

Portable Anwendungen mit PEM-Brennstoffzellen

von Joachim Scholta und Mario Zedda

Überblick

Polymermembran-Brennstoffzellen sind unter Umgebungsbedingungen einsetzbar und bieten aufgrund ihrer Leistungsfähigkeit eine Alternative sowohl zu batteriebasierten Stromversorgungen im Kleinleistungsbereich (bis 50 Watt) als auch zu motorbetriebenen Stromerzeugern der kW-Klasse. Bei Kleinleistungsanwendungen steht der höhere Energieinhalt, bei Anwendungen höherer Leistung die herausragende Umweltfreundlichkeit (Wirkungsgrad, Abgas- und Geräuschemission) von Stromversorgungen mit Brennstoffzellen im Vordergrund. Prototypen für Notebook-Betrieb (Fraunhofer ISE) und netzunabhängige Stromversorgung („Power Bag“, ZSW) zeigen die Leistungsfähigkeit dieser Systeme.

Polymer electrolyte membrane fuel cells operate at ambient conditions and, because of their performance capabilities, are an alternative for batteries in low-power power supplies (up to 50 watts) as well as for motor-generators in the kW-range. In low power applications the main advantage of fuel cells is the higher energy density, in high power applications the superior environmental characteristics (efficiency, exhaust and noise emissions). Prototypes of fuel cell power supplies for notebooks (Fraunhofer ISE) and for general applications („power bag“, ZSW) demonstrate the capabilities of such systems.

1. Einführung

Die Leistungsanforderungen an Stromversorgungen sind in den letzten Jahren sowohl hinsichtlich der Leistungs- als auch hinsichtlich der Energiedichte deutlich gestiegen. Gleichzeitig zwingen gestiegene Umweltanforderungen zu vermindertem Schadstoffeintrag.

Vor diesem Hintergrund besitzen Brennstoffzellen in Verbindung mit einem Wasserstoffspeicher ein breites Einsatzpotenzial. Entscheidend für einen Erfolg der Brennstoffzellen als portable Stromerzeuger sind vor allem eine gegenüber Vergleichssystemen verbesserte Energiedichte sowie bei größeren Systemen ein im Vergleich zu motorischen Stromerzeugern drastisch verbessertes Geräusch- und Emissionsverhalten (**Abbildungen 6 und 7**) sowie ein wesentlich erhöhter Wirkungsgrad.

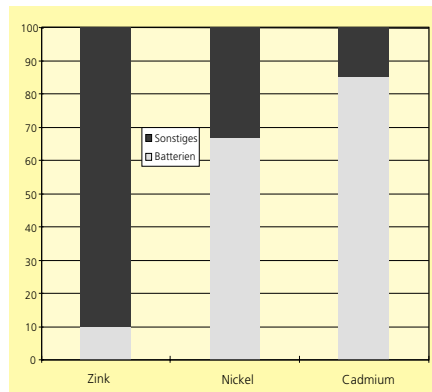


Abbildung 1: Anteile von Batterien und Akkumulatoren am Schadstoffeintrag im Hausmüll (Angaben in %)

1.1 Brennstoffzellen

Derzeit sind fünf Brennstoffzellentypen (PEMFC, DMFC, PAFC, MCFC, SOFC) mit unterschiedlichen Elektrolyten und Temperaturniveaus im Einsatz. Für den Einsatzzweck der portablen Stromversorgung ist die Polymermembran-Zelle (PEMFC) besonders geeignet, da sie als einziger Zelltyp folgende Eigenschaften aufweist:

- Schnelles An- und Abschaltverhalten
- Betrieb zwischen 0 und 80°C, selbst heizend
- Hohe Leistungsdichte (> 0,5 W/cm³)
- Hohes Leistungsgewicht (> 0,25 W/g)
- Lange Lebensdauer

Die Leistungsdaten beziehen sich auf die Brennstoffzelle und müssen noch durch die Speichereinheit und die zum Betrieb erforderliche Peripherie ergänzt werden. Für sehr kleine Leistungen kann bereits heute zusätzlich die Direkt-Methanol-Zelle (DMFC) in Betracht gezogen werden.

1.2 BZ-Kleinsysteme

Die Brennstoffzelle benötigt zu ihrem Betrieb eine an den Strombedarf angepasste Versorgung mit Wasserstoff und Luft sowie bei höheren Leistungen eine Kühlung zur Wärmeabfuhrung. Der prinzipielle Aufbau eines solchen Systems ist in **Abbildung 2** dargestellt.

Dr. rer. nat. Joachim Scholta arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Polymermembran-Brennstoffzellen und -systeme in der Abteilung ECW im Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), Ulm.

Dipl.-Ing. Mario Zedda arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter an Polymermembran-Brennstoffzellen für portable Anwendungen in der Abteilung Energietechnik des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE), Freiburg.

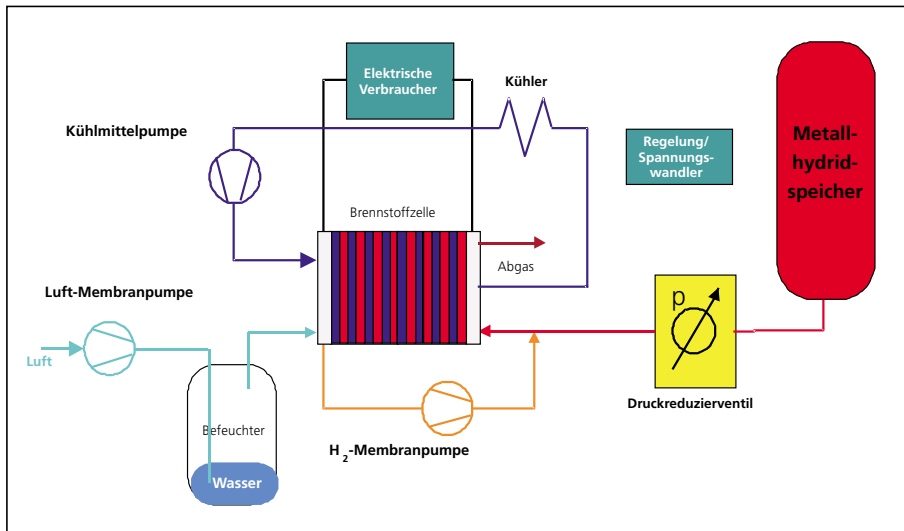
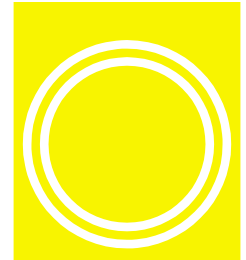


Abbildung 2: Schema eines Klein-Brennstoffzellensystems mit Wasserstoff-Rezyklrierung, Luftbefeuchtung und Kühlung

Die Brennstoffzelle selbst wird im Regelfall als Zellstapel (Stack) aufgebaut. Zusätzlich besteht bei kleineren Leistungen (bis etwa 50 Watt) die Möglichkeit einer ebenenintegrierten Verschaltung mehrerer Zellen sowie des Einsatzes einer Einzelzelle mit dazu passendem DC-DC-Konverter. Ebenenintegrierte Verschaltung und Stackbauweise sind kombinierbar („Streifenmembranzelle“), was ein flaches Zelldesign bei hohen Leistungsdichten ermöglicht.

1.3 Speichersysteme

Polymermembran-Brennstoffzellen benötigen Wasserstoff, welcher direkt gespeichert oder aus Kohlenwasser-

stoffen gewonnen (reformiert) wird. Der Reformer-Wasserstoff muss zusätzlich gereinigt werden, um für die PEMFC verträglich zu sein. Aus diesem Grund sowie wegen des sich bei Einheiten unter 1 kW_{chem.} deutlich verschlechternden Wirkungsgrades kommt für Systeme unterhalb 500 W_{el.} praktisch nur Wasserstoff als Speichermedium in Frage. Eine Ausnahme bilden Zellen im Bereich von 5 Watt oder weniger, wo heute auch die DMFC eingesetzt und damit direkt verstrombares Methanol als Speichermedium eingesetzt werden kann.

Aufgrund von technischen Überlegungen (Isolationsverluste bei Kleinspeichern, fehlende Infrastruktur)

scheidet Flüssigwasserstoff (LH₂) als Speicher für Kleinsysteme aus. Je nach Gewichtung von volumen- und gewichtsbezogener Energiedichte kommen für diesen Anwendungsfall bevorzugt Metallhydrid- oder Druckspeicher in Frage. Bei beiden Systemen sind derzeit Entwicklungen von Stahl- zu Kompositflaschen im Gang, was eine wesentliche Steigerung der gewichtsbezogenen Energiedichte bewirken wird. Methanol ist im Vergleich zu den bei Wasserstoff realisierbaren Energiedichten attraktiver. Dieser Vorteil kann wegen des Zusatzaufwands für die Reformierung jedoch nur bei Systemen über 500 W oder für direkt umsetzende Kleinstsysteme (DMFC) zum Tragen kommen. Die Speicherung von Wasserstoff an Carbonfasern ist noch Forschungsgegenstand, neuerdings wurden wiederum Werte von mehr als 10 Gew. % publiziert [1].

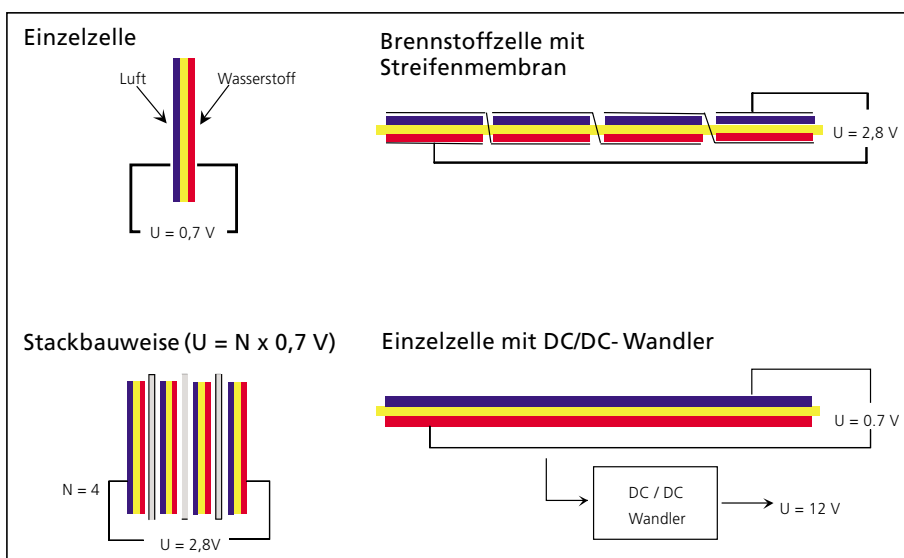
1.4 Leistungsdaten im Vergleich

Volumen- und gewichtsspezifische Energiedichten von Wasserstoffspeichern (mit Tank) für verschiedene Speichervolumina sind z. B. in [2] wiedergegeben. Die volumenspezifischen Energien für Druck- und Hydridspeicherung liegen zwischen ca. 0,2 und mehr als 0,5 kWh/l, die volumenspezifische Leistung zwischen ca. 0,2 und 0,5 kW/l. Zusätzlich sind periphere Komponenten zu berücksichtigen.

Die bei BZ-Stromerzeugern im Gegensatz zu Batterien räumlich getrennten Systeme „Speicher“ (Energie) und „Zelle“ (Leistung) ermöglichen eine weitgehende Anpassung an unterschiedliche Energie/Leistungsverhältnisse. Die aus den Komponenten „Speicher“ und „Zelle“ resultierende Energiedichte im Vergleich zu Primär- und Sekundärsystemen ist in [Abbildung 4](#) wiedergegeben.

Der BZ-Stromerzeuger weist bei hohen Energie/Leistungsverhältnissen deutliche Vorteile im Vergleich mit bestehenden Sekundärbatterien auf. Umgekehrt werden für sehr leistungsintensive Anwendungen Sekundärbatterien oder Supercaps bevorzugt. Die volumenbezogene Energiedichte von BZ-Stromerzeugern im kW-Bereich ist konkurrenzfähig zu marktgängigen Benzin-Generatoren. Die Hauptvorteile liegen hier jedoch im hohen Wirkungs-

Abbildung 3: Elektrische Verschaltungsmöglichkeiten von Kleinbrennstoffzellen



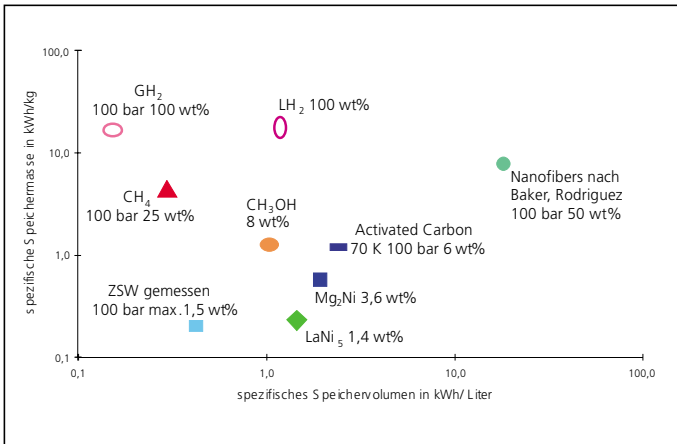
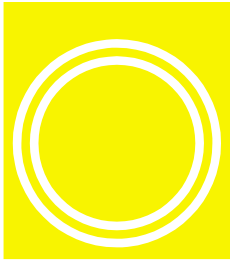


Abbildung 4: Volumenbezogene Energiedichte von Wasserstoffspeichern (ohne Behälter)

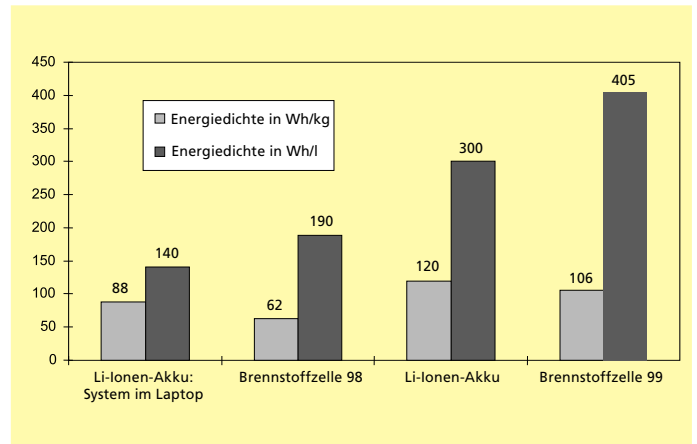


Abbildung 5: Volumen- und gewichtsbezogene Energiedichte von portablen Brennstoffzellen im Vergleich zum Li-Ionen-Akku

grad sowie dem herausragend günstigen Lärm- und Emissionsverhalten der Brennstoffzellensysteme.

Im Kleinleistungsbereich (z.B. Laptop) ist die Lithium-Ionen-Batterie Stand der Technik. Die volumen- und gewichtsbezogenen Energieinhalte sind in [Abbildung 5](#) im Vergleich zu Wasserstoff-Brennstoffzellensystemen wiedergegeben.

Der Vergleich zeigt, dass portable Brennstoffzellen bei vergleichbarem gewichtsbezogenem Energieinhalt im volumenbezogenen Energieinhalt deutliche Vorteile aufweisen, was entweder der Einsatzdauer oder der Leistungsfähigkeit von Laptops zugute kommen kann.

1.5 Ökologische Vorteile von Brennstoffzellen

Im Kleinleistungsbereich sind vor allem die gegenüber Sekundärbatterien verringerten Schadstoffeinträge ([Abbil-](#)

[dung 6](#)) zu nennen. Gegenüber Primärzellen ist die bei diesen stark negative Energiebilanz (bis zu 500 bezogen auf Herstellungsaufwand) zu nennen.

Im Bereich höherer Leistungen sind portable BZ-Stromerzeugungsanlagen eine Alternative zu motorbetriebenen Generatoren. Gegenüber diesen sind BZ-Anlagen bei H₂-Betrieb vollständig schadstofffrei und sehr lärmarm. Bei Reformat-Betrieb werden lediglich vernachlässigbare Mengen CO und NO_x sowie weniger als die halbe Menge CO₂ emittiert. Die Zahlenwerte sind in den [Abbildungen 6 und 7](#) wiedergegeben.

Auch im elektrischen Wirkungsgrad zeigt die Brennstoffzelle deutliche Vorteile, wie in [Abbildung 8](#) wiedergegeben.

Der reine Stack-Wirkungsgrad liegt über 50%. Wegen des nahezu vollständigen Umsatzes von Wasserstoff sind Abgasverluste vernachlässigbar.

Durch Nebenaggregate (Luftzufuhr, Kühlung, Steuerung) sinkt der Wirkungsgrad auf 20 bis 40%. Da der Wirkungsgrad bei motorbetriebenen Generatoren der kW-Klasse im Allgemeinen unter 10% liegt, ist auch im ungünstigsten Fall von einem Wirkungsgradvorteil um den Faktor 2 auszugehen.

2. Anwendungen

Anwendungsfelder für portable Brennstoffzellen sind prinzipiell alle Bereiche, in denen eine netzunabhängige Energieversorgung benötigt wird. Besonders bevorzugt sind Anwendungen, bei denen es entweder auf hohe Energiedichten ankommt oder hohe Anforderungen an Lärm- und Emissionsverhalten gestellt werden. Im ersten Bereich sind Batterieersetzsysteme angesiedelt, z.B. für Laptops und technische Anlagen ohne Stromanschluss. Im zweiten Bereich sind

Abbildung 6: Emissionsvergleich Abgas zwischen PEMFC und Generatoren

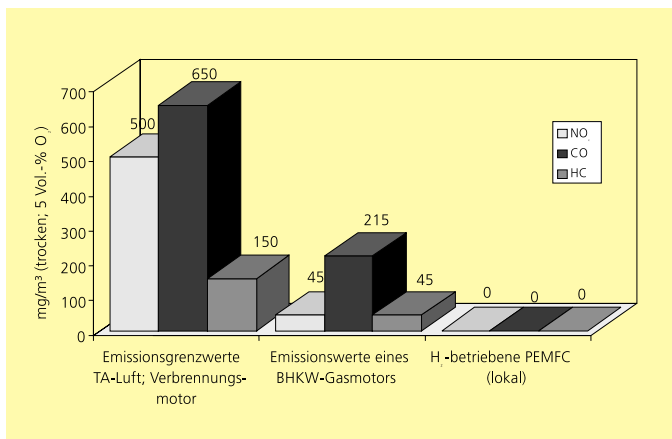
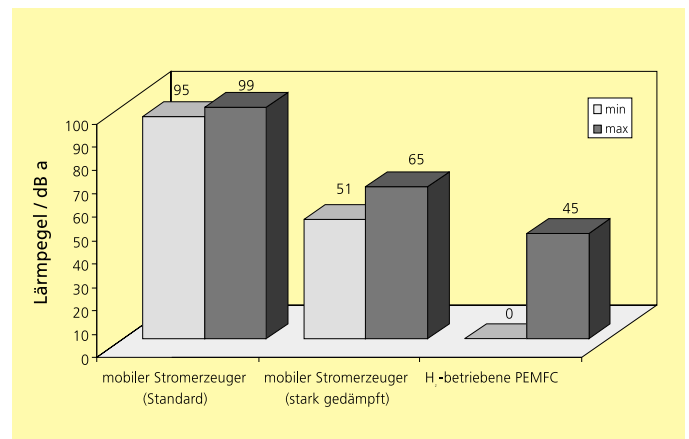


Abbildung 7: Emissionsvergleich Lärm zwischen PEMFC und Generatoren



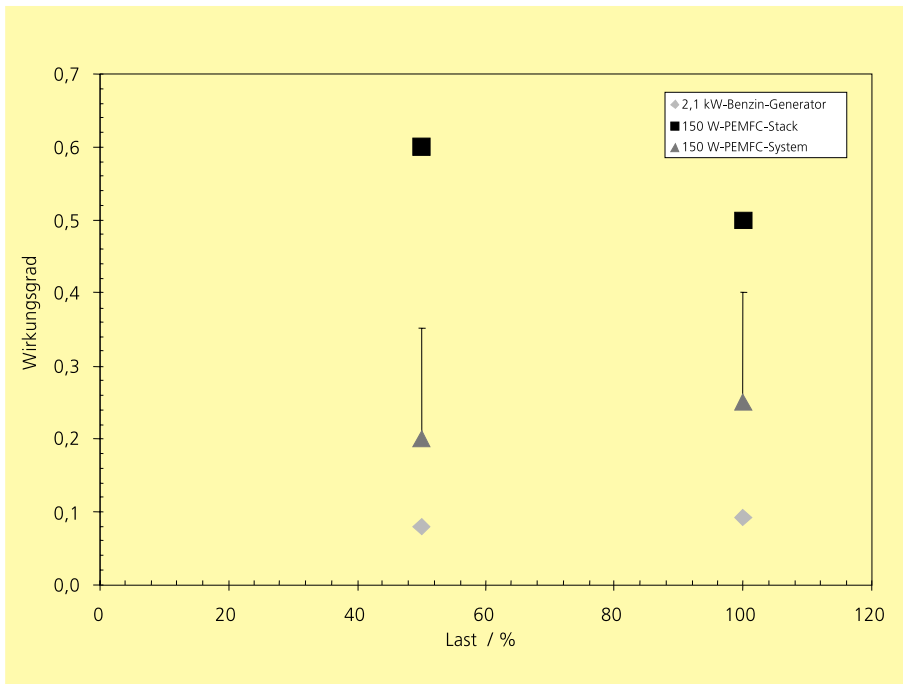
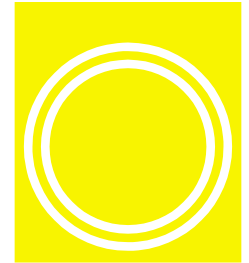


Abbildung 8: Wirkungsgradvergleich zwischen PEMFC und Generatoren

mobile Stromerzeugungsanlagen zu nennen, z. B. für Freizeitanwendungen wie Camping, Boote, Wochenendhäuser. Für beide Bereiche sind bereits leistungsfähige Prototypen entwickelt worden, ein Brennstoffzellensystem zum Betrieb im Laptop (Fraunhofer ISE) sowie eine unabhängige Stromversorgungseinheit („Power Bag“, ZSW).

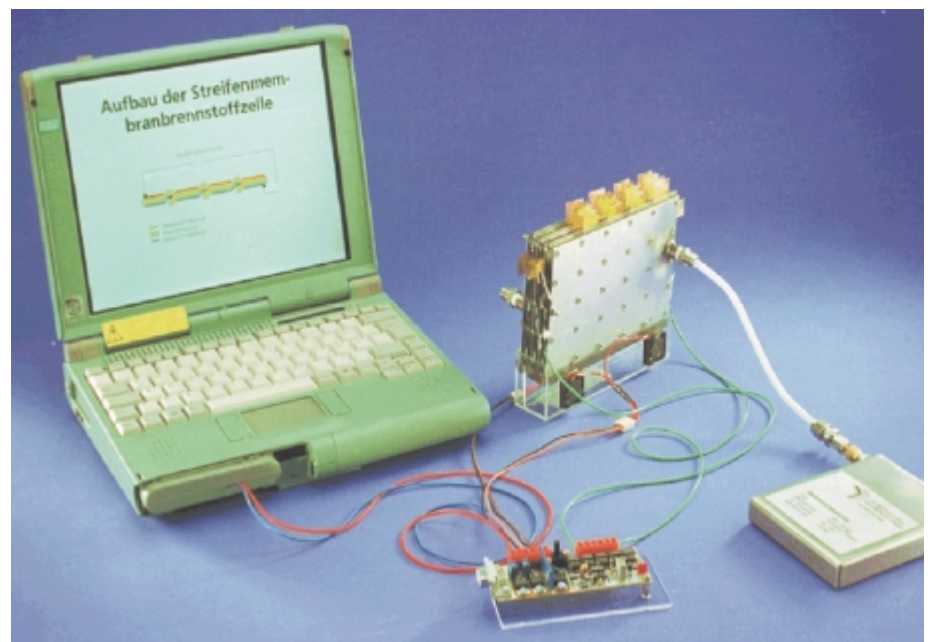
2.1 20-W-Brennstoffzellensystem für Laptops

Das vom Fraunhofer ISE entwickelte System (Abbildung 9) besteht aus einer 25-zelligen, selbst atmenden Streifenmembranzelle mit Metallhydridspeichereinheit, Mini-Lüftern und kleiner Steuerelektronik. Dieses Konzept ermöglicht den Einsatz eines Kunststoffgehäuses sowie einen kompakten, sehr flachen Aufbau. Streifenmembranzellen können problemlos an die benötigte Geometrie angepasst werden. Durch den Einsatz von Miniaturlüftern wird ein lautloser Betrieb bei geringem Hilfsenergiebedarf ermöglicht, d. h., die von der Brennstoffzelle erzeugte Energie kann fast ausschließlich dem Laptop zur Verfügung stehen. Um einen stabilen Betrieb der Brennstoffzelle und einen kontrollierten Wasseraustrag zu gewährleisten, sind die Lüfter lastabhängig gesteuert. Lastsprünge, wie sie z. B. beim Anfahren des Laptops auf-

treten, stellen für die Streifenmembranzelle kein Problem dar, blitzschnell reagiert das System auf die Anforderungen des jeweiligen Gerätes.

Die Weiterentwicklung des Systems zu einem in den Laptop integrierfähigen Prototypen findet zur Zeit statt, wobei die Leistungsdichte bereits um den Faktor 3 gesteigert werden konnte. Bei einem Systemvergleich mit einem herkömmlichen Lithium-Ionen-Akku erzielt das Streifenzellensystem somit

Abbildung 9: Brennstoffzellensystem für den Betrieb eines Laptops (20 W)



bereits höhere Energiedichten. Viel versprechend fällt auch die Abschätzung der Kosten eines in Serie produzierten Streifenzellensystems aus. Schließlich besteht die Brennstoffzelle fast ausschließlich aus Kunststoff. Dass der Metallhydridspeicher sich beim Entladen abkühlt, dürfte auch für die Computerhersteller interessant sein.

2.2 150-W-Brennstoffzellensystem zur unabhängigen Stromversorgung

Als Prototyp einer portablen Stromversorgung wurde ein vom ZSW entwickelter Brennstoffzellen-Stack mit einem Wasserstoff-Hydridspeicher und einer zu diesem Zweck entwickelten Steuerung zu einem „Power-Bag“ kombiniert (Abbildung 10).

Das Brennstoffzellen-Stack ist einfach und kostengünstig aufgebaut und weist eine Leistung von 250 W auf. Damit resultiert eine Systemleistung von 150 W bei einer Ausgangsspannung von etwa 12 V. Der Leistungsbereich kann durch geeignete Stack- und Peripherieauswahl bis auf 1 kW erweitert werden. Mit einer 2 l-Wasserstoff-Hydridspeicher-Patrone kann dieses Modell einen 35 l-Camping-Kühlschrank 2 bis 5 Tage versorgen. Die Hydrid-Speicher-Patrone kann mittels Bajonett-Verschluss leicht gewechselt werden. Der Wasserstoff wird praktisch zu 100% ausgenutzt. Aufgrund des Betriebs mit Wasserstoff

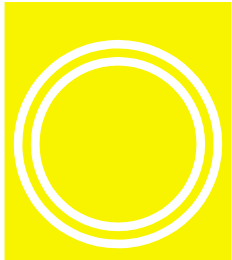


Abbildung 10: 150-W-Stromversorgungseinheit mit PEMFC („Power Bag“)

ist das „Power Bag“ eine vollständig schadstofffreie Stromquelle. Die systemintegrierte Steuerung bewirkt eine strom- und temperaturabhängige Gaszufuhr, führt bei Bedarf Spülzyklen zur Inertgasausschleusung durch und reduziert im Teillastbetrieb den Verbrauch der Nebenaggregate bis nahe 0. Damit wird ein vollautomatischer Betrieb des Systems erreicht.

Das verwendete Stack besitzt noch Optimierungspotenzial in Bezug auf die erzielbare Strom- und damit Leistungsdichte. Die in der Zwischenzeit durch eine verbesserte Gasführung im Stack erzielten Leistungsverbesserungen sind in [3] wiedergegeben. Durch Kombination dieser Stacks mit einem erweiterten Wasserstoffspeicher ist bei gleicher Baugröße eine Leistung von 400 W (Stack-Leistung 500 W) entnehmbar. Der Energieinhalt vergrößert sich entsprechend zum Wasserstoff-

speicher. Für dieses System ergibt sich bei einem Volumen von 38 Litern ein Netto-Energieinhalt von 5,6 kWh, was einer volumenbezogenen Energiedichte von 0,15 kWh/l entspricht. Hervorzuheben ist, dass das Volumen sämtli-

Tabelle: Bisherige und erwartete Kostenentwicklung bei PEMFC-Stacks

	ca.-Preis (1. Generation) / DM	ca.-Preis (heute) / DM	Zielpreis / DM	
EME-Einheit	250	150	< 10	Membrankosten, Elektrodenherstellung
davon Membran	24	20	< 2	Massenproduktion, neue Materialien
Bipolarplatten	250	20	< 5	Wegfall spanabhebender Bearbeitung
Preis pro kW*	25000	10000	750	

* = 400 mA/cm², 0,6 V

cher Nebenaggregate für das PEMFC-System in den Daten enthalten ist.

3. Kosten

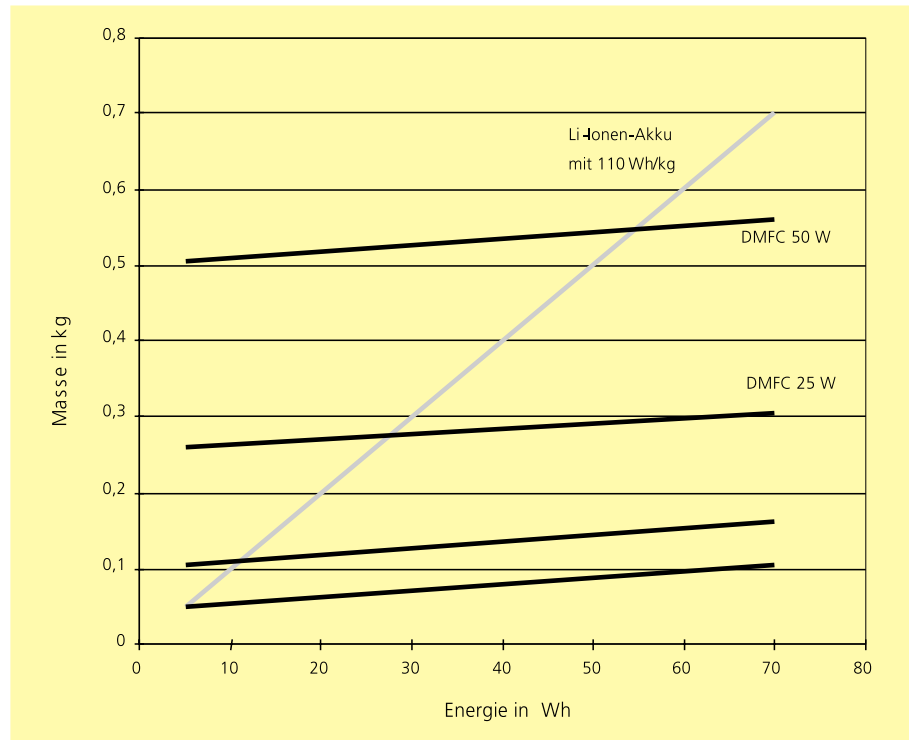
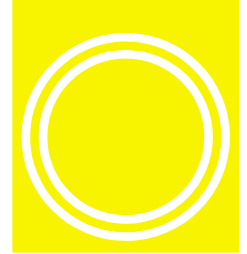
Der Einsatz von portablen Brennstoffzellen wird wesentlich durch Kostengesichtspunkte mitbestimmt werden. Die derzeitigen sowie die Zielkosten sind in der Tabelle wiedergegeben.

Hervorzuheben ist die Notwendigkeit erheblicher Kostensenkungen zum erfolgreichen Markteintritt. Für eine Kostensenkung in dem erforderlichen Umfang und darüber hinaus bestehen aber gute Aussichten, da im Traktionsbereich Kostenziele von 100 DM/kW für das BZ-Antriebssystem bestehen. Deswegen sollte die Entwicklung von portablen Brennstoffzellen bereits jetzt forciert und zunächst in bereits heute kosteneffektiven Bereichen durchgeführt werden.

4. Ausblick

In der Zukunft ist von weiteren Verbesserungen spezifischer Leistungs- und Energiedichten auszugehen. Diese Entwicklung fördert auch die Einsetzbarkeit von DMFC-basierten Stromerzeugern im Kleinleistungsbereich. Abbildung 11 zeigt Massen- und Energieinhalte von DMFC-Systemen im Vergleich zum Li-Ionen-Akku.

Für hohe Energie/Leistungsverhältnisse ist auch hier ein Verbesserungspotenzial durch portable DMFC-Systeme gegeben. Exemplarisch für eine Anwendung sei der DMFC-Handylader (Abbildung 12) genannt.



Literatur

- [1] Chen, P., Wu, X., Lin, J., Tan, L.: „High H₂ Uptake by Alkali-Doped Carbon Nanotubes under Ambient Pressure and Moderate Temperatures“, Science 285, (1999) 91-3
- [2] Scholta, J., Plzak, V., Jossen, A., Rohland, B., Garche, J.: „Einsatzmöglichkeiten von Brennstoffzellen als möglicher Substituend von Primär- und Sekundärbatterien“, Begleittexte zum 4. Design & Elektronik Entwicklerforum „Batterien und Ladekonzepte“, München, (1997) 305-11
- [3] Wagner, N., Gülzow, E., Jörissen, J., Mergel, J., Heinzl, A.: „PEMFC-Entwicklungen“, Themen 1999/2000, FORSCHUNGSVERBUND SONNENENERGIE, Berlin (2000) 11-18

Abbildung 11: Massen und Energieinhalte von DMFC-Systemen im Vergleich zum Li-Ionen-Akku

Abbildung 12: DMFC-Handy-Lader

