AFC auf und baut über mehrere Jahre hinweg AFC-Systeme für Busse [2, 3]. Bis heute wird die AFC in Randbereichen wie der Raumfahrt und in U-Booten eingesetzt. Jedoch hinkt diese Technologie der PEMFC hinterher, da an ihr intensiver geforscht wird.

Vor- und Nachteile der AFC gegenüber der PEMFC: Die größten Vorteile der PEMFC sind die Verwendung eines Feststoff-Elektrolyts (Ionomer-Membran) und der Betrieb mit Luftsauerstoff. Durch den Einsatz einer Membran anstelle der Kalilauge in der AFC vereinfacht sich die Handhabung der BZ. Ein flüssiger Elektrolyt erfordert zusätzliche Pumpen, um diesen im System umzuwälzen, was sich auch in einer aufwendigeren Regelung der zusätzlichen Komponenten widerspiegelt. Die Umwälzung des Elektrolyts ist notwendig, da sich darin das Produktwasser auf der Anodenseite nach folgender Gleichung bildet (vgl. Abbildung 1):



Des Weiteren müssen auch evtl. entstandene Verunreinigungen (z. B. K₂CO₃) aus dem System entfernt werden. Für die AFC spricht ein höherer elektrischer Wirkungsgrad von 60 – 70 % im Vergleich zum Wirkungsgrad von 50 – 68 % der PEMFC [2]. Vorteile beider BZ-Typen sind, dass als Reaktionsprodukt nur Wasser entsteht, dass beide mit Luft gekühlt werden können und dass sowohl die Elektrizität als auch die entstehende Wärme genutzt werden können.

Allerdings ist die Markteinführung der PEMFC in Form von Massenproduktion mit Stückzahlen für die Automobilindustrie (vergleiche Stückzahl VW Golf V: 580.000 im Jahr 2007 [5]) mit erheblicher Skepsis zu betrachten. Einerseits werden für die Herstellung der *Membrane Electrode Assembly* (MEA) sehr kostenintensive Technologien eingesetzt, andererseits wird als Katalysator das teure Platin verwendet. Noch schlagen die Kosten für die

Bipolarplatten mit 30 – 50 % des Stacks zu Buche [6, 7]. Bei Betrachtung der Verfügbarkeit und Fördermengen von Platin (mit 5×10^{-7} % direkt hinter Gold bei der Elementhäufigkeit, Platingehalt in der Erdkruste $20 \mu\text{g/t}$ [8], vgl. Tabelle 2) wird deutlich, dass sich der Kostenanteil der Bipolarplatten zugunsten eines höheren Anteils für den Katalysator senken wird. Es ist anzunehmen, dass der Platinpreis aufgrund der höheren Nachfrage steigen wird. Das heißt jedoch nicht, dass die Kosten für die Herstellung der Bipolarplatten gravierend reduziert werden können.

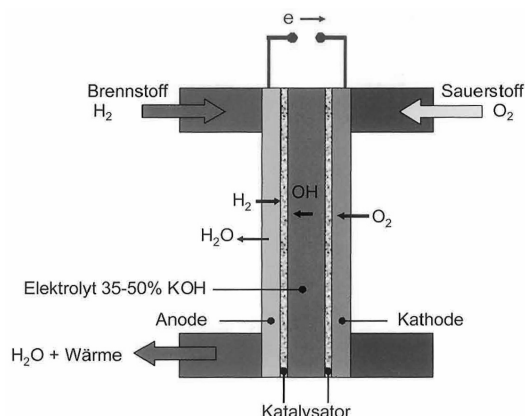


Abb. 1: Prinzip einer AFC [9]

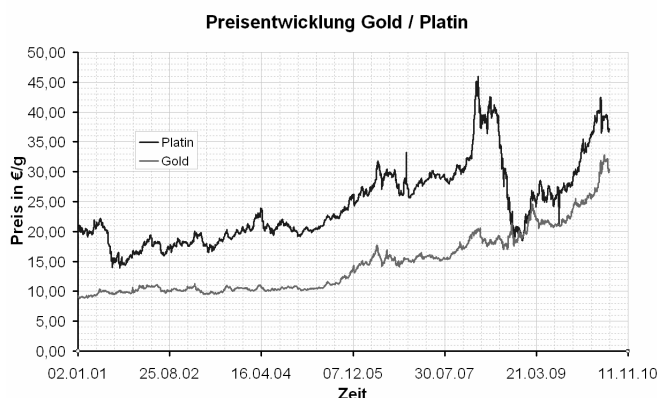


Abb. 2: Preisentwicklung von Platin und Gold [11]

1926 wurde mit dem Abbau von Platin begonnen und im Jahr 1990 lag der Preis für Platin über dem von Gold [10]. Wie Abbildung 2 zeigt war Platin bis zur Wirtschaftskrise doppelt so teuer wie Gold. An diesem Punkt ist ein weiterer Vorteil der AFC zu erkennen: Platin wird nicht benötigt. Für die katalytischen Vorgänge kann auf Nickel zurückgegriffen werden. Wie Tabelle 2 zeigt, ist Nickel in viel größerem Umfang und zu einem weit günstigeren Preis von $15,38 \text{ €/kg}$ verfügbar [13]. Für die Produktion der AFC kann allgemein auf günstigere Werkstoffe zurückgegriffen werden.

Eine Erhöhung der Leistungsdichte der PEMFC ist momentan nur mit einer noch aufwendigeren Membran zu verwirklichen, wobei für die katalytische Dissoziation der Reaktanden in nächster Zeit auf Platin nicht verzichtet werden kann. Derzeit sind 1 kW PEMFC-Stacks inkl. Steuerung für ca. 3.000 € erhältlich.

Tabelle 2: Nickel / Platin Produktion und Reserven [12]

	Prod. 2008 in t	Prod. 2009 in t	Reserven in t
Nickel Weltweit	1.570.000	1.430.000	71.000.000
Platin Weltweit	189	178	Ca. 142.000

Forschungsaktivitäten am IBZ:

Hydroflight: Bereits im Jahr 2007 hat das IBZ einen BZ-Roller auf Basis des Speedfight 2 (50ccm) von Peugeot aufgebaut. Es wurden alle Komponenten entfernt, welche für den Betrieb mit einem Verbrennungsmotor benötigt werden und durch einen PEMFC-Stack von Ballard (Nexa-Modul, $1,2 \text{ kW}$ Leistung) inkl. Zusatzsystemen und einem 5 kW Li-Ion Akku-Pack ersetzt. Insgesamt wurden zahlenmäßig mehr Teile ausgebaut als eingebaut. Der fertige Hydroflight weist fast die doppelte Leistung im Vergleich zum Ursprungsmodell auf und ist für die Straße zugelassen.

Zur Verfügung stehen mehrere Betriebsmodi. Bei Fahrten mit geringem Leistungsanspruch erfolgt die Energieversorgung über die BZ, welche auch gleichzeitig den Akku-Pack laden kann. Wird für die Beschleunigung oder für Bergauffahrten mehr Leistung benötigt, so wird der Elektromotor über die BZ und den Akku-Pack gespeist. Für Bergabfahrten oder Bremsvorgänge bietet der Roller auch die Möglichkeit überschüssige Bewegungsenergie zu rekuperieren und dadurch den Akku-Pack zu laden. Der Umbau wurde ohne Nachteile hinsichtlich Gewicht, Bauraum und Fahrleistung verwirklicht. Allein auf das Helmfach muss verzichtet werden, da dort der BZ-Stack untergebracht ist.

Hydrosmart: In weiteren Projekten hat das IBZ das Wissen im Bereich der elektrischen Fahrzeugantriebe vertieft und perfektionieren können. Zu einem dieser Projekte gehört der Hydrosmart. Aus einem Serien-Smart Fortwo ist ein Elektrofahrzeug mit BZ-Range-Extender entstanden. Auch hier wird als BZ ein PEMFC-Stack verwendet. Das Ziel dieses Projekts ist es, ein Fahrzeug aufzubauen, welches hinsichtlich Leistung und Reichweite derzeit verfügbare Fahrzeuge übertrifft. Um dies zu erreichen, musste ein neuartiges Fahrzeugkonzept entwickelt werden. Der Smart wurde mit $704 \text{ Li-Ion-Polymer-Consumer-Zellen}$ (22 kWh bei 135 kg) ausgestattet, welche eine Reichweite von ca. 130 km ermöglichen. Dieser Akku-Pack kann während der Fahrt und im Stillstand über die BZ-Stack geladen werden - im Stillstand auch über das allgemeine Stromnetz.

Der Akku-Pack ist nach Abbildung 3 mittig unter dem Fahrzeug in einem neuen CFK-Unterboden positioniert. An der Front ist jetzt die BZ mit einer Leistung von $2,5 \text{ kW}$ montiert. Für die Versorgung der BZ mit Wasserstoff wird eine Kohlefaserflasche mit 39 Liter Inhalt und einem Druck von 350 bar verwendet (blau in Abbildung 3). Bei 350 bar entspricht der Energiegehalt des Wasserstoffs im Speicher 40 kWh . Die BZ setzt die chemische Energie mit einem durchschnittlichen Wirkungsgrad von 40% in elektrische Energie um. Durch diese Maßnahme wird die Reichweite des Fahrzeugs auf insgesamt $250 - 300 \text{ km}$ erhöht. Als Antriebseinheit dient ein Elektromotor der Firma BRUSA mit 90 kW

Leistung und einem Drehmoment von 230 Nm. Der Motor ist direkt am Originalgetriebe montiert, wobei immer im zweiten Gang gefahren wird (Übersetzungsverhältnis 8,4:1). Dies bietet eine ausreichende Beschleunigung und Höchstgeschwindigkeit (> 120 km/h).

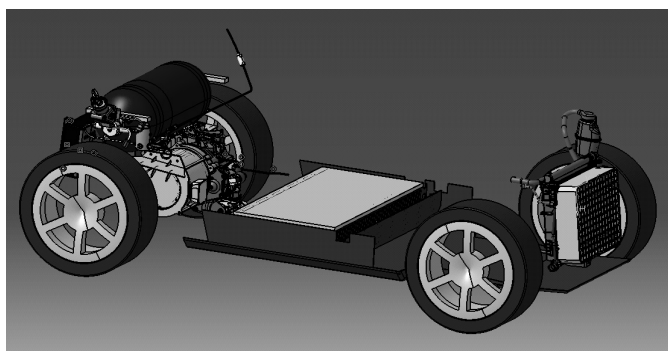


Abb. 3: Antriebskomponenten des HydroSmart [14]

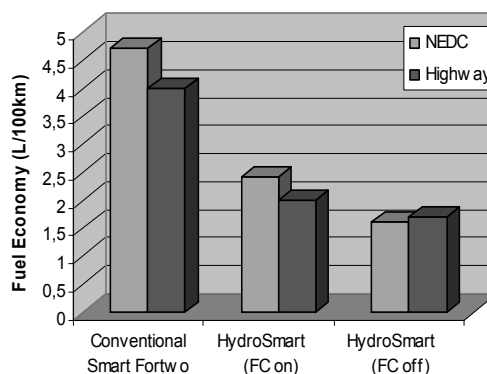


Abb. 4: Energieverbrauch (Benzin-Äquivalent) [14]

In Abbildung 4 ist die Simulation des Energieverbrauchs zu sehen. Zum besseren Verständnis sind die Ergebnisse in ein Benzin-Äquivalent umgerechnet. Untersucht werden die Fahrzyklen Autobahn (Highway) und Neue Europäische Fahrzyklus (NEDC). Die Simulation zeigt auch, dass die Erhöhung der Reichweite durch den Stack nur für den Stadtverkehr gilt. Bei Autobahnfahrten kann die BZ den Akku-Pack nicht ausreichend schnell laden [14].

Zusammenfassung: Die alkalische Brennstoffzelle bietet sehr viele Vorteile. Es ist der Einsatz von mehr metallischen Komponenten möglich, woraus sich günstigere Fertigungsverfahren ergeben. So können z. B. die Bipolarplatten aus Aluminium hergestellt werden, welche jedoch zusätzlich beschichtet werden müssen um dem alkalischen Milieu standzuhalten. Platin wird als Katalysator nicht benötigt, stattdessen kann auf das wesentlich günstigere Nickel zurückgegriffen werden. Günstigere Werkstoffe und einfachere Fertigungsverfahren senken die Produktionskosten und somit den Kaufpreis der alkalischen Brennstoffzelle. Das Problem der Vergiftung durch CO_2 ist trotzdem noch ungelöst. Eine Möglichkeit ist die Verwendung von CO_2 -Filtern.

In den o. a. Fahrzeugen sind BZ-Stacks des Typs PEMFC verbaut. Jedoch ist es möglich, die Stacks durch eine alkalische Brennstoffzelle mit Feststoff-Elektrolyt zu ersetzen. Dabei muss die CO_2 -Unverträglichkeit beachtet werden. Da die verwendeten PEMFC Stacks mit dem Sauerstoff aus der Umgebungsluft arbeiten, müssen beim Gebrauch einer AFC Lösungen gefunden werden, welche den Betrieb unter gleichen Bedingungen ermöglichen. Ein zusätzlicher Sauerstoffspeicher stellt hierbei kein Optimum dar. Dadurch verlieren die Vorteile der AFC an Gewicht, weil weitere Komponenten benötigt werden. Da diese Technologie noch in den Anfängen ist, gibt es viele Themen, an denen geforscht werden muss. Das Ziel am IBZ ist es, mit dem detaillierten Wissen über die Komponenten einzelnen Punkte zu optimieren, um einen Stack auf industriellem Niveau mit gleich bleibender Qualität herstellen zu können und in ein System zu integrieren (z. B. Verwendung in Fahrzeugen, als BHKW, als BZ-Batterie, ...).

Quellenverzeichnis:

- [1] Wiley-VCH, Fuel Cells – From Fundamentals to Systems, Journal, 2001 - 2010
- [2] Kurzweil, Peter: *Brennstoffzellentechnik*, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 1. Auflage, 2002
- [3] Gemma Crawley: *Alkaline Fuel Cells (AFC)*, Fuel Cell Today, Article, March 2006
- [4] Carrette L., Friedrich K. A., Stimming U.: *Fuel Cells – Fundamentals and Applications*, Fuel Cells – From Fundamentals to Systems, WILEY-VCH Verlag GmbH, 2001 Volume 1-1
- [5] www.focus.de, *VW Verkaufsschlager für den Herbst*, Focus Online, August 2008, (aufgerufen am 10.07.10)
- [6] Zentrum für BrennstoffzellenTechnik - ZBT GmbH, *Brennstoffzellen und Komponenten*, Broschüre, Mai 2004
- [7] www.energieportal24.de, *Die Bipolarplatten als Lunge der Brennstoffzelle*, Artikel, April 2003 (aufgerufen am 10.07.10)
- [8] Lee S. H., Leutner H.: *Platin – Geologie, Vorkommen, Wert und Anwendungsgebiete*, Wirtschaftsgeologieseminar, Bayrische Julius Maximilians Universität, 2009
- [9] Eichseder H., Klell M.: *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik*, Vieweg + Teubner Verlag, 2. Auflage, 2010
- [10] www.beyars.com, *Platinvorkommen und sein Wert*, Artikel, (aufgerufen am 10.07.10)
- [11] www.allgemeine-gold.de, *Edelmetallkurs*, (aufgerufen am 10.07.10)
- [12] United States Geological Survey, *Statistics and information on the worldwide supply of, demand for, and flow of minerals and materials*, Annual Publication for 2010
- [13] www.finanzen.net/rohstoffe/nickelpreis, (aufgerufen am 12.07.10)
- [14] Gabele H., Panik F., Ziegler M.: *Elektro Smart mit Brennstoffzellen Range Extender*, Horizonte, Zeitschrift Hochschule Esslingen, August 2009