

Brennstoffzellen für mobile Anwendungen – Wo stehen wir auf diesem Weg?

Detlef Stolten, Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Energie- und Klimaforschung – Brennstoffzellen (IEK-3)

Kurzfassung

Mobilität steht vor der Herausforderung, mit neuen Energiewandlungstechniken und neuen Kraftstoffen zur Verringerung der Umweltbelastungen und zur Reduktion importierter Energierohstoffe beizutragen. Batterie- und Brennstoffzellensysteme zur Bereitstellung von elektrischer Leistung für Antriebe und Bordnetze werden aktuell entwickelt. Langfristig soll Strom aus erneuerbaren Energien in Form von Wasserstoff für Pkw-Antriebe bereitgestellt werden. Batterie-Pkw mit deutlich reduzierter Reichweite werden mit Netzstrom versorgt, dessen Anteil an erneuerbaren Energien ebenfalls steigen wird, und können darüber hinaus auch durch Entnahme und Abgabe elektrischer Energie die Netzstabilität unterstützen. Der Beitrag stellt den aktuellen Stand der Brennstoffzellentechnik im Zusammenhang mit heute erkennbaren Anwendungen dar.

1. Einführung

Wesentliche Ziele einer notwendigen Neuausrichtung des Verkehrssektors sind die Verringerung globaler und lokaler Umwelteinwirkungen, die Reduzierung der Abhängigkeit von importierten Energierohstoffen sowie wirtschaftspolitische Aspekte. In diesem Zusammenhang werden aktuell ein veränderter Primärenergiemix in Verbindung

Arbeits- temperatur	Brennstoffzelle		Vorteile	Nachteile
	Akronym	Elektrolyt		
1000°C	Keramischer IC	Y ₂ O ₃ -dotiertes ZrO ₂	<ul style="list-style-type: none"> Guter Wirkungsgrad Einfaches System Interne Reformierung 	<ul style="list-style-type: none"> Sprödigkeit der Keramiken Korrosion mit metall. IC
	SOFC			
750°C	Metallischer IC			
650°C	MCFC	Li _{0,5} (Na,K) _{0,5} CO ₃	<ul style="list-style-type: none"> Große Zellfläche Einfache Systeme Interne Reformierung 	<ul style="list-style-type: none"> Korrosion Phasenübergang I ↔ s Niedrige Leistungsdichte
220°C	PAFC,	e.g. H ₃ PO ₄ , PBI	<ul style="list-style-type: none"> Einfache Kühlung; Kein Wassermanagement 	<ul style="list-style-type: none"> PAFC: fortgeschritten PBI: früher Status
160°C	HT-PEFC			
120°C	PEFC	Sulfoniertes Polymer	<ul style="list-style-type: none"> Fortgeschrittener Status; Gut mit Wasserstoff 	<ul style="list-style-type: none"> Wassermanagement Nicht für Reformierung
60°C	DMFC	Sulfoniertes Polymer	<ul style="list-style-type: none"> Robust Flüssiger Energieträger 	<ul style="list-style-type: none"> Methanolpermeation Begrenzter Wirkungsgrad

Abb. 1: Übersicht über die wesentlichen Brennstoffzellen.

AFC: Alkalische BZ, BZ: Brennstoffzelle, DMFC: Direktmethanol-BZ, HT-PEFC: Hochtemperatur-PEFC, MCFC: Karbonatschmelzen-BZ, PAFC: Phosphorsäure-BZ, PEFC: Polymerelektrolyt-BZ, SOFC: Festoxid-BZ

Im Bereich der Leichttraktion können Brennstoffzellen als Ersatz für bisher übliche Batteriemodule eingesetzt werden. Dabei kann Wasserstoff in Polymermembranbrennstoffzellen (*Polymer electrolyte fuel cells*, PEFC) oder Methanol in Direkt-Methanolbrennstoffzellen (DMFC) verwendet werden. Letztere bieten den Vorteil der Nutzung eines einfach zu tankenden flüssigen Kraftstoffs hoher Energiedichte.

Im Folgenden werden die Einsatzfelder von Brennstoffzellen für Fahrzeugantriebe und zur Bordstromversorgung vor dem Hintergrund einer generell beobachtbaren Ausweitung der Nutzung von Strom in Fahrzeugen untersucht und nach den Kriterien Primärenergiebedarf, Treibhausgasemissionen und Kosten bewertet.

2. Elektroantriebe für den Straßenverkehr

Kraftfahrzeuge deren Antriebsstruktur und Speicherauslegung einen rein elektrischen Betrieb ermöglicht gelten als emissionsfrei. Darunter fallen:

- *Plug-in* Hybride mit Verbrennungsmotor oder Brennstoffzellensystem (*Plug-in hybrid electric vehicle*, PHEV) mit Reichweiten im Batteriebetrieb von bis zu 50 km,
- Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzelle und Batterie (*Fuel cell hybrid electric vehicle*, FCHV) mit Reichweiten von mehr als 400 km und
- Elektrofahrzeuge mit Batterie (*Battery electric vehicle*, BEV) mit Reichweiten bis maximal 200 km.

Über die Vergleichbarkeit entsprechender Fahrzeugkonzepte mit heutigen Fahrzeugen entscheiden bei vergleichbarer Nutzlast und Nutzvolumen neben den Kosten vor allem die Leistungsfähigkeit des Antriebs mit Bezug auf Höchstgeschwindigkeit und Beschleunigungsfähigkeit sowie die Reichweite zwischen Betankungs- beziehungsweise Batterieladevorgängen. Aufgrund des Drehmomentverlaufs der Antriebsmaschine gelten Elektroantriebe als sehr gut fahrbar und machen bei moderaten Höchstgeschwindigkeiten ein Schaltgetriebe verzichtbar. Für Fahrzeugantriebe mit Brennstoffzellen im Wasserstoffbetrieb kommen heute ausschließlich PEFC mit Betriebstemperaturen zwischen 80°C und 95°C zum Einsatz. Die Kaltstartfähigkeit ist auch bei -25°C gewährleistet. Beispiele für heute in Kleinserie zur weiteren Erprobung beim Anwender gebaute Fahrzeuge gibt Abb. 3.



Abb. 3: Fahrzeuge mit Brennstoffzellen im Wasserstoffbetrieb.
 Von links: B-Klasse F-CELL, Daimler AG [1]; Honda FCX Clarity [2]; GM HydroGen4 [3]

Bezüglich der Reichweite gelten deutlich stärkere Restriktionen für Elektrofahrzeuge mit Batterien im Vergleich zu Fahrzeugen mit Brennstoffzellen. Die Masse von Batteriesystemen, ist dem Energievorrat proportional. Kenndaten dazu können Tabelle 1 entnommen werden. Es wird deutlich, dass Batterien mit Li-Ionentechnologie den Anforderungen nach hoher spezifischer Energie und Energiedichte, hoher Lebensdauer und geringer Selbstentladeraten am ehesten gerecht werden.

Parameter		Blei	Ni-MH	Li-Ionen
Theor. spezifische Energie	[Wh/ kg]	167	214	420
Spezifische Energie	[Wh/ kg]	35...49	45...75	65...150
Spezifische Leistung	[W/ kg]	227...310	250...1.000	600...1.500
Energiedichte	[Wh/ l]	70...96	125...182	130...300
Leistungsdichte	[W/ l]	445...620	600...2.800	1.200...3.000
Kalendarische Lebensdauer	[a]	2...6	12	7...10
Zyklenlebensdauer	[1.000]	0,1...0,3	2,5...300	2...300
Selbstentladung	[1/Monat]	2%...3%	20%...30%	2%...10%
Temperaturbereich	[°C]	-30...70	-10...60	-25...50

Tabelle 1: Leistungsdaten von Batterien. Daten nach [4]; Energiedichte bei 25°C; Spezifische Leistung: Blei- und Li-Ionen-Akkumulatoren bei 10 s, Ni-MH bei 18 s Pulslast (Laden und Entladen); Zyklenlebensdauer: Ni-MH und Li-Ionen: unterer (oberer) Wert für 100% (<3%) Entladetiefe; Temperaturbereich: für in-Betrieb befindliche Zellen

Einzelne Hersteller geben für Hochenergiebatterien bezogen auf Einzelzellen Werte von bis zu 185 Wh/kg an [5]. Werden Abschläge für zusätzlich notwendige Massen für die Systemintegration zu Batteriemodulen und eine über die Lebensdauer notwendige

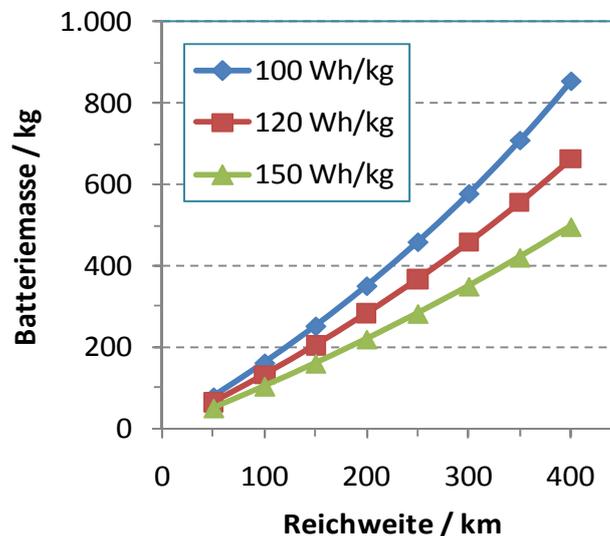


Abb. 4: Zusammenhang zwischen Batteriemasse und Reichweite im MVEG-Fahrzyklus gültig unter hier getroffenen Annahmen und bei konstanten Wirkungsgraden der Komponenten des Antriebsstranges (siehe Text).

Kapazitätsreserve von 20% angesetzt, kann auf Basis dieser Angabe eine spezifische Energie von 120 Wh/kg abgeschätzt werden. Für 200 km Reichweite bedeutet dies eine Masse der Batterie von 283 kg bei einem Energiebedarf von 14,2 kWh/100 km, der mit Hilfe von

Simulationsrechnungen auf Basis des Europäischen Fahrzyklus (MVEG) errechnet wurde [6]. Die zu speichernde Energiemenge beträgt damit 28,3 kWh_e. Eine Auslegung auf größere Reichweite erscheint nicht sinnvoll, da die größere Fahrzeugmasse auch einen erhöhten Energiebedarf bedeutet.

Der Zusammenhang zwischen notwendiger Batteriemasse und Reichweite kann Abb. 4 entnommen werden. Hierbei gelten folgende Annahmen bezüglich der Komponentenwirkungsgrade: 90% Entladen, 85% Elektromotor inklusive Leistungselektronik und 90% mechanischer Antriebsstrang. Annahmen für das Fahrzeug wurden wie folgt festgelegt: die Querspanfläche beträgt 2 m², der Luftwiderstandsbeiwert 0,32 und die Fahrzeugmasse ohne Antrieb und Speicher 900 kg. Es wird angenommen, dass sich durch Maßnahmen zur Chassis-Verstärkung die Fahrzeugmasse um das 1,2-fache zusätzlicher Komponentenmassen erhöht. Die Masse von Antrieb und Kraftübertragung wird mit 118 kg nach [7] abgeschätzt.

Die Lebensdauer von Batteriesystemen für reine Batterieantriebe auf Li-Ionenbasis kann heute nur unzureichend spezifiziert werden, da die Lebensdauer stark von den im Betrieb auftretenden Temperaturen und von der Entladetiefe abhängt. Anhaltspunkte dazu sind in Abb. 5 aufgeführt. Im realen Betrieb auftretende Bedingungen hängen von den tatsächlichen Nutzungsprofilen ab.

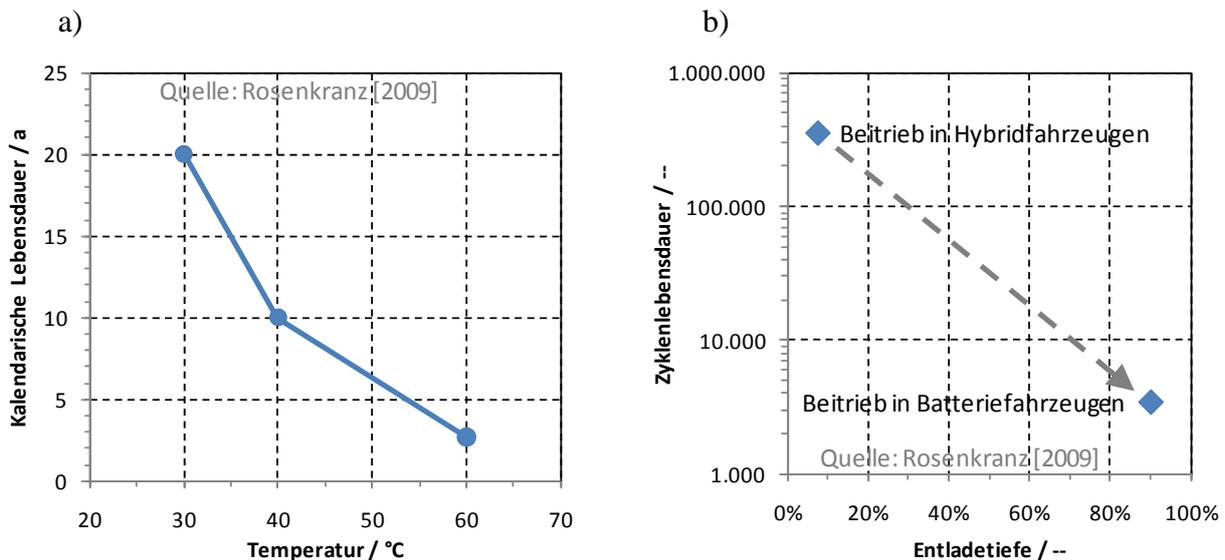


Abb. 5: Lebensdauer von Lithium-Ionenbatterien (nach [8]):
Abhängigkeit von a) der Temperatur, b) der Entladetiefe.

Bei Brennstoffzellen stellt die Verbesserung der Lebensdauer ebenfalls noch eine Herausforderung dar. Entsprechende Aktivitäten zur Aufklärung von Degradationsmechanismen und damit zur weiteren Reduktion des Leistungsverlusts betreffen auch die Materialwissenschaften und Fertigungsverfahren. Der heutige Status wird vom US Department of Energy (US DOE) in [9] mit 5.000 Stunden angegeben. Dieser Wert gilt allgemein als Referenzwert für die Pkw-Anwendung. Von Helmolt (2009) gibt in [10] für die kommende GM-Fahrzeuggeneration mit Brennstoffzelle eine Laufleistung von 120.000 Meilen, entsprechend ca. 190.000 km an. Weitere Verbesserungen stehen im Zusammenhang mit einer Reduktion des Bedarfs an Edelmetallkatalysatoren und damit insbesondere mit den Kosten von Brennstoffzellen.

Kostenprognosen für Batterien und Brennstoffzellensysteme sind heute schwierig zu treffen. Für Batterien gilt, dass zukünftig relevante Materialien und Herstellverfahren derzeit noch nicht absehbar sind. Gängige Werte – bei Annahme von Massenproduktion – werden heute als Zielwerte für den Zeitraum 2015 bis 2020 mit 250 bis 300 EUR/kWh_e angegeben. Für die weiter oben ermittelte Batteriekapazität von 28,3 kWh_e können dann bei Annahme des Mittelwerts von 275 EUR/kWh_e die Kosten des Batteriemoduls bei Berücksichtigung der Kapazitätsreserve von 20% mit rund 9.700 EUR abgeschätzt werden. Für Brennstoffzellen liegen Kostenangaben entsprechend Kromer et al. [2008] in [7] bei Unterstellung von Massenproduktion bei 108 US\$/kW_e und in [8] bei 61 EUR/kW_e. Zielwerte für 2015 geben [8] mit 30 US\$/kW_e und [7] mit 52 bis 76 US\$/kW_e an. Bei hier angenommenen 90 kW_e Systemleistung und 70 EUR/kW_e liegen die Kosten des Brennstoffzellensystems ohne Speicher bei 6.300 EUR. Für Wasserstoffspeicher als Druckgasspeicher mit 700 bar Betriebsdruck können in Anlehnung an [7] 10 EUR/kWh_{H2} angesetzt werden. Bei 110 kWh_{H2} notwendiger Wasserstoffmenge für 400 km auf der Basis von Berechnungen zum Kraftstoffbedarf im Europäischen Fahrzyklus (MVEG) [6] lassen sich Speicherkosten von 1.100 EUR für den H₂-Tank abschätzen. Die geschätzten Gesamtkosten des Stromerzeugungssystems liegen damit bei rund 7.400 EUR.

Zusammenfassend sind in Abb. 6 vergleichende Angaben zu Fahrzeugen mit Brennstoffzellen und Batterien dargestellt. Es wird deutlich, dass die Kosten des Stromerzeugungssystems mit Brennstoffzellen bei mindestens verdoppelter Reichweite deutlich geringer ausfallen können, wenn die entsprechenden Kostenziele erreicht werden. Die Fahrzeugmassen sind vergleichbar. Bezüglich der *Well-to-wheel* (WTW) Bilanzierung von Primärenergieaufwand und Emission von Treibhausgasen (THG) bestehen geringe Nachteile für das FCHV bei der Nutzung von Erdgas zur Erzeugung von Wasserstoff. Durch Veränderung der Primärenergiebasis bei der Bereitstellung von Strom und Wasserstoff in Richtung THG-ärmer Primärenergien lassen sich diese Werte weiter reduzieren.

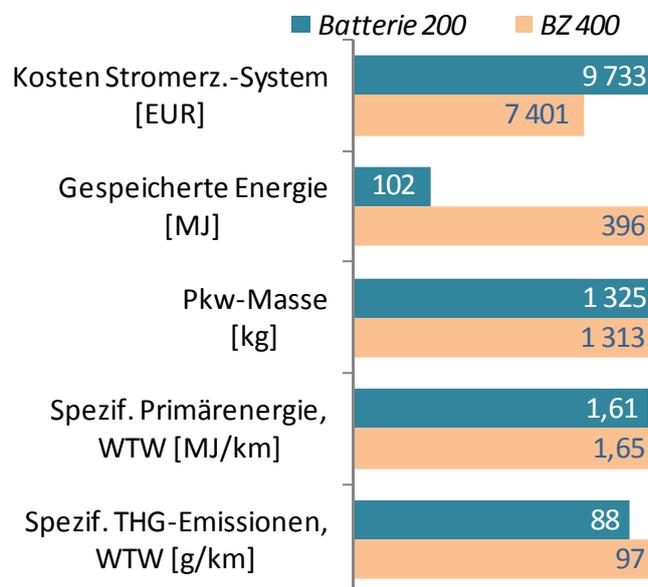


Abb. 6: Vergleich von Elektrofahrzeugen mit Batterien und Brennstoffzellen.
 Annahmen zu den Fahrzeugen, siehe Text; Strombereitstellung entsprechend dem deutschen Strommix (2008) nach [11], Wasserstoffbereitstellung mittels Erdgasreformierung und anschließendem Transport in Druckflaschen per Lkw; WTW: Well-to-wheel

Für den Alltagsgebrauch und für die Struktur der Kraftstoffversorgung von erheblicher Bedeutung ist die notwendige Betankungsinfrastruktur. Die Bereitstellung von Wasserstoff für FCHV erfordert zunächst hohe Investitionen in Wasserstofferzeugungskapazitäten

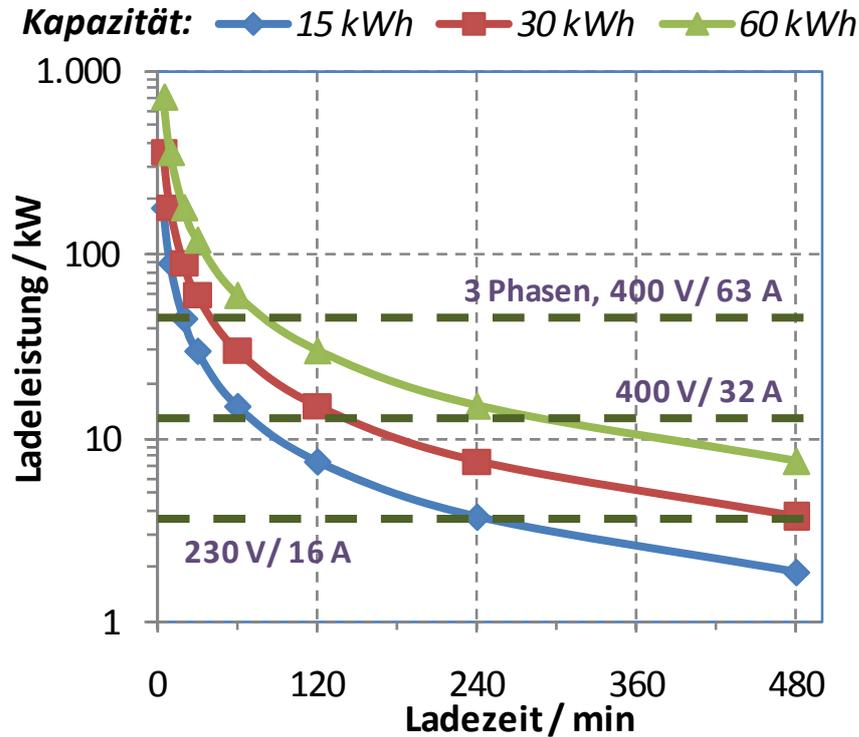


Abb. 7: Abschätzung der mindestens notwendigen Ladeleistung in Abhängigkeit von der Ladezeit für verschiedene Batteriekapazitäten.

und -infrastrukturen einschließlich der Tankstelle. Die Betankungsvorgänge können bezüglich Bedienbarkeit und Betankungsdauer weitgehend analog zur heutigen Fahrzeugbetankung gestaltet werden. Für BEV gelten grundsätzlich andere Randbedingungen aufgrund der erheblich längeren Betankungsdauer im Sinne der Batterieladevorgänge. Abb. 7 stellt Ladeleistungen und Ladezeiten gegenüber, wobei letztere Mindestladezeiten darstellen, die sich als Quotient aus der Batteriekapazität und der Ladeleistung ergeben. Reale Li-Ionenbatterien können nur bis etwa 75% Ladezustand (SOC) mit maximalem Ladestrom geladen werden. Darüber hinaus muss die Ladeleistung deutlich reduziert werden, was die Ladedauer weiter erhöht.

3. Brennstoffzellen zur Bordstromversorgung

Über die Bereitstellung von Antriebsleistung für Elektroantriebe hinaus können Brennstoffzellensysteme auch als Bordstromerzeuger (*Auxiliary power unit, APU*), zum Beispiel in Lkw, Flugzeugen oder Schiffen sinnvoll eingesetzt werden. Auch für Pkw, die einen erhöhten Strombedarf bei Fahrzeugstillstand aufweisen, können APUs mit Brennstoffzellen zu Vorteilen bezüglich Kraftstoffbedarf und Emissionen führen. Solche Systeme erreichen auch im Betrieb mit flüssigen Kraftstoffen deutlich höhere Wirkungsgrade als Antriebsmaschinen, die im Leerlauf über den Generator Strom bereitstellen, oder als APUs mit Verbrennungsmotoren. Basis solcher Systeme können Festoxidbrennstoffzellen (*Solid oxide fuel cells, SOFC*) oder PEFC beziehungsweise HT-PEFC sein. Auf die oben

genannten Anwendungen bezogen sind solche Systeme vielversprechend, die den an Bord verfügbaren Kraftstoff nutzen, z.B. Diesel oder Kerosin. Hierfür ist eine Reformierung mit anschließender Gasaufbereitung erforderlich (Abb. 8).

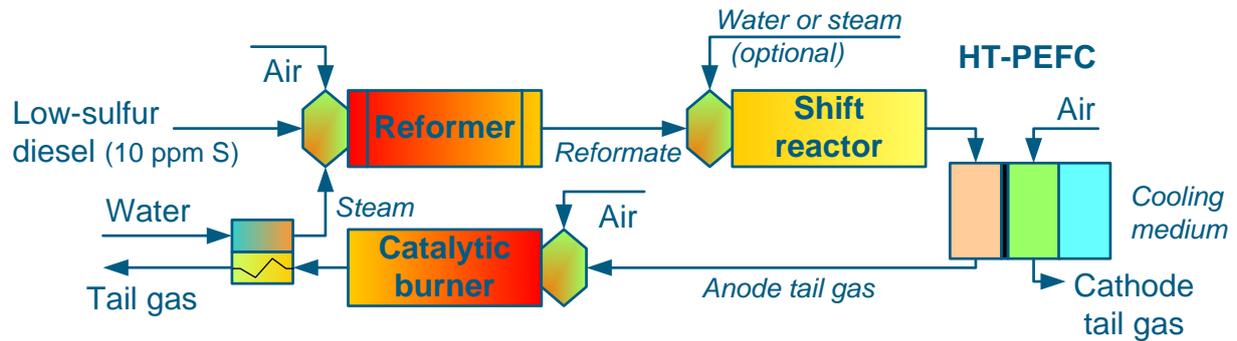


Abb. 8: Brennstoffzellensystem auf Basis von HT-PEFC mit autothermer Reformierung und Shift-Reaktor zur Brenngasaufbereitung.

Heute verfügbare Kraftstoffe unterscheiden sich in für die Reformierbarkeit relevanten Eigenschaften Siedeverhalten, chemischer Zusammensetzung, Additiv-Zugaben und Schwefelgehalt. Entsprechende Spezifikationen wirken sich stark auf die einzusetzenden Verfahren der Brenngaserzeugung und damit auch auf die Kosten aus (Abb. 9, siehe auch Peters et al. 2008 [12]).

Options for APUs in mobile application							
	LPG	Alcohols	Gasoline	Kerosene	Diesel	Heating oil	Marine Gas Oil
Boiling range						!	X
Residue						X	X
Aromatics			X	!	!	!	!
Di-, Tri and Poly aromatics						X	X
S content	!			X		X	X
S species				!		X	X

Abb. 9: Kraftstoffe für APU-Anwendungen.

Mögliche Vorteile, bezogen auf den Kraftstoffbedarf je erzeugter Kilowattstunde Strom, lassen sich bei Kenntnis des lastpunktabhängigen Betriebsverhaltens von Stromerzeugungssystemen ermitteln. Als Basis für solche Berechnungen zeigt Abb. 10 die Abhängigkeit des Wirkungsgrades der Stromerzeugung von der relativen Systemleistung für ein SOFC-System. Es wird deutlich, dass über den gesamten Teillastbereich der Wirkungsgrad des SOFC-Systems im Vergleich zur Verbrennungsmotor-APU deutlich höher ist. Nur bei Vollast sind die Werte vergleichbar.

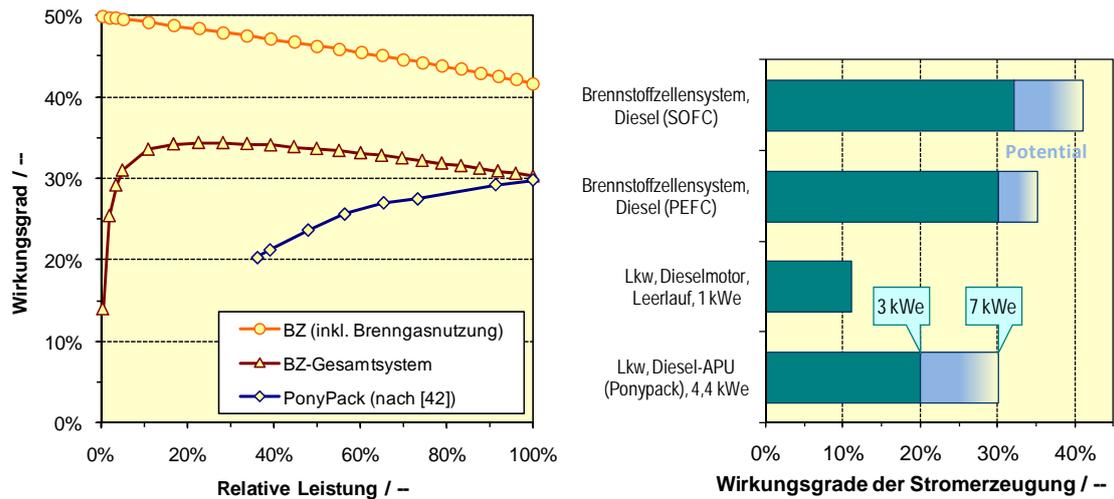


Abb. 10: links: Elektrischer Wirkungsgrad von Stromerzeugern mit SOFC und Verbrennungsmotor-APU in Abhängigkeit von der relativen Leistung; rechts: Wirkungsgrade unterschiedlicher Möglichkeiten der Stromerzeugung.

4. Zusammenfassung und Ausblick

In Verbindung mit Brennstoffzellen erlaubt Wasserstoff als Energieträger lokal emissionsfreie Mobilität und ermöglicht die Nutzung eines breiten Primärenergiespektrums. Wird Wasserstoff aus Erdgas hergestellt, sind bereits heute Vorteile gegenüber Pkw-Antrieben, die Benzin oder Diesel nutzen, darstellbar. Der Ausbau der Stromerzeugung auf Basis fluktuierender erneuerbarer Energien erfordert mittelfristig deren Zwischenspeicherung aus Gründen der Netzstabilität. Wasserstoff bietet hierfür im Vergleich zu Batterien eine höhere Energiedichte und gegenüber heute vergleichbare Tankprozeduren. Deutlich höhere Pkw-Reichweiten zwischen Betankungsvorgängen lassen sich realisieren. Der Wirkungsgrad der Prozesskette von der Primärenergie bis zum Rad ist dabei im Vergleich zu Batteriefahrzeugen geringer.

Der Einsatz von Brennstoffzellen zur Bordstromversorgung von Lkw, Flugzeugen oder Schiffen kann aus heutiger Sicht zu einer Reduktion des Kraftstoffbedarfs und lokal wirksamer Emissionen beitragen. Entsprechende Systeme nutzen den für die Anwendung gängigen Kraftstoff und erfordern damit keine eigene Kraftstoffinfrastruktur.

Für marktfähige Systeme müssen neben anwendungsspezifischen Entwicklungsaufgaben Kosten weiter verringert sowie Lebensdauer und Zuverlässigkeit erhöht werden. Optionen zur Kostenreduzierung liegen dabei vor allem im Design von Brennstoffzellen-Stack und -System und in der Entwicklung neuer Materialien sowie Verfahren zur Herstellung von Brennstoffzellen.

Literatur

- [1] Daimler AG (2010) www.daimler.de, zuletzt besucht am 13.12.2010
- [2] Honda Motor Co. (2010) www.hondanews.eu, zuletzt besucht am 13.12.2010
- [3] Adam Opel GmbH (2010) www.media.opel.de, zuletzt besucht am 13.12.2010

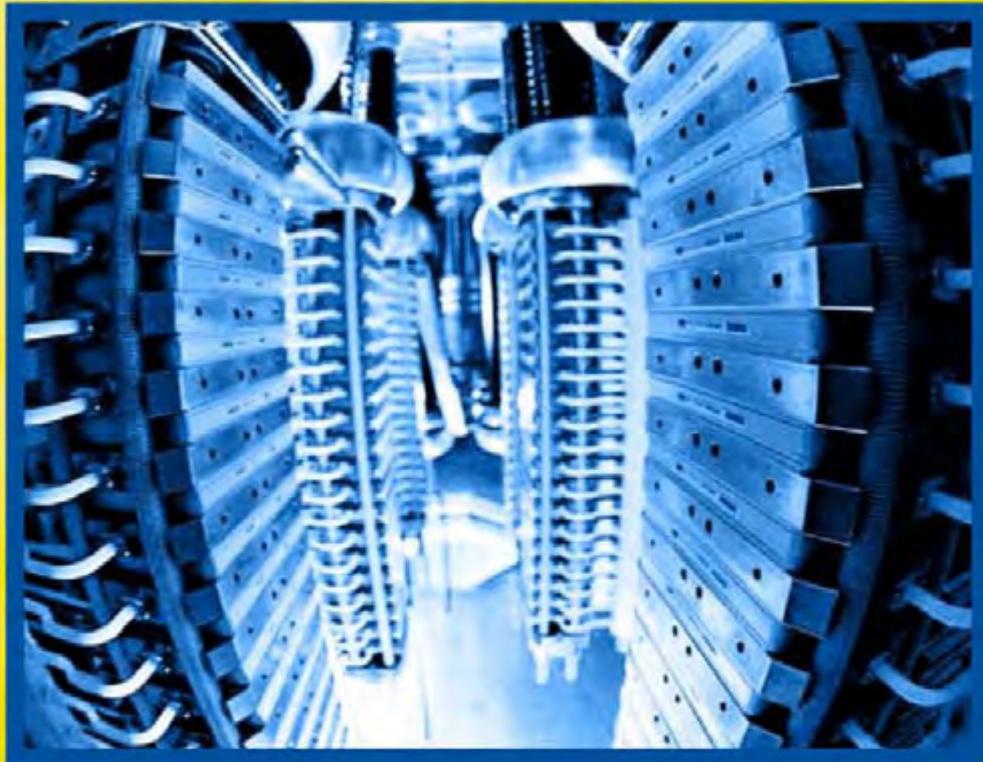
- [4] Wallentowitz, H.; Reif, K. (2006) Handbuch Kraftfahrzeugelektronik: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2006
- [5] Saft America Inc., Datenblatt zu VL 52 E - high energy cell. www.saftbatteries.com, zuletzt besucht am 15.09.2010
- [6] Grube, Th., Stolten, D. (2010) Bewertung von Fahrzeugkonzepten mit Brennstoffzellen und Batterien. Beitrag zur VDI-Tagung „Innovative Fahrzeugantriebe“, Dresden, 10. und 11.11.2010
- [7] Kromer, M.A.; Heywood, J.B., A Comparative Assessment of Electric Propulsion Systems in the 2030 US Light-Duty Vehicle Fleet. SAE Technical Paper Series SAE 2008-01-0459
- [8] Rosenkranz, C. (2009) Li-Ion Batterien: Schlüsseltechnologie für das Elektroauto. Tagungsbeitrag: Erster Deutscher Elektro-Mobil Kongress, Bonn, 16.06.2009
- [9] US DOE (2009) Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan: Planned Program Activities for 2005-2015. <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/mypp/>, zuletzt besucht am 22.09.2010
- [10] von Helmolt (2009) Fuel cell or battery vehicles? Similar technology, different infrastructure. Tagungsbeitrag: f-cell, Stuttgart, 28. und 29. September 2009
- [11] AG Energiebilanzen (2010) Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2008. www.ag-energiebilanzen.de, zuletzt besucht am 22.09.2010
- [12] Peters, R., Grube, Th., Pasel, J., Samsun, C. (2008) Einsatzgebiete und technische Voraussetzungen für Brennstoffzellen in APU-Anwendungen. „Der 4. Deutsche Wasserstoff Congress 2008 – Tagungsband“, Stolten, D., Emonts, B., Grube, Th. (Hrsg.), Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energie & Umwelt, Band 12, Jülich, 2008

Prof. Dr.-Ing. Detlef Stolten
 Institut für Energie- und Kimaforschung – Brennstoffzellen (IEK-3)
 Forschungszentrum Jülich GmbH
 D-52425 Jülich
 d.stolten@fz-juelich.de

Exzerpt aus Tagungsband des AKE, DPG-Tagung 2010 Bonn

home:

http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/DPG2010-AKE_Bonn/Links_DPG2010.htm



Energie

Technologien für die Zukunft

Vorträge auf der DPG-Frühjahrstagung in Bonn 2010

Herausgegeben von Hardo Bruhns

Energie

Technologien für die Zukunft

Vorträge auf der DPG-Frühjahrstagung in Bonn 2010

Arbeitskreis Energie in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

Herausgegeben von Hardo Bruhns

Bad Honnef, April 2011

Frühjahrstagung des Arbeitskreises Energie
in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft
Bonn, 15. und 16. März 2010

Hauptvorträge

Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	5
Übersicht über die Fachsitzungen.....	7
Abstracts	8
Energieeffizienz in der Informationstechnologie (vorgetragen von W. Gnettner).....	18
ITER, the Decisive Step towards Fusion Energy (vorgetragen von G. Janeschitz)	29
The Physics Base for ITER and DEMO (vorgetragen von H. Zohm).....	44
Neue Reaktorenkonzepte für die Kernspaltung, Entwicklungen von AREVA (vorgetragen von W. Dams).....	55
Brennstoffzellen für mobile Anwendungen – Wo stehen wir auf diesem Weg? (vorgetragen von D. Stolten)	67
Elektrische Energiespeicher (vorgetragen von M. Rzepka)	77
Strom aus solarthermischen Kraftwerken im Sonnengürtel (vorgetragen von R. Pitz-Paal)	90
Stromtransport: Erfordernisse und Lösungen für ein europäisches Verbundnetz unter Nutzung solaren Stroms aus Nordafrika (vorgetragen von T. Benz)	97
Intelligente Stromnetze - Perspektiven und Potenziale (vorgetragen von F. Schulte)	108
Geothermische Stromerzeugung - Vom Reservoir bis zur Turbine (vorgetragen von E. Huenges).....	114
Energie aus Biomasse – Perspektiven für Europa (vorgetragen von D. Thrän).....	126
Thermodynamisch optimiertes Heizen und Kraft-Wärme-Kopplung (vorgetragen von G. Luther).....	137

Der vorliegende Band fasst schriftliche Ausarbeitungen der Hauptvorträge der AKE Tagung des Jahres 2010 in Bonn zusammen. Leider ist es nicht gelungen, von allen Vortragenden Manuskripte zu erhalten. Die Präsentationsfolien aller Hauptvorträge können auf der Webseite des Arbeitskreises über:

<http://www.dpg-physik.de/dpg/organisation/fachlich/ake.html>

(von dort zu dem Archiv des AKE weiterklicken) eingesehen werden. Allen, die zu diesem Sammelband beigetragen haben, sei an dieser Stelle sehr herzlich gedankt.

Düsseldorf, im Dezember 2010

Hardo Bruhns

Direkter Link zum AKE - Archiv:

<http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/index.htm>

Direkter Link zum AKE - Archiv, Tagung 2010 -Bonn:

http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/DPG2010-AKE_Bonn/Links_DPG2010.htm