

■ Brennstoffzellen und Wasserstofftechnologien in der Praxis

- Die keramische Brennstoffzelle als Energiewandler für die Stromerzeugung im Auto
- Brennstoffzellen im Einsatz als dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung
- Brennstoffzellen für die Mikroenergietechnik
- Wasserstofftechnologie in stationären autonomen Systemen

Die keramische Brennstoffzelle als Energiewandler für die Stromerzeugung im Auto

Dr. Franz-Josef
Wetzel
BMW Group
franz-josef.wetzel@bmw.de

Dr. Evelyn Proß
BMW Group
evelyn.pross@bmw.de

Dr. Günther
Schiller
DLR
guenter.schiller@dlr.de

Wasserstoff als Kraftstoff

Realistische Energie-, Umwelt- und Verkehrsszenarien gehen davon aus, dass das Automobil auch weiterhin Basis der Mobilität bleibt. Es wird jedoch in Zukunft neben Benzin auch mit anderen Kraftstoffen betrieben werden. Dabei stellen Erdgas und insbesondere Wasserstoff die saubersten Alternativen dar. Wasserstoff macht vor allem dann Sinn, wenn er mit Hilfe von regenerativem Strom umweltneutral aus Wasser hergestellt wird. Als Verbrennungsprodukt entsteht im Wesentlichen wieder der Ausgangsstoff Wasser.

Die BMW Group setzt mittel- und langfristig auf diese Option. Das Unternehmen sieht darin die beste Möglichkeit, optimale Schonung der Umwelt mit Mobilität verbinden zu können. Wegen seiner bestechenden Praxiseigenschaften gilt dabei der wasserstoffbetriebene Verbrennungsmotor als der Zukunftsantrieb [1].

Solange Wasserstoff als Kraftstoff in geeigneten Mengen praktisch noch nicht verfügbar ist, bietet sich das ungiftige Erdgas über die kommenden Jahrzehnte als erdölschonende und umweltfreundliche Zwischenlösung an: Mit Erdgas betriebene Motoren emittieren beispielsweise rund 20 % weniger klimarelevantes CO₂ und 80 % weniger ozonbildende Kohlenwasserstoffe. Damit können die strengen kalifornischen Grenzwerte für „Ultra Low Emission Vehicles“ schon heute erfüllt werden. Gleichzeitig ist die Technologie von Erdgas- und Wasserstoffmotoren ähnlich. Deshalb war die BMW Group der erste europäische Automobilhersteller, der serienmäßig gefertigte Erdgasautomobile am Markt anbot und damit den ersten konsequenten Schritt in Richtung Wasserstoffautomobil gezielt vollzog.

Zur Darstellung zukunftssträchtiger Antriebssysteme für Benzin, Diesel und Wasserstoff werden sowohl in den Unternehmen als auch in der Öffentlichkeit verschiedene Lösungsansätze vertreten. Die BMW Group favorisiert hierbei eine Strategie, bei der die Zahl von Energieumwandlungsschritten und der zugehörigen Bauteile auf einem Minimum gehalten werden. Die Abb. 1 zeigt den Paradigmenwechsel in der Stromversorgung [2].

Brennstoffzellen-APUs

Unabhängig vom Kraftstoff ergibt sich das gemeinsame Optimum von Mobilität und energetischer Effizienz der Transportleistung, durch eine geschickte Aufteilung der Leistungsbereitstellung für den Vortrieb und für die Nebenaggregate des Fahrzeugs.

Bei diesem Konzept wird der Verbrennungsmotor von möglichst vielen Aufgaben zur Bereitstellung von Hilfsenergien befreit. Er kann somit für seine Aufgaben als Energiewandler für den Antrieb optimiert werden (Abb. 2).

Wenn sinnvoll, werden die Nebenaggregate des Automobils elektrifiziert und können dadurch noch bedarfsgerechter als bisher betrieben werden. Sinnvoll ist dies jedoch nur, wenn das zeitliche Integral über die typischen Nutzungstechniken einen geringeren Energieverbrauch ergeben, oder wenn sich bei gleichem Verbrauch aus Kundensicht signifikante Nutzungsvorteile ergeben – z. B. hinsichtlich Komfort.

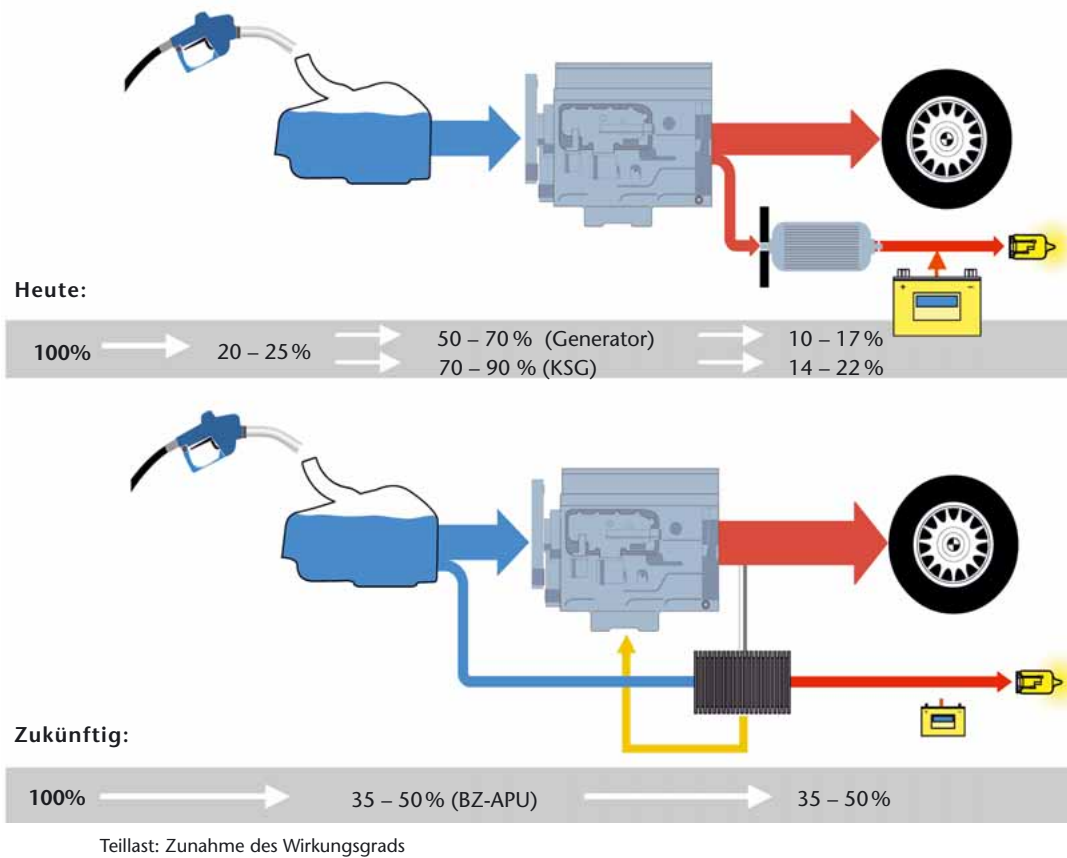


Abbildung 1
 Paradigmenwechsel in der Stromversorgung: Die Prozentangaben bezeichnen den durchschnittlichen Wirkungsgrad.

Die Jahresenergiebilanz elektrifizierter Nebenaggregate wird gegenüber den ausgereiften heutigen Systemen in der Regel nur dann besser sein, wenn die Bereitstellung der elektrischen Energie mit signifikant höherem Wirkungsgrad erfolgt, als dies durch die bisherige Technologie der keilriemengetriebenen Generatoren möglich ist.

Die BMW Group sieht für diesen Zweck eine sinnvolle Einsatzmöglichkeit von Brennstoffzellen auch wenn sie heute im Vergleich mit guten Hubkolbenmotoren leistungsbezogen immer noch sehr kostenintensiv sind.

Will man Brennstoffzellen schon im Benzin- und Dieselzeitalter eine Marktchance eröffnen, so benötigen diese Gasbereitstellungsanlagen geringes Gewicht, kleines Volumen und geringe Kosten. Eine Eigenschaftsbewertung verschiedener Bauformen von Brennstoffzellen als Hilfsenergie-Bereitstellungsanlagen (Auxiliary Power Unit, APU, [2]) ergibt signifikante Vorteile für

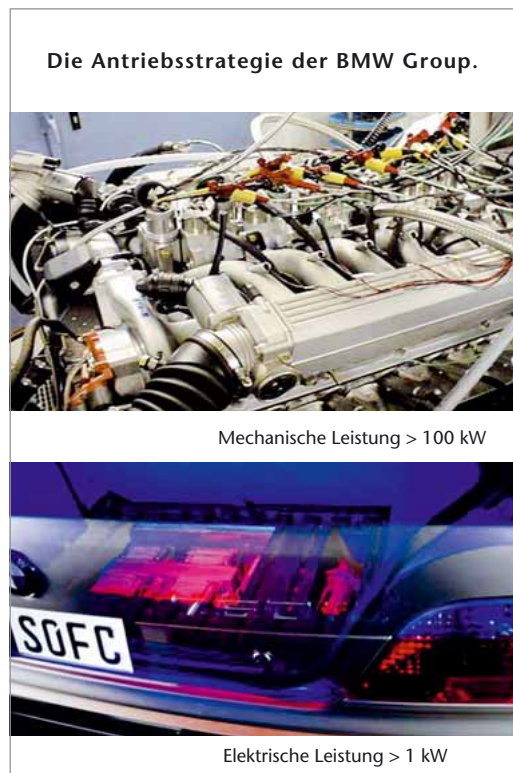


Abbildung 2
 Jedes System macht was es am besten kann: Wasserstoffmotor und Brennstoffzelle für die Stromversorgung.

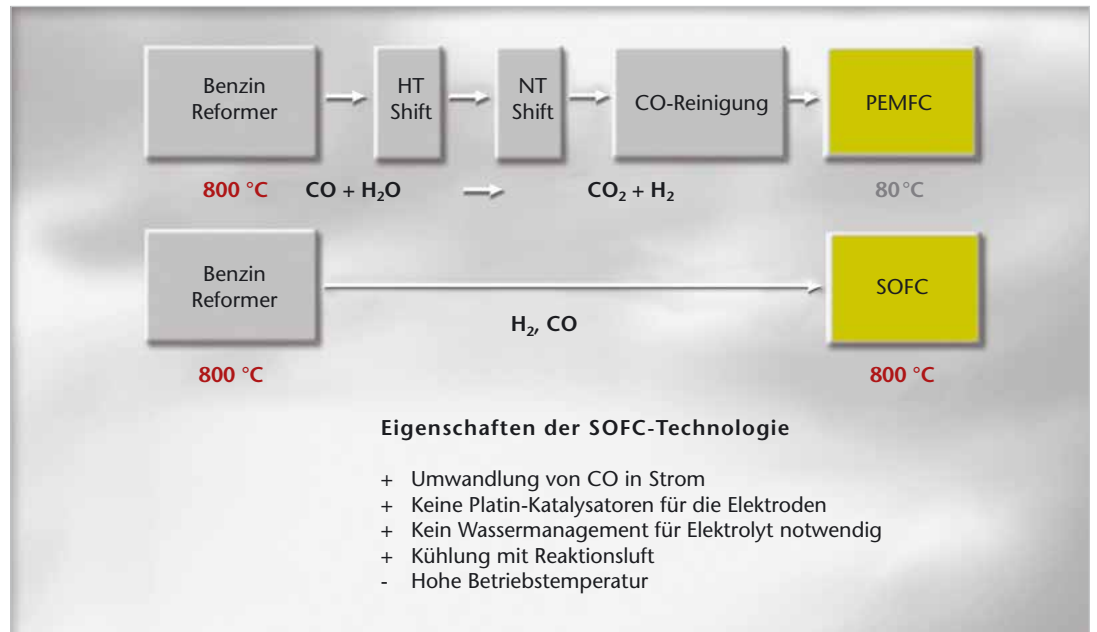


Abbildung 3
Vergleich PEMFC
mit SOFC im
Benzinbetrieb

die keramische Variante, welche allerdings erst bei Temperaturen oberhalb von ca. 650 °C funktioniert (Abb. 3). Daraus resultiert jedoch ihr Hauptnachteil. Sie kühlt bei längeren Betriebspausen aus. Werkstoffbedingt verträgt sie beim Wiederhochheizen thermomechanische Spannungen nur in begrenztem Maße. Daraus resultiert, dass trotz automobilerorientierter Aus-

legung des Brennstoffzellenblocks bei Abkühlung der APU auf Umgebungstemperatur einige Minuten Anwärmzeit in Kauf genommen werden müssen.

Die Lebensdauer der einzelnen Brennstoffzellen unter automobilen Betriebsbedingungen spielt eine zentrale Rolle. Sie hängt sowohl von der

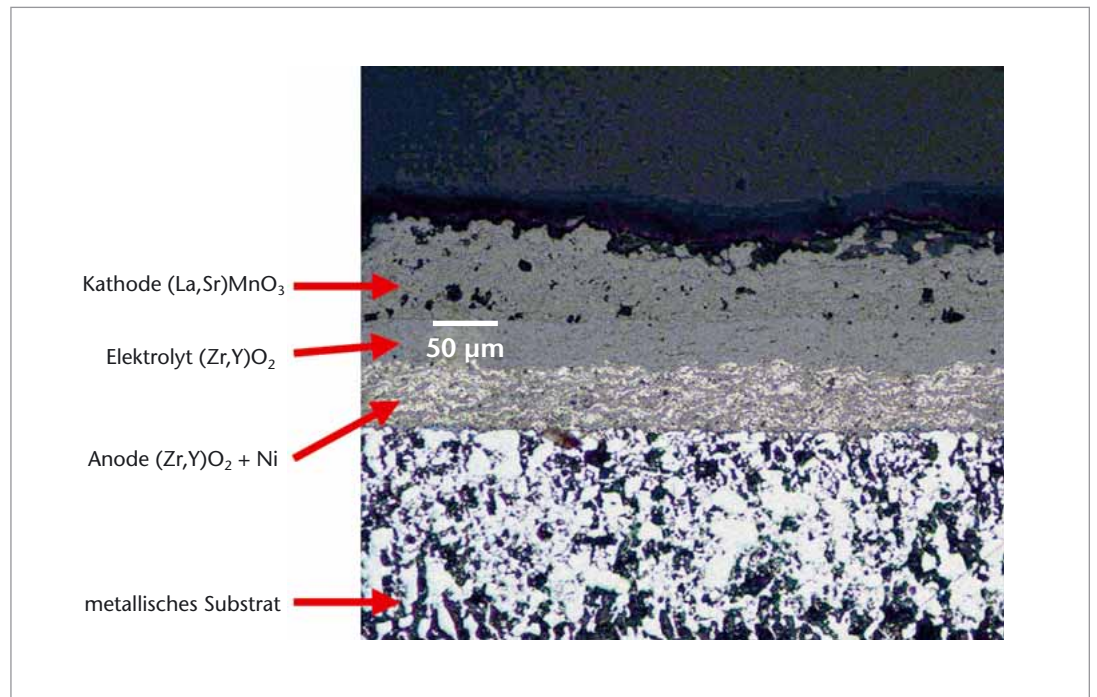


Abbildung 4
Schnitt durch
eine plasmage-
spritzte SOFC
Quelle: DLR

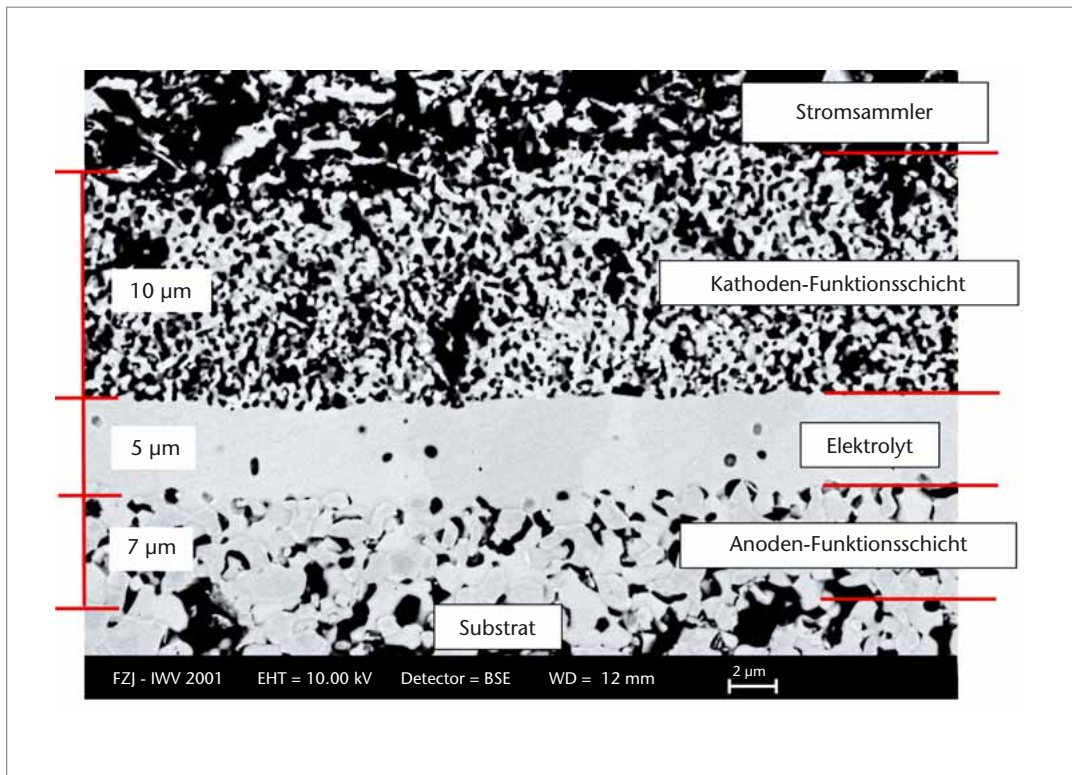


Abbildung 5
Schnitt durch
eine gesinterte ASC
(Anode Supported Cell)
Quelle: FZ Jülich

Herausforderungen

- Entwicklung von Komponenten, die gegenüber Last- und Thermozyklen tolerant sind
- Verbesserung der Schnellstartfähigkeit
- Erhöhung der volumetrischen und gravimetrischen Leistungsdichte sowie der Lebensdauer
- Reduzierung der Kosten

Maßnahmen

- Wahl und Optimierung von Materialien und Fertigungsverfahren
- Änderung des Designs
- Anpassung der Betriebsweise

konstruktiven Auslegung als auch vom Herstellungsverfahren der keramischen Reaktionsschichten ab (Abb. 4 und 5). Diese Erkenntnisse wurden bereits frühzeitig in den Entwicklungsprozess der APU integriert (Tab.1).

Nach mehr als 10 Jahren Brennstoffzellen-Praxiserfahrung wurde nun die weltweit erste Brennstoffzellen-APU auf Basis einer keramischen Brennstoffzelle in einer Limousine der BMW 7er Reihe der Öffentlichkeit vorgestellt [3]. Diese benzinbetriebene APU wurde mittels einer isolierten Box im Bereich der bisherigen Ersatzradwanne in den Kofferraumboden integriert. Damit wurde ein integriertes Package-konzept von Karosserie, Fahrwerk und APU erreicht. Das System liefert eine Spannung von 42 V und erfüllt damit die Anforderungen zukünftiger Bordnetze.

Trotz der Erfolge gibt es weiterhin großen Forschungs- und Entwicklungsbedarf für Brennstoffzellen-APUs:

Die Brennstoffzellen-APU erschließt durch die motor- und batterieunabhängige Bereitstellung elektrischer Leistung neue Fahrzeugfunktionen,

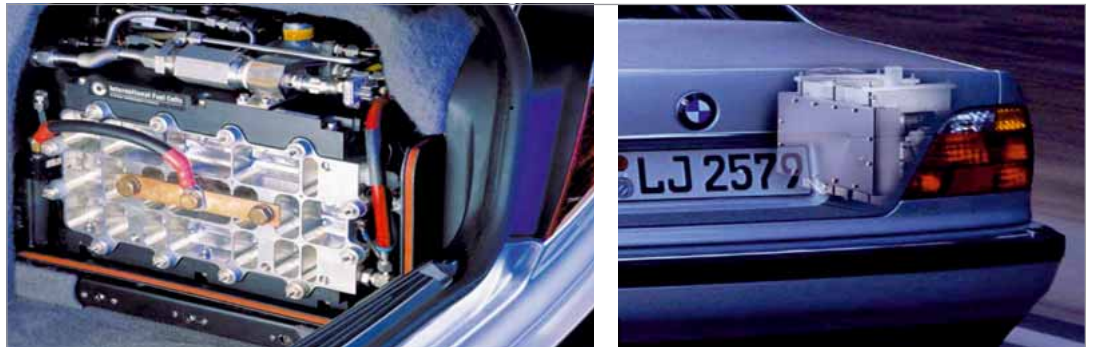
Tabelle 1
SOFC-Forschungsbedarf aus BMW-Sicht

auch bei dessen Fahrzeugstillstand [4]. So können z. B. zusätzlich zur Standheizungsfunktion u.a. die Sitze elektrisch vorgeheizt werden. Bei sommerlicher Hitze kann der Fahrgastraum via elektrisch betriebenem Klimakompressor bereits vor der Fahrt auf angenehme Temperaturen gebracht werden. Multimedia- und Kommunikationsanwendungen, wie z. B. das Internet, werden auch im Fahrzeugstillstand möglich. In einigen Jahren können die dann elektrifizierten Nebenaggregate eines Automobils sowohl im Fahrbetrieb als auch im abgestellten Zustand komforterhöhend und gleichzeitig verbrauchs-

optimal betrieben werden. Der zukünftig stark zunehmende Elektrizitätsbedarf der Fahrzeuge kann somit mit Brennstoffzellen-APUs gedeckt werden [4].

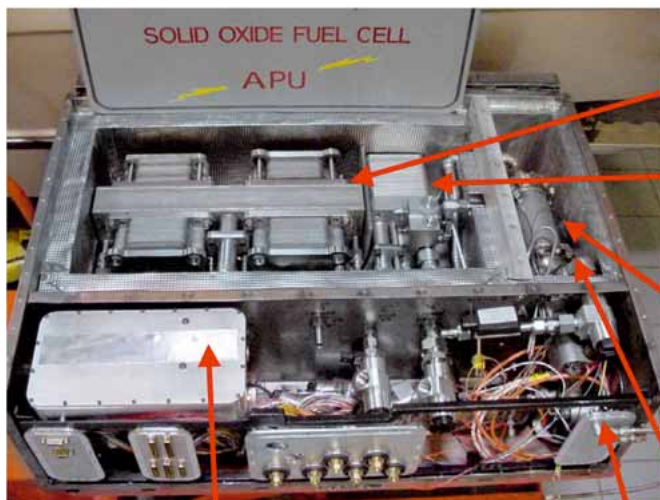
Pro Kilowatt Leistungsbedarf des elektrischen Bordnetzes erschließt die keramische Brennstoffzellen-APU einen Verbrauchsvorteil von mehr als 0,5 Liter Benzin oder Diesel pro hundert Kilometer. Hinzu kommt die Erschließung von Verbrauchsminderungspotenzialen durch die Optimierung der Verbrennungsmotoren auf ihre Antriebsaufgabe.

Abbildung 6
BMW 750 hl –
Wasserstofffahrzeug
mit Brennstoff-
zellen-APU (PEM)
in Kleinserie
Partner: IFC/UTI



Leistung: 5 kW_e / Spannung: 42 V / Wirkungsgrad: 35-50 % (Gesamtsystem)
Volumen: 20 l (Stack) 48 l (Gesamtsystem) / Gewicht: 22 kg (Stack) 45 kg (Gesamtsystem)

Abbildung 7
Brennstoffzellen-
APU für Benzinfahr-
zeuge. Delphi 1,5 kW
SOFC APU-Gesamt-
system („Hot-Box“)
der 1. Generation



Brennstoffzellen-Stack
Erzeugung elektrischer Energie
aus Reformat (H₂ und CO)

Energie-Rückgewinnung
Restgasverbrennung, Aufheizung Reaktionsluft

Hauptreformer
Aufheizung Stack, Erzeugung von Reformat
(20% H₂, 20% CO, 3% CH₄, Rest N₂)

Mikroreformer
Start Hauptreformer

Luft-Gebläse
Reaktionsluft und
Kühlluft

Kraftstoffversorgung

Literatur

- [1] CleanEnergy – Wasserstoffantrieb
Informationen der BMW Group,
D-80788 München

- [2] J. Tachtler, Thomas Dietsch and
Georg Götz
Fuel Cell Auxiliary Power Unit –
Innovation for Electric Supply of Passenger
Cars, 2000-01-0374; SAE 2000 World
Congress, Detroit, March 6-9, 2000

- [3] Andreas Klugescheid, Thomas Gubitze
BMW Group presents first car with petrol
fuel cell for onboard electricity supply
BMW Group, Corporate Communications,
Media Information, D-80788 Munich,
E-Mail: presse@bmw.de

- [4] Burkhard Göschel, Member of the Board
of Management of BMW Group,
R&D Presentation of the SOFC Prototype
Vehicle, Februar 16, 2001 BMW Group,
Corporate Communications, Media
Information, D-80788 Munich

Brennstoffzellen im Einsatz als dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung

Dr. Klaus Heikrodt

Viessmann Werke
GmbH & Co KG
drh@viessmann.com

Dr. Christof Wittwer

Fraunhofer ISE
christof.wittwer@ise.fhg.de

Dr. Joachim Scholta

ZSW
joachim.scholta@zsw-bw.de

Einleitung

Die vom Menschen verursachten CO₂-Emissionen führen offensichtlich zu einer Klimabeeinflussung. Aus diesem Grund hat die Bundesregierung beschlossen, diese Emissionen bis 2005 um 25 % gegenüber dem Stand von 1990 zu reduzieren. Diese Zielsetzung, ist ohne maßgebliche Mitwirkung der Hausenergietechnik nicht zu erreichen. Im Vergleich zu anderen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen weist nach Voruntersuchungen die erdgasbetriebene Niedertemperatur-Brennstoffzelle das größte Potenzial auf, dezentral und im kleinem Leistungsbereich mit hohem elektrischen Wirkungsgrad, die elektrische Energieversorgung im Haushalt zu unterstützen und die Wärmeerzeugung mit äußerst niedrigen Schadgasemissionen zu übernehmen.

Die Viessmann Werke arbeiten seit 2000 an der Entwicklung einer Brennstoffzellenanlage, im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wissenschaft und Arbeit (BMWA) geförderten Verbundvorhabens [1]. Die Schwerpunkte der Entwicklungsarbeiten bei Viessmann liegen in der Entwicklung des Gaserzeugungssystems, des Brennstoffzellenstacks und der Senkung der bisher hohen Systemkosten, sowie der Steigerung von Lebensdauer und Zuverlässigkeit. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die Entwicklung mehrerer Laborgeräte durchgeführt. Derzeit laufen Lebensdaueruntersuchungen an Komponenten und Gesamtanlagen mit Blick auf erste Anwendungsversuche in 2005.

Versorgung von Ein- und Zweifamilienhäusern

Im Jahr 2000 umfasste die Wohnbevölkerung in Deutschland 82,2 Mio. Menschen, die in einem Bestand von 38,4 Mio. Wohnung lebten. Die Gebäudestruktur weist in 2001 10,24 Mio. Einfamilienhäuser, 3,37 Mio. Zweifamilienhäuser und 1,97 Mio. Mehrfamilienhäuser auf [2]. Anlagenanzahl und Energieverbrauch machen den Markt der Ein- und Zweifamilienhäuser sowohl im Bestand als auch im Neubau interessant, er ist aber hinsichtlich der Anforderungen sehr schwierig. Abb. 1 zeigt das Anlagenschema einer Brennstoffzellen-Hausenergieversorgungsanlage.

Die Brennstoffzelle muss nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten ausgelegt und betrieben werden. Die Wirtschaftlichkeit von Brennstoffzellenanlagen wird durch das Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz und die ökologische Steuerreform unterstützt [3,4]. Danach erhalten Betreiber von KWK-Anlagen mit einer elektrischen Leistung unter 2000 kW und einem Jahresnutzungsgrad der Anlage über 60 % eine Befreiung von der Öko-Mineralölsteuer von 0,366 Ct/kWh (H₀)¹ bei Erdgas und zusätzlich bei einem Jahres- bzw. Monatsnutzungsgrad von mindestens 70 % auch von der bisherigen Mineralölsteuer von 0,184 Ct/kWh (H₀) bei Erdgas. Aus Abb. 2 [4] lässt sich auch der ökologische Nutzen einer KWK-Anlage erkennen. Im Vergleich zur Stromerzeugung aus Kohlekraftwerken und Wärmeerzeugung mit einem Heizöl-Kessel kann mit einer KWK-Anlage 36 % Primärenergie und 58 % CO₂ eingespart werden.

Der jährliche Stromverbrauch von Einfamilienhäusern ist abhängig von verschiedenen Faktoren wie Personenzahl im Haushalt, Art und Fläche und elektrischer Ausstattung.

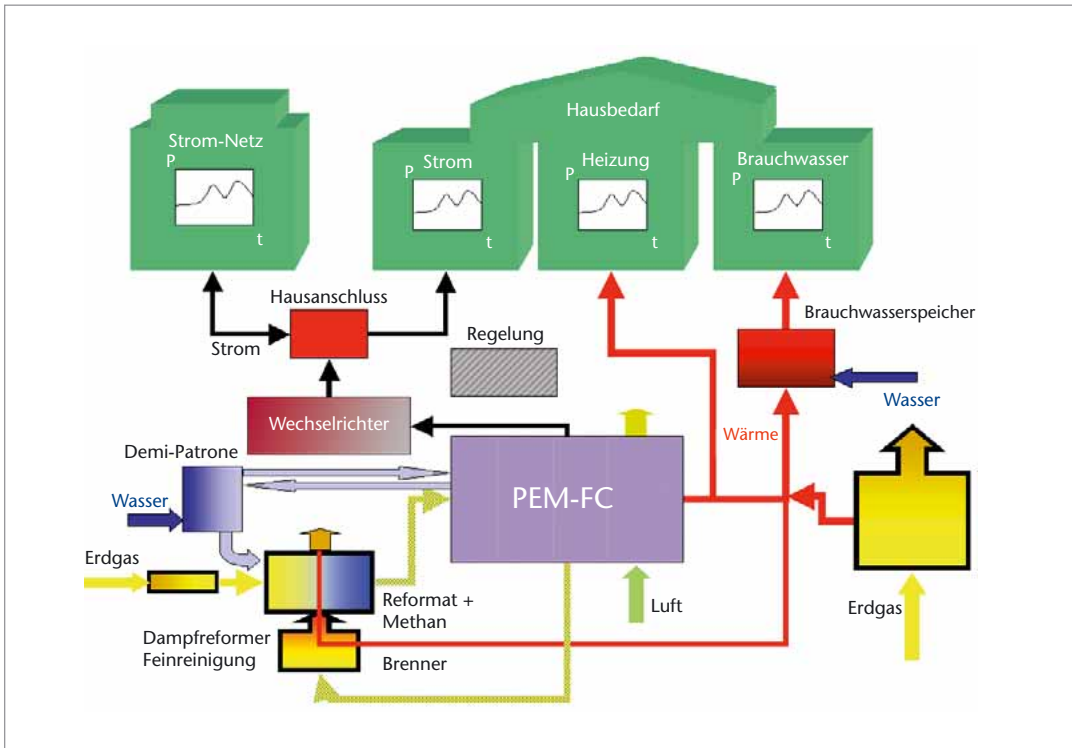


Abbildung 1
Anlagenschema
einer Brennstoffzellen-
Hausenergieversor-
gungsanlage

Der Warmwasserbedarf wird in einer VDI-Richtlinie [5] behandelt; näheres zum Strom- und Wärmebedarf kann in einer Broschüre über erdgasbetriebene Brennstoffzellen-Hausanlagen [1] nachgelesen werden. Aus diesen Überlegungen resultiert die Auslegung der Brennstoffzellenanlage. Die elektrische Nettoleistung wurde mit 2 kW festgelegt, woraus sich eine thermische Leistung von 5 kW ergibt.

Die elektrische Leistung ist mit 2 kW für ein Einfamilienhaus eher hoch veranschlagt, der gute Teillastwirkungsgrad der Brennstoffzellen und eine Modulation von 1:5 sprechen für diese Auslegung. Die Auslegungsdaten sind in Abb. 3 zusammengefasst.

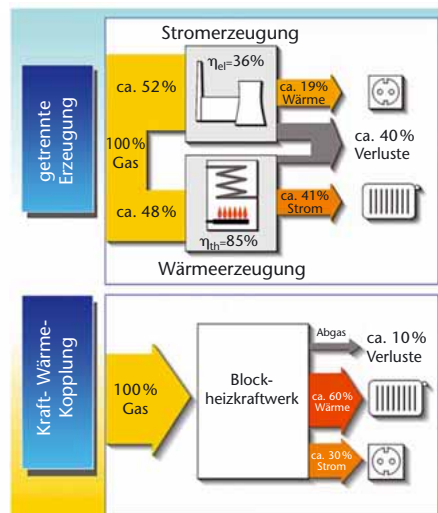
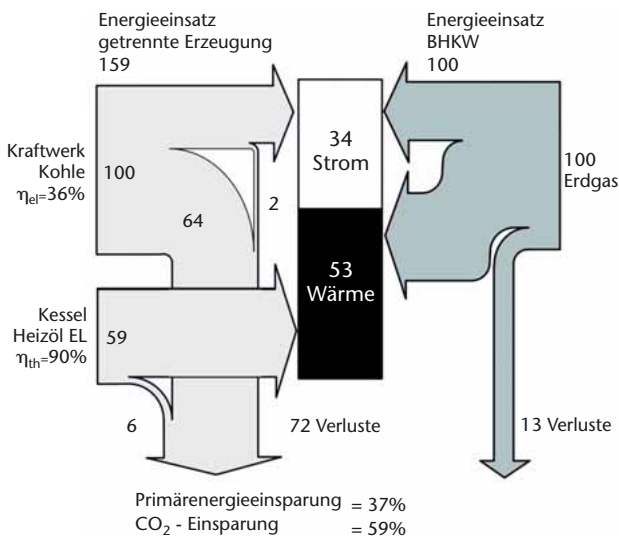


Abbildung 2
Getrennte
Energieerzeugung
im Vergleich zur
Kraft-Wärme-Kopplung

Abbildung 3
Auslegungsdaten
einer Brennstoff-
zellen-Hausanlage



Erzeugung von elektrischer Energie und Wärme zur Hausheizung und Trinkwassererwärmung in Ein- und Mehrfamilienhäusern

Brennstoffzelle

PEMFC	2 kW _{el} Netto
Modulationsgrad	1:5
Druck	Normaldruck
Kathode	Betrieb mit unbefeuchteter Luft
CO-Toleranz	< 20 ppm Betrieb ohne air bleed
Auslegungsspannung	> 650 mV bei 0,6 A/cm ²
Wasserstoffumsatz	> 80%
Luftumsatz	> 60%

Gesamtanlage

Heizmitteltemperaturen	bis 75 °C
Ges. Wirkungsgrad	> 90% Niedertemperatur-Heizkreis
Elektr. Wirkungsgrad	> 32%
Lebensdauer	> 40.000 h
Geringer Wartungsaufwand	
Kaltstartzeit (20 °C)	< 15 min
Thermische Leistung	3-5 kW
Gewicht	120 kg
Abmaße	60 * 70 * 100 (cm)
Wärmespitzenabdeckung	Zusatzgerät

Stand der Entwicklung am Beispiel der SOFA 3-Anlage

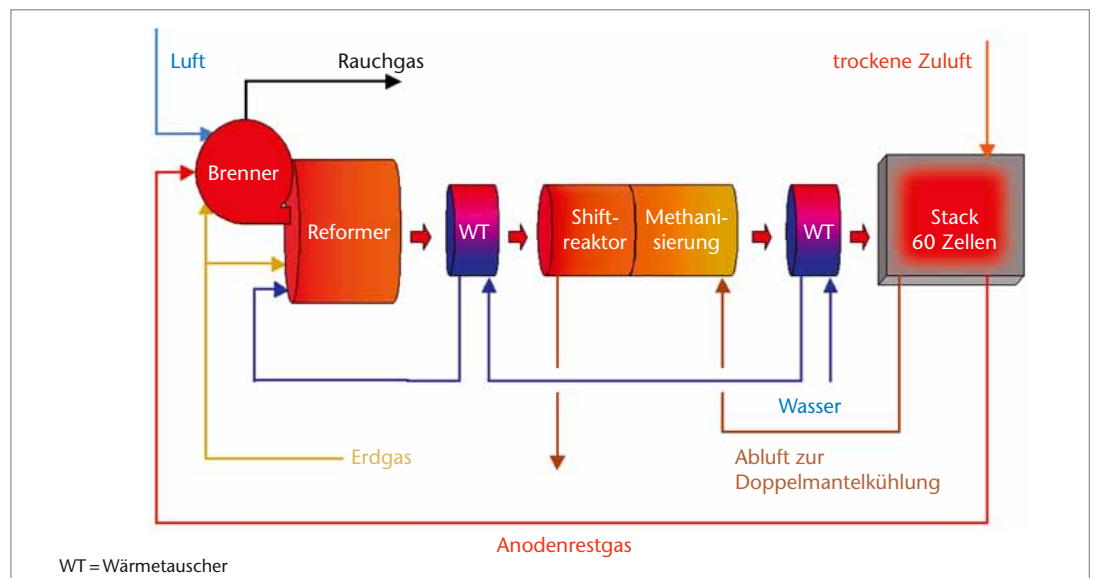
Gaserzeugung

Für die Gaserzeugung wurde aus energetischen und Gasqualitätsgründen das Konzept der Dampfreformierung gewählt. Nach der Reformierung erfolgt eine zweistufige Gasreinigung, in der das verbleibende Kohlenmonoxid (CO) in einer sogenannten chemischen Shiftreaktion zu CO₂ beziehungsweise zu CH₄ (Methan)

umgewandelt wird. Dieses Konzept ermöglicht den Verzicht auf zwischengeschaltete Wärmetauscher in der Gasreinigung. Die in der SOFA 3-Anlage realisierte Gaserzeugung ist in *Abb. 4* wiedergegeben.

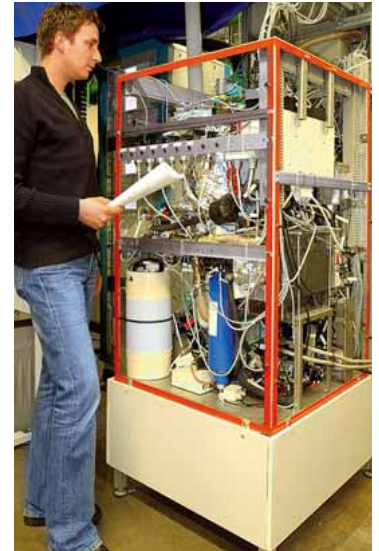
Die Entwicklungsschritte sind in *Abb. 5* dargestellt. Der erste Prototyp SOFA 1 ist mit einer Gaserzeugung bestehend aus Reformer, Hochtemperatur-Shift, Niedertemperatur-Shift, selektive Oxidation und zwei umluftbefeuchteten Brennstoffzellen-Stapeln ausgeführt.

Abbildung 4
Gaserzeugung in der
SOFA 3-Anlage



Der dritte Prototyp SOFA 3 hat eine Gaserzeugung nach *Abb. 4* und einen Stack mit unbefeuchteter Kathode. Größe und apparativer Aufwand sind wie in *Abb. 5* zu sehen durch diese Maßnahmen entschieden reduziert worden.

Im Zuge der angestrebten Lebensdauer von 40.000 h wurden Untersuchungen zum Einfluss von Schadgasen auf die Brennstoffzellen-Leistung durchgeführt. Hierbei ergab sich eine relative Unempfindlichkeit der Zelle auf Belastungen mit Ethylen, andererseits eine sehr hohe Empfindlichkeit auf Schwefelwasserstoff, welcher vollständig aus dem Anodengas entfernt werden muss. Dieses erfolgt über eine in die Gasaufbereitung integrierte Entschwefelungseinheit.



Brennstoffzellen-Stapel

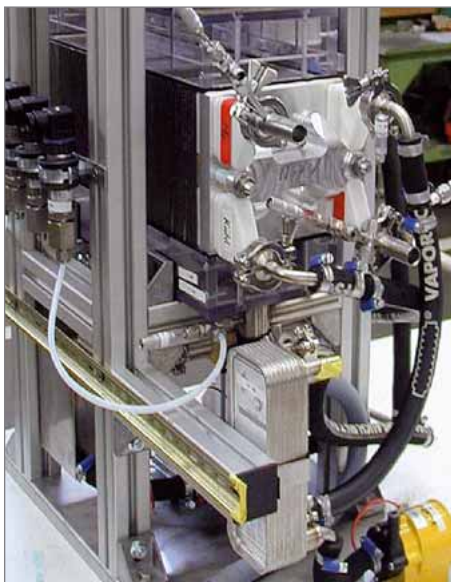
Die Brennstoffzellen-Stapelentwicklung führte von den zwei Stapeln – in der technischen Umgangssprache als Stacks bezeichnet – mit Umluftbefeuchtung und 140 Zellen auf einen Stack mit 60 Zellen, der ohne zusätzliche Kathodenbefeuchtung betrieben werden kann.

Beide Prototypen lieferten 2 kW elektrische Leistung. Der Luftumsatz an der Kathodenseite wurde deutlich erhöht, um den Wasseraustrag mit der Abluft zu reduzieren. Die technischen Daten und die Ausführung des Stacks im Prototyp SOFA 3 sind in *Abb. 6* dargestellt.

Gesamtsystem

Das Gesamtsystem Prototyp SOFA 3 ist in *Abb. 5* dargestellt. Das Gerät kann mit gängigem Erdgas betrieben werden, eine Entschwefelung ist im Gehäuse untergebracht. Die elektrische Bruttoleistung beträgt 2,2 kW Gleichstrom, das entspricht einer Nettoleistung von 2,0 kW Wechselstrom. Der elektrische Wirkungsgrad ist mit 28% noch nicht im Zielgebiet, eine Verbesserung ergibt sich aber schon mit der zunehmenden Güte der elektrischen Komponenten des Gesamtsystems (wie zum Beispiel Wechselrichter, elektrische Pumpen und Ventile).

Abbildung 5
Größenvergleich der Prototypen SOFA 1 und SOFA 3



DC-Leistung	2,2 kW (650 mV mittlere Zellspannung) 60 Zellen (39 V Nennspannung) Zellfläche 140 cm ² (Stromdichte 400 mA/cm ²)
Nennleistungsdichte	0,27 W/cm ²
Stacktemperatur	70 °C
Kühlung	Wasserkühlung
H ₂ -Umsatz	> 70% bei Dampfpreformat (H ₂ -Gehalt ca. 75%)
Luftumsatz	> 50 %
Druckverluste	Anode < 10 mbar Kathode < 10 mbar

Abbildung 6
Technische Daten des Stacks im Prototyp SOFA 3

Versorgungsobjekt	Saniertes Einfamilienhaus (5 Personen)
Beheizte Fläche	180 m ²
Spezifischer Raumwärmebedarf	78 kWh/m ² a
Warmwasserverbrauch	2600 kWh/a
Stromverbrauch	5500 kWh/a
Brennstoffzellen-BHKW	2 kW PEM
Elektrischer Wirkungsgrad	29,5%
Thermischer Wirkungsgrad	50,5%
Wärmespeicher	Schichtspeicher mit integriertem Gasbrenner
Volumen	750 l
Leistung Gasbrenner	10 kW
Elektrisches Netz:	
Wirkungsgrad des Stromerzeugungsmixes	39,1%
Strompreis (inkl. MWST)	15,31 Cent/kWh
Einspeisevergütung	8 Cent/kWh
Gasnetz:	
Gaspreis (inkl. MWST)	4,41 Cent/kWh

*Tabelle 1
Randbedingungen
für die Simulations-
studie aus Abb. 7,
prognostizierte Werte
für das Jahr 2010
(siehe [8]).*

Heizwassertemperaturen von 35 °C bis 75 °C sind möglich. Die Abgasemissionen sind durch Einsatz konventioneller Brennertechnik besser als der Grenzwert für den „Blauen Engel“ und die Schallemissionen vergleichbar konventioneller Gasheiztechnik. Die Kaltstartzeit (Start der Anlage bei einer Systemtemperatur von 20 °C bis zum Beginn der Erzeugung von elektrischer Energie) beträgt knapp 30 min, die Warmstartzeit nach 1 h Anlagenstop ca. 15 min. Die Maße des Gesamtsystems des Prototyps SOFA 3 betragen 80 x 80 x 105 cm. Die Anlage wiegt 150 kg.

Betriebsführungskonzepte

Für die Energieversorgung eines Gebäudes auf Basis eines Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerks (BHKW) in Kombination mit einem Wärmespeicher und einem Zusatz-Wärmeerzeuger wird ein Regelungskonzept benötigt, das einerseits die Versorgungssicherheit gewährleistet und andererseits die Anlagenkomponenten vor unzulässigen Betriebszuständen schützt. Die dazu notwendige Regelungshierarchie besteht aus vier Ebenen [6]. Im Folgenden wird die oberste Ebene dieses Konzeptes, die sogenannte Betriebsführung, erläutert. Neben den Betriebsführungsarten „stromgeführt“ und „wärmegeführt“ werden zwei optimierte Regelstrategien unter-

sucht, die einerseits die Betriebskosten und andererseits den Primärenergiebedarf minimieren.

1. Stromgeführter Betrieb

Abhängig von dem Speicherzustand und den Lastgrenzen (Teillastgrenze und Nennbetriebspunkt) des BHKW folgt die Anlage dem aktuellen Strombedarf des Gebäudes.

2. Wärmegeführter Betrieb

Bei Wärmebedarf wird das Brennstoffzellen-BHKW zugeschaltet und erst nach Überschreiten des vorgegebenen Solltemperaturbereichs wieder abgeschaltet.

3. Betriebskosten-optimierte Regelstrategie

Auf Basis von Lastprognosen wird der Arbeitspunkt des Brennstoffzellen-BHKWs ermittelt, der für ein definiertes Zeitintervall die geringsten Betriebskosten verursacht. Berücksichtigt sind dabei die Energiebezugskosten, die Einspeisevergütung und die spezifischen Wartungskosten.

4. Primärenergie-optimierte Regelstrategie

Auf Basis von Lastprognosen wird derjenige Arbeitspunkt des Brennstoffzellen-BHKWs ermittelt, der für ein definiertes Zeitintervall den geringsten Primärenergiebedarf aufweist. Berücksichtigt werden dabei der Erdgasbedarf des Brennstoffzellen-BHKWs, der Erdgasbedarf des Gasbrenners, der Strombezug (gewichtet mit dem Wirkungsgrad des Strommixes) und die primärenergetische Gutschrift für die ins Netz eingespeiste elektrische Energie (ebenfalls gewichtet mit dem Wirkungsgrad des Strommixes). Zur energetischen und wirtschaftlichen Bewertung von Energieversorgungskonzepten sind Untersuchungen im Jahresverlauf erforderlich, die anhand von Simulationsstudien sehr effizient durchgeführt werden können. Die dazu notwendige Modellbildung wird in [6 und 7] näher beschrieben.

In *Tab. 1* sind die Randbedingungen für die vorgestellte Simulationsstudie aus *Abb. 7* zusammengefasst.

In *Abb. 7* sind die Simulationsergebnisse für ein Energieversorgungssystem auf Basis eines Brennstoffzellen-BHKWs mit einer elektrischen Leistung von 2 kW, eingesetzt in einem sanierten Einfamilienhaus, dargestellt.

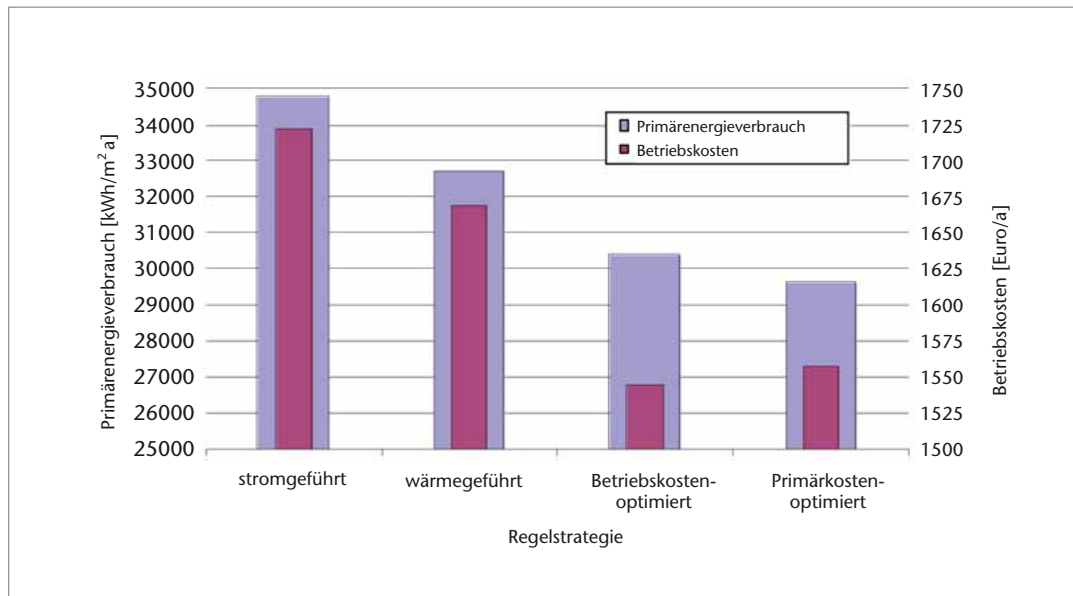


Abbildung 7
Vergleich verschiedener Regelstrategien für ein Brennstoffzellen-BHKW auf PEM-Basis, hinsichtlich Primärenergieverbrauch und Betriebskosten [6]

Nähere Angaben zu den verwendeten Algorithmen sind in [6] zu finden.

Es wird ein deutlicher Einfluss der Betriebsführungsstrategie auf die Primärenergie und die Betriebskosten erkennbar. Die primärenergieoptimierte Regelung ermöglicht ein Einsparungspotenzial von ca. 20% bei relativ geringen Betriebskosten.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Schwerpunkte der weiteren Brennstoffzellenentwicklung sind sicherlich in der Entwicklung der Gasaufbereitung und des Stacks zu sehen, wobei für die Peripheriekomponenten auch nur wenige fertige Serienlösungen vorhanden sind. Im Verlauf des Projektes sind hinsichtlich Funktionalität, Wirkungsgrad, Kompaktheit und Reduktion der Bauteile große Fortschritte erzielt worden. Die Dauerhaltbarkeit ist bei weitem noch nicht abgesichert und das Kostenziel insbesondere der Brennstoffzellen längst nicht erreicht.

Das Brennstoffzellen-Heizgerät ist im Sinne eines Serienproduktes ein nur wenig erprobtes Gerät. Die reversiblen und irreversiblen Einflüsse auf die Funktion und die Dauerhaltbarkeit sind wenig bekannt, insbesondere das Degradieren der Katalysatoren stellt ein großes Problem dar. Für den stationären Einsatz sind Lebensdauerforderungen von 40.000 h für das Ein- und Zweifamilienhaus und bis zu 80.000 h für das Mehrfamilienhaus zu erfüllen. Realtime-Tests würden sich über Jahre hinziehen, beschleunigte- und Schnellalterungs-Tests für Komponenten und Gesamtsysteme sind noch nicht bekannt und werden erst entwickelt. Auf eine breite Wissensbasis kann leider nicht zurückgegriffen werden, so dass neben der Weiterentwicklung zum Serienprodukt noch umfangreiche Grundlagenuntersuchungen betrieben werden müssen.

Literatur

- [1] Heikrodt, K., Britz, P.: Erdgasbetriebene PEMFC-Hausenergieversorgungsanlage - innovativer Beitrag zur Emissions- und Energiereduktion, Fortschrittsbericht VDI Reihe 6 Nr. 516, Düsseldorf 2004
- [2] Statistisches Bundesamt 2001
- [3] ASUE: KWK-Gesetz 2002, Kaiserslautern
- [4] ASUE: „Die ökologische Steuerreform“ Vorteil für Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen Stand 1.1.2003, Kaiserslautern
- [5] VDI Richtlinie 2067, Blatt 12: Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen, Düsseldorf 1988
- [6] Vetter, M: Modellbildung und Regelstrategien für erdgasbetriebene Brennstoffzellen-BHKWs auf PEM-Basis. Dissertation am Fraunhofer ISE, Universität Karlsruhe (TH), 2004.
- [7] Wittwer, C: CoSim Simulation von Regelungssystemen in aktiven solarthermischen Anlagen, Dissertation am Fraunhofer ISE, Universität Karlsruhe (TH), 1999.
- [8] Umweltauswirkungen, Rahmenbedingungen und Marktpotenziale des dezentralen Einsatzes stationärer Brennstoffzellen. Abschlussbericht des Forschungsprojektes FKZ 0327550, gefördert vom BMU (Zukunftsinvestitionsprogramm), 2003.
- [9] DIN V 4701-10 2001. Deutsches Institut für Normung e.V.: Energetische Bewertung von heiz- und raumluftechnischen Anlagen, Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung, Berlin, 2001.

Brennstoffzellen für die Mikroenergie-technik

Jedes zweite elektronische Gerät ist mittlerweile tragbar oder wird zumindest fern einer Steckdose betrieben. Üblicherweise liefern dann Batterien oder Akkus die nötige Energie. Während Mikroprozessoren im letzten Jahrzehnt um 3000 % schneller geworden sind, ist im gleichen Zeitraum die Energiedichte von Batterien lediglich um etwa 75 % gestiegen, was beispielsweise bei einem Laptop derzeit zu Betriebszeiten von etwa zwei bis maximal vier Stunden pro Akkuladung führt. Gleichzeitig wächst jedoch der Energiebedarf der elektronischen Geräte. Zwar konnte durch Verbesserungen der Prozessoren und intelligenteres Powermanagement der Stromverbrauch gesenkt werden, aber dieser Effekt wird überkompensiert durch weitere Funktionsmerkmale und kryptische Schlagworte wie: W-LAN, UMTS, Blue Tooth, GPS, personal networks, mobility, connectivity, wireless und always-on™. Dies sind in steigendem Maße die entscheidenden Begriffe für den „Nomadic Office Worker“ und auch für die Teenager von heute, wenngleich mit anderen Daten.

Eine Umfrage unter Nutzern des IBM-Laptop „ThinkPad“ ergab, dass die Betriebsdauer höher bewertet wird als die Leistung [1]. Da die Energiedichte von modernen Akkutechnologien nicht mit dieser Entwicklung Schritt halten kann, werden neue Energiewandler mit höheren Kapazitäten gesucht. Abhilfe, kann in Zukunft die Brennstoffzelle schaffen, da die Energiedichte von Wasserstoff oder Methanol die von Batteriesystemen um ein Vielfaches übersteigt.

Daher sind große Aktivitäten zur Entwicklung von portablen Brennstoffzellen bei den Herstellern mobiler elektronischer Geräte wie Laptops, Mobiltelefone oder Organizer zu verzeichnen. Aufgrund der hohen Leistungsdichte und des vorteilhaften Niedertemperaturverhaltens konzentrieren sich die Aktivitäten auf die Entwicklung von PEM-Brennstoffzellen (Polymer Elektrolyt Membran), die entweder mit flüssigem Methanol (Direktmethanol-Brennstoffzelle, DMFC) oder mit Wasserstoff als Brennstoff

versorgt werden. Methanol hat den großen Vorteil einer hohen Energiedichte, während Wasserstoff eine im Vergleich zum Methanolbetrieb eine mehrfach höhere Leistungsdichte des Brennstoffzellen-Stapels ermöglicht. Gegenüber der DMFC hat die mit Wasserstoff betriebene Brennstoffzelle deshalb das Potenzial, leistungsstarke Geräte allein, d. h. ohne Hybridisierung mit einem Akku zu betreiben. Ein Anwendungsschwerpunkt für portable Brennstoffzellen-Systeme ist derzeit die Entwicklung geräteexterner, und damit Netz unabhängiger Ladestationen. Längerfristig angelegte Entwicklungen sehen auch eine Integration von flachen, serienverschalteten Brennstoffzellen mit selbstatmender Kathode¹ in das jeweilige Gerätegehäuse vor. Derartige Systeme sind als Hybridsysteme konzipiert, bei denen die Brennstoffzelle den geräteintegrierten Akku auflädt.

Eine Schwierigkeit liegt in der Miniaturisierung der verschiedenen Peripherieeinheiten. Bisher konnten zwar vielversprechende Labormuster präsentiert werden, noch fehlt jedoch ein integrationsfähiges Demonstrationssystem. In Nischenanwendungen wie Camping oder Fahrrad wurden bereits erste Produkte zur Markteinführung in 2005 vorgestellt. Massenanwendungen wie Laptops werden voraussichtlich vor allem von asiatischen Unternehmen ab dem Jahr 2006 erschlossen.

Vom Brennstoffzellen-Stapel zum portablen Gesamtsystem

Zur Reduzierung von Größe, Gewicht und Kosten wird in allen Anwendungsbereichen der Brennstoffzelle versucht, die Systemkomplexität zu reduzieren. Auch der Energieeigenverbrauch der Systemperipherie muss in der Praxis mit dem geforderten Leistungsbereich im Einklang stehen.

Fraunhofer ISE

Dr. Christopher Hebling

christopher.hebling@ise.fraunhofer.de

Ulf Groos

ulf.groos@ise.fraunhofer.de

Mario Zedda

mario.zedda@ise.fraunhofer.de

Marco Zobel

marco.zobel@ise.fraunhofer.de

¹ohne extra Sauerstoffzuführung

Abbildung 1
Planare, serien-
verschaltete und
selbstatmende Brenn-
stoffzelle aus Leiter-
platten-Material

Quelle: Fraunhofer ISE



Planare, selbstatmende Brennstoffzellen erreichen zwar derzeit nicht die Leistungsdichte eines mit Pumpen betriebenen Systems, aber sie können wegen der Gehäuseintegration und der einfachen Systemarchitektur einen weiten Anwendungsbereich mit Leistungen ab wenigen Milliwatt abdecken.

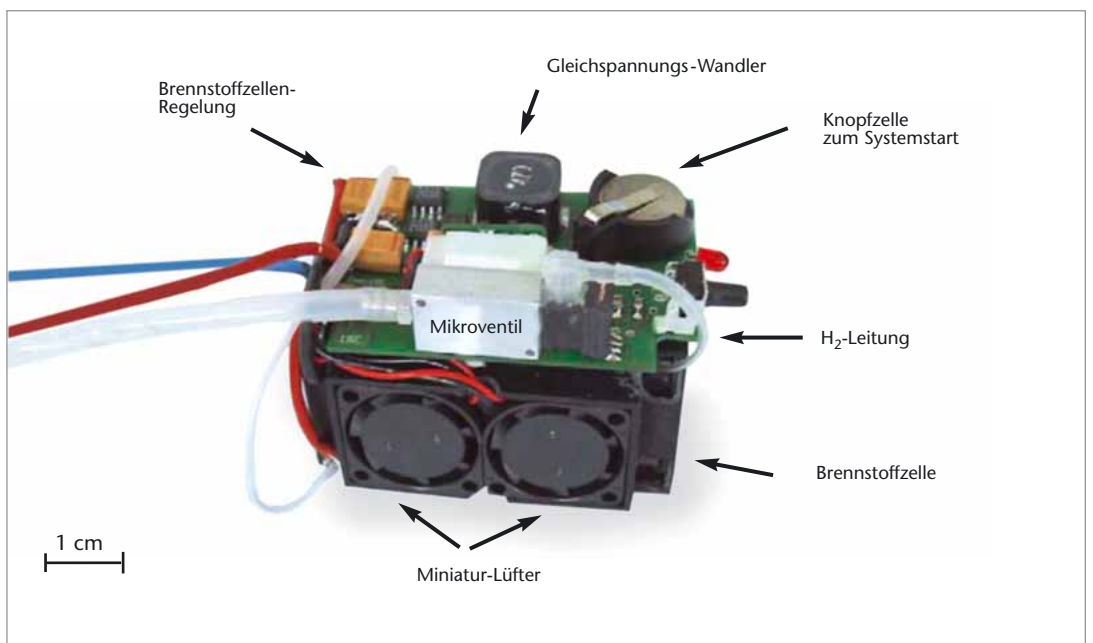
Ein mit geregelten Aktoren und Sensoren ausgestattetes Brennstoffzellen-System (Abb. 2) erlaubt große und schnelle Lastsprünge und übertrifft ein passives, selbstatmendes System im Hinblick auf dessen Betriebszuverlässigkeit.

Jede zusätzliche Systemkomponente besitzt jedoch den Nachteil der ihr eigenen begrenzten Lebensdauer. So können portable Brennstoffzellen eine höhere Lebenszeit haben als die Pumpen oder Ventile im System. Hersteller von Mini-Pumpen, kleinen Ventilen, Lüftern und anderen Komponenten sehen hier einen Markt und entwickeln in enger Zusammenarbeit mit Industrie und Forschungsinstituten angepasste Produkte [2].

Abb. 3 zeigt den Aufbau eines portablen, aktiv geregelten PEMFC-Brennstoffzellen-Systems.

Abbildung 2
Komplettsystem einer
Miniaturbrennstoff-
zelle. Im Beispiel ein
PEMFC-System der
Fraunhofer-Initiative
Mikro-Brennstoffzelle.

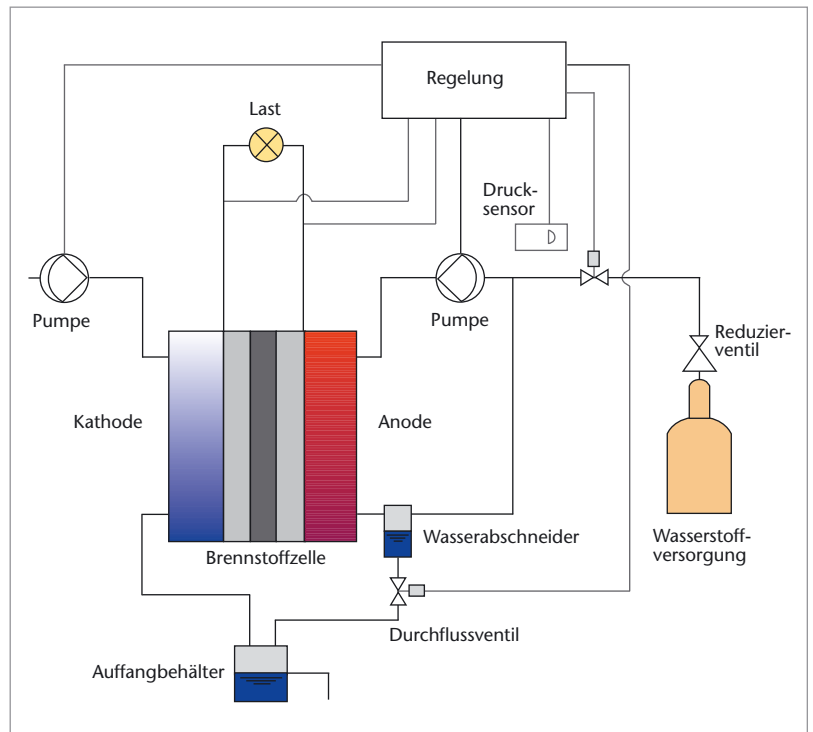
Quelle: Fraunhofer ISE



Wassermanagement

Die Kathodenpumpe saugt gefilterte Außenluft an und presst diese in den Brennstoffzellen-Stapel. Am Kathodenausgang wird der überschüssigen Luft die Feuchte entzogen, in einem Befeuchter gesammelt und rückgeführt. Wasserstoff wird aus einem Metallhydrid- oder Druckspeicher entnommen oder mittels chemischer Hydride erzeugt. Der Druck wird mit geeigneten Maßnahmen geregelt, wobei ein Mikrocontroller das Druckniveau überwacht. Die Minipumpe im Anodenkreislauf sorgt durch den Wasseraustrag für einen stabilen anodenseitigen Dauerbetrieb der Brennstoffzellen.

Das im Anodenkreislauf anfallende Wasser wird gesammelt und ausgetragen. Wichtige Anforderungen an alle Bauteile im Anodenkreislauf sind Korrosionsbeständigkeit und Dichtigkeit gegenüber Wasserstoff bei einem Druck bis etwa 2 bar.



Wärmemanagement

Auch portable Brennstoffzellensysteme im kleinen Leistungsbereich müssen über ein (passiv oder aktiv) geregeltes Wärmemanagement verfügen. Bei Umgebungstemperaturen von 40°C erreichen selbst moderat belastete Brennstoffzellen-Systeme ohne Kühlung Betriebstemperaturen von bis zu 80°C. Mit einer effektiven Kühlstrategie kann der Austrocknung der Membran-Elektroden-Einheiten (MEA) bei diesem Betriebspunkt entgegengewirkt werden. In der Regel ist eine Befeuchtung der Gase am Brennstoffzellen-Eingang unter den genannten Extrembedingungen jedoch unumgänglich, was zudem auch noch die Lebensdauer der MEA verlängert.

DMFC-System

Die Systemtechnik einer DMFC unterscheidet sich von der einer mit Wasserstoff betriebenen Brennstoffzelle durch die Zufuhr von flüssigem Methanol und demzufolge durch unterschiedliche elektrochemische Teilreaktionen in der Zelle (Abb. 4). Durch eine Pumpe wird die Methanolzufuhr realisiert. Der Vorteil der hohen

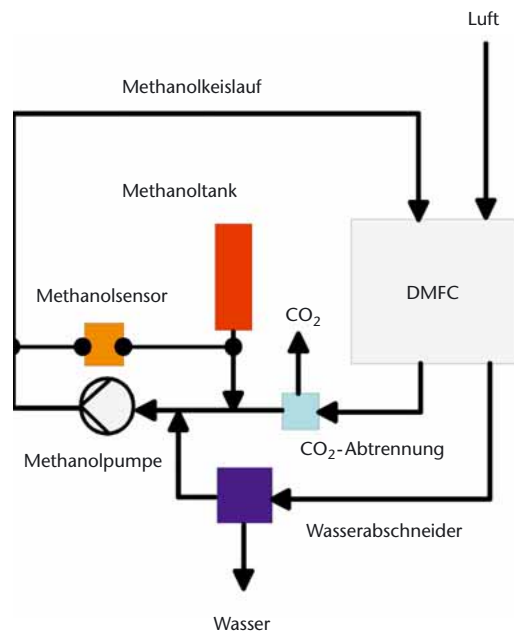
Energiedichte des Methanols kann bei der DMFC nur dann genutzt werden, wenn hochkonzentriertes Methanol getankt wird und die Einstellung des optimalen Mischungsverhältnisses mit Wasser erst vor der Anode erfolgt. Systemtechnisch elegant ist die Rückführung des kathodenseitig produzierten Wassers auf die Anode. Die Einstellung eines optimalen Methanolgehalts erfordert einen Methanolsensor, der die Konzentration misst und die Zudosierung des Wassers steuert.

Je nach Leistungsbedarf der peripheren Systemkomponenten beträgt der Wirkungsgrad eines DMFC-Systems derzeit etwa 20-30%. Miniaturisierte und effiziente Komponenten, wie z. B. Anoden-Rezirkulationspumpen, Kathoden-Pumpen bzw. -Lüfter, Wassertanks, Gasabscheider und Methanolsensoren werden benötigt, um alle geforderten Funktionen möglichst kompakt zu realisieren [3].

Abbildung 3
Schematischer Aufbau eines portablen, aktiv geregelten und mit Wasserstoff versorgten Brennstoffzellensystems.

Quelle: Fraunhofer ISE

Abbildung 4
Prinzipschema eines
DMFC-Systems
Quelle: Fraunhofer ISE



Die DMFC ist stark temperaturabhängig. Mit steigender Temperatur nimmt die Blockierung der reaktiven Oberfläche des Anodenkatalysators durch Kohlenmonoxid ab, welches bei der chemischen Reaktion als Zwischen- bzw. Nebenprodukt entsteht und die Leistung der Methanolzelle steigt deutlich an. Ziel ist daher der Betrieb der DMFC bei Temperaturen von typischerweise 80-90 °C. Daher ist auch das Wärmemanagement weniger relevant als bei der PEMFC.

Markteinführung portabler Brennstoffzellen

Nachdem in den letzten Jahren zahlreiche Prototypen verschiedener Entwickler in der Öffentlichkeit präsentiert wurden, findet eine Markteinführung nun Schritt für Schritt statt. Einige Unternehmen konzentrieren sich auf autarke Energiesysteme zur Versorgung unterschiedlicher Elektrogeräte. Da Brennstoffzellen als externe Energieversorgung eingesetzt werden sollen, sind die Anforderungen an die Miniaturisierung etwas weniger streng als bei der Geräteintegration. In Deutschland sind in diesem Zusammenhang insbesondere die Unternehmen Masterflex und Smart Fuel Cell zu nennen. Masterflex hat zusammen mit dem Fraunhofer ISE auf der

Hannover Messe 2004 das PEMFC-System „Powerbox“ mit einer Nennleistung von 35 W vorgestellt. Brennstoffzelle und Peripherie wurden in ein funktionales Gehäuse integriert. Der Wasserstoffspeicher kann als externe Einheit angeschlossen werden, wodurch eine Anpassung des Systems an unterschiedliche Anwendungen möglich ist. Neben der Powerbox hat Masterflex auch ein Brennstoffzellen betriebenes Hybrid-Fahrrad vorgestellt.

Brennstoffspeicher für portable Anwendungen

Die Energiedichte eines PEMFC-Gesamtsystems hängt entscheidend von der Kapazität der Wasserstoffspeicher ab. Die Entwicklung der portablen Brennstoffzelle wird vor allem durch die hohe Energiedichte der Brennstoffe vorangetrieben, die im Vergleich zu Sekundärbatterien längere Gerätebetriebszeiten bei gleichem Volumen bzw. Gewicht versprechen. Im Folgenden werden die Energiedichten verschiedener Brennstoffe bei verschiedenen Speicherarten diskutiert.

Druckwasserstoff

Bei einer Speicherung von gasförmigem Wasserstoff mit Drücken bis zu 300 bar werden maximale Speicherdichten von ca. 0,5 kWh/l erreicht. In jüngster Vergangenheit wurden erste Wasserstoffdruckspeicher für Drücke bis 700 bar zugelassen. Handelsüblich sind heute Druckflaschen mit 200 bzw. 250 bar. In Kleinstanwendungen wurde Druckwasserstoff bisher kaum eingesetzt. In naher Zukunft wird jedoch damit gerechnet, dass auch Flaschen mit einer Größe unter 5 l mit Drücken bis 700 bar zur Verfügung stehen. Vorteile der Druckgasflaschen als etablierte und standardisierte Technologie sind eine für Industrieunternehmen bereits verfügbare Infrastruktur und im Betrieb die weitgehende Unabhängigkeit von der Außentemperatur. Ebenso könnten kleine Druckspeicher in einer Massenfertigung kostengünstig hergestellt werden.

Metallhydridspeicher

Metallhydridspeicher lagern Wasserstoff chemisch gebunden in das Metallgitter einer Legierung ein. Die Absorption von Wasserstoff erfolgt exotherm, der Speicher erwärmt sich. Umgekehrt muss zur Desorption Energie von außen zugeführt werden – die Reaktion ist endotherm.

Niedertemperatur-Metallhydride (MeH) können bis zu $0,7 \text{ l H}_2/\text{cm}^2 \text{ MeH}$ bzw. 1,5 Gewichtsprozent bei Umgebungstemperatur speichern. Dieses entspricht volumetrisch ungefähr einem Druckspeicher mit 400 bar. Metallhydridspeicher stellen wegen der notwendigen Wärmezufuhr bei der Freisetzung von Wasserstoff eine relativ sichere Art der Speicherung dar. Bei einer Leckage in der Speicherwandung führt ein rasches Austreten von Wasserstoff zur Vereisung und reduziert den Volumenstrom auf ein Minimum. Für portable Anwendungen werden häufig Legierungen gewählt, die eine Desorption von Wasserstoff bereits bei Raumtemperatur ohne aktive Wärmezufuhr erlauben.

Eine Wiederbefüllung der Metallhydridspeicher mit reinem Wasserstoff kann ohne nennenswerten Kapazitätsverlust mehrere hundert bis tausend Mal durchgeführt werden. Die Wiederbefüllung erfolgt dabei zum Beispiel durch Anschluss an eine Druckgasflasche und Einstellung des jeweiligen Beladungsdrucks. Dieser beträgt bei portablen Brennstoffzellensystemen typischerweise 10 bar. Metallhydridspeicher können heute bereits kommerziell erworben werden.

Chemische Hydride

Chemische Hydride setzen bei Zugabe von Wasser oder von Wärme Wasserstoff frei und zeigen hohe Energiedichten zwischen 9 und 20 Gewichtsprozent. Der Wasserstoff ist im Gegensatz zu den Metallhydriden chemisch gebunden. CaH_2 oder MgH_2 sind auch ökologisch unbedenklich. Die bei der Wasserstoffherstellung produzierten Schlämme können recycelt und erneut als Speicher verwendet werden. Bei den chemischen Hydriden handelt es sich heute allerdings um Spezialchemikalien mit hohen Kosten und teilweise hohem energetischen

Aufwand für die Herstellung. Grundsätzlich ist diese Technologie noch in der Entwicklung und noch nicht in Kombination mit Brennstoffzellen verfügbar. Einzelne Prototypen werden jedoch bereits auf Konferenzen und Messen vorgeführt.

Nanospeicher

Nanospeicher sind Gegenstand der Grundlagenforschung. Publikationen über deren Wasserstoffspeicherkapazitäten differieren beträchtlich. Bei dem Speichervorgang von Wasserstoff lagert dieser sich physikalisch in die Kohlenstoffstrukturen ein, weshalb keine Energiezufuhr zur Desorption erforderlich ist. Wegen der großen Oberfläche können hohe Speicherdichten erzielt werden. Theoretisch scheint ein Wasserstoffspeichervermögen bei Karbon-Nanomaterialien bis zu 14 Gewichtsprozent erreichbar zu sein.

Kohlenwasserstoffe und Mikroreformer

Mikroreformer bieten vor allem zwei wichtige Vorteile gegenüber den bisher vorgestellten Brennstoffspeichern. Zum einen könnte mit Hilfe von Mikroreformern auf eine bestehende Infrastruktur (z. B. Propangas) oder auf eine leicht aufzubauende Infrastruktur (z. B. Ethanol) zurückgegriffen werden. Zum anderen könnten Brennstoffe mit einer sehr hohen Energiedichte verwendet und dadurch die Größe und das Gewicht des Brennstoffspeichers bei einem gegebenen Energiebedarf verringert werden.

Reformer wandeln je nach verwendeten Brennstoffen zwischen Temperaturen von 200°C bis 1.000°C Kohlenwasserstoffe in Wasserstoff (H_2), Kohlendioxid (CO_2), Kohlenmonoxid (CO) und Wasser (H_2O) um. Da Katalysatoren von Membranbrennstoffzellen bereits bei Konzentrationen von wenigen 10 ppm Kohlenmonoxid „vergiftet“ werden, ist eine aufwändige Gasreinigung nach der Reformierung notwendig. Neuere Forschungsarbeiten untersuchen den Einsatz von metallischen oder keramischen Membranen zur Wasserstoffseparation. Um die technische Eignung eines Mikroreformers für den Betrieb portabler Brennstoffzellen einzuschätzen, müssen die zusätzlichen Baugruppen ebenfalls verkleinert werden.

Es muss auch beachtet werden, dass zum Start eine Aufheizzeit notwendig ist und auch das Abschalten definiert über einen gewissen Zeitraum erfolgen muss. Nach heutigem Stand der Technik erscheint die Reformierung in Kombination mit Membranbrennstoffzellen vor allem für stationär und kontinuierlich betriebene Energieversorgungen sinnvoll. Mikroreformer befinden sich derzeit im Stadium der Entwicklung und sind noch nicht produktreif.

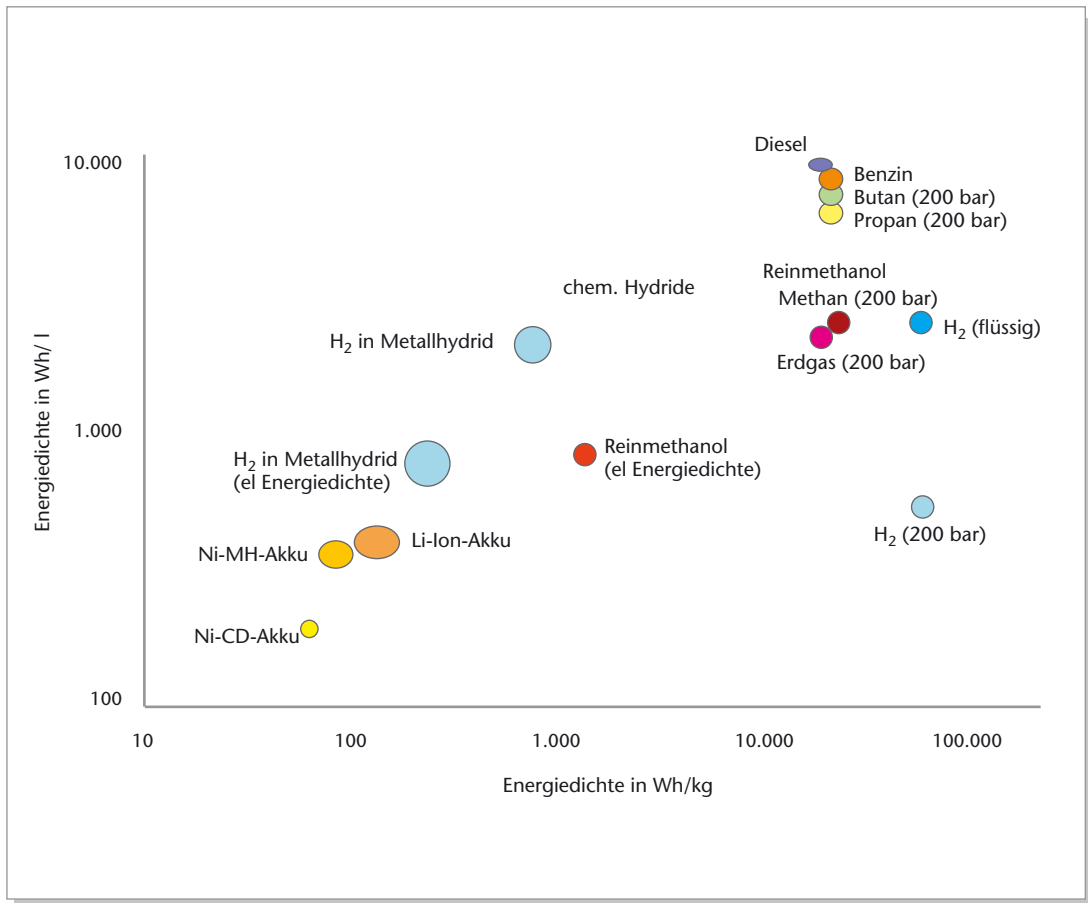
Methanol

Mit ca. 4.200 Wh/l bzw. 5.300 Wh/kg besitzt Methanol, ohne Einbezug eines Brennstoffzellensystems und Wirkungsgradverlusten, gegenüber einem Lithium-Ionen-Akku eine vielfach höhere chemische Energiedichte. Methanol ist eine Flüssigkeit, die sich leicht speichern, umfüllen und transportieren lässt. Des Weiteren kann eine Infrastruktur für Methanol vergleichsweise

einfach aufgebaut werden. Einige Unternehmen planen die Einführung von standardisierten Methanolbehältern, die direkt in den Brennstoffzellensystemen eingesetzt werden können.

In der Betrachtung von Gesamtsystemen muss allerdings beachtet werden, dass die derzeitige Leistungsdichte einer DMFC ein Vielfaches unter der einer PEMFC liegt, somit eine DMFC bei gegebener Ausgangsleistung entsprechend größer und schwerer ausfallen wird. Methanol könnte kostengünstig zur Verfügung gestellt werden, allerdings werden die Kosten einer DMFC aufgrund des höheren Materialbedarfs und der höheren Katalysatorbelastung deutlich über denen einer PEMFC liegen. Der Wirkungsgrad einer DMFC liegt mindestens 10% absolut unter dem einer PEMFC. Der technische Vergleich einer DMFC mit einer PEMFC kann deshalb nur für eine spezielle Anwendung durch eine Systembetrachtung inklusive Brennstoff, Brennstoffzelle und Peripherie erfolgen.

Abbildung 5
Energiedichten von Sekundärzellen und Brennstoffen. Die elektrische Energiedichte bei Wasserstoff bzw. Methanol wurde mit Systemwirkungsgraden von 35% (PEMFC) bzw. 20% (DMFC) angegeben.
Quelle: Fraunhofer ISE



Vergleich der Energiedichten

Im Folgenden werden die Energiedichten verschiedener Batterien mit den Speichermöglichkeiten für Brennstoffe ohne die Berücksichtigung von Brennstoffzellensystemen bzw. Tanks verglichen.

Die *Abb. 5* vergleicht die Energiedichte von Batterien mit Brennstoffen, die prinzipiell für den Einsatz in Brennstoffzellen geeignet sind. Es muss beachtet werden, dass die Energiedichten der Brennstoffe sich nicht auf Gesamtsysteme beziehen, während bei den Akku-Technologien eine direkte Leistungsentnahme möglich ist. Zur Stromgewinnung aus den Brennstoffen mit Hilfe von Brennstoffzellen muss noch die oben beschriebene Systemtechnik berücksichtigt werden. Da eine aggregierte Darstellung jedoch nur leistungsabhängig möglich ist, wurde hierauf verzichtet. Bei den für Metallhydrid und Methanol angeführten elektrischen Energiedichten wurden Wirkungsgrade von 35% beim Einsatz von Metallhydridspeichern in PEMFC-Systemen und 20% beim Einsatz von Methanol in DMFC-Systemen angenommen. Es wird deutlich, dass mit Hilfe der Brennstoffzellentechnologie in Abhängigkeit von der jeweiligen Systemkonfiguration Vorteile gegenüber Batterien bezüglich der Energiedichten bzw. Gerätelaufzeiten erreicht werden können.

Literatur

- [1] Kelty, K. R.:
Small Fuel Cells vs. Li-Ion Battery:
A Battery Manufacturer's View,
5th Annual International Symposium
Small Fuel Cells 2003, New Orleans,
7 - 9 Mai 2003
- [2] VDI/VDE-IT:
Verbundfaltblatt des Projekts
"Outdoor FC", Förderprogramm Innonet
- [3] Martin, C.:
Integration of Portable DMFC Systems,
6th Annual International Symposium
Small Fuel Cells 2004, Arlington,
5-7 Mai 2004

Wasserstofftechnik in stationären autonomen Stromversorgungssystemen

Fraunhofer ISE

Dr. Tim Meyer

tim.meyer@ise.fraunhofer.de

Andreas Steinhüser

andreas.steinhueser@ise.fraunhofer.de

Felix Holz

felix.holz@ise.fraunhofer.de
Puls@ise.fraunhofer.de

Georg Bopp

georg.bopp@ise.fraunhofer.de

Dr. Bruno Burger

bruno.burger@ise.fraunhofer.de

Einleitung

Stationäre autonome Stromversorgungssysteme zählen zu den möglichen Vorreitermärkten für Brennstoffzellen. Insbesondere in Photovoltaik- oder Photovoltaik-Wind-Hybridsystemen könnten Brennstoffzellen die Rolle des Zusatzstromerzeugers übernehmen. Bei nicht ausreichenden Sonnenscheinintensitäten und Windgeschwindigkeiten können sie die Versorgungslücke schließen. Im Leistungsbereich von einigen 10 Watt bis zu wenigen kW sind hier für heute keine befriedigenden konventionellen technologischen Lösungen für autonome Stromversorgungssysteme am Markt verfügbar. Im Folgenden wird dieser Anwendungsbereich anhand der Erfahrungen aus Planung und Feldbetrieb einer 1 kW-Brennstoffzelle am Rappenecker Hof sowie einem vollständig autarken System mit einem Wasserstoffsystem als Saisonspeicher dargestellt.

Einsatzgebiete für Brennstoffzellen in stationären autonomen Systemen

Technische Stromversorgungen wie z. B. Messstationen, Telekommunikations- oder Telematikanlagen werden häufig in sehr abgelegenen Gegenden betrieben und müssen kostengünstig und zuverlässig mit Strom versorgt werden. Dies erfolgt heute meist mit Hybridsystemen in denen Solarzellen, Wind- oder Wasserkraft sowie ein Batteriespeicher und möglicherweise ein Diesel-Generator als Zusatzstromerzeuger zusammenwirken. Auch Wohnhäuser, ländliche Gewerbebetriebe, Tourismusanlagen und Gaststätten sind Anwendungen für ähnlich aufgebaute Hybridsysteme.

Brennstoffzellen könnten in solchen Hybridsystemen die Zusatzstromerzeugung übernehmen.

Die Kapazität der Wasserstoffsysteme reicht dabei von einigen Wochen bis zu einigen Monaten zur Aufrechterhaltung des Betriebes. Damit treten sie in Konkurrenz zu herkömmlichen Dieselgeneratoren. Ebenso können Brennstoffzellen Batterien ersetzen. In diesem Fall sind Wasserstoffsysteme auch als Saisonspeicher denkbar, in denen die elektrische Überschussenergie aus den Solarzellen im Sommer durch Elektrolyse in Wasserstoff gewandelt, gespeichert und im Winter in einer Brennstoffzelle wieder in Strom gewandelt wird (Abb. 1).

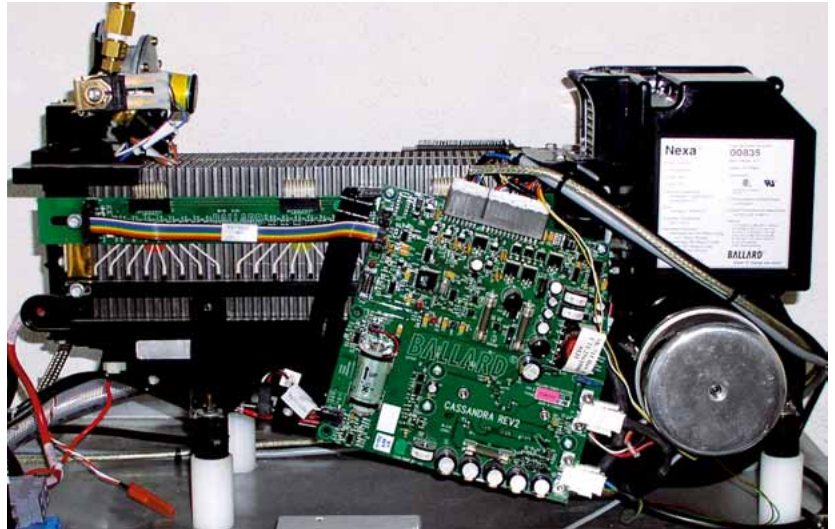
Brennstoffzellen haben gegenüber Dieselgeneratoren prinzipielle Vorteile, die allerdings in heutigen Komponenten technologisch noch nicht immer umgesetzt werden konnten:

- höherer Wirkungsgrad, gerade im Teillastbetrieb
- geringere Emissionen von Lärm und Schadstoffen
- kleinerer Wartungsbedarf

Diese prinzipiellen Vorteile können der Brennstoffzellentechnologie auch bei höheren Kosten Wettbewerbsvorteile gegenüber anderen Zusatzstromerzeugern sichern. An den Nachteilen wie der teuren Sicherheitstechnik sowie der aufwändigeren Brennstoffversorgung von PEM-Brennstoffzellen mit Wasserstoff oder durch Reformierung aus Kohlenwasserstoffen muss aber noch gearbeitet werden.

Praxiserfahrungen aus Projekten in Deutschland und Spanien

Das Fraunhofer ISE hat Technologien für Brennstoffzellen, Leistungselektronik und Regelungstechnik entwickelt sowie mehrere Projekte durchgeführt, die intensive Praxistests auch



bereits auf dem Markt erhältlicher Technologien beinhalten. Solche Tests mit Dauerbetrieb von Komponenten und Anlagen sind wesentlich für die Identifikation des weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarfes und des Marktpotenziales neuer Technologien. Im Folgenden werden die Erkenntnisse aus den Projekten „Rappenecker Hof“ und „FIRST“ zusammen gefasst.

Rappenecker Hof: Hybridsystem mit Brennstoffzelle als Zusatzstromerzeuger

Das Hybridsystem am Rappenecker Hof ist seit 1987 in Betrieb und wurde im Jahr 2003 für die gestiegenen Lastanforderungen und mit einer 1,2 kW-Brennstoffzelle als Zusatzstromerzeuger ertüchtigt. Solar- und Windgenerator liefern ca. 40% der Jahresenergie der saisonal betriebenen Gaststätte. Der vorhandene Motorgenerator blieb in das Energieversorgungssystem eingebunden, um die Verfügbarkeit in der Erprobungsphase und nach Projektende (d. h. ohne Brennstoffzelle) sicherzustellen. Ein innovatives Batteriemanagementsystem des Fraunhofer ISE soll die Lebensdauer der in der Zwischenzeit unterschiedlich stark gealterten Komponenten maximieren. Eine ausführliche Dokumentation des Projektes kann in [1] nachgelesen werden.

Das Wasserstoffsystem besteht aus einem 1,2 kW-Brennstoffzellen-Stapel der Firma Ballard (inkl. allen Hilfsaggregaten), einem Gleichstromwandler zur Anpassung der Ausgangsspannung auf das Batterieniveau, einer Laderegelung sowie

einem Wasserstoffspeicher mit Druckgasflaschen (Reichweite ca. 400 Betriebsstunden) und der notwendigen Sicherheitstechnik. Der Sauerstoff für die Brennstoffzelle wird der Luft entnommen, was in der Höhenlage von 1000 Metern zu einer Reduktion der Brennstoffzellen-Leistung auf 1,1 kW führt.

Seit September 2003 ist das Wasserstoffsystem mit insgesamt 3500 Betriebsstunden in Betrieb. Nach 2020 Stunden musste der erste Brennstoffzellenstapel wegen Ausfalls einer Zelle ausgetauscht werden. *Abb.2* zeigt die typische Betriebsführung der Brennstoffzelle an einem Tag mit guter Sonneneinstrahlung und Erträgen aus dem Windrad.

Nach nunmehr über einem Jahr Betrieb der Anlage können folgende Erfahrungen aus der Planungsphase und dem Betrieb festgehalten werden:

- Der Zusatzaufwand für die Sicherheitstechnik ist erheblich. Am Markt verfügbare Wasserstoff-Sensoren, die den Betrieb in der Praxis absichern, sind teuer und müssen regelmäßig erneuert werden. Bereits über die Projektlaufzeit von 3 Jahren liegen die Aufwendungen bei mehreren tausend Euro. Auch der Aufwand für Lüftungstechniken muss noch reduziert werden.

*Abbildung 1
Brennstoffzellenstapel
und Wasserstofflager*

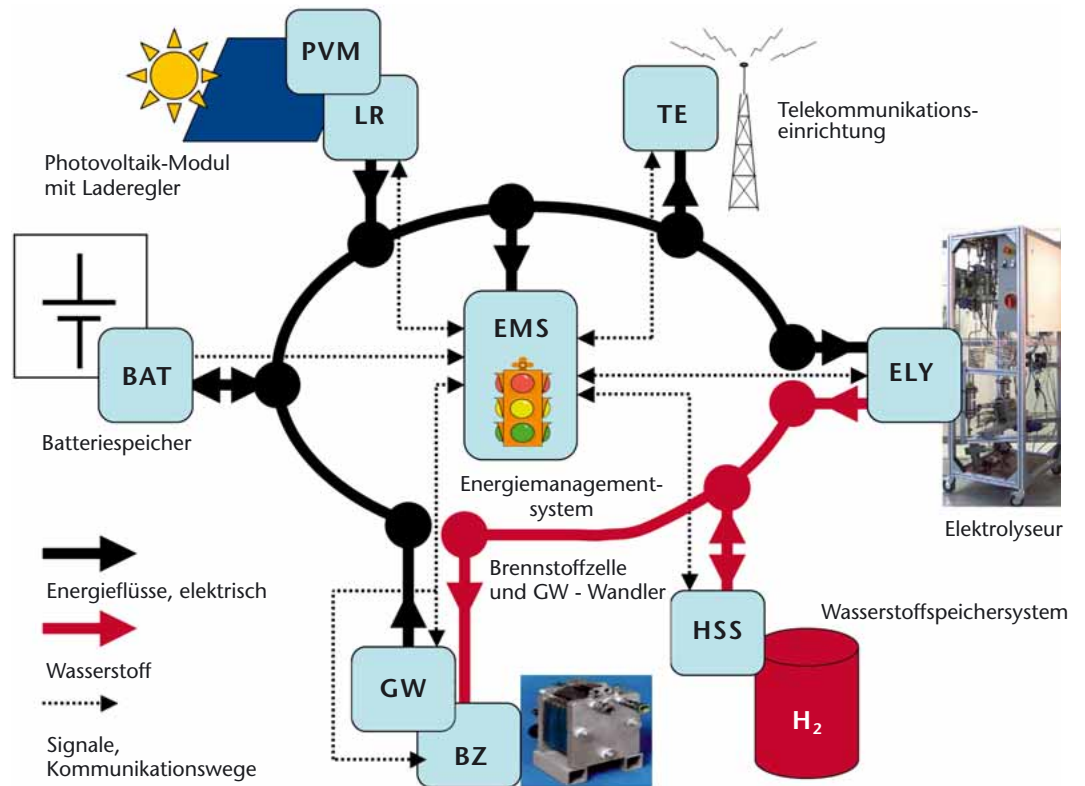


Abbildung 2
Typische Betriebsführung der Brennstoffzelle an einem Tag im September 2004. Am Vormittag und am Nachmittag (wenn Solarertrag und Windkraft nicht zur Deckung der Last ausreichen) wird die Brennstoffzelle zugeschaltet.

- Zum Zeitpunkt des Projektbeginns waren kaum Gleichspannungs-Wandler GW verkäuflich, die die Ausgangsspannung des Brennstoffzellen-Stapels von 24 V bis 36 V auf die Batteriespannung von 48 V heraufsetzen. Das Fraunhofer ISE entwickelte daher selbst einen Wandler mit einem optimalen Wirkungsgrad (97%). Dabei kann demonstriert werden, dass ein Wandler auch ohne Kühlkörper auskommt und so besonders leicht in Brennstoffzellen-Packages integriert werden kann. Generell müssen Brennstoffzelle und Leistungselektronik eng aufeinander abgestimmt werden.
- Hersteller verlangen heute einen Betrieb der Brennstoffzelle mit Wasserstoff der Güte 5.0 (99,9990%). Die Kosten dieses Brennstoffs liegen nach Abzug der Umwandlungsverluste in der Brennstoffzelle mit ca. 2,80 €/kWh elektrischer Energie sehr hoch. Um autonome Stromversorgungen als Markt erschließen zu können, müssen die Anforderungen an die Brennstoffqualität und damit die Kosten deutlich gesenkt werden.
- Die Lebensdauer der Brennstoffzelle hat zwar die Garantie des Herstellers überschritten, ist mit ca. 2000 Stunden aber für die Erschließung von Märkten noch deutlich zu klein.
- Insgesamt läuft der Betrieb des Wasserstoffsystems annähernd störungsfrei. Die Zuverlässigkeit der Komponenten ist gut.

FIRST:
Wasserstoffsystem als Saisonspeicher in einer technischen Stromversorgung
Zur autonomen Versorgung einer Telekommunikationseinrichtung mit durchschnittlich 150 W Dauerlast wurde im EU-Projekt „FIRST“ ein System mit geschlossenem Wasserstoffkreis als Saisonspeicher aufgebaut. Standort ist Madrid. Ein 1 kW-Elektrolyseur wandelt Überschussenergie aus dem 1,5 kW-Solarzellen-Generator im Sommer in Wasserstoff. Dieser wird in einem Metallhydridspeicher (äquivalent 100 kWh elektrischer Leistung) gelagert und im Winter über eine 300 W-Brennstoffzelle wieder in Strom gewandelt. Ca. 7% des Jahresenergieverbrauches werden über den Wasserstoffkreis geführt.

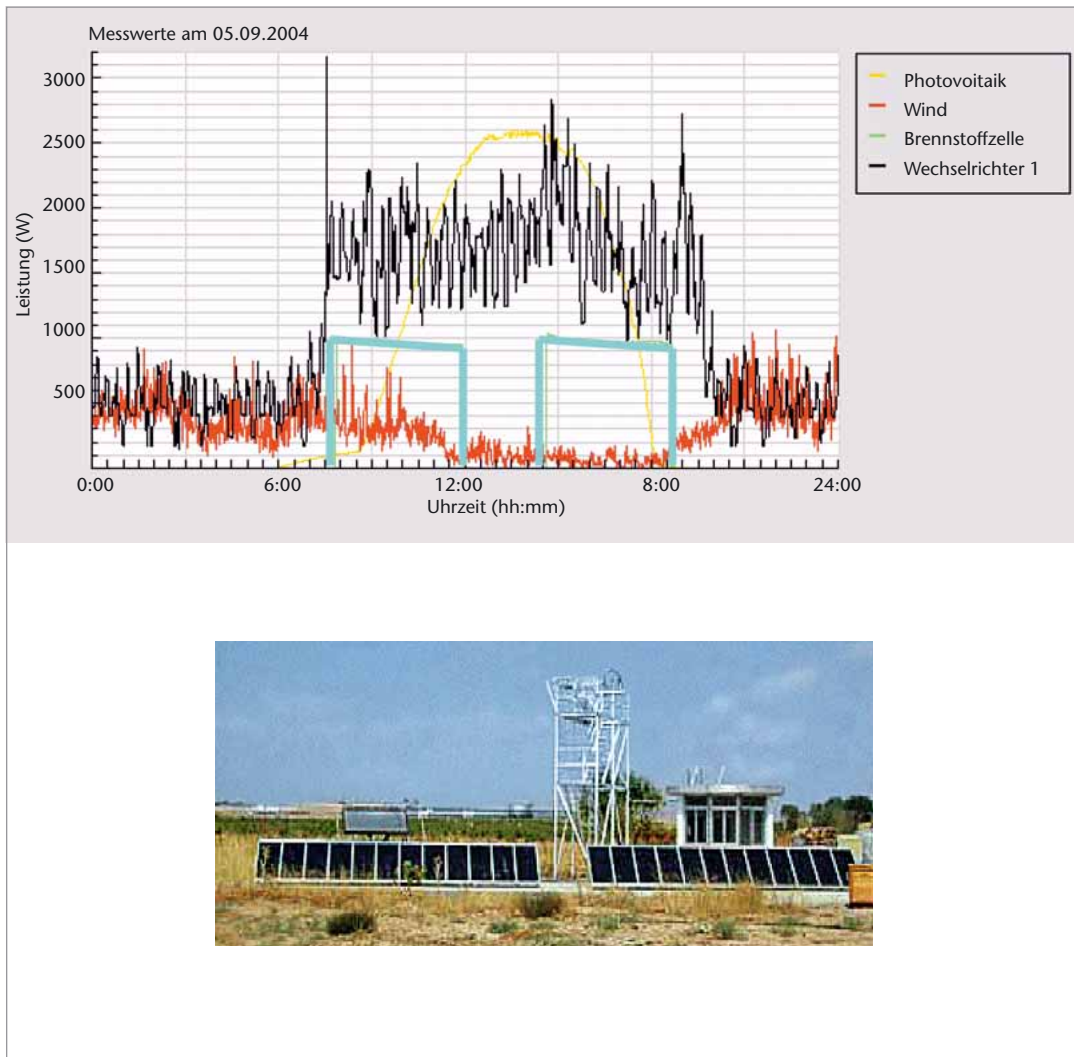


Abbildung 3
Systemkonzept der
Stromversorgungs-
anlage in „FIRST“
und Foto der Anlage

Mit der Anlage konnte ein vollständig autarker Betrieb demonstriert werden. Trotz eines effizienten Energiemanagements zeigen die Erfahrungen aus Planung und Betrieb, dass Wasserstoffsysteme als Saisonspeicher noch erhebliche Technologieentwicklung und Kostensenkung benötigen, um eine Marktchance zu erhalten:

- Die Komplexität des Wasserstoffsystems und die Abhängigkeit der Komponenten untereinander ist erheblich. Für einen zuverlässigen und wartungsarmen Betrieb muss eine Vielzahl von Betriebszuständen beherrscht und in seinen Auswirkungen auf Lebensdauer und Wirkungsgrade verstanden sein.
- Die Temperaturabhängigkeit des Be- und Entladeverhaltens von Metallhydridspeichern vermindert die nutzbare Speicherkapazität erheblich. Beim Einlagern im Sommer ist hoher Druck notwendig (bis über 10 bar) während bei der Entnahme im Winter nur niedriger Druck entnommen werden kann (in diesem System benötigt die Brennstoffzelle mindestens 2 bar). Damit kann im gegebenen System nur etwa 50% der theoretischen Speicherkapazität genutzt werden.
- Die Wasserstoff-Speichertechnik ist teuer (Metallhydrid) oder potenziell zu energieaufwändig (Druckspeicher).
- Besondere Schwachstellen sind Komponenten der Systemperipherie (Pumpen, Ventile, Sensoren).

Kostenvergleiche von Systemlösungen mit und ohne Wasserstoffsystem

Ob Wasserstoffsysteme in den beschriebenen Anwendungsfeldern Einzug erhalten werden, hängt von technologischen und wirtschaftlichen Faktoren und Entwicklungen ab. Diese sind heute nur schwer vorherzusagen und zu modellieren. Da in die Lebensdauerkosten von autonomen Systemen die Betriebskosten erheblich eingehen und nicht nur die Abschreibungen für Anfangsinvestitionen, sind diese Modellierungen für Wasserstoffsysteme besonders erschwert¹.

Die folgenden Kostenvergleiche wurden zwar ohne detaillierte Modellierung von Kostenfaktoren und Betriebsführungsstrategien erstellt, beinhalten aber keine Barwertermittlung unter Berücksichtigung von Inflation und Zinsen. Sie sind daher lediglich als Plausibilitätsprüfungen zu verstehen. Sie geben wertvolle Anhaltspunkte ob das entsprechende Marktsegment überhaupt für Wasserstofftechnologie attraktiv ist und welche technologischen Ziele hierfür in etwa erreicht werden müssen. Es ist auch zu beachten, dass die Sicherheitstechnik heute noch sehr hohe Kosten verursacht, die ebenfalls erheblich reduziert werden müssen.

Brennstoffzelle als Zusatzstromerzeuger im Vergleich mit einem reinen PV-System

Im Sinne einer Extremwertbetrachtung wird ein reines Photovoltaik-Batterie-System mit einem Hybridsystem PV-Batterie-Brennstoffzelle verglichen. Es wird angenommen, dass in einem größeren Photovoltaik-Batterie-System ein Anteil von 10 kWh/d der Last über vier Wintermonate nicht mehr über Photovoltaik, sondern über eine Brennstoffzelle als Zusatzstromerzeuger bereitgestellt werden soll. Dies entspricht in unseren Breiten etwa einer PV-Generatorleistung von 10 kW, um die der PV-Generator im Hybridsy-

stem kleiner ausfallen kann. Inklusive Montage und Laderegler spart dies ca. 50 T. Die 10 kWh/d sollen im Alternativsystem über eine Brennstoffzelle von 1 kW Leistung bereitgestellt werden, die täglich 10 h läuft. Für das Brennstoffzellensystem ergeben sich überschlägig mit heutiger Technologie (Wirkungsgrad 33%, 2000 h Lebensdauer, benötigte H₂-Qualität 5.0) folgende Kostenfaktoren:

- Kosten pro Brennstoffzelle 12 x 3500 € (fällt über 20 Jahre 12 Mal an)
- H₂-Qualität 5.0 2,8 €/kWh_e

Summe über 20 Jahre 115 T€

Darin sind Transportkosten für den Wasserstoff, die je nach Standort erheblich variieren, nicht enthalten. Es liegt auf der Hand, dass allein der 12-malige Austausch der Brennstoffzellen nicht akzeptabel wäre. Auch die Brennstoffkosten sind erheblich zu hoch. Nimmt man für die selbe Rechnung jedoch eine verbesserte Brennstoffzellentechnologie an (Wirkungsgrad 40%, 10000 h Lebensdauer, benötigte H₂-Qualität 3.0), ergibt sich eine deutlich bessere Perspektive:

- Kosten Brennstoffzellen 3 x 3500 € (fällt über 20 Jahre 3 Mal an)
- H₂-Qualität 3.0 0,6 €/kWh_e

Summe über 20 Jahre 31 T€ (ohne Transportkosten)

Der Vergleich zeigt, dass technologisch neben der erforderlichen Erhöhung der Lebensdauern vor allem auch die Anforderungen an die Brennstoffqualität reduziert werden müssen. Gelingt dies, scheinen entsprechende Systeme als Alternative zu reinen PV-Systemen interessant. In diesem Fall kann je nach Anwendung als weiterer Vorteil die durch einen zweiten Stromerzeuger im System steigende Systemverfügbarkeit geltend gemacht werden.

Anwendungen wären also Bereiche, in denen sonst 100 % PV-Versorgung notwendig wäre, z. B. weil Diesel als Zusatzgenerator wegen Lärm- und Abgasemissionen oder eines Standortes mit sehr hohen Wartungskosten (Anfahrtskosten) nicht in Frage kommt.

¹ Am Fraunhofer ISE wurden auch detaillierte Lebensdauerkosten-Berechnungen für spezielle Anlagenauslegungen im Rahmen des Projektes FIRST durchgeführt. Dabei wurde ein umfassender Modellansatz mit dem ebenfalls am Fraunhofer ISE entwickelten Software-tool „TALCO“ (Technical and Least Cost Optimisation) verwendet.

Brennstoffzelle als Zusatzstromerzeuger im Vergleich mit einem Photovoltaik-Diesel-Hybridssystem

Es wird angenommen, dass 1 kW Zusatzstromerzeugerleistung ersetzt werden soll. In einem konventionellen Hybridssystem würde diese Leistung über einen überdimensionierten Diesel bereitgestellt, da kleinere Aggregate nicht auf dem Markt verfügbar sind (nur als Benzin, deren Wartungskosten aber für die hier unterstellte Anwendung zu hoch sind).

Der Diesel-Generator im Referenzsystem wird mit einer Lebensdauer von 10 Jahren angenommen (20.000 Betriebsstunden) und der elektrische Wirkungsgrad η mit 15 %. Damit ergeben sich Kraftstoffkosten von ca. 0,7 €/kWh elektrischer Energie. Eine kleine Wartung (Ölwechsel) soll alle 500 Betriebsstunden durchgeführt werden (je 150 €) und eine große Wartung einmal pro Jahr (500 €). Die groben Kostenfaktoren sind dann:

• Investition (10 Jahre Lebensdauer)	2 x 3 T€
• Kraftstoff ($\eta = 15\%$)	0,7€/kWh _e
• Wartung (2000 h/a Betrieb Teillast)	1,1 T€/a

Summe über 20 Jahre 56 T€

Im Alternativsystem wird direkt eine Brennstoffzelle mit 10.000 h Lebensdauer angenommen, die mit 2000 Vollaststunden/a und Wasserstoff 3.0 betrieben wird:

• Investition (Lebensdauer 10000 h)	4 x 3,5 T€
• Kraftstoff H ₂ -Qualität 3.0 ($\eta = 40\%$)	0,6 €/kWh _e

Summe über 20 Jahre 38 T€

Auch in dieser Wettbewerbssituation scheint also ein Brennstoffzellensystem prinzipiell Marktchancen zu besitzen, wenn die technologischen und wirtschaftlichen Ziele (inkl. kostengünstiger Sicherheitstechnik) erfüllt werden. Vorteile entstehen vor allem bei Leistungen, für die keine entsprechenden Diesel-Generatoren auf dem Markt sind und wenn der Aufwand für Brennstofftransport und -speicherung begrenzt ist.

Die Versorgung der Brennstoffzelle aus flüssigen Brennstoffen wäre hier gegenüber gasförmigem Wasserstoff von erheblichem Vorteil. Ein weiterer Vorteil von Brennstoffzellen gegenüber Diesel-Generatoren ist, dass mit Diesel eine Pflege- und Ladung von Batterien nicht sinnvoll möglich ist, da diese in extremer Teillast mit sehr schlechten Wirkungsgraden betrieben werden müssten.

Wasserstoffsystem als Saisonspeicher

Es wird ein Wasserstoffsystem als Saisonspeicher in autonomen Stromversorgungen betrachtet. In unseren Breiten muss in einem solchen System der PV-Generator stets so groß dimensioniert werden, dass er in einem konventionellen Hybridssystem wenigstens einer 80 %-igen solaren Deckung entsprechen würde, zuzüglich des Ausgleichs der Verluste, die in der Speicherkette Elektrolyseur – H₂-Speicher – Brennstoffzelle entstehen. Andernfalls würde im Sommer nicht genügend Überschussenergie erzeugt, um den Bedarf im Winter zu decken.

Da konventionelle Hybridssysteme mit Dieselgenerator an „einfachen“ Standorten in der Regel kostenoptimal mit ca. 50 - 70 % solarer Deckungsrate ausgelegt werden, können Wasserstoffsysteme als Saisonspeicher hier nicht konkurrieren: alleine die Zusatzinvestitionen in den größeren PV-Generator verteuern das System bereits.

Als Marktnische kommen daher nur Anwendungen in Frage, in denen das konventionelle System ohnehin mit hoher solarer Deckungsrate ausgelegt würde, z. B. über 90 %. Gründe hierfür können ein besonders entlegener Standort sein, Emissionen von Zusatzstromerzeugern oder Zuverlässigkeitskriterien. Wie in dem Projektbeispiel deutlich wird, macht allerdings die hohe Komplexität von Wasserstoffsystemen für Saisonspeicher und daran geknüpft ihre Kosten und der Wartungsbedarf noch auf längere Sicht den Markteinstieg solcher Systeme unwahrscheinlich.

Zusammenfassung

Stationäre autonome Stromversorgungen stellen tatsächlich einen realistischen Einstiegsmarkt für Wasserstoffsysteme und Brennstoffzellen dar, vorerst jedoch als Zusatzstromerzeuger und erst mittelfristig als Saisonspeicher – wenn Konkurrenztechnologien wie etwa die Redox-Flow-Battery sich nicht als vorteilhafter erweisen sollten. Zu seiner Erschließung müssen jedoch einige, aus heutiger Sicht teilweise ambitionierte, Ziele erreicht werden:

- Erhebliche Erhöhung der Lebensdauer von Brennstoffzellen und ihren Systemkomponenten auf 10.000 h
- Reduzierung der Anforderungen an die Brennstoffqualität
- Vereinfachung und Kostensenkung in der Sicherheitstechnik
- Zuverlässigere und kostengünstigere Komponenten für die Systemperipherie (Pumpen, Ventile, Sensoren)
- Verbesserte Systemintegration von Brennstoffzellen und Leistungs- und Regelungselektronik
- Für Saisonspeicher Kostensenkung und Steigerung der Zuverlässigkeit der sehr komplexen Systeme (Elektrolyser – H₂-Speicher – Brennstoffzelle) und günstigere Speichertechnologie
- In Outdoor-Anwendungen Entwicklung von Technologien für entsprechende Temperaturbereiche (bis -20 °C)

Danksagung

Die Modernisierung der Stromversorgung auf dem Rappenecker Hof wurde möglich dank der Förderung durch den Innovationsfonds Klima- und Wasserschutz der badenova AG & Co. KG, Freiburg. Die beteiligten Projektpartner Familie Riesterer, Oberried; Phocos AG - Deutschland, Illerkirchberg sowie das Fraunhofer ISE, Freiburg beteiligten sich ebenfalls mit beträchtlichen Eigenmitteln an der Finanzierung dieses Projektes. Die Firma basi Schöberl GmbH und Co, Rastatt stellt den Wasserstoff kostenlos zur Verfügung.

Das Projekt FIRST wurde unter Koordination von INTA, Spanien gemeinsam mit den spanischen Forschungsinstituten CIEMAT und ICP-CSIC, der französischen Firma Air Liquide, der italienischen Firma Nuvera Fuel Cells sowie Würth Elektronik und dem Fraunhofer ISE aus Deutschland durchgeführt. Als Beobachter nehmen die Firmen INABENSA und CHLORIDE aus Spanien teil. Das Projekt wird in Teilen von der Europäischen Gemeinschaft im Rahmen des Forschungsvertrages ERK5-CT1999-00018 finanziert.

Literatur

- [1] A. Steinhüser, R. Kaiser, N. Reich, W. Roth, M. Schneider:
Brennstoffzellen zur dezentralen Stromversorgung auf dem Rappenecker Hof, 19. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein 2004
- [2] J. Benz, B. Hacker, U. Wittstadt, F. Isorna, A.M. Chaparro, L. Daza:
Autonomous PV-hybrid system with electrolyser and fuel cell: Operating experience, EuroSun, Freiburg 2004
- [3] J. Benz, T. Meyer, D.U. Sauer, A. Vegas:
Integrated Design Approach for PV Hybrid Systems, 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka 2003
- [4] W. Roth, J. Benz, B. Ortiz, D. U. Sauer, A. Steinhüser:
Fuel Cells in Photovoltaic Hybrid Systems for Stand-Alone Power Supplies, 2nd European PV Hybrid and Mini Grid Conference, Kassel 2003