

## **Abschlussbericht**

### **Brennstoffzellensysteme für portable und stationäre Kleingeräte**

---

**Technikbewertung und Potenziale**

# **Brennstoffzellensysteme für portable und stationäre Kleingeräte**

---

## **Technikbewertung und Potenziale**

**Auftraggeber:**

**Bayerisches  
Staatsministerium für  
Wirtschaft, Verkehr und  
Technologie**

**FfE-Auftragsnummer:**

**057.18**

**Bearbeiter/in:**

**Ulli Arndt  
Frank Hauptmann  
Dietmar Kraus  
Stefan Richter**

**Fertigstellung:**

**August 2003**

**Impressum:**

Endbericht  
der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.  
(FfE)

*zum Projekt:*

Brennstoffzellensysteme für portable und  
stationäre Kleingeräte

Technikbewertung und Potenziale

*Auftraggeber:*

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft,  
Verkehr und Technologie

**Kontakt:**

Am Blütenanger 71  
80995 München  
Tel.: +49 (0) 89 158121-0  
Fax: +49 (0) 89 158121-10  
E-Mail: [info@ffe.de](mailto:info@ffe.de)  
Internet: [www.ffe.de](http://www.ffe.de)

**Wissenschaftlicher Leiter:**

Prof. Dr.-Ing. U. Wagner

**Geschäftsführer:**

Dr.-Ing. W. Mauch

# Inhaltsverzeichnis

<b>0 Zusammenfassung</b> .....	<b>1</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>3</b>
<b>2 Zielsetzung und Methodik</b> .....	<b>4</b>
<b>3 Portable und stationäre Kleingeräte</b> .....	<b>5</b>
<b>3.1 Gerätearten und grundlegende Eigenschaften</b> .....	<b>5</b>
<b>3.2 Auswahl geeigneter Kleingeräte für Brennstoffzellensystemen</b> .....	<b>6</b>
<b>3.3 Beschreibung der Gerätetypen</b> .....	<b>8</b>
3.3.1 Notebooks .....	8
3.3.2 Akku-Werkzeuge .....	9
3.3.3 Verkehrsnebenanlagen .....	10
<b>4 Akkumulatoren</b> .....	<b>13</b>
<b>4.1 Funktionsweise und Aufbau von Akkumulatoren</b> .....	<b>13</b>
4.1.1 Blei-Akkumulatoren .....	13
4.1.2 Nickel-Cadmium-Akkumulatoren .....	14
4.1.3 Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren .....	15
4.1.4 Lithium-Ionen- und Lithium-Polymer-Akkumulatoren .....	16
<b>4.2 Der Markt für Akkumulatoren</b> .....	<b>17</b>
<b>5 Technologie der Brennstoffzelle</b> .....	<b>19</b>
<b>5.1 Allgemeine Funktionsweise von Brennstoffzellen</b> .....	<b>19</b>
<b>5.2 Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle</b> .....	<b>20</b>
5.2.1 Funktionsweise .....	20
5.2.2 Wasserstoffherstellung .....	21
5.2.3 Wasserstoffspeicherung .....	22
<b>5.3 Direkt-Methanol-Brennstoffzelle</b> .....	<b>23</b>
5.3.1 Funktionsweise .....	23
5.3.2 Methanolherstellung .....	25
5.3.3 Methanolspeicherung .....	25
<b>5.4 Hersteller- und Literaturrecherche</b> .....	<b>26</b>
<b>5.5 Analyse der notwendigen Infrastruktur</b> .....	<b>33</b>

<b>6 Messtechnische Untersuchungen.....</b>	<b>34</b>
<b>6.1 Prüfstands Aufbau .....</b>	<b>34</b>
<b>6.2 Lastprofile ausgewählter Kleingeräte .....</b>	<b>35</b>
6.2.1 Notebooks .....	35
6.2.2 Akkuschauber .....	38
6.2.3 Verkehrsnebenanlagen .....	39
<b>6.3 Messungen an Brennstoffzellensystemen .....</b>	<b>40</b>
6.3.1 Power Bag des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung .....	40
6.3.2 Remote Power A 25 von Smart Fuel Cell .....	44
<b>6.4 Bestimmung des Energieverbrauchs .....</b>	<b>47</b>
<b>6.5 Zusammenfassung der messtechnischen Untersuchungen.....</b>	<b>50</b>
<b>6.6 Auslegungstool für Brennstoffzellensysteme .....</b>	<b>51</b>
<b>7 Potenzialabschätzung .....</b>	<b>53</b>
<b>7.1 Potenzialbegriffe und Methodik .....</b>	<b>53</b>
<b>7.2 Bestandsabschätzung .....</b>	<b>54</b>
7.2.1 Notebooks .....	54
7.2.2 Akku-Werkzeuge.....	56
7.2.3 Verkehrsnebenanlagen .....	57
<b>7.3 Potenziale von Brennstoffzellensystemen .....</b>	<b>58</b>
7.3.1 Notebooks .....	59
7.3.2 Akku-Werkzeuge.....	61
7.3.3 Verkehrsnebenanlagen .....	61
<b>8 Ausblick.....</b>	<b>65</b>
<b>9 Literaturverzeichnis.....</b>	<b>67</b>
<b>10 Anhang.....</b>	<b>71</b>

## 0 Zusammenfassung

Die an der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Technologie verfasste Studie, beschäftigt sich mit der technischen Machbarkeit und dem zu erwartenden Marktpotenzial von Brennstoffzellensystemen für portable und stationäre Kleingeräte.

Die portablen Kleingeräte, die für die Anwendung von Brennstoffzellen (BZ) in Betracht kommen, können in die Gruppen der „Handhelds“ (z.B. Mobiltelefon, PDA), „tragbare Geräte“ (Camcorder, Notebook etc.), „Power Tools“ (akkubetriebene Werkzeuge) sowie „Mobile Office-Systeme“ (mobiler Video-Schnittplatz u.ä.) eingeteilt werden. Eine weitere Gruppe umfasst netzunabhängig betriebene „stationäre Anwendungen“ kleiner Leistung, wie Parkscheinautomaten und Verkehrsnebenanlagen. Als Energieversorgung werden in diesen Geräten heutzutage meist Nickel-Metallhydrid-, Nickel-Cadmium-, Lithium-Ionen- oder, bei stationären Anlagen, Bleiakkumulatoren eingesetzt. Als geeignete BZ-Systeme kommen die Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle und die Direkt-Methanol-Brennstoffzelle in Frage. Die mit Wasserstoff betriebene PEMFC hat den Vorteil einer hohen Leistungsdichte und benötigt weniger komplexe Nebenaggregate. Problematisch ist die Speicherung des Wasserstoffes, für die nach dem heutigen Stand der Technik bei portablen Anwendungen Metallhydridspeicher und evtl. auch Gaspatronen zur Verfügung stehen. Die DMFC profitiert von der hohen Energiedichte des Methanols. Sie ist jedoch verfahrenstechnisch aufwändiger.

Die großen Erwartungen bezüglich der BZ-Technologie spiegeln sich in zahlreichen Forschungsaktivitäten wieder. Viele Forschungseinrichtungen vor allem in Europa, den USA und Japan beschäftigen sich mit BZ-Systemen im unteren Leistungsbereich. Auch die Industrie zeigt großes Interesse an dieser technischen Entwicklung. Sowohl große Elektronikkonzerne wie auch kleinere Startup-Firmen haben bereits Prototypen und Vorserienmodelle vorgestellt.

Der messtechnisch erfasste Lastgang eines Notebooks, hinsichtlich Leistungsaufnahme und Dynamik repräsentativ für die Gruppe „tragbare Geräte“, liegt im Durchschnitt bei 27 W, wobei je nach Anwendung Spitzenlasten bis zu 40 W auftreten. Der Lastgang des Akkuschauber, aus der Gruppe der „Power Tools“, zeichnet sich durch seine extreme Dynamik aus. Innerhalb weniger Sekunden steigt der Strom auf bis zu 40 A, was einer Leistungsaufnahme von ca. 500 W entspricht. Die untersuchte Straßenwetter-Messstation als Beispiel einer „stationären Anwendungen“ ist bereits für die Versorgung mit einem PV-Bleiakku-Hybridsystem optimiert und hat einen entsprechend geringen Leistungsbedarf von maximal 5 W.

Die Dynamik der Lastanforderung ist ein entscheidendes Kriterium für die technische Realisierbarkeit eines BZ-Systems in portablen Kleingeräten. So kann eine BZ nach dem heutigen Stand der Technik dem schnellen Stromanstieg des Akkuschaubers nicht folgen, sofern die handlichen Eigenschaften des Geräts nicht verloren gehen sollen. Die hier eingesetzten Hochleistungsakkus sind somit in absehbarer Zeit nicht durch BZ-Systeme ersetzbar. Der Lastgang eines Notebooks hingegen kann, bei geeigneter Dimensionierung des Stacks, vollständig durch eine in das Gerät integrierte BZ gedeckt werden. Demgegenüber spielt das Packaging bei stationären Kleingeräten in der Regel

eine untergeordnete Rolle, ein an die dynamischen Lastwechsel angepasstes BZ-System ist meist ohne Probleme einzubauen.

Die Energieaufnahme innerhalb von zwei Stunden Betriebszeit (entspricht einer Akkuladung) des im Rahmen dieser Studie untersuchten Notebooks liegt bei ca. 57 Wh. Die Bereitstellung dieser Energie durch das öffentliche Stromnetz und einen Lithium-Ionen-Akku hat einen Nutzungsgrad von 24,2 %. Wird das Notebook mittels einer Brennstoffzelle betrieben, ergibt sich bei einem PEMFC-System ein Bereitstellungsgrad von 22,0 % und bei dem DMFC-System von 8,8 %. Bei dem untersuchten DMFC-System wirkt sich hier vor allem der niedrige elektrische Gesamtwirkungsgrad von 15 % aus. Aber auch das PEMFC-System kann mit einem elektrischen Wirkungsgrad von durchschnittlich 37 % die Verluste der Erdgasreformierung nicht kompensieren.

Für die auch heute schon technisch realisierbaren BZ-Systeme in Notebooks ergibt sich aus den Bestandszahlen und Prognosen zu den zukünftigen Verkaufszahlen ein sehr großes technisches Potenzial von mehreren Millionen verkauften Stück pro Jahr. Ausgehend von der Annahme, dass Zuverlässigkeit und Lebensdauer den Erfordernissen des praktischen Einsatzes entsprechen bzw. dass die potenziellen Vorteile von BZ-Systemen - vor allem lange netzunabhängige Betriebszeiten - zum Tragen kommen, könnte der Markteintritt von BZ-Systemen bereits innerhalb der nächsten Jahre erfolgen. Noch nicht abschließend diskutiert ist wie und in welcher Form Wasserstoff oder Methanol für den Endkunden bereitgestellt werden kann, wobei die Kosten entscheidenden Einfluss auf Wirtschaftlichkeit und erschließbares Marktpotenzial haben. Für die Methanolkartuschen und Wasserstoffpatronen ist eine Einweg- (vgl. Druckerpatronen) oder Pfandsystem-Infrastruktur (vgl. CO<sub>2</sub>-Patronen für Sodawasser) denkbar. Neben den wirtschaftlichen Aspekten ist heute noch eine Reihe von rechtlichen und sicherheitstechnischen Fragen offen, die ebenfalls ein Markthemmnis darstellen können. Aufgrund der verhältnismäßig kurzen Nutzungsdauer von durchschnittlich vier Jahren kann im dynamischen Notebook-Markt ausgehend von hochpreisigen Geräten eine schnelle Marktdiffusion erfolgen.

Der Markt für batteriebetriebene Akku-Werkzeuge konnte in den letzten Jahren - im Gegensatz zu konventionellen Elektrowerkzeugen - ein starkes Wachstum verzeichnen. Durch BZ-Systeme als Ersatz von Hochleistungs-Akkus in Werkzeugen ist heutzutage kein Marktpotenzial erschließbar. Allerdings könnte der Einsatz von BZ-Systemen in portablen Akku-Ladestationen eine Alternative zum direkten Akkuersatz darstellen.

Technisch ist der Einsatz von BZ-Systemen in stationären Anwendungen heute bereits machbar und vor allem in Kombination mit einem PV-Akku-Hybridsystem technisch sinnvoll. Das technische Potenzial wurde aufgrund belastbarer Daten nur für einen Ausschnitt der Verkehrsnebenanlagen ausgewiesen, das aufgrund des bereits realisierten großen Anteils netzversorgter Geräte vergleichsweise klein ist. Bei der betrachteten Verkehrsdatenerfassung besteht ein Marktvolumen von einigen hundert Geräten pro Jahr vor allem bei Neubau.

Das technische Potenzial für den gesamten Bereich der stationären Kleingeräte ist ungleich höher, aber aufgrund einer unsicheren Datenbasis nicht ausweisbar. Für einen erfolgreichen Markteintritt müssen Zuverlässigkeit und Kosten von BZ-Systemen verbessert werden. Durch die heute bereits lange Lebensdauer von Verkehrsnebenanlagen und erst durch den Einsatz von BZ ermöglichten Anwendungsbereiche ist eine Markteindringung mittelfristig möglich.

# 1 Einleitung

In den letzten Jahrzehnten haben elektrische und elektronische Kleingeräte in unterschiedlichsten Bereichen, wie z.B. der Informationstechnik, der Unterhaltungselektronik sowie der Haus- und Werkzeugtechnik sehr große Verbreitung gefunden. Prognosen gehen davon aus, dass es in wenigen Jahren über sechs Milliarden tragbare elektronische Geräte geben wird, eine Anzahl, die der jetzigen Weltbevölkerung entspricht. Die Energieversorgung dieser Geräte erfolgt im Allgemeinen über Primärbatterien, Akkumulatoren und, wie z.B. bei verschiedenen Gartengeräten und Stromgeneratoren, durch kleine Verbrennungsmotoren.

In allen Verbrauchssektoren kommt heute eine Vielzahl netzunabhängiger batteriebetriebener Kleingeräte zum Einsatz, die eine komfortable und mobile Anwendung ermöglichen. Durch die Entwicklung neuer Geräte und die Substitution einer großen Anzahl bislang am Netz betriebener Geräte wird deren Anzahl in Zukunft weiter stark steigen. Der eigentliche Nutzenergiebedarf der Geräte, z.B. für mechanische Energie oder Informationsübertragung, ist in der Regel gering. Dennoch ergibt sich durch schlechte Ladewirkungsgrade und unnötig hohen Verbrauch im Stand-by-Betrieb ein Energieverbrauch, der um Größenordnungen über dem jeweiligen Nutzenergiebedarf liegen kann. Dieser Energiebedarf summiert sich mittlerweile zu einem nicht mehr vernachlässigbaren Anteil des Hausstromverbrauches /FIN 98/.

Die Entwicklung im Bereich der Kommunikationstechnik hat in den letzten Jahren dazu geführt, dass für Geräte wie Mobiltelefone und Notebooks immer leistungsfähigere Akkumulatoren nötig wurden. Geeignete Brennstoffzellen könnten hier ein weiterer Schritt in Richtung höherer Energiedichte sein. Im Vordergrund steht dabei der praktische Mehrwert für den Nutzer in Form von längeren Betriebszeiten. Energieeinsparung und Emissionsminderung sind nur Nebeneffekte.

Ein weiterer Aspekt der Nutzung netzunabhängiger Kleingeräte ist die Umweltverträglichkeit der als Energiespeicher eingesetzten Stoffe. Allein durch wiederaufladbare Nickel-Cadmium-Akkus gelangen in Deutschland jährlich rund 400 t des hochgiftigen Schwermetalls Cadmium unkontrolliert in die Umwelt. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass die bisherigen Rücknahmesysteme für gebrauchte Akkus offenbar nicht ausreichen. Lediglich rund 30 % der cadmiumhaltigen Akkus, wie sie z.B. in Werkzeugen wie Akkuschrauber eingesetzt werden, geben die Nutzer zurück und das, obwohl gebrauchte Batterien und Akkus seit 1998 nicht mehr über den Hausmüll entsorgt werden dürfen. Nach Schätzungen des Umweltbundesamtes gelangen etwa 200 t der 400 t in den Hausmüll. Die übrigen 200 t verteilen sich auf andere Müllfraktionen wie „Gelbe Tonne“, Sperr- und Gewerbemüll sowie unregelmäßige Entsorgung und Lagerung in Haushalten /REN 01/.

Befürworter der Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnologie sehen schließlich die möglichen Synergieeffekte zwischen den jeweiligen Herstellungsverfahren von Brennstoffzellen für portable, mobile und stationäre Anwendungen. Der frühzeitige Einsatz von Brennstoffzellen im Bereich der portablen Kleingeräte, in dem vom Anwender die relativ höchsten Kosten je kWh akzeptiert werden, könnte den Markteintritt der Brennstoffzellentechnik in den anderen Bereichen beschleunigen.



## 2 Zielsetzung und Methodik

Im Rahmen dieser Studie soll eine umfassende Technikanalyse über den Einsatz von Brennstoffzellensystemen in Kleingeräten durchgeführt werden. Dies erfolgt an Hand einer Auswahl von drei Gerätearten, die für die verschiedensten portablen und stationären netzfernen Einsätze charakteristisch sind. Für diese Geräte wird der derzeitige Stand der Technik und die absehbare zukünftige Entwicklungen dargestellt und zusätzlich messtechnische Untersuchungen zur Bestimmung von Lastgängen durchgeführt. Als Energiespeicher werden heutzutage im Bereich der portablen Kleingeräte Nickel-Cadmium- (NiCd), Nickel-Metallhydrid- (NiMH) oder Lithium-Ionen- (Li-Ionen) - Akkumulatoren und bei stationären Anlagen meist Bleibatterien (Pb) eingesetzt. Diese Techniken werden detailliert beschrieben und es wird auf die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Akkumulatoren eingegangen.

Als viel versprechende Lösung zur Überwindung der spezifischen Nachteile aktueller Batterietechnologien hinsichtlich Energiedichte und Laufzeit wird die Brennstoffzellentechnologie gesehen. Die in portablen Geräten einsetzbaren Techniken der Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle (PEMFC) und der Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (DMFC) werden zunächst ausführlich erläutert. Des Weiteren werden die jeweilige Brennstoffherstellung und -speicherung für Wasserstoff und Methanol beschrieben. Eine ausführliche Hersteller- und Literaturrecherche gibt einen Überblick über aktuelle Entwicklungen und Produkte mit Brennstoffzellen für portable und stationäre Kleingeräte. Betrachtet wird zudem die notwendige Infrastruktur zur Versorgung der Geräte mit Brennstoffen. An einem Prototypen und einem Vorserienmodell werden ausführliche elektrische Messungen vorgenommen. Dazu dient ein Brennstoffzellenprüfstand, der an der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. aufgebaut wurde.

Auf Grundlage der messtechnischen Untersuchungen wird anschließend der Energieverbrauch der jeweiligen Produktgruppen für den Betrieb mit Brennstoffzellen im Vergleich zu Akku-Betrieb bestimmt. Mit den vorliegenden Ergebnissen kann das technische Potenzial von Brennstoffzellensystemen in portablen und stationären Kleingeräten abgeschätzt werden. Hierzu wird ein Auslegungstool verwendet, mit dessen Hilfe auf Basis von Leistungsgrößen der Brennstoffzellen sowie anderen Faktoren, das Gewicht und der Raumbedarf von Brennstoffzellensystemen für portable Kleingeräte bestimmt werden können.

Auf Basis aktueller Marktdaten und Studien zur zukünftigen Entwicklung werden die Verkaufszahlen für die ausgewählten Kleingeräte betrachtet. Zusammen mit den Überlegungen zum technischen Potenzial lassen sich so Aussagen über das zu erwartende Marktpotenzial von Brennstoffzellensystemen treffen. Hierbei wird zwischen den einzelnen Gerätegruppen unterschieden und jeweils eine Prognose bis zum Jahr 2010 erstellt.

### 3 Portable und stationäre Kleingeräte

#### 3.1 Gerätearten und grundlegende Eigenschaften

Eine Auswahl elektrischer Kleingeräte, die für die Anwendung von Brennstoffzellen in Betracht kommen, sowie deren charakteristische Eigenschaften sind in **Tabelle 3-1** aufgelistet. Die Bewertung der Eignung erfolgt nach den in Kapitel 3.2 diskutierten Kriterien.

**Tabelle 3-1:** Mögliche Anwendungsgebiete für Brennstoffzellensysteme

Gruppe	Eigenschaften	Beispiele	Eignung <sup>1</sup>
<b>Handhelds</b>	sehr kompakte Bauweise Leistung kleiner 10 W	Mobiltelefon, PDA, Walkman, Discman, mp3-Player, Lawinen- piepser, GPS-Gerät, Notsender	☐
		Camcorder, Satellitentelefon, Funkgerät, mini TV-Gerät	⊙
<b>tragbare Geräte</b>	geringes Gewicht, lange Lauf- zeit Leistung 10 – 50 W	Notebook, Filmkamera, Kühlbox, Ladegerät	+
<b>Power Tools</b>	robuste Bauweise, sehr hohe Spitzenlastströme Leistung 10 – 1.000 W <sub>peak</sub>	Akku-Bohrer, -Schrauber, -Bohrhammer, -Schleifer, -Säge, -Heckenschere, -Kreissäge	⊙
<b>Mobile Office</b>	externe portable Strom- versorgung Leistung 100 – 1.000 W	Mobile Office System, mobiler Schnittplatz, Beleuchtungs- und Blitzkoffer, Campinggenerator, militärische Stromversorgung	+
<b>stationäre Anwendungen</b>	lange Betriebszeiten Leistung 1 – 1.000 W	Parkscheinautomaten, Verkehrs- leitsysteme, Verkehrsneben- anlagen, ÖPNV-Haltestellen, Zigarettenautomaten	+
		Hindernisbefeuern, Mess- technik, Korrosionsschutz	⊙
		Beleuchtung, Pumpen	☐

Die erste Gruppe, hier als „**Handhelds**“ bezeichnet, umfasst Anwendungen wie Mobiltelefone, PDAs (Personal Digital Assistants) und Walkmen, die teilweise „am Körper“ getragen werden und „im Gehen“ benutzt werden können. Daraus ergibt sich eine sehr kompakte und leichte Bauweise, welche die Integration eines Speichers mit ausreichendem Energieinhalt erschwert. Eine hohe spezifische Energiedichte ist notwendig, da mit der häufigen und langen Benutzung dieser Geräte trotz geringer elektrischer Leistung ein relativ hoher Energieverbrauch verbunden ist.

<sup>1</sup> Bewertung des Brennstoffzelleinsatzes: + grundsätzlich geeignet, o mit Einschränkungen geeignet, - derzeit nicht geeignet

In der Gruppe „**Tragbare Geräte**“ sind Geräte zusammengefasst, die im Gegensatz zu denen der Gruppe „Handhelds“ größer und schwerer sind, nicht als ständiger Begleiter am Körper getragen werden und einen deutlich höheren Stromverbrauch haben (Notebook, Kamera). Die Geräte werden häufig von Ort zu Ort transportiert und dort nahezu stationär benutzt. Baumaße und Gewicht sind wichtige Kriterien für die integrierte Energieversorgung, werden allerdings zu Gunsten einer möglichst langen Betriebszeit weniger stark gewichtet.

Eine weitere Gerätegruppe wird mit dem Begriff „**Power Tools**“ bezeichnet (Akkuwerkzeuge wie Bohrer, Schraubendreher, Säge etc.). Die in die Geräte integrierte Stromversorgung hat eine mittlere bis hohe, teilweise sehr dynamische Leistungsanforderung zu decken. Die Bauweise der Geräte ist prinzipiell möglichst kompakt und leicht, die Unempfindlichkeit gegenüber äußeren Einflüssen (mechanische Belastung, Schmutz u.ä.) hat jedoch eine sehr hohe Bedeutung.

Als Mobile Office System wird die Kombination von mehreren Geräten (z.B. Notebook, Drucker, Modem und Mobiltelefon) bezeichnet, die mit einer zentralen externen Energiequelle versorgt werden. In **Tabelle 3-1** sind unter „**Mobile Office**“ tragbare Geräte zusammengefasst, die ein relativ hohes Eigengewicht haben und deren hoher Stromverbrauch nicht durch eine interne Energiequelle bereitgestellt werden kann. Eine mobile externe Stromversorgung wie z.B. ein Campinggenerator kleiner Leistung soll für diese Anwendungsfälle vor allem eine möglichst lange Betriebszeit ermöglichen, das Gewicht und die Größe spielen eine untergeordnete Rolle.

„**Stationäre Anwendungen**“ wie Parkscheinautomaten oder Verkehrsleitsysteme werden netzunabhängig betrieben, falls kein Stromnetz in unmittelbarer Nähe vorhanden ist oder der Aufwand für einen Anschluss zu hoch ist. Oft wird hier eine Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher eingesetzt, um eine autarke Stromversorgung zu realisieren. Es gibt Überlegungen, durch die Kombination mit einer Brennstoffzelle die Wirtschaftlichkeit und die Verfügbarkeit eines solchen Systems zu verbessern. Durch den Einsatz eines Brennstoffzellensystems könnte die PV-Modulfläche kleiner dimensioniert und die Batterie besser konditioniert werden, womit sich ihre Lebensdauer verlängert.

### 3.2 Auswahl geeigneter Kleingeräte für Brennstoffzellensystemen

Auf den ersten Blick scheint eine Reihe der in **Tabelle 3-1** aufgeführten mobilen Kleingeräte für den Einsatz von Brennstoffzellen geeignet zu sein. Die Vorteile gegenüber Akkumulatoren, vor allem die längere Betriebszeit und das schnelle Wiederaufladen durch einfachen Austausch des Energiespeichers, würden in vielen Fällen die Einsatzfähigkeit der Geräte und den Kundennutzen erhöhen.

Bei näherer Betrachtung werden jedoch teilweise Kriterien ersichtlich, die gegen die Verwendung eines Brennstoffzellensystems zur Energieversorgung sprechen.

Technische Kriterien spielen dabei eine große Rolle. Brennstoffzellensysteme haben gegenüber Akkus den Nachteil, dass sie keine geschlossenen Systeme darstellen. Durch die Luftversorgung kann Wasser oder Schmutz in das System eindringen. Bei Kleingeräten, die aufgrund ihrer Einsatzbedingungen vollständig oder bedingt wasserdicht sein sollen bzw. einer starken Schmutz- und Staubbelaugung ausgesetzt sind, erweist

sich dies unter Umständen als Ausschlusskriterium für den Einsatz von Brennstoffzellensystemen (z.B. Notsender, Lawinensuchgerät, GPS-Gerät).

Weitere technische Aspekte sind das Wärmemanagement oder das Packaging der Brennstoffzelle und der Systemkomponenten. „Handhelds“, die ein sehr geringes Volumen für die Energieversorgung aufweisen (z.B. Mobiltelefon, PDA, mp3-Player), sind von diesen Problemen weitaus stärker betroffen, was eine große technische Herausforderung darstellt. Bei größeren Geräten (z.B. Camcorder, Filmkamera) sind hingegen bereits Lösungen realisiert worden /ISE 02, SFC 01/.

Elektrische Leistungen größer als ca. 10 W können nur durch aktive Brennstoffzellensysteme mit mechanischen Komponenten zur Luft- und Brennstoffversorgung realisiert werden. Solche Ventilatoren, Methanol-Pumpen und Ventile erhöhen aber die Anfälligkeit für eine Beschädigung bei hoher mechanischer Belastung, z.B. beim Herunterfallen. Für die Gerätegruppe „Power Tools“, die meist unter harten Einsatzbedingungen auf Baustellen und in Werkstätten eingesetzt werden, ist dies besonders entscheidend. Anhand der heutzutage erhältlichen Geräte aus diesem Bereich ist ersichtlich, wie wichtig die stabile Bauweise ist.

Neben den technischen Kriterien spielen auch wirtschaftliche Aspekte bei der Abschätzung des Potenzials von Brennstoffzellensystemen zur Versorgung von Kleingeräten eine wichtige Rolle. Generell kann beobachtet werden, dass sich eine neue Technik ausgehend von hochpreisigen Geräten kleiner Stückzahl zu den Produkten des Massenmarktes durchsetzt. Beispielsweise wurden Lithium-Ionen-Akkumulatoren zu Beginn der Markteinführung nur in sehr teuren Notebooks angeboten, inzwischen werden sie aber auch in den unteren Preisklassen verwendet. So könnte auch die Brennstoffzellentechnik z.B. über die professionelle Filmkamera zum Einsatz in Camcordern für den Heimanwender gelangen.

Mobile-Office-Lösungen werden in einem rein professionellen Umfeld verwendet. Die Rahmenbedingungen für Brennstoffzellensysteme erscheinen sehr vorteilhaft, da hochwertige Geräte mit einem hohen Stromverbrauch über einen längeren Zeitraum betrieben werden. Auch das Nutzerverhalten und die externen Bedingungen (wenig Staub, Schmutz und Feuchtigkeit) sind, bedingt durch teilweise empfindliche elektronische Bauteile der Anwendungstechniken (z.B. mobiler Schnittplatz), für Brennstoffzellensysteme unproblematisch. Das Marktvolumen dieser Anwendung ist allerdings begrenzt.

Im Bereich der stationären Kleingeräte kann der Einsatz von Brennstoffzellensystemen dann sinnvoll sein, wenn die Geräte bzw. Stationen durch Wartungspersonal regelmäßig gewartet werden müssen und die Brennstoffzellen dabei betankt werden können. So ist beispielsweise eine intensive Betreuung von Fahr- und Parkscheinautomaten notwendig, weil die Kassen entleert und Fahr- und Parkscheine aufzufüllen sind. Kurze Wartungsintervalle sind aufgrund des hohen Anteils an elektronischen Komponenten durchaus üblich.

Bei Geräten, die sich in weit abgelegenen oder schwer zugänglichen Gebieten befinden, erscheint dagegen eine autarke Stromversorgung mit Hybridsystemen aus Photovoltaikanlage und Batteriespeicher (Blei-Akku) zweckmäßiger zu sein. Im praktischen Betrieb von solchen netzfernen, stationären Kleingeräten zeigen sich jedoch technische Unzulänglichkeiten, wie beispielsweise nicht ausreichende Verfügbarkeit (z.B. bei Eisglätte-

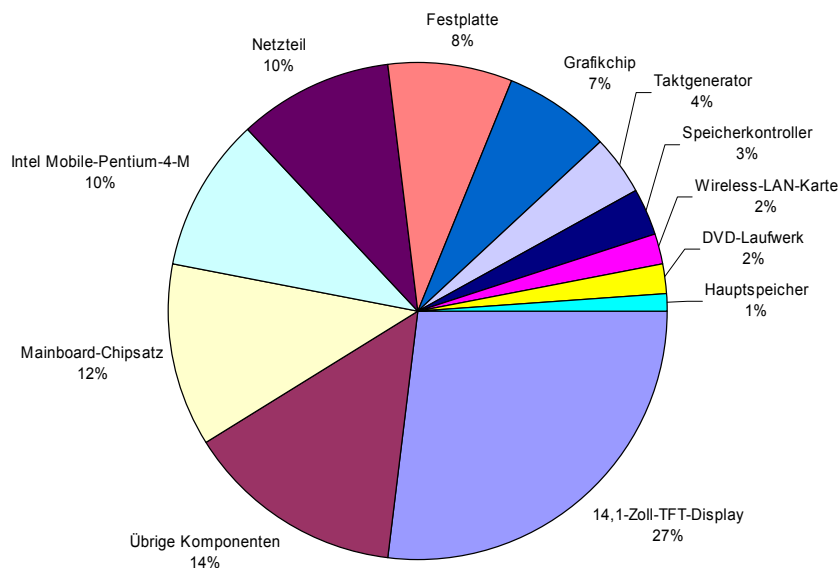
warnsensoren mit Photovoltaik) oder zu kurze Wartungsintervalle, aufgrund zu geringer Speicherkapazität des Akkus (z.B. bei Hinderniswarnanlagen). In diesen Fällen kann gerade der Einsatz eines Brennstoffzellensystems in Kombination mit anderen Elementen der Energiewandlung und -speicherung Vorteile bringen. Unter Ausnutzung der jeweiligen systemspezifischen Vorteile der Einzelkomponenten kann hierdurch eine Optimierung des Gesamtsystems bezüglich maximaler Verfügbarkeit erfolgen. Die Betrachtung und Analyse dieser Hybridsysteme mit Brennstoffzellen kann jedoch nicht im Rahmen dieser Studie stattfinden.

### 3.3 Beschreibung der Gerätetypen

Drei Gerätegruppen und typische Vertreter werden im Rahmen dieser Studie näher untersucht. Als Kriterium für die Auswahl der Beispiele dienen die in Kapitel 3.2 aufgeführten Rahmenbedingungen und technische Anforderungen. Zudem werden, um eine Bandbreite verschiedener Anwendungsfälle abzudecken, Geräte mit unterschiedlicher elektrischer Leistung und charakteristischem Lastgang ausgewählt.

#### 3.3.1 Notebooks

Die Gruppe der tragbaren Kleingeräte umfasst Notebooks, Camcorder, Filmkameras und Ladegeräte. Gemeinsames Merkmal dieser Geräte ist das geringe Gewicht, die kompakten Abmessungen mit integrierter Energieversorgung, die langen netzunabhängigen Laufzeiten und die relativ gleichmäßigen Lastanforderungen. Während der Betriebszeit benötigen die Geräte elektrische Leistungen von ca. 10 - 50 W. Als Repräsentant dieser Gruppe wird das Notebook ausgewählt.



**Abbildung 3-1:** Leistungsaufnahme von Notebook-Komponenten unter Last /RIE 02a/

In den letzten Jahren haben die verbesserte Ausstattung und die erhöhte Rechenleistung der Notebooks sich stark auf den Energieverbrauch ausgewirkt. Die maximale Leistungsaufnahme von Notebooks hat sich von 1996 bis 2000 mehr als verdoppelt, wohingegen die Energiedichte von Akkus im gleichen Zeitraum nur um ca. 40 % ver-

größert werden konnte /HEB 01a/. Der Anteil der einzelnen Notebook-Komponenten an der gesamten Leistungsaufnahme unter Last ist in **Abbildung 3-1** dargestellt.

Der TFT-Bildschirm (TFT: thin film transistor) benötigt gut ein Viertel der gesamten Leistung. Zwei Faktoren spielen dabei eine wichtige Rolle: die Helligkeit des Bildschirms und die dargestellten Farben. Das TFT-Display wird durch eine aktive Hintergrundbeleuchtung angestrahlt, deren Energieverbrauch umso höher ist, je heller der Anwender den Bildschirm einstellt. Die Farbdarstellung hat ebenfalls Einfluss auf den Energieverbrauch, da bei dunklen Farben mehr Transistoren geschaltet werden müssen und dadurch der Stromverbrauch zunimmt.

Moderne Energiesparmodi (z.B. Speedstep-Technik, Power-Now, Long-Run) wirken sich hauptsächlich auf den Verbrauch von Prozessor und Mainboard-Chipsatz aus. In Zeiten mit einem niedrigen Bedarf an Rechenleistung werden die Taktfrequenz und Prozessor-kernspannung abgesenkt. Dabei werden bereits kurze Pausen zwischen zwei Tastenanschlägen für eine Verringerung der Taktfrequenz genutzt. So lässt sich unter Last eine um etwa 20 % niedrigere Leistungsaufnahme erreichen. /RIE 02a/.

Mit einem Lithium-Ionen-Akku können moderne Notebooks ca. zwei bis drei Stunden netzunabhängig betrieben werden. Durch einen Zusatz- oder Zweitakku lässt sich diese Zeit verdoppeln. Allerdings muss für den Einbau des Zusatzakkus meist ein Laufwerk (z.B. Disketten- oder CD-Laufwerk) herausgenommen werden. Alternativ kann das Notebook heruntergefahren werden, um den leeren Akku gegen einen vollen Zweitakku auszutauschen. Der zusätzliche Akku (0,45 kg) stellt aber ebenso wie das benötigte Netzteil (0,48 kg) ein erhebliches Mehrgewicht zum Gesamtgewicht des Notebooks (2,67 kg) dar<sup>2</sup>.

Die zukünftige Entwicklung portabler Computer ist schwer einzuschätzen. Mittelfristig scheint sich die Tendenz der vergangenen Jahre fortzusetzen, nach der die Rechenleistung und die Ausstattung der portablen Computer immer besser werden und damit die Leistungsanforderung an die Energieversorgung steigt. Energieeinsparotechniken (z.B. Intel® Centrino™ Pentium-M) und Weiterentwicklungen in der Akkutechnik werden bestenfalls für eine gleich bleibende Akkulaufzeit ausreichen /RIE 02b/. Inwiefern sich so genannte Table PCs (in das TFT-Display integrierter PC, über Touchscreen oder Datenstift zu bedienen) gegenüber den konventionellen Notebooks durchsetzen, oder wann neuartige Bildschirmtechniken wie OLED (organic light emitting displays) bzw. FED (Field Emission Displays) mit einem geringeren Energieverbrauch zum Einsatz kommen, bleibt abzuwarten.

### 3.3.2 Akku-Werkzeuge

Mit Akkus betriebene Werkzeuge wie Akkuschauber und -Bohrer werden sowohl von Privatpersonen als auch von professionellen Anwendern immer mehr eingesetzt. Die Vorteile der netzunabhängigen Betriebsweise sind der hohe Komfort und die schnelle Rüstzeit durch den Wegfall des Stromkabels. Neue Systeme sind ähnlich leistungsfähig wie netzbetriebene Geräte, so dass auch für Geräte mit hohen Leistungsanforderungen, wie z.B. Bohrhammer, Heckenscheren und Kreissägen, Akkusysteme angeboten werden.

---

<sup>2</sup> Acer Travelmate 632 XC



Die gemeinsamen Produkteigenschaften dieser Gruppe sind die durch den professionellen Einsatz auf Baustellen bedingte robuste Bauweise und die aufgrund der Anforderungs- und Leistungscharakteristik hohen Spitzenlastströme bis zu 95 A. Der gängige Leistungsbereich liegt ca. zwischen 100 und 600 W, Peakleistungen bei bis zu 1000 W. In diesem Zusammenhang wird zwischen Geräten mit „normaler“ Leistungsanforderung und „High-Power“-Geräten unterschieden. In die Kategorie „High-Power“-Geräte fällt beispielsweise ein Bohrhammer oder eine Kreissäge mit Leistungen im Bereich von etwa 600 bis 1000 W. Als Repräsentant dieser Gerätegruppe wird ein Akkuschauber gewählt.

Für die Deckung solcher extremen Lastgänge kommen heute hauptsächlich Nickel-Cadmium-Akkus zum Einsatz, die wegen dem hohen Cadmium-Anteil von bis zu 100 g pro Akku in der Umweltdiskussion problematisch sind /OEK 98/. Eine Begrenzung des Cadmiumgehalts auf 0,002 % ist ab dem Jahr 2008 EU-weit gesetzlich vorgeschrieben. Zunehmend werden für kleinere Leistungsbereiche deshalb auch Nickel-Metallhydrid-Akkus eingesetzt und nehmen heute einen Anteil von etwa 5 % der in Werkzeugen eingesetzten Akkus ein. Je nach Leistungsanforderung liegen die Akku-Nennspannungen in einem Bereich von 7,2 bis 24 V mit Kapazitäten bis 4 Ah /MET 03/. Akku-Werkzeuge bleiben im Dauereinsatz durchschnittlich 200 Stunden funktionsfähig. Ein Akku hat nach Herstellerangaben eine Lebensdauer von 500 bis 2000 Zyklen. Unter Berücksichtigung der - in der Regel kurzen - Dauer der einzelnen Arbeitsgänge wird die durchschnittliche Lebensdauer eines Gerätes auf etwa 8 Jahre geschätzt /MET 03/.

### 3.3.3 Verkehrsnebenanlagen

Die Gruppe der stationären Anlagen umfasst Geräte, die fern vom allgemeinen Stromnetz in Inselanwendungen betrieben werden, weil ein Netzanschluss entweder technisch nicht möglich oder wirtschaftlich nicht sinnvoll ist. **Tabelle 3-2** beinhaltet stationäre Anlagen für ausgewählte Produktparten.

**Tabelle 3-2:** Anwendungen in verschiedenen Produktparten stationärer Kleingeräte

Produktparte		Anwendung
Telekommunikation		Repeater-Stationen
Pipeline-Überwachung		Korrosions- und Leckage-Überwachungssysteme
Verkehrsnebenanlagen	Verkehrstelematik	Verkehrsdichtemessung, Mauterfassungssysteme, GPS-Referenzstationen, Wettermessstationen, Nebeldetektoren, Glättemelder, Verkehrsleitsysteme, Verkehrsinformationssysteme, rechnergestützte Betriebsleitsysteme
	Verkehrssicherheit	Baustellensicherungsleuchten, Lauflichtanlagen, mobile Ampelsysteme, mobile Verkehrsinformationsanlagen
	Städtischer Bereich	Fahrgastinformationssysteme, Fahr- und Parkscheinautomaten, Zigarettenautomaten
Sicherheitstechnik		Überwachungskameras, Bewegungsmelder
Wissenschaft und Analysetechnik		Wassergütemessgeräte, Verwerfungsdetektoren, Pegelmessung, Seismographie

Gemeinsame Merkmale der Gruppe sind lange Laufzeiten von einem bis über zehn Jahren sowie ein gleichmäßiger Lastgang. Aufgrund eines oft schwer zugänglichen Einsatzortes und der damit verbundenen aufwändigen und kostspieligen Wartung sind die Anforderung an die Versorgungs- und Ausfallsicherheit hoch. Der Einsatz im Freien setzt zudem eine Unempfindlichkeit gegenüber Außentemperatur, Witterungsbedingungen und Verschmutzung voraus. Der Leistungsbereich stationärer Kleinsysteme bewegt sich je nach Verwendungszweck zwischen ca. 1 und 1.000 W.

Durch die Zuarbeit eines Herstellers von Straßenwetter-Messstationen stehen für einen Ausschnitt aus **Tabelle 3-2** umfassende Informationen und belastbare Daten zur Verfügung, die exemplarisch ausführlich behandelt werden und auf die verbleibenden Anlagen anderer Produktparten übertragbar sind (vgl. Kapitel 7.2).

Eine Straßenwetter-Messstation besteht überwiegend aus einer oder mehreren in die Fahrbahnoberfläche eingelassenen Sensoren zur Messung der Feuchte, des Restsalzgehalts und der Oberflächentemperatur. An einem Mast am Fahrbahnrand mit ca. vier Meter Höhe sind Sensoren für die atmosphärischen Werte installiert. Bestimmt werden hier die Lufttemperatur und -feuchte, woraus sich die Taupunkttemperatur ergibt, sowie Art und Intensität des Niederschlags. Weitere Messgrößen können in Einzelfällen die Windrichtung und -geschwindigkeit sowie die Sonneneinstrahlung (Leistung pro Fläche) sein. Die Streckenstationen im Autobahnbereich arbeiten gemäß den technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS) der BAST (Bundesanstalt für Straßenwesen).

Die Sensoren werden an eine Erfassungselektronik angeschlossen, welche die Sensoren soweit notwendig ansteuert, die Signale auswertet und die Ergebniswerte an eine weit entfernte Zentrale übermittelt. Diese Elektronik benötigt eine Dauerleistung von ca. 15 W bei einer Spannung von 12 V (DC). Zusammen mit den Sensoren, welche teilweise ein- und ausgeschaltet werden, kann eine Leistung bis zu 25 W notwendig werden. Darin enthalten ist auch der Leistungsbedarf der Übertragungseinheit. Für autonome Anlagen stehen derzeit neue Gerätegenerationen zur Verfügung, welche erheblich weniger Leistung benötigen. Die Erfassungselektronik verbraucht teilweise unter 1 W und die Sensoren können ein- und ausgeschaltet werden.

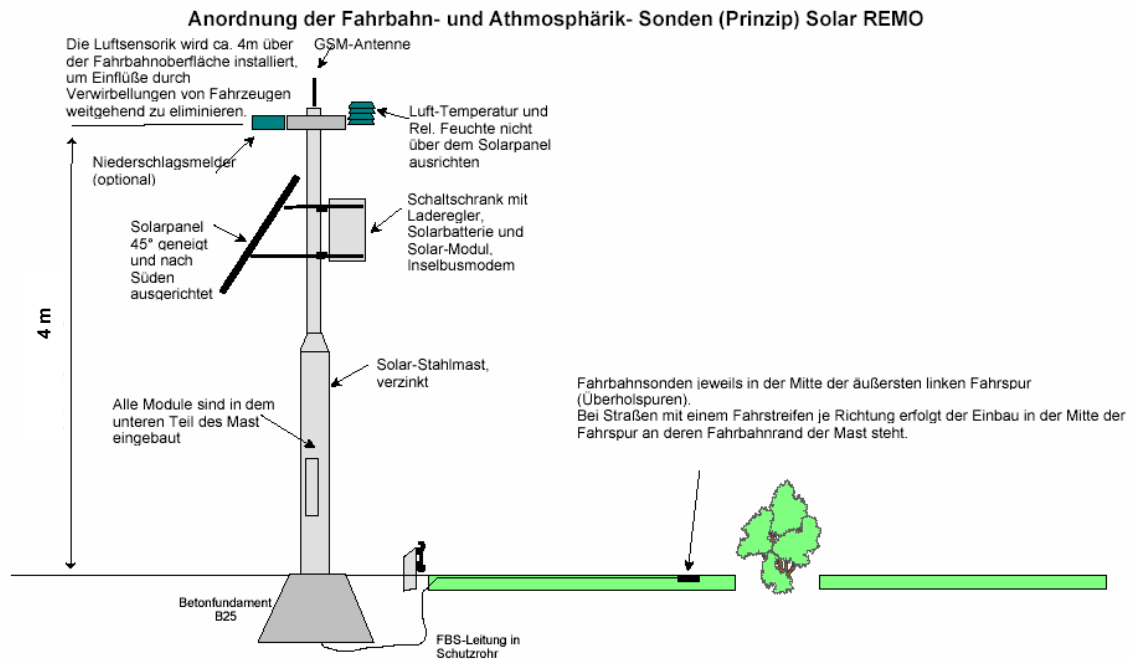
Die meisten autonomen Streckenstationen arbeiten mit Datenübermittlung via Mobilfunknetz (GSM<sup>3</sup>), sind Ereignis gesteuert und senden eine SMS<sup>4</sup>, wenn sich definierte Messwerte in bestimmten, frei einstellbaren Grenzen verändert haben. Dies garantiert die kürzeste mögliche Sendezeit. Es existieren auch Anlagen, die nicht Ereignis gesteuert Messwerte an die Zentrale senden, sondern von dieser zyklisch abgefragt werden. Dies ist beispielsweise in Bündelfunknetzen der Fall, kann aber grundsätzlich auch in GSM-Netzen angewandt werden. Generell ist bei dieser Anwendung als Frühwarnsystem für den Winterdienst eine Aktualisierung der Daten im Bereich von 2 bis 10 Minuten erforderlich. Die Übertragungsdauer (Sendezeit) einer solchen Kommunikation pro Zyklus dauert bis zu 20 Sekunden.

**Abbildung 3-2** zeigt einen typischen Aufbau einer autonomen Messstation an Straßen und Autobahnen.

<sup>3</sup> GSM: Global System Mobile, Standard für digitalen Mobilfunk

<sup>4</sup> SMS: Short Messaging Service, Kurzmitteilungsversand im GSM-Netz





**Abbildung 3-2:** Typischer Aufbau einer autonomen Straßenwetter-Messstation /MIC 03/

Als autonome Stromversorgung werden fast ausschließlich Photovoltaikanlagen verwendet. Um eine ausreichende Verfügbarkeit auch in Schlechtwetter-Perioden zu garantieren, ist für die durchschnittliche Dauerleistung der Sensoren (ca. 3 W) eine PV-Modulleistung von mindestens 150 W und eine Batteriekapazität von etwa 230 Ah erforderlich. Die Anlagen sind meist auf 12 V ausgelegt. Vereinzelt gibt es auch Hybrid-Anlagen mit zusätzlichen Windgeneratoren.

Moderne Messgeräte, wie z.B. Sichtweitenmessgeräte für die Nebeldetektion und moderne Windgeber auf Basis des Ultraschall-Doppler-Effekts, benötigen aber für ihren Betrieb eine Heizung, da sie sehr empfindlich und vor dem Einfrieren der Messköpfe zu schützen sind. Solche Heizungen benötigen bis zu 70 W bei 24 V (DC), die zudem genau dann gebraucht werden, wenn das Angebot an Sonnenenergie gering ist.

Im Bereich der deutschen Autobahnen sind derzeit ca. 550 Glättemeldeanlagen installiert. Diese werden im Rahmen des bundesweit eingeführten Straßenwetter-Informationssystems (SWIS) betrieben. Grundsätzlich ist an den deutschen Bundesautobahnen eine Infrastruktur aus Telefon- und Stromnetz vorhanden, sodass dort die Anzahl der autonom betriebenen Streckenstationen gering ist und bei maximal 2 % liegt. Im Ausland, z.B. in Ungarn oder Tschechien ist der Anteil autonomer Anlagen durchaus höher. Die Verfügbarkeit einer kostengünstigen und zuverlässigen Stromversorgung würde es aber ermöglichen, auch jene Anlagen autonom zu versorgen, bei denen der Netzanschluss kostenintensiv über eine große Strecke herangeführt werden muss.

## 4 Akkumulatoren

Grundsätzlich unterscheidet man in der Batterietechnik Primärspeicher und Sekundärspeicher. In Primärspeichern (Batterien) laufen Reaktionen ab, die innerhalb der Zelle einmalig und nicht umkehrbar sind. Nach dem Entladen können sie nicht wieder geladen werden. Sekundärspeicher (Akkumulatoren) hingegen können durch Anlegen einer äußeren Spannung wieder aufgeladen werden. Ihre internen Zellreaktionen sind für eine begrenzte Zyklenzahl reversibel. Eine Übersicht über die Einteilung der Batterien, die gängigen Batterietypen und deren jeweiligen Hauptanwendungsbereiche zeigt **Tabelle 4-1**.

**Tabelle 4-1:** Batterietypen und deren typische Anwendungen

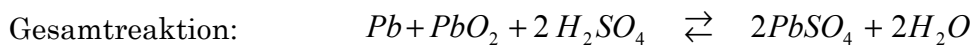
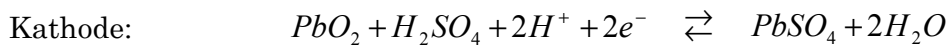
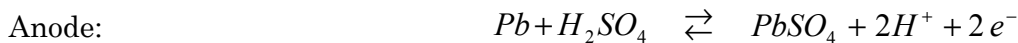
Batterien			
Primärspeicher (nicht aufladbar)		Sekundärspeicher (aufladbar)	
Batterie	typ. Anwendung	Batterie	typ. Anwendung
Zink-Kohle / Zink-Chlorid	Spielzeuge	Bleisäure	Autobatterien, PV-Anlagen
Alkali-Mangan	Taschenlampen	Nickel-Cadmium	Werkzeuge
Zink-Luft / Zink-Silber	Knopfzellen	Nickel-Metallhydrid	Handys
Quecksilber	Medizin, Militär	Lithium-Ionen	Organizer
Lithium-Metall	Fotografie	Lithium-Polymer	Laptops

Für den Einsatz in portablen Kleingeräten sind nur Niedertemperatur-Akkumulatoren geeignet, die bis zu einer Temperatur von ca. 60 °C betrieben werden. Die wichtigsten Typen sind Blei, Nickel-Cadmium-, Nickel-Metallhydrid-, Lithium-Ionen- und Lithium-Polymer-Akkumulatoren. In stationären Anlagen werden meistens Blei-Akkumulatoren verwendet.

### 4.1 Funktionsweise und Aufbau von Akkumulatoren

#### 4.1.1 Blei-Akkumulatoren

In der Bleibatterie wird sowohl in der positiven als auch in der negativen Elektrode Blei verwendet. In der negativen Elektrode tritt es als Metall (Pb) und in der positiven Elektrode als Bleidioxid (PbO<sub>2</sub>) auf. Als Elektrolyt wird im allgemeinen Schwefelsäure (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) verwendet. In neueren Typen, den so genannten verschlossenen Bleibatterien, wird der Elektrolyt mit einem Vlies oder durch den Zusatz von Siliziumdioxid (SiO<sub>2</sub>) in einem Gel gebunden. Die chemischen Reaktionen der Halbzellen sowie die Gesamtreaktion bei der Ladung (←) und Entladung (→) zeigen die nachfolgenden Gleichungen /KIE 00/:



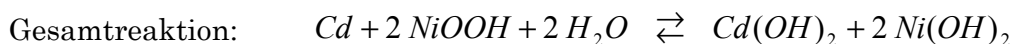
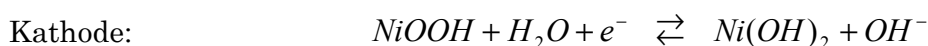
Die Zellspannung beträgt 2,08 V. Als Näherungswert wird häufig eine Spannung von 2 V als Nennspannung bezeichnet, was bei den am häufigsten verwendeten Typen mit 6 Zellen, wie z.B. den KFZ-Starterbatterien, zu einer Nennspannung von 12 V führt.

Die Einsatzmöglichkeiten von Bleiakkumulatoren sind vielfältig. Sie werden z.B. in Verbindung mit PV-Anlagen, zur Sicherstellung einer unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) oder als Starterbatterien im Automobilbereich eingesetzt. Da die Anforderungen in den jeweiligen Einsatzgebieten sehr unterschiedlich sind, lassen sich Bleibatterien nicht unter allen Bedingungen gleichgut nutzen. Aus diesem Grund werden Bleibatterien in verschiedenster Hinsicht weiterentwickelt, um sie unter den jeweiligen Anforderungen optimal einsetzen zu können.

Am Beispiel der PV-Stromversorgung mit Batterien zeigt sich eine Entwicklung zu dickeren Elektroden und einer größeren Elektrolytmenge. Dabei sind zum einen die Verringerung des Wartungsaufwandes und zum anderen die Erhöhung der Betriebsdauer wesentliche Ziele. Andere stationäre Anwendungen wie die USV unterliegen den gleichen Anforderungen, so dass auch hier die Entwicklung in diese Richtungen geht. /LIN 02/

#### 4.1.2 Nickel-Cadmium-Akkumulatoren

In einem Nickel-Cadmium-Akkumulator besteht die Kathode aus Nickeloxid-Hydroxid (NiOOH) und die Anode aus Cadmium (Cd). Als Elektrolyt dient verdünnte Kalilauge, die in einem Vlies gebunden ist /PRA 95/. Die chemische Reaktionen in der Zelle bei der Entladung und bei der Ladung entsprechen vereinfacht den folgenden Gleichungen /LIN 02/:



Die Zellspannung zwischen der Cadmium-Anode und der Nickel-Kathode beträgt 1,2 V.

Durch die robuste und kostengünstige Bauweise haben sich NiCd-Akkumulatoren vor allem im Haushalt als leicht handhabbarer Ersatz für Primärzellen etablieren können. Auch für Power-Tools eignen sie sich gut, da zum einen sehr hohe Spitzenlastströme bis zu 40 A möglich sind /REN 01/ und zum anderen mit gesteuerten Ladegeräten eine Schnellladung innerhalb von einer Stunde realisiert werden kann /LIN 02/.

Ein Nachteil der NiCd-Akkumulatoren ist der so genannte „Memory-Effekt“. Durch unvollständiges Entladen der Zelle kommt es zu physikalischen Veränderungen an den Elektrodenstrukturen, die zu einer geringeren Kapazität nach dem Wiederaufladen führt. Allerdings lassen sich die Folgen des Memory-Effektes durch mehrmaliges vollständiges Laden und Entladen beseitigen /LIN 02/. Nicht zu beeinflussen ist jedoch die

relativ hohe Selbstentladung der NiCd-Akkus von 1 bis 4 % innerhalb von 24 h, die zu geringen Stand-by-Zeiten führt /PRA 95/.

Aus Sicht des Gesundheits- und Umweltschutzes ist die Verwendung von Cadmium in den Zellen problematisch. Alle Verbindungen dieses Schwermetalls sind äußerst toxisch. In der Umwelt erfolgt keinerlei Abbau oder Umwandlung zu ungefährlichen Stoffen /RÖM 95/. Cadmium wird in menschlichen und tierischen Organismen in Leber und Nieren angereichert und führt zu verschiedenen Vergiftungserscheinungen. Eine Beschränkung der Verwendung des Werkstoffes Cadmium auf bestimmte Bereiche bzw. ein vollständiges Verbot von NiCd-Akkumulatoren wird deshalb seit einigen Jahren in Erwägung gezogen. Nach einem Entwurf der neuen EU-Batterierichtlinie könnte ein solches Verbot im Jahr 2008 in Kraft treten /REN 01/.

### 4.1.3 Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren

In den wesentlichen Betriebseigenschaften sind Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren den Nickel-Cadmium-Akkumulatoren sehr ähnlich. Jedoch dient als Anode statt dem Cadmium eine Metalllegierung, in der an Zwischengitterplätzen Wasserstoff eingelagert wird (vgl. auch Kapitel 5.2.3). Der so in Form von Metallhydriden gespeicherte Wasserstoff reagiert mit den Hydroxid-Ionen ( $\text{OH}^-$ ) des alkalischen Elektrolyten. Die dabei freigesetzten Elektronen fließen über den äußeren Stromkreis zur Kathode.



Die Zellspannung des NiMH-Akkus beträgt 1,2 V.

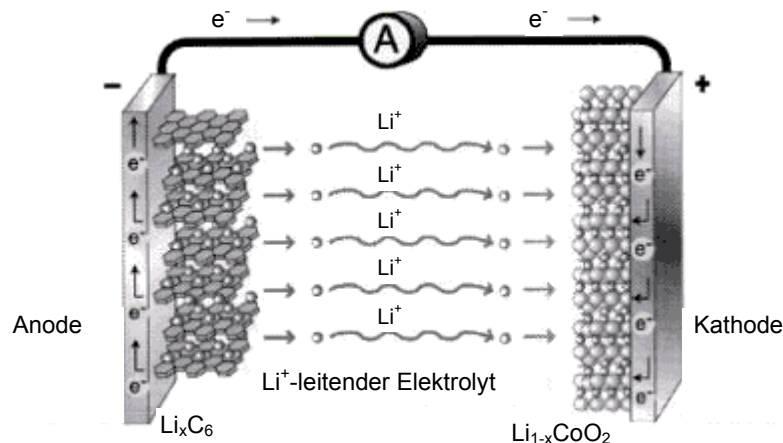
Um die Entstehung eines Knallgasgemisches zu verhindern, ist der Metallhydridspeicher gegenüber der Kathode überdimensioniert und dient so als Ladungs- bzw. Entladungsreserve /LIN 02/.

Durch das Metallhydrid als Anode sind NiMH-Akkus gegenüber NiCd-Akkus zum einen wesentlich umweltfreundlicher, zum anderen erhöht sich die Speicherdichte und der Memory-Effekt fällt deutlich schwächer aus. Allerdings sind geringere maximale Entladeströme möglich, so dass NiCd-Akkus noch nicht vollständig substituiert werden können. Auch ist für das Aufladen der NiMH-Akkumulatoren ein geregeltes Ladegerät notwendig, da sie empfindlicher auf eine Überladung reagieren.

NiMH-Akkumulatoren werden hauptsächlich in Mobiltelefonen und PDAs eingesetzt, da sie geometrisch relativ frei zu gestalten sind und somit die Form des Energiespeichers keine Einschränkung im Design der Geräte bedingt /REN 01/. Für die Anwendung in Power Tools wird versucht, die maximale Stromdichte der NiMH-Akkus zu erhöhen, um in diesem Bereich NiCd-Akkus vollständig zu ersetzen. Als Energieversorgung in Notebooks werden NiMH-Akkus verstärkt durch die leistungstärkeren aber teureren Li-Ionen-Akkumulatoren verdrängt.

#### 4.1.4 Lithium-Ionen- und Lithium-Polymer-Akkumulatoren

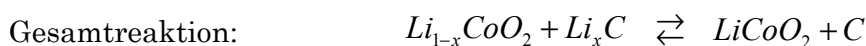
Lithium-Ionen-Akkumulatoren bestehen aus einem flüssigem organischen Elektrolyten und zwei so genannten Interkalationselektroden. Unter Interkalation versteht man die Einlagerung von Atomen in eine Kristallgitterebene. Bei den Li-Ionen-Akkumulatoren wird an der Kathode das Gitter von Metalloxiden, meist Kobaltoxid ( $\text{CoO}_2$ ) und an der Anode das Schichtgitter von Graphit zur Einlagerung von Lithium verwendet. Beim Laden der Zelle wird Lithium von der Kathode zur Anode transportiert und dort in das Graphitgitter eingelagert. Die analog verlaufende Reaktion der Entladung ist in **Abbildung 4-1** dargestellt.



**Abbildung 4-1:** Entladevorgang eines Lithium-Ionen-Akkumulators nach /AGM 02/

In Lithium-Polymer-Akkumulatoren wird an Stelle eines flüssigen Elektrolyten ein Ionen leitendes Polymer in Form eines Gels verwendet. Dadurch ist es nicht möglich, dass bei einem beschädigten Akku gesundheitsgefährdende Flüssigkeiten austreten. Die Hülle der Lithium-Polymer-Akkus kann deshalb deutlich leichter sein und es wird statt eines Stahl- oder Aluminiumbleches eine dünne Aluminiumfolie verwendet. Somit lassen sich sehr dünne (bis zu 3 mm) und leichte Akkus herstellen, wodurch die Integration in portable Kleingeräte erleichtert wird. Schlechtere Leistungskennwerte und ein höherer Preis im Vergleich zu den Lithium-Ionen-Akkus haben aber dazu geführt, dass sich Lithium-Polymer-Akkus auf dem Markt noch nicht durchsetzen konnten /REN 01/.

Die chemischen Reaktionen der Lithium-Akkus beim Laden und beim Entladen erfolgen entsprechend den folgenden Gleichungen:



Die Zellspannung liegt, abhängig von den verwendeten Materialien für die Elektroden, zwischen 2,5 und 4,2 V. In den meisten Anwendungsfällen beträgt sie 3,6 V /LIN 02/.

Vorteilhaft bei Lithium-Akkus ist, dass kein Memory-Effekt auftritt und die Selbstentladung mit 2 – 8 % pro Monat sehr gering ist /LIN 02/. Neben dem hohen Preis besteht ein weiterer Nachteil darin, dass Lithium-Akkus schon mit einer einzigen

Überladung oder Tiefentladung stark beschädigt oder gar zerstört werden können. Aus diesem Grund ist eine Lade- und Entladeüberwachung in die Akkumulatoren integriert. Dadurch wird der Akku stets richtig aufgeladen und abgeschaltet, wenn die Entladeschlussspannung erreicht ist.

Zukünftige Entwicklungen zielen auf kostengünstigere und leistungsfähigere Interkalationsmaterialien für die Kathode. So werden heute schon teilweise Elektroden aus Lithium-Mangandioxid ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ) oder Lithium-Nickel-Cobaltoxid ( $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_2$ ) verwendet, die höhere Spannungen und höhere Speicherdichten ermöglichen /LIN 02/.

**Tabelle 4-2:** Volumetrische und gravimetrische Energiedichte unterschiedlicher Akkumulatoren /REN 01/

Energiedichte	Einheit	Blei	NiCd	NiMH	Li-Ionen	Li-Polymer
volumetrisch	Wh/l	70	180	300	350	270
gravimetrisch	Wh/kg	35	50	70	140	150

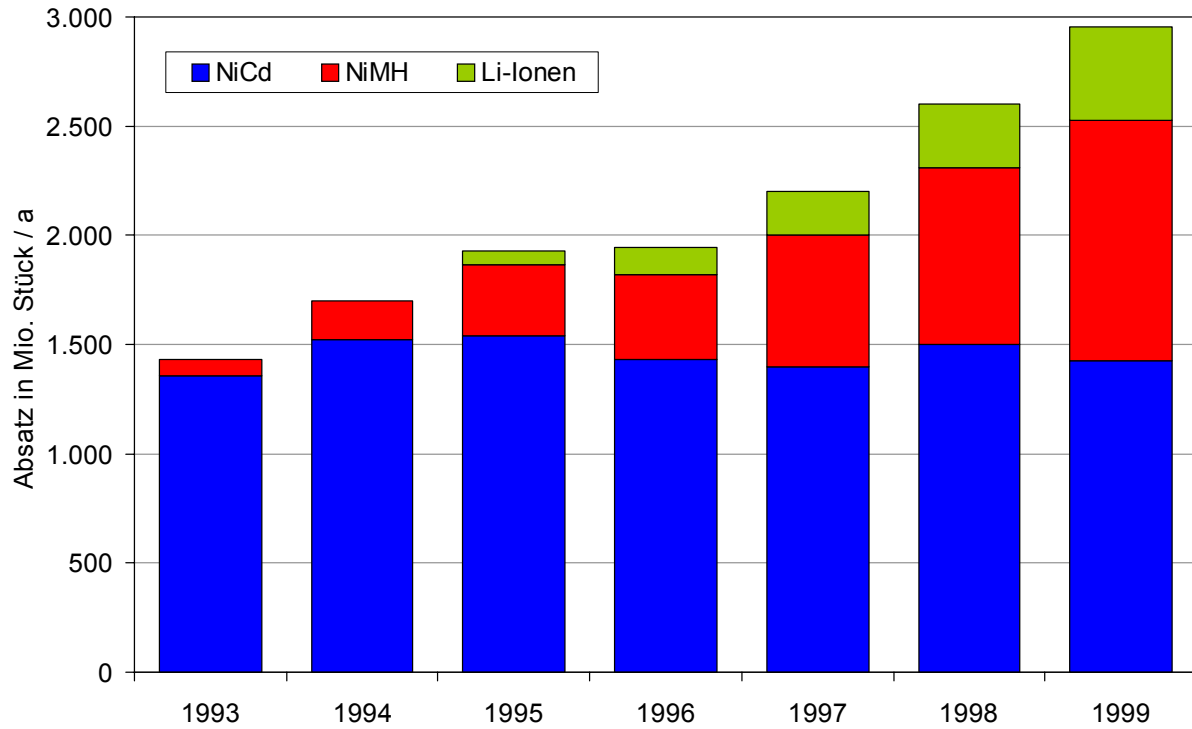
Wie in **Tabelle 4-2** dargestellt, sind die volumetrische und die gravimetrische Energiedichte von Li-Ionen-Akkus deutlich höher als bei NiCd- und NiMH-Akkus. Sie werden deshalb bevorzugt in Geräten eingesetzt, bei denen eine maximale Energiedichte erwünscht wird und der höhere Preis dafür in Kauf genommen werden kann (z.B. Notebooks, Camcorder). Die Energiedichte von Blei-Akkus, die hauptsächlich als Starterbatterien in Fahrzeugen und in Verbindung mit PV-Anlagen eingesetzt werden, ist sowohl volumetrisch als auch gravimetrisch wesentlich geringer als bei den anderen Akku-Typen. Trotzdem haben Blei-Akkus wegen ihres Kostenvorteils in den o.g. Bereichen eine nahezu 100 %-ige Verbreitung.

## 4.2 Der Markt für Akkumulatoren

Der Markt für Sekundärbatterien ist durch die beherrschende Stellung der zwei großen Anbieter Sanyo Energy und Matsushita Electric gekennzeichnet, die zusammen mehr als 50 % Umsatzanteil auf sich vereinen können. Neben einer Vielzahl kleinerer Hersteller hält nur Sony einen weiteren nennenswerten Marktanteil von 9 % (im Jahr 1999) /REN 01/.

In **Abbildung 4-2** ist die Entwicklung des weltweiten Absatzes und Marktanteils von NiCd-, NiMH- und Li-Ionen-Akkumulatoren abgebildet. Es ist zu erkennen, dass der Zuwachs in den letzten Jahren vollständig durch die modernen NiMH- und Li-Ionen-Akkus gedeckt wurde. Dadurch ging der relative Anteil der NiCd-Akkus bei nahezu konstanten Stückzahlen stark zurück.

In Zukunft wird die Anzahl verkaufter Akkus weiter zunehmen, wobei sich die Verschiebung der Anteile in Richtung der fortschrittlichen NiMH- und Lithium-Akkus fortsetzen wird. Diese Entwicklung ist vor allem durch den Markt der Informations- und Kommunikationstechnologien bedingt. Bei Werkzeugen, tragbaren Musikgeräten und Ähnlichem werden weiterhin überwiegend NiCd-Akkus eingesetzt, da sie bei geringeren Kosten sehr hohe Stromflüsse ermöglichen /REN 01/. Ein mögliches EU-weites Cadmiumverbot würde jedoch die Substitution der NiCd-Akkus stark beschleunigen.



**Abbildung 4-2:** Entwicklung des weltweiten Absatzes ausgewählter Sekundär-batterien /REN 01/



## 5 Technologie der Brennstoffzelle

Im Folgenden werden die wesentlichen Eigenschaften der Brennstoffzellentechnik sowie die für portable Anwendungen geeigneten Brennstoffzellentypen beschrieben.

Brennstoffzellen sind, genauso wie Primär- und Sekundärbatterien, Energiewandler, welche die in chemischen Verbindungen gespeicherte Energie direkt in elektrische Energie umwandeln. Gegenüber Wärmekraftmaschinen, die durch den Carnot-Wirkungsgrad beschränkt sind, weisen sie damit einen potenziell höheren elektrischen Wirkungsgrad auf, der zudem zum Teillastbereich hin ansteigt. Im Unterschied zu Batterien und Akkumulatoren ist der Brennstoff selbst nicht Bestandteil des Brennstoffzellensystems, sondern wird diesem kontinuierlich aus einem Tank zugeführt. Somit kann die Energieversorgung durch unterschiedliche Dimensionierung von Energiewandler (Brennstoffzelle) und Energiespeicher (Tank) an den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden.

### 5.1 Allgemeine Funktionsweise von Brennstoffzellen

Abbildung 5-1 zeigt den funktionalen Aufbau einer Brennstoffzelle. Die wichtigsten Bestandteile sind die zwei Elektroden, die kontinuierlich mit Brennstoff bzw. Sauerstoff versorgt werden, und der Elektrolyt, der die beiden Elektrodenräume gasdicht und elektrisch trennt.

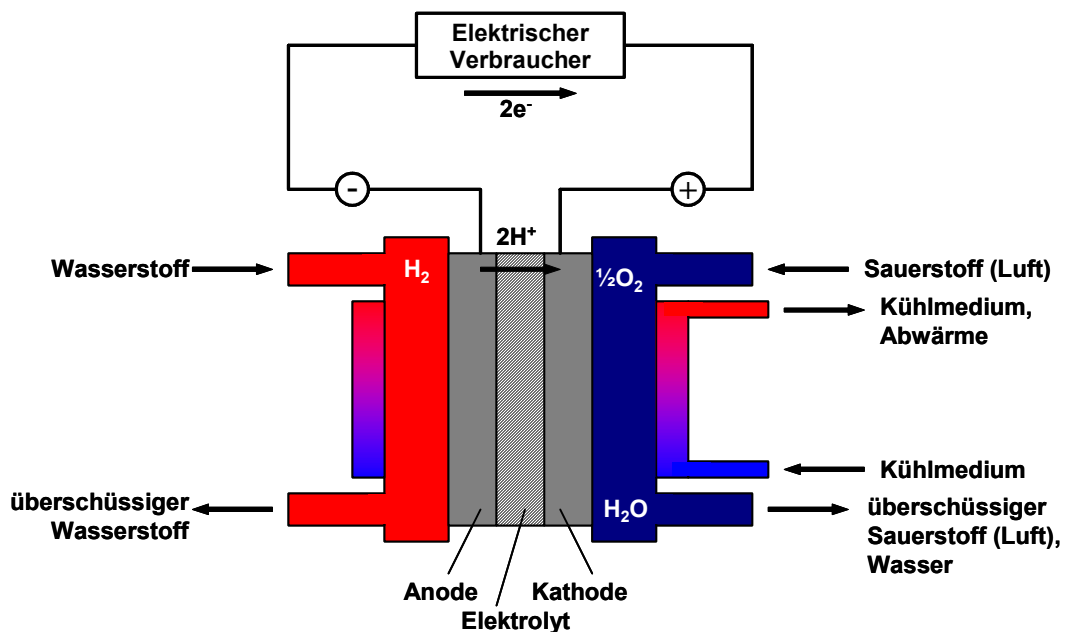


Abbildung 5-1: Prinzipieller schematischer Aufbau einer PEM-Brennstoffzelle /KOR 96/

An der katalytisch aktiven Anodenoberfläche oxidiert der Brennstoff (z.B. Wasserstoff), so dass Elektronen ( $e^-$ ) freigesetzt werden. Die Elektronen fließen über einen äußeren



Stromkreis und können dort Arbeit leisten, während der Ladungstransport in der Zelle durch Ionenwanderung im Elektrolyten erfolgt. An der katalytischen Oberfläche der Kathode wird Sauerstoff reduziert, wobei die Elektronen gebunden werden. Die Brennstoffzelle teilt somit die Gesamtreaktion von Brennstoff und Sauerstoff in zwei räumlich getrennte Reaktionen auf.

Die Aneinanderreihung einzelner Brennstoffzellen ergibt den Brennstoffzellenstack. Das gesamte Brennstoffzellensystem besteht neben dem Stack aus einer Vielzahl peripherer Komponenten zur Brennstoff- und Luftversorgung sowie zur Kühlung.

Die Anforderungen an Brennstoffzellensysteme für portable, mobile und stationäre Anwendungen unterscheiden sich zum Teil erheblich. Für Brennstoffzellen im stationären Betrieb ist in erster Linie ein hoher Wirkungsgrad und eine besonders hohe Betriebsstundenzahl von Bedeutung. Bei mobilen Brennstoffzellensystemen steht ein hoher elektrischer Wirkungsgrad und die hohe Lastdynamik im Vordergrund. Dagegen wird für portable Anwendungen ein geringes Gewicht, ein kleines Volumen und ein einfacher Systemaufbau gefordert. Packaging und Wärmemanagement stellen somit eine besondere Herausforderung dar.

Durch den von der Leistung der Brennstoffzelle unabhängig dimensionierbaren Energiespeicher bietet die Brennstoffzelle besonders Vorteile bei Anwendungen mit relativ kleiner Leistung und langen Betriebszeiten. Vorteilhaft im Vergleich zu Akkumulatoren sind zusätzlich die kurze Aufladezeit durch einfachen Austausch des Brennstoffspeichers, fehlende Selbstentladung, der nicht vorhandener Memory-Effekt, sowie die zu erwartende lange Lebensdauer.

Für den Einsatz von Brennstoffzellensystemen in portablen Kleingeräten kommen aus zwei Gründen nur die wasserstoffbetriebene PEM-Brennstoffzelle und die Direkt-Methanol-Brennstoffzelle in Frage. Zum einen erfolgt nur bei diesen Niedertemperatur-Brennstoffzellen die elektrochemische Umsetzung des Brennstoffes bei einer relativ niedrigen Temperatur von 40 – 80 °C, die für die Anwendung in Kleingeräten geeignet ist. Zum anderen liegt hier, im Gegensatz zur alkalischen Brennstoffzelle, der Elektrolyt in fester Form vor und ermöglicht so die Realisierung kleinster Packmaße.

Im Folgenden werden die für portable Anwendungen geeigneten Brennstoffzellentypen hinsichtlich ihres besonderen Funktionsprinzips, ihres energetischen Verhaltens und ihrer Betriebsparameter beschrieben. Für ausführlichere Informationen über Brennstoffzellen wird auf die Literatur in /LED 01, TAB 01/ verwiesen.

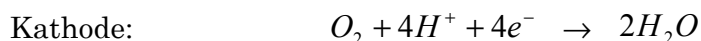
## 5.2 Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle

### 5.2.1 Funktionsweise

Bei der PEM-Brennstoffzelle besteht der Elektrolyt aus einer dünnen, gasdichten und protonenleitenden Kunststoffmembran (z.B. Nafion™ von DuPont, GORE-SELECT™ von WL Gore). Der für die Ionenleitung notwendige Wassergehalt dieser Polymermembranen begrenzt die Betriebstemperatur der PEMFC bei Umgebungsdruck auf maximal 100 °C. Die Arbeitstemperatur liegt meist zwischen 60 und 80 °C, wobei PEM-Brennstoffzellen ein sehr gutes Kaltstartverhalten aufweisen. Als Katalysatormaterial werden Platin oder andere Edelmetalle verwendet, wodurch sich eine starke Empfind-

lichkeit gegenüber Katalysatorgiften wie z.B. Kohlenmonoxid ergibt. Als Brenngase benötigt die PEMFC reinen Wasserstoff und Sauerstoff, wobei sie problemlos im Wasserstoff/Luft-Betrieb einsetzbar ist.

Chemische Reaktionen:

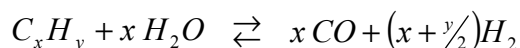


Die Entwicklung der PEMFC im  $H_2/O_2$ -Betrieb begann bereits vor rund 40 Jahren für militärische Anwendungen und die Stromversorgung in der Raumfahrt. Fortschritte in der Membrantechnik führten in den 90er Jahren zu einem neuen Entwicklungsschub bei den  $H_2$ /Luft-Systemen. Der Brennstoffzellentyp gilt heute bereits als sehr zuverlässig und ausgereift. Die elektrische Leistung derzeit verfügbarer PEMFC-Anlagen liegt im Bereich von wenigen Watt bis zu ca. 250 kW<sub>el</sub>. Aufgrund der guten Dynamik der PEMFC werden derzeit insbesondere mobile Anwendungen im Verkehr intensiv untersucht. International bereiten einige Konsortien (z.B. DaimlerChrysler, Ballard, und Ford) eine Serienfertigung von PEM-Brennstoffzellen für das Jahr 2005 vor /ANG 00/. Mögliche Einsatzbereiche werden aber auch in der dezentralen Energieversorgung (Industrie- und Hausenergieversorgung) gesehen, die Entwicklungsarbeiten können in die Leistungsbereiche 200 - 300 kW<sub>el</sub> (BHKW) und 1 - 5 kW<sub>el</sub> (Brennstoffzellen-Kleinsysteme) eingeteilt werden.

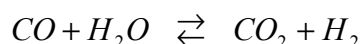
Parallel dazu werden PEM-Brennstoffzellen für den Einsatz in Kleinstanwendungen entwickelt. Die Systemleistung liegt bei diesen Anwendungen zwischen einem und einigen 100 Watt elektrisch. Durch die potenziell sehr hohen Stückzahlen (im Jahr 2001 wurden ca. 2 Mrd. batteriebetriebene Geräte niedriger Leistung verkauft /HEB 01b/) könnten die Brennstoffzellensysteme zu konkurrenzfähigen Preisen hergestellt werden. Zudem können sich Synergieeffekte zwischen den portablen, mobilen und stationären Anwendungen ergeben, was zu einer weiteren Reduzierung der Herstellungskosten führen würde.

### 5.2.2 Wasserstoffherstellung

Wasserstoff wird weltweit im großindustriellen Maßstab (ca. 500 Mrd. Nm<sup>3</sup> pro Jahr /ZIT 02/) hergestellt und heutzutage hauptsächlich als Einsatzstoff in der chemischen Industrie für die Produktion von Ammoniak, Ethylen oder Methanol benötigt. Hierfür wird er meist mittels Dampfreformierung aus Erdgas gewonnen



Mit der anschließenden Kohlenmonoxid-Shift-Reaktion kann die Ausbeute an Wasserstoff deutlich erhöht werden:



Daneben fällt Wasserstoff als Koppelprodukt der Chlor-Alkali-Elektrolyse bei der Herstellung von Chlorgas an. Auch in der petrochemischen Industrie entsteht beim Thermocracken von Mineralöl in großen Mengen Wasserstoff, der anschließend teilweise

für die Entschwefelung von Kraftstoffen verwendet wird. Weitere großtechnische Herstellungsverfahren für Wasserstoff sind die Partielle Oxidation von Schwerölen und die Vergasung von Kohle /ZIT 02/. Die Elektrolyse von Wasser setzt die Verfügbarkeit billigen Strom voraus, um gegenüber der Herstellung von Wasserstoff aus fossilen Energieträgern konkurrenzfähig zu sein und wird deshalb nur im geringen Maße eingesetzt.

Die niedrigsten Herstellungskosten erreicht man bei den Verfahren auf Basis von Erdgas oder Erdöl (ca. 0,09 €/Nm<sup>3</sup> /ANG 00, SCHI 97/), wobei dieser Preis stark von den Kosten für die eingesetzten Energieträger abhängig ist. Die Verfahren sind technisch sehr weit entwickelt, so dass in Zukunft durch die Weiterentwicklung nur eine geringe Kostenreduktion zu erwarten ist.

Mögliche zukünftige Herstellungstechniken für Wasserstoff sind thermochemische (Kvaerner-Prozess), photobiologische oder photokatalytische Prozesse. Allerdings befinden sich diese Verfahren zum Teil in frühen Entwicklungsstadien, so dass der großtechnische Einsatz in naher Zukunft fraglich ist.

### 5.2.3 Wasserstoffspeicherung

In der Praxis stehen für die Speicherung von Wasserstoff vier verschiedene Systeme zur Verfügung: Druckgasflaschen aus Stahl oder Alu-Komposite, Flüssigwasserstoff- und Metallhydrid-Speicher (vgl. **Tabelle 5-1**). Kohlenstoff-Nanostrukturen als Wasserstoffspeicher sind noch Bestandteil der Forschung und weit von einer technischen Verwendung entfernt, so dass über das mögliche Potenzial dieser Technik noch keine Aussagen getroffen werden können.

**Tabelle 5-1:** Energiedichten verschiedener Wasserstoffspeicher (Tankbehälter mit Füllung)

Speicherart	gravimetrische Speicherdichte in kWh/kg	volumetrische Speicherdichte in kWh/l
Stahlflasche (20 MPa)	0,19 (2 l) – 0,37 (50 l)	0,53
Alu-Komposite (20 MPa)	0,80	0,53
Flüssigwasserstofftank	4,5	2,0
Metallhydride	0,21 – 0,39	1 – 1,5

Druckgas- und Flüssigwasserstoffspeicher kommen z.B. bei Wasserstoff-Fahrzeugen zum Einsatz, lassen sich aber nicht in einer Größe herstellen, die für die Anwendung in portablen Kleingeräten geeignet ist. Zudem ist die Verflüssigung von Wasserstoff und die Speicherung in Kryotanks energetisch sehr aufwändig. Für stationäre Kleingeräte stellen konventionelle Stahlgasflaschen eine sehr kostengünstige Methode zur Wasserstoffspeicherung dar, denn hier spielen Speichervolumen und Gewicht nur eine untergeordnete Rolle. Stahlflaschen werden in Größen von 2 bis 50 l angeboten, was bei einem Druck von 20 MPa einem Volumen von 0,33 bis 8,3 Nm<sup>3</sup> Wasserstoff entspricht. Das Gewicht solcher Flaschen liegt bei 5,3 bis 68 kg /ZIT 02/. Daraus ergibt sich eine gravimetrische Speicherdichte von 0,19 bis 0,37 kWh/kg bzw. eine volumetrische Speicherdichte von 0,53 kWh/l. Mit Aluminium- oder Full-Composite-Tanks aus Kohlefaserverbundwerkstoffen können zwar noch deutlich höhere Speicherdichten erreicht

werden, allerdings ist der Gewichtsvorteil für die stationäre Anwendung nicht relevant und die Kosten solcher Tanks liegen deutlich über denen von Stahlgasflaschen.

Die Speicherung von Wasserstoff in Metallhydriden basiert auf der Absorption von Wasserstoff in Metalllegierungen. Durch eine exotherme Reaktion wird der Wasserstoff atomar in Zwischengitterplätze eingelagert. Bis zu 2,2 Gew.-% Wasserstoff bezogen auf die Legierungsmasse können so bei Tieftemperatur-Hydriden ( $T = 20 - 90^{\circ}\text{C}$ ) gespeichert werden /BÜN 01/. Die Entladung des Speichers erfolgt durch Wärmezufuhr (z.B. aus der Umgebung), wodurch die endotherme Desorption des Wasserstoffes bewirkt wird.

Der Betriebsdruck des Speichers lässt sich durch die Wahl der Legierung bestimmen. Bei den heute üblichen Lanthan-Nickel- oder Titan-Zirkon-Legierungen liegt er zwischen 0,25 und 10 bar /FVS 01/. Zum Beladen wird der Tank mit 10 bis 30 bar Wasserstoff beaufschlagt. Dabei wird solange Wärme freigesetzt, bis keine Absorptionsreaktionen mehr stattfinden, bzw. der Tank vollständig gefüllt ist. Bis zu eintausend Mal ist ein entleerter Metallhydrid-Speicher so wiederaufzufüllen.

Der Vorteil von Metallhydridspeichern ist ihre relativ hohe volumetrische Speicherdichte von 1 - 1,5 kWh/l. Die gewichtsbezogene Speicherdichte von ca. 0,21 - 0,39 kWh/kg ist im Vergleich zu anderen Wasserstoffspeichern eher ungünstig und wird bei kleinen Speichern durch den relativ hohen Anteil des Druckmantels am Gesamtgewicht deutlich beeinflusst /ZIT 02/. In einigen Fällen können die Metallhydridspeicher schlecht an die geometrischen Abmessungen der Geräte angepasst werden.

Aber auch sicherheitstechnische Aspekte sprechen für Metallhydridspeicher. Durch die mit der Entladung verbundene Abkühlung des Speichers wird nur ein definierter Wasserstoffstrom abgegeben. Bei einem möglichen Defekt kühlt sich der Speicher selbst ab und es kann nicht der gesamten Speicherinhalt innerhalb kurzer Zeit freigegeben werden /DBT 01/.

Einfache Metallhydridspeicher bestehen aus einer Druckhülle, dem Metallhydridpulver, einem Feinstaubfilter und einem Ventil. Bei höheren Leistung (z.B. Pkw) ist ein komplexerer Aufbau mit Wärmetauscher notwendig, um die erforderliche Wärmemenge bei der Entladung bereitstellen zu können.

## 5.3 Direkt-Methanol-Brennstoffzelle

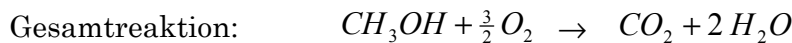
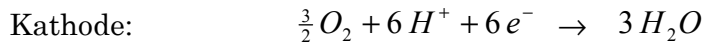
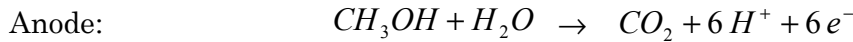
### 5.3.1 Funktionsweise

Für die Direkt-Methanol-Brennstoffzelle werden heutzutage die gleichen Polymermembranen verwendet, die bei der PEM-Brennstoffzelle zum Einsatz kommen. Diese Membranen zeichnen sich vor allem durch eine hohe Protonenleitfähigkeit aus. Sie haben jedoch den Nachteil, dass ein nicht unerheblicher Anteil des Methanols ungenutzt von der Anode zur Kathode gelangen kann. Dieser so genannte „Methanol-Crossover“ führt zu einer verringerten Potenzialspannung zwischen den Elektroden und senkt den Wirkungsgrad des Systems. Aus diesem Grund wird intensiv an alternativen Membranen geforscht, die für den Einsatz in der DMFC besser geeignet sind.

Als Katalysatormaterial wird auf der Anodenseite eine Platin-Ruthenium-Legierung verwendet. Diese ermöglicht die thermisch stark gehemmte Methanoloxidation bei Raumtemperatur und verhindert, dass Zwischenprodukte der Reaktion die Katalysator-

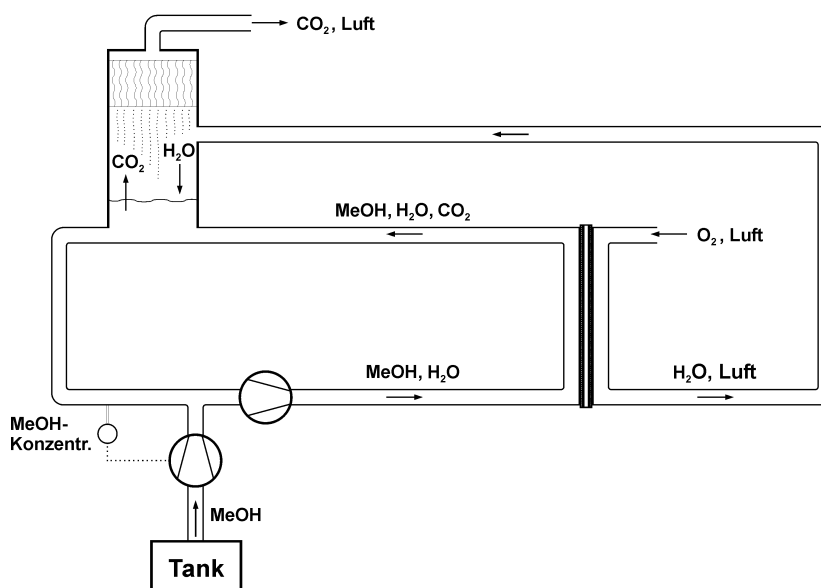
aktivität herabsetzen. Auf der Kathodenseite wird meist reines Platin eingesetzt, das sich auch in der PEMFC als optimales Katalysatormaterial für die Sauerstoffreduktion erwiesen hat.

Die chemischen Reaktionen in der DMFC können stark vereinfacht durch folgende Gleichungen dargestellt werden:



Die elektrische Leistung der derzeit verfügbaren DMFC-Anlagen liegt im Bereich von wenigen Watt bis ca. 5 kW<sub>el</sub>. Die im Gegensatz zur PEM-Brennstoffzelle geringere maximale Leistung verdeutlicht in etwa den Entwicklungsrückstand der DMFC. Es gibt jedoch große Bemühungen, Membranen und Katalysatoren speziell für die Direkt-Methanol-Brennstoffzelle zu entwickeln, da aufgrund des flüssigen und damit leicht handhabbaren Brennstoffs die DMFC besonders für mobile und portable Anwendungen interessant ist.

Niedrige Leistungen können mit passiven Brennstoffzellensystemen realisiert werden, bei denen die Methanol- und Luftversorgung alleine auf physikalischen Mechanismen (Konvektion, Diffusion) beruht. Bei größeren Leistungen (ab ca. 10 W) sind aktive mechanische Elemente wie ein Ventilator für die Luftversorgung und eine Methanolpumpe notwendig. In jedem Fall muss die CO<sub>2</sub>-Abtrennung aus dem MeOH-H<sub>2</sub>O-Kreislauf der Anode und die Rückführung von MeOH-H<sub>2</sub>O-Gemisch aus der Kathode konstruktiv oder mit einem Gas- bzw. Flüssigkeitsabscheider realisiert werden. Dies ist notwendig, um die hohe Energiedichte des Methanols ausnutzen zu können. Das prinzipielle Verfahrensschema der Methanolregelung ist in **Abbildung 5-2** dargestellt.

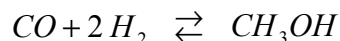
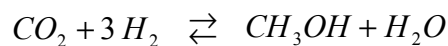


**Abbildung 5-2:** Verfahrensschema des Methanol-Wasser-Kreislaufes einer Direkt-Methanol-Brennstoffzelle

Ein Wasser-Methanol-Gemisch wird auf der Anodenseite der DMFC im Kreislauf geführt. In der Brennstoffzelle erfolgt durch die Reaktion eine Abreicherung des Methanols, das entstehende Kohlendioxid wird mit dem Gemisch abtransportiert und in einem Gasabscheider abgetrennt. Im Gasabscheider erfolgt auch eine Abtrennung des Produktwassers aus dem Kathodenabgas, so dass dem Brennstoffkreislauf dieses Produktwasser zugeführt wird und dort das bei der Anodenreaktion verbrauchte Wasser ersetzt. Auch Methanol-Wasser-Gemisch, das durch die Membran gelangt, wird hier rückgeführt. Nach Bestimmung der Methanolkonzentration im Gemisch, kann aus dem Tank Brennstoff zudosiert werden. Aufgrund des Methanol-Crossovers sollte die Methanolkonzentration in der Zelle aber nicht höher als ca. 5-Vol.-% sein.

### 5.3.2 **Methanolherstellung**

Methanol ist eines der wichtigsten Produkte der chemischen Industrie und wird als Grundstoff z.B. für Formaldehyd, Essigsäure oder Kunststoffe auf Acrylsäurebasis (PET) benötigt. In den USA wird zudem ein erheblicher Teil zu Tertiär-Butyl-Methyl-Ether (MTBE) verarbeitet, das als Zusatz für Benzin verwendet wird /MET 02/. Weltweit wurden im Jahr 2000 ca. 31 Mio. t Methanol produziert /MET 01/. Die Herstellung von Methanol erfolgt mittels katalytischer Dampfreformierung aus schwefelarmen Synthesegas, welches zuvor meist aus Erdgas gewonnen wurde /RÖM 95/. Die chemischen Reaktionen bei der Methanolherstellung mittels Dampfreformierung lauten:



Zur Reinigung durchläuft das Methanol anschließend zwei Destillationskolonnen.

In den letzten Jahren sind mehrere größere Methanolwerke in Betrieb gegangen, in denen sonst nicht verwertbare Begleitgase aus der Erdölförderung genutzt werden. Diese Gase dürfen in vielen Ländern nicht mehr abgefackelt oder abgeblasen werden und stehen praktisch kostenlos zur Verfügung /SCHI 97/.

Als Massenprodukt der chemischen Grundstoffindustrie ist der Preis für Methanol sehr niedrig und liegt bei 0,15 – 0,18 US \$ pro Liter (1997) /EPA 98/. Für den Einsatz in Brennstoffzellen wird jedoch sehr reines Methanol benötigt, um den Katalysator vor Vergiftung durch Verunreinigungen zu schützen. Erste Abschätzungen der Kosten für eine Methanolpatrone führen bei der Einführung zu einem Preis für den Endkunden von ca. € 10,- je Liter Methanol /SFC 02/.

### 5.3.3 **Methanolspeicherung**

Die Speicherung von Methanol ist weit weniger aufwendig, als die von Wasserstoff. Es können einfache Kunststofftanks eingesetzt werden, wobei jedoch auf die Methanolbeständigkeit zu achten ist. Die Methanol-Tankpatronen können mit Ventilen ähnlich denen von Tintenpatronen herkömmlicher PC-Drucker ausgestattet werden, so dass ein Austreten von Tropfen oder Dämpfen nahezu ausgeschlossen ist. Dies ist notwendig, da Methanol eine gewisse Toxizität besitzt und deshalb auch der Hautkontakt mit flüssigen oder das Einatmen von dampfförmigem Methanol vermieden werden sollte. Die Gefährdung ist jedoch nicht größer als bei Benzin- oder Dieselkraftstoffen, die im großen Mengen von den Verbrauchern benutzt werden /SCHI 97, HEB 01b/.



Die Energiespeicherdichte von Methanol liegt mit 5,6 kWh/kg bzw. 4,42 kWh/l deutlich höher als bei Metallhydriden zur Wasserstoffspeicherung /BÜN 01/. Bei Methanoltanks ist die Energiedichte, je nach verwendetem Kunststoff und Komplexität des Tanks, nur geringfügig niedriger als von reinem Methanol. Studien und erste Prototypen von Methanolspeichern gibt es z.B. von den Firmen Manhattan Scientific, Medis, Motorola und Smart Fuel Cell (SFC).

## 5.4 Hersteller- und Literaturrecherche

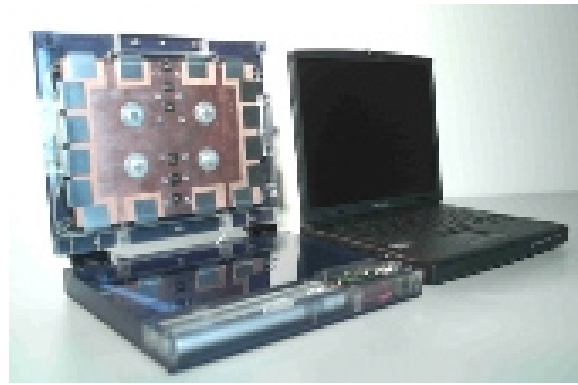
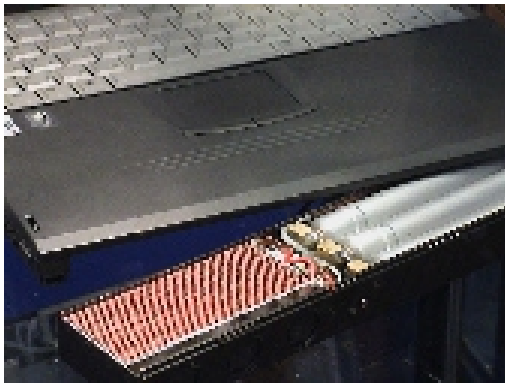
Im Bereich der Brennstoffzellensysteme für portable und stationäre Kleingeräte ist eine Vielzahl von Forschungseinrichtungen und Firmen weltweit tätig. In **Tabelle 5-2** sind beispielhaft einige Institute und in **Tabelle 5-3** einige Hersteller aufgeführt.

**Tabelle 5-2:** Auf dem Gebiet der portablen Brennstoffzellen tätige Forschungseinrichtungen (Auswahl)

Forschungseinrichtung	Land	BZ-Technik	Anwendungen
Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, DLR www.dlr.de/TT/electrochem	D	PEMFC, DMFC	portabler Stromgenerator (H <sub>2</sub> )
Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE www.ise.fhg.de	D	PEMFC	Camcorder, Notebook (in Zusammenarbeit mit CETI und LG Electronics)
Los Alamos National Laboratories www.lanl.gov/worldview	USA	PEMFC, DMFC	portabler Stromgenerator für militärische Zwecke (MeOH)
Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung, ZSW www.zsw-bw.de	D	PEMFC, DMFC	Ladestation Mobiltelefon, Taschenlampe, portabler Stromgenerator, modulare Stacks

In Deutschland ist hier vor allem das Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (FhG ISE) in Freiburg zu nennen, das in enger Zusammenarbeit mit Industriepartnern (LG Electronics, CETI) PEMFC-Systeme für Camcorder und Notebooks entwickelt hat.

In **Abbildung 5-3 links**, ist ein komplett in das Akkufach des Notebooks integriertes Brennstoffzellensystem mit einer Spitzenleistung von 50 W und drei Metallhydridspeichern mit einem Energieinhalt von 40 Wh dargestellt. **Abbildung 5-3 rechts**, zeigt einen Prototyp eines Laptops mit einer Brennstoffzelle in flacher Bauweise, die im Bereich hinter dem TFT-Display des Laptops integriert werden kann.



**Abbildung 5-3:** Brennstoffzellenintegration in Laptops vom Fraunhofer ISE  
links: PEM-Brennstoffzelle und Metallhydridspeicher,  
rechts: Brennstoffzelle in flacher Bauweise hinter dem TFT-Display

Auch das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) in Ulm und das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Stuttgart haben Modellanwendungen vorgestellt, und damit die prinzipielle Realisierbarkeit von Brennstoffzellensystemen für Kleingeräte demonstriert.

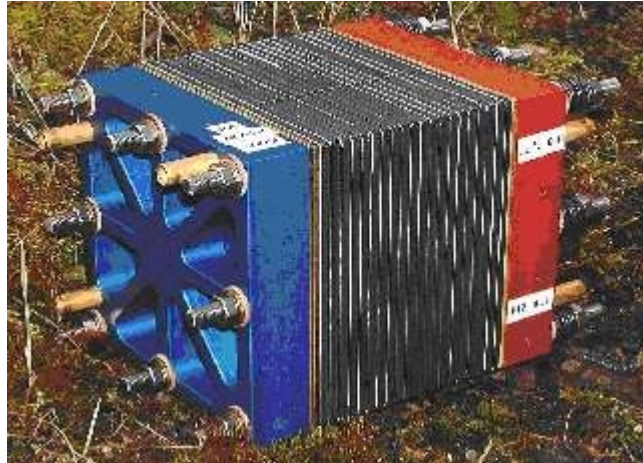
Am ZSW wurde ein zylindrisches Brennstoffzellensystem mit dem Durchmesser einer handelsüblichen Monozelle entwickelt. Das in **Abbildung 5-4** dargestellte System besteht aus einem 3-Zellen-Stack mit einer Nennspannung von 1,5 V. Das System verfügt über einen integrierten Metallhydridspeicher mit einer Speicherkapazität von 20 NI Wasserstoff. Die Luftversorgung erfolgt ohne zusätzliche Aggregate durch geeignet gestaltete Kanäle und ermöglicht so einen völlig geräuschlosen Betrieb. Das System erlaubt eine Dauerleistung von 1 W und eine Spitzenleistung von 4 W /ZSW 03b/.



**Abbildung 5-4:** Autonomes Brennstoffzellensystem als Ersatz für konventionelle Batterien /ZSW 03b/

Daneben bietet das ZSW ein modulares System zum Aufbau leistungsangepasster Brennstoffzellenstacks. Diese sind in Filterpressenbauweise mit interner Verteilerstruktur für Gase und Kühlwasser hergestellt. **Abbildung 5-5** zeigt einen 20-zelligen Stack mit einer Nennleistung von 350 W bei 12 V.





**Abbildung 5-5:** 20-zelliger Brennstoffzellenstack /ZSW 03b/

Das Institut für Technische Thermodynamik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Stuttgart arbeitet an der Entwicklung von hocheffizienten Energiewandlungstechnologien. Für den Bereich der portablen und stationären Kleingeräte wurde das in **Abbildung 5-6** dargestellte PEMFC-System „Replacer“ mit integrierter Wasserstoffspeicherung als Batterieersatz zur Langzeit-Energieversorgung mit niedriger Leistung entwickelt. Das System hat eine Abgabeleistung von 200 W bei 12 V (Gleichstrom) oder 165 W bei 230 V (Wechselstrom), wobei ein paralleler 12 V- und 230 V-Betrieb mit entsprechend geringerer Leistung möglich ist.



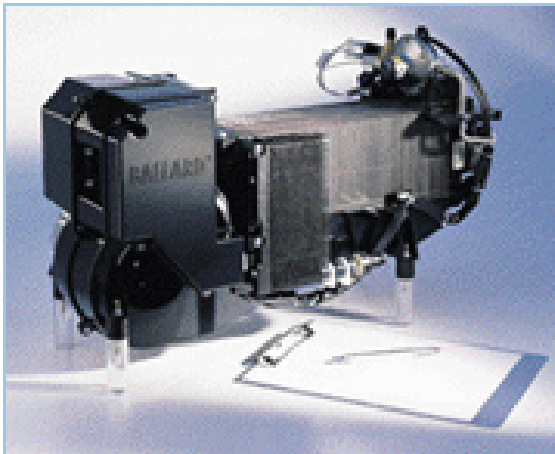
**Abbildung 5-6:** „Replacer“ vom DLR /DLR 03/

Die amerikanischen Los Alamos National Laboratories sind auf dem Gebiet der Direkt-Methanol-Brennstoffzelle sehr aktiv und entwickelten mit mehreren Partnern aus der Industrie, darunter die Firma Ball Aerospace, einen portablen Stromerzeuger für militärische Anwendungen.

**Tabelle 5-3:** Auf dem Gebiet der portablen Brennstoffzellen tätige Firmen

Firma	Land	BZ-Technik	Anwendungen
Avista www.avistalabs.com	USA	PEMFC	Stacks 100 W bis 5 kW
Ball Aerospace www.ball.com	USA	PEMFC, DMFC	Notebook, portable Stromgeneratoren mit 100 bzw. 1000 W
Ballard Power www.ballard.com	CAN	PEMFC, DMFC	portable Stromgeneratoren 100 bzw. 1000 W
Clean Energy Technologies, CETI www.ceti-fuelcell.com	KO	PEMFC	Notebook (in Zusammenarbeit mit ISE und LG Electronics)
Enable Fuel Cells www.enablefuelcells.com	USA	PEMFC	Stacks
Energy Related Devices www.energyrelated-devices.com	USA	DMFC	Mobiltelefon
Energy Visions www.energyvi.com	CAN	DMFC	Mobiltelefon
H2 Interpower www.h2-interpower.de	D	PEMFC	Stacks
H-Power www.hpower.com	USA	PEMFC	portabler Stromgenerator 250 W
Ida Tech www.idatech.com	USA	PEMFC	portabler Stromgenerator 1200 W (mit Stack von Ballard)
LG Electronics www.lge.com	KO	PEMFC	Notebook (in Zusammenarbeit mit ISE und CETI)
Mechanical Technologies www.mechtech.com	USA	DMFC	Mobiltelefon, Notebook
Medis www.medisel.com	ISR	DMFC	Mobiltelefon
Motorola www.motorla.com	USA	DMFC	Mobiltelefon
Samsung www.samsung.com	KO	PEMFC, DMFC	Mobiltelefon, Notebook
Smart Fuel Cell www.sfc.de	D	DMFC	Kamera, Mobile Office, Ampel
Sony www.sony.com	J	DMFC	
Toshiba www.toshiba.com	J	DMFC	Notebook

Die Hersteller von PEMFC-Systemen sind größtenteils in den USA oder Kanada ansässig und entwickeln Brennstoffzellen auch für mobile und stationäre Anwendungen. Ein Hauptakteur ist die Firma Ballard, die mit vielen Automobilherstellern kooperiert, aber auch Blockheizkraftwerke (ca. 250 kW<sub>el</sub> und ca. 1 kW<sub>el</sub>) herstellt. Im Bereich kleiner Leistungen hat Ballard im Jahr 2001 mit dem Nexa™ Power Module (siehe **Abbildung 5-7 links**) ein erstes Produkt vorgestellt, das in portablen und stationären Stromerzeugern zur Anwendung kommt und an OEM-Hersteller (Original Equipment Manufacturer) vertrieben werden soll.



**Abbildung 5-7:** Nexa™-Modul von Ballard und deren Anwendung AirGen bei Coleman Powermate

Das Gerät hat eine unregelmäßige Bruttoleistung von 1,2 kW<sub>el</sub> und wiegt 13 kg. Als Brennstoff wird gasförmiger Wasserstoff genutzt. Die Firma Coleman Powermate hat das NEXA™-Modul in den Notstromgenerator AirGen integriert (**Abbildung 5-7 rechts**), der für private, kommerzielle und industrielle Anwendungen konzipiert wurde. Dieser verfügt über eine Leistungsregelung und Blei-Säure-Akkumulatoren als Pufferbatterien (technische Daten siehe Anhang).

Erste Prototypen von DMFC-Systemen für die Versorgung von Mobiltelefonen und Notebooks wurden unter anderem von Medis El und SFC Smart Fuel Cell entwickelt. Auch diese Firmen planen nicht die eigenständige Herstellung von Produkten für den Endanwender, sondern wollen in Zukunft als Lieferant für OEM-Hersteller auftreten.

Die Firma SFC Smart Fuel Cell AG zeigte erstmals auf der CeBIT 2003 die in **Abbildung 5-8**, dargestellten Produkte.



**Abbildung 5-8:** Notebook-Dockingstation und „Marathon-Koffer“ von SFC

Links ist eine Designstudie einer Notebook-Dockingstation mit integrierter Direkt-Methanol-Brennstoffzelle zur Stromversorgung, die zusammen mit der Medion AG entwickelt wurde, und rechts ein Aktenkoffer, der mit einer externen Stromquelle auf DMFC-Basis zum mobilen Büro wird, zu sehen. Laut Hersteller ist geplant, sowohl die „Energy Docking Station“ und den „Marathon-Koffer“ ab dem nächsten Jahr (2004) auf den Markt zu bringen.

Die Firma Masterflex aus Gelsenkirchen präsentiert auf der Hannover-Messe 2003 ihren ersten seriennahen Prototypen einer wasserstoffbasierten Mini-Brennstoffzelle mit einer Nennleistung von 50 W. Der Prototyp wurde in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE entwickelt. Die Brennstoffzelle von Masterflex soll zukünftig portable Anwendungen, wie z.B. Notebooks, Drucker etc. in mobilen Bürosystemen netzunabhängig mit Strom versorgen und damit neue Anwendungsperspektiven bieten (siehe **Abbildung 5-9**).



**Abbildung 5-9:** Rollkoffersystem für Notebook und Wasserstoff-Brennstoffzelle von Masterflex

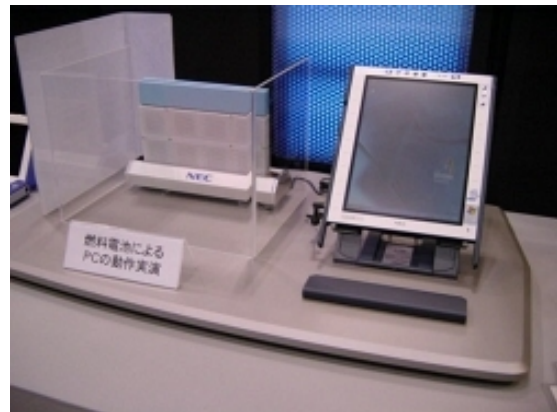


Auch die Firma Toshiba präsentiert eine Notebook-Dockingstation (**Abbildung 5-10**) mit einer Direkt-Methanol-Brennstoffzelle, die von Toshiba selbst entwickelt wurde. Die mögliche Dauerleistung von 12 W lässt allerdings auf eine Auslegung des Systems auf Sub-Notebooks mit energieoptimiertem Betrieb schließen. Für vollwertige Notebooks stellt das System eine Unterstützung und Laufzeitverlängerung des Akkus dar.



**Abbildung 5-10:** Notebook-Dockingstation von Toshiba mit DMFC

Das Beispiel einer DMFC vom japanischen Elektronikkonzern NEC in **Abbildung 5-11 links** zeigt anschaulich, in welchen Größen Brennstoffzellensysteme herstellbar sind. Ein DMFC-System, das näher an der Serienreife ist, ist in **Abbildung 5-11 rechts** dargestellt und wurde im Februar 2003 erstmals der Öffentlichkeit präsentiert. Das System hat eine für einen Tablet-PC ausreichende Dauerleistung von 12 W, eine Spitzenleistung von 19 W und eine Kapazität, die einen drei bis vierstündigen Betrieb ermöglicht. Mit einer Marktreife des Systems wird nicht vor Ende 2004 gerechnet.



**Abbildung 5-11:** DMFC-Systeme von NEC

Zurzeit ist eine Reihe kleinerer Unternehmen auf dem Gebiet der Brennstoffzellenforschung sehr aktiv. Diese Firmen sind aber in der Regel nicht in der Lage, die sehr großen Stückzahlen, die für eine kostengünstige Produktion notwendig sind, zu produzieren. Große Batterie- und Elektronik-Hersteller hingegen treten weniger aggressiv mit ihren Forschungsergebnissen an die Öffentlichkeit, besitzen aber die notwendigen finanziellen Mittel, große Produktionsstraßen aufzubauen und können sich auch durch Firmenübernahmen notwendiges Know-how zukaufen.

Generell lässt sich sagen, dass enge Zusammenarbeiten zwischen Brennstoffzellenherstellern und großen Elektronikkonzernen den möglichen Einsatz der Brennstoffzellentechnik im schnell wachsenden Markt der Informations- und Kommunikationsgeräte vorantreiben können.

## 5.5 Analyse der notwendigen Infrastruktur

Für eine zentrale Herstellung von Wasserstoff bzw. Methanol zur Versorgung von Brennstoffzellensystemen in portablen und stationären Kleingeräten ist angesichts der heute hergestellten Mengen dieser Energieträger (vgl. Kapitel 5.2.2 und 5.3.2) keine zusätzliche Infrastruktur notwendig. Sowohl Wasserstoff als auch Methanol sind wichtige Grundstoffe für die chemische Industrie und auch bei einer vollständigen Substitution aller batteriebetriebenen Kleingeräte würde der zusätzliche Bedarf nur ein Bruchteil der heute hergestellten Mengen darstellen.

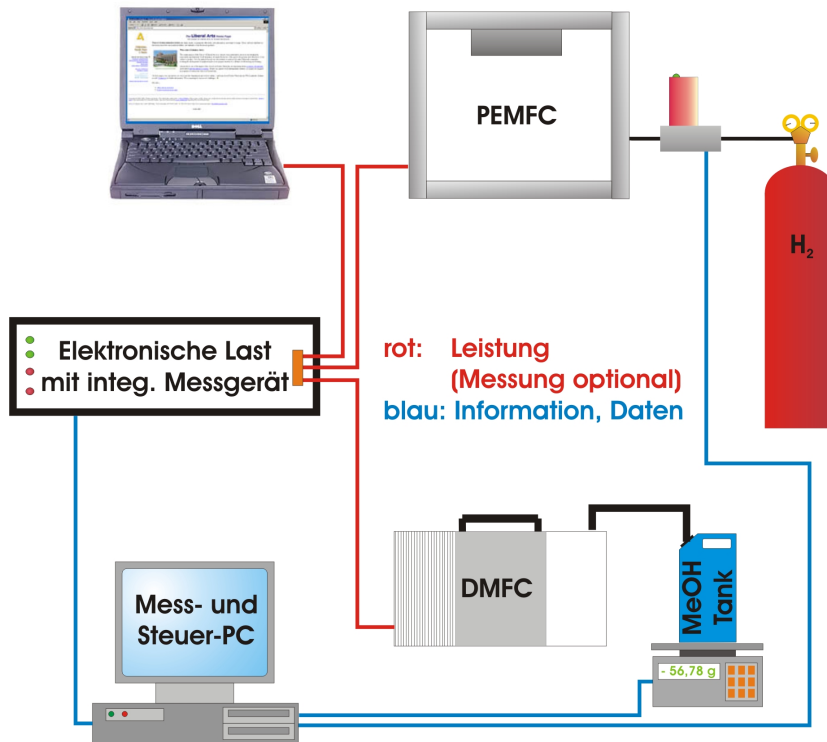
Die heutzutage für Lehr- und Demonstrationszwecke verwendeten Metallhydridspeicher müssen nach der Entladung an den Händler oder Hersteller zurückgeschickt werden. Dort werden sie über eine Wasserstoff-Druckflasche beladen. Den günstigen Erzeugungsbedingungen für Wasserstoff in zentralen Großanlagen stehen die Aufwendungen für den Vertrieb der Druckgasflaschen und der Metallhydridspeicher gegenüber. Im Falle eines zukünftigen Einsatzes von Wasserstoff für portable Kleingeräte wäre ein Pfandsystem für Metallhydridspeicher möglich, wie es heutzutage bei den Kohlendioxidpatronen für die Soda-Wasserzubereitung praktiziert wird. Alternativ ist eine dezentrale Bereitstellungskette denkbar, bei der der Anwender selbst den Wasserstoff mit Hilfe eines kleinen Elektrolyseurs herstellt. Zwar werden solche Elektrolyseure noch nicht angeboten, sie sind jedoch in der Entwicklung und werden sich möglicherweise aufgrund der bequemerer Handhabung gegenüber einem Pfandsystem durchsetzen /ANG 00/.

Für die Versorgung mit Methanol sollte eine zentrale Bereitstellungskette aufgebaut werden, bei der das Auffüllen der Patronen von Fachpersonal durchgeführt wird, da aus Gesundheitsgründen der Kunde kein offenes Methanol handhaben sollte. Die Methanolpatronen können dabei für ein Einweg- oder ein Mehrweg-System konzipiert werden. Zum Beispiel plant die Firma SFC, die Versorgung ihrer Brennstoffzellensysteme mit Einweg-Patronen zu realisieren, da ein Mehrwegsystem aus ökonomischer und ökologischer Sicht nicht sinnvoll sei /SFC 02/. Die Einweg-Patronen aus kostengünstigen Kunststoffmaterialien können entleert im Hausmüll entsorgt werden. Wie das Beispiel von Farbpatronen heutiger Tintenstrahldrucker zeigt, ist aber auch bei höherwertigen Materialien oder einer aufwendigen Konstruktion ein Mehrwegsystem nicht zwangsläufig. Hier ist der Druckkopf teilweise in die Patrone integriert, dennoch wird die entleerte Farbpatrone nicht wieder verwendet.

## 6 Messtechnische Untersuchungen

### 6.1 Prüfstands Aufbau

Die messtechnischen Untersuchungen an elektrischen Kleingeräten und Brennstoffzellen wurden an einem Prüfstand durchgeführt, der an der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. aufgebaut ist (s. **Abbildung 6-1**).



**Abbildung 6-1:** Brennstoffzellenprüfstand

Zentraler Bestandteil ist eine elektronische Last mit integrierter hochdynamischer Leistungsmessung. Hiermit können Lastgänge von Kleingeräten aufgenommen und Brennstoffzellensysteme anhand frei programmierbarer oder gespeicherter Lastgänge getestet werden. Entsprechend dem Einsatzbereich in Kleingeräten kann die elektronische Last eine Leistung von maximal 200 W aufnehmen.

Für die Bestimmung des Wasserstoffverbrauchs von PEM-Brennstoffzellen kommt ein Durchflussmesser (Bronkhorts El-Flow F111C) mit einem Messbereich von 0,08 bis 4 NI/min<sup>5</sup> zum Einsatz. Der Methanol-Verbrauch von Direkt-Methanol-Brennstoffzellen wird durch Wägung des Tanks bestimmt, da Durchflussmessgeräte für die hier vorkommenden kleinen Flüssigkeitsvolumina (ca. 0,6 ml/min) nicht geeignet sind und durch die Waage (Precisa XB 4200 C) ein größerer Messbereich mit hoher Genauigkeit abgedeckt werden kann. Die technischen Daten des Brennstoffzellenprüfstands sind in **Tabelle 6-1** zusammengefasst.

<sup>5</sup> NI/min: Normliter pro Minute bei Standardbedingungen ( $p = 101.325 \text{ Pa}$ ,  $T = 273,15 \text{ K}$ )

Für die Durchführung von Versuchen bei verschiedenen Umgebungstemperaturen steht eine Klimakammer zur Verfügung, die einen Temperaturbereich von  $-25\text{ °C}$  bis  $+60\text{ °C}$  abdecken kann. Die Steuerung und Messdatenerfassung der elektronischen Last sowie von Durchflussmesser und Waage erfolgt über einen PC.

**Tabelle 6-1:** Geräteübersicht Brennstoffzellenprüfstand

Gerät	Wert	Einheit
<b>Messwertgeber</b>		
zeitliche Auflösung	450	$\mu\text{s}$
Messbereich Strom	0 ... 10	A
Auflösung	0,5	mA
Genauigkeit	$\pm 0,05$	% Momentanwert
Messbereich Spannung	0 ... 20	V
Auflösung	1	mV
Genauigkeit	$\pm 0,05$	% Momentanwert
<b>Elektronische Last</b>		
Leistungsaufnahme	0 ... 200	W
<b>H<sub>2</sub>-Durchflussmesser</b>		
Messbereich	0,08 ... 4,0	Nl/min
Genauigkeit	$\pm 0,5$	% Momentanwert
	$\pm 0,1$	% Endwert
<b>Methanol-Waage</b>		
Messbereich	0 ... 4,2	kg
Auflösung	0,01	g
Genauigkeit	0,1	g
<b>Temperatursensor</b>		
Messbereich	- 50 ... + 100	$^{\circ}\text{C}$
<b>Klimakammer</b>		
Temperaturbereich	- 25 ... + 60	$^{\circ}\text{C}$
<b>Wasserstoff- / Methanolsensor</b>		

## 6.2 Lastprofile ausgewählter Kleingeräte

### 6.2.1 Notebooks

Die messtechnische Bestimmung eines typischen Notebook-Lastganges wurde an einem Acer Travelmate 632XC vorgenommen. Das Gerät ist mit einem Mobile Intel® Pentium® 4 Prozessor-M 1,6 GHz, 256 MB SDRAM Arbeitsspeicher<sup>6</sup>, einer 20 GB Festplatte, einem kombinierten DVD-CDRW-Laufwerk<sup>7</sup> und einem 56 kbps Modem<sup>8</sup> ausgestattet. Das XGA<sup>9</sup> TFT-Display hat eine Bildschirmdiagonale von 14.1" (entspricht 35,8 cm). Entsprechend dem professionellen Einsatz wurde das Gerät zusätzlich mit

<sup>6</sup> SDRAM: Synchronous Dynamic Random Access Memory

<sup>7</sup> DVD: Digital Versatile Disk; CDRW: Compact Disk Rewriteable

<sup>8</sup> kbps: kilobit per second

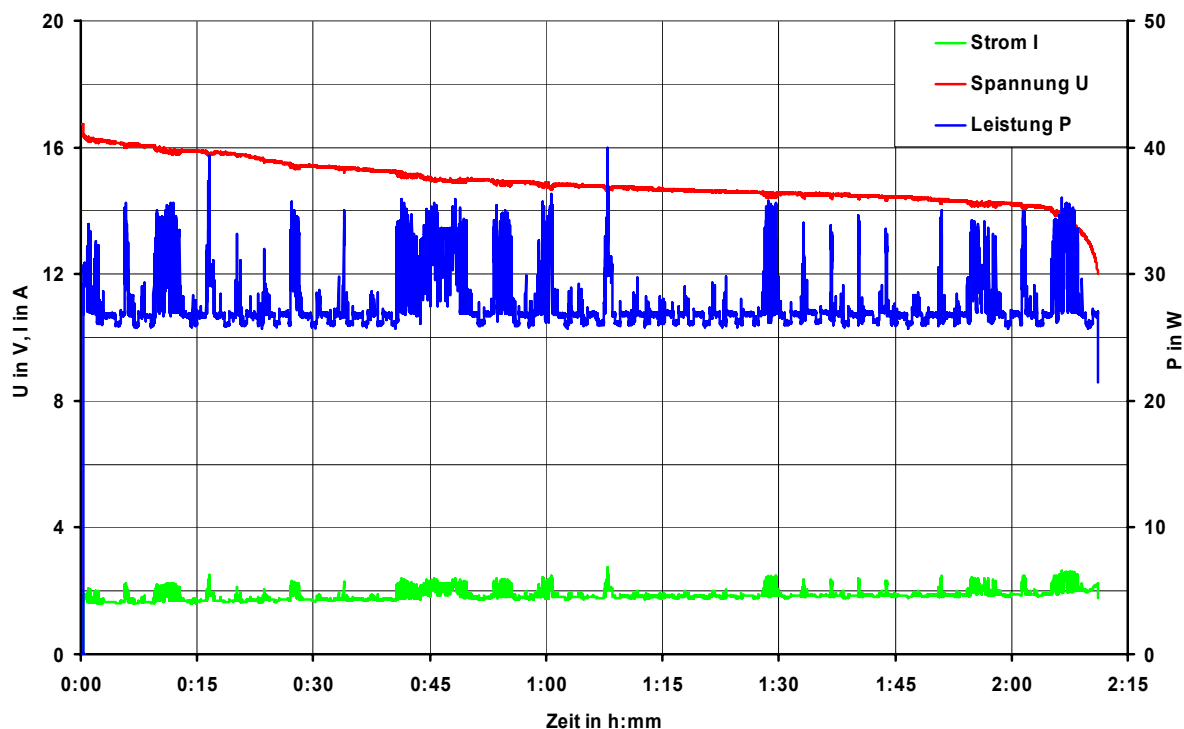
<sup>9</sup> XGA: Extended Graphics Adapter



einer 10/100 LAN-Netzwerkkarte<sup>10</sup> und einem SmartCard-Leser ausgestattet. Die standardmäßige mobile Stromversorgung erfolgt über einen 14,8 V Lithium-Ionen Akku mit 4000 mAh. Als Betriebssystem ist Microsoft Windows 2000 installiert.

Der Stromverbrauch von Notebooks wird zum einen durch die verwendete Hardware, zum anderen aber auch durch die Leistungsanforderungen während des Betriebs bestimmt. Je nach Prozessorlast, Anzahl der Festplattenzugriffe oder Tastaturanschläge und damit auch vom Benutzer abhängig, ergibt sich ein unterschiedlicher Stromverbrauch. Da die modernen Energiesparprogramme der Notebooks bereits die Zeit zwischen zwei Tastenanschlägen nutzen, kann nur durch ein automatisch simuliertes Benutzerprofil ein reproduzierbarer Lastgang aufgenommen werden.

Für die Simulation eines typischen Notebook-Benutzerprofils wurde deshalb die Software Business Winstone 2001 BatteryMark der Firma eTesting Labs verwendet. Dieses Programm zur Bestimmung der maximalen Laufzeit von Notebook-Akkus führt diverse Anwendungen (MS Office, Norton Antivir etc.) auf dem Rechner aus und bearbeitet Dokumente, um so das Verhalten eines Nutzers zu simulieren. Somit lassen sich sehr gut reproduzierbare Lastgänge erzeugen, sodass die Vergleichbarkeit der Messungen gewährleistet ist.

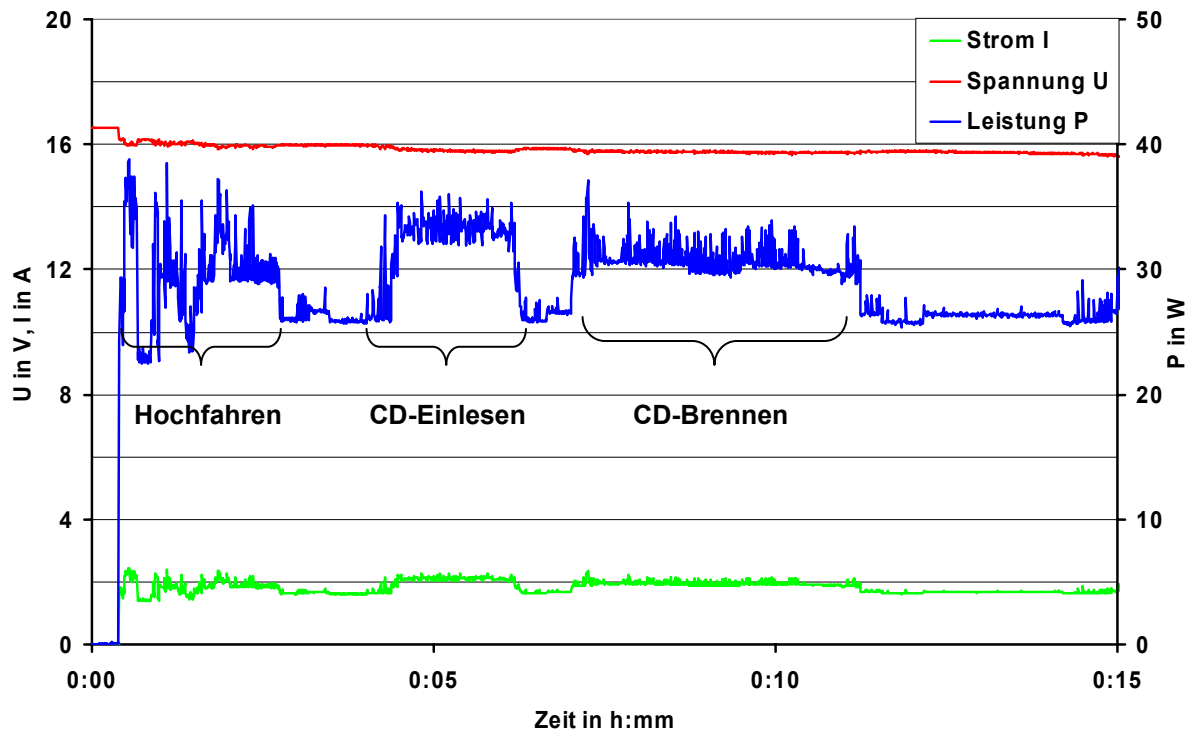


**Abbildung 6-2:** Notebook-Lastgang bei Office-Anwendungen, simuliert mit BatteryMark

**Abbildung 6-2** zeigt einen Lastgang, der mit diesem Programm generiert wurde. Die Spannung des Akkus fällt dabei von 16,7 V auf einen Wert von 12 V, bei dem das Notebook automatisch abschaltet. Um den Leistungsbedarf zu decken, steigt der Strom entsprechend von ca. 1,7 A auf ca. 2,2 A an.

<sup>10</sup> LAN: Local Area Network

Sehr deutlich ist die gleich bleibende Grundlast von ca. 27 W zu erkennen, die der Leistungsaufnahme im Leerlauf entspricht. Durch Festplattenzugriffe, Tastatureingaben und durchzuführende Berechnungen treten Spitzenlasten von bis zu 40 W auf. Insgesamt kann der Lastgang aber als relativ gleichmäßig bezeichnet werden.



**Abbildung 6-3:** Lastgang CD-Brennen

Zwei Betriebsarten werden durch BatteryMark nicht simuliert, stellen jedoch aufgrund ihrer hohen Leistungsanforderungen für Prozessor und Stromversorgung sehr interessante Anwendungsfälle dar: das Brennen einer CD (**Abbildung 6-3**) und das Abspielen einer DVD (**Abbildung 6-4**) mit Hilfe des integrierten DVD-CDRW-Laufwerkes. Ein typisches Nutzerverhalten für diese Anwendungen wurde mit der Software „Macro Scheduler“ aufgenommen, wodurch die entsprechenden Lastgänge reproduzierbar gemessen werden konnten.

Beim CD-Brennen ist deutlich der erhöhte Leistungsbedarf beim Einlesen und Schreiben auf die Festplatte (ca. 33 W) und beim Brennen selbst (ca. 31 W) zu erkennen. Beim Abspielen der DVD liegt die durchschnittliche Leistungsaufnahme bei ca. 32 W. Dabei ist anzumerken, dass bei diesen Betriebszuständen zwar die durchschnittliche Leistungsaufnahme gegenüber dem Normalbetrieb erhöht ist, die Lastgänge jedoch gleichmäßiger sind und weniger scharfe Lastspitzen auftreten.

Die Laufzeit von ca. 2 h 15 min, die mit dem 4,0 Ah Akku erreicht wird, entspricht der vieler anderer handelsüblicher Notebooks. Aus der Praxis ist bekannt, dass dies in den seltensten Fällen ausreicht und für den Benutzer nicht zufrieden stellend ist.

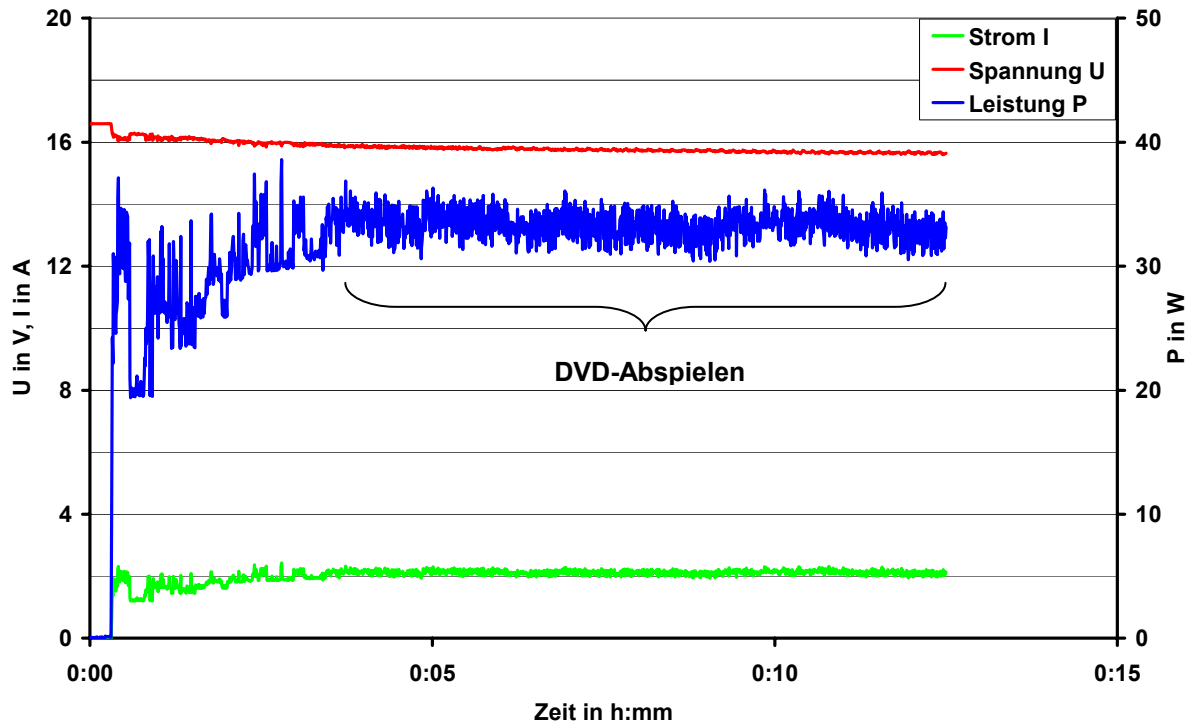


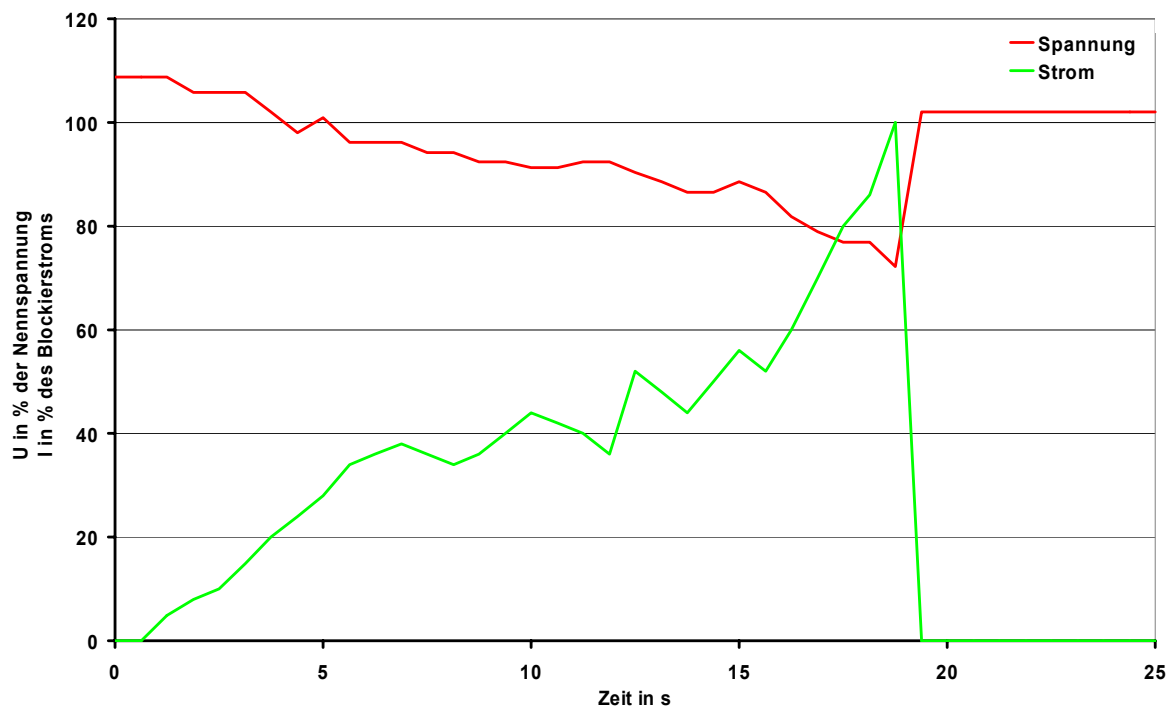
Abbildung 6-4: Lastgang DVD-Abspielen

### 6.2.2 Akkuschauber

Charakteristisch für den Lastgang von Akku-Werkzeugen ist der schnelle Lastanstieg und die damit verbundenen hohen Ströme. **Abbildung 6-5** zeigt den Lastgang eines Akkuschaubers beim Eindrehen einer Schraube in Holz bis zum Blockieren des Motors.

Innerhalb von wenigen Sekunden wird der Akku bis zum Blockierstrom (der Motor bleibt abrupt stehen) belastet. Dabei sinkt die Akkuspannung entsprechend deutlich unter die Nennspannung und liegt auch nach der Belastung kurze Zeit unterhalb der Nennspannung.

Der hier qualitativ dargestellte Lastgang eines Akkuschaubers tritt in ähnlicher Weise auch bei anderen Akku-Werkzeugen wie Akku-Bohrern und Kreissägen auf. Auch hier kann es durch Blockieren des Motors zu extremen Belastungen des Akkus kommen. Aber auch bei weniger anspruchsvollen Lastgängen treten ähnlich hohe Spitzenströme und dynamische Lastwechsel auf.

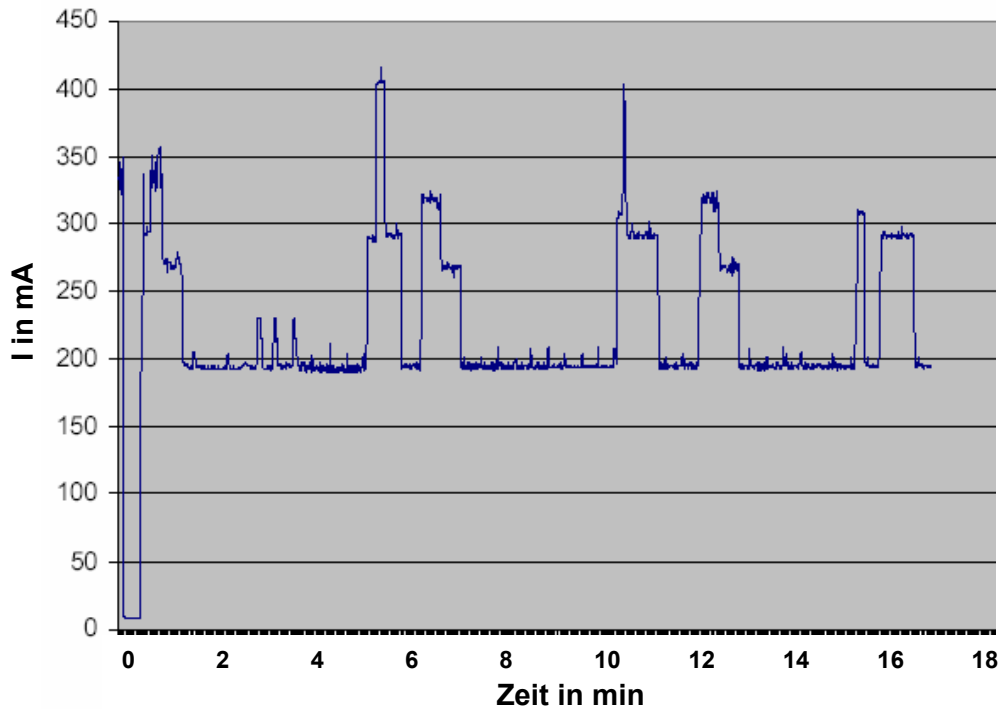


**Abbildung 6-5:** Lastgang eines Akkuschraubers bis zum Blockieren des Motors /MET 03/

### 6.2.3 Verkehrsnebenanlagen

Den typischen Lastverlauf einer modernen, Ereignis gesteuerten Verkehrsnebenanlage (12 V DC), die für den netzunabhängigen Betrieb konzipiert ist, stellt die **Abbildung 6-6** dar. Es ist der Stromverlauf über einen repräsentativen Zeitabschnitt von etwa einer viertel Stunde dargestellt. Der Grundlast von ca. 200 mA sind die durch Messung und SMS-Übertragung erzeugten Lastspitzen ca. 400 mA überlagert. Der Lastgang ist somit zwar relativ dynamisch, die Last steigt innerhalb weniger Sekunden um 100 %, für ein üblicherweise hier eingesetztes Hybridsystem aus einem 240 Ah Bleiakku und einem 150 W Photovoltaikmodul stellt er aber aufgrund der niedrigen Ströme kein Problem dar.

Der Lastgang von netzgekoppelten Anlagen gemäß den technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen der Bundesanstalt für Straßenwesen entspricht qualitativ dem hier dargestellten, jedoch liegt deren Leistungsaufnahme mit 15 W für die Grundlast und bis zu 25 W für die Spitzenlast deutlich höher. In einigen Fällen, meist bei modernen Sichtweitemessgeräten oder Windgebern, ist zusätzlich noch eine elektrische Heizung mit einer Leistung von bis zu 70 W eingebaut. Da die Leistung für die Heizung meist dann benötigt wird, wenn die Wettersituation für das PV-Modul und die Pb-Batterie ungünstig ist, stoßen die Photovoltaik-Bleiakku-Hybridsysteme schnell an die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit.



**Abbildung 6-6:** Messergebnis zur Stromaufnahme  $I$  einer Straßenwettermessstation /MIC 03/

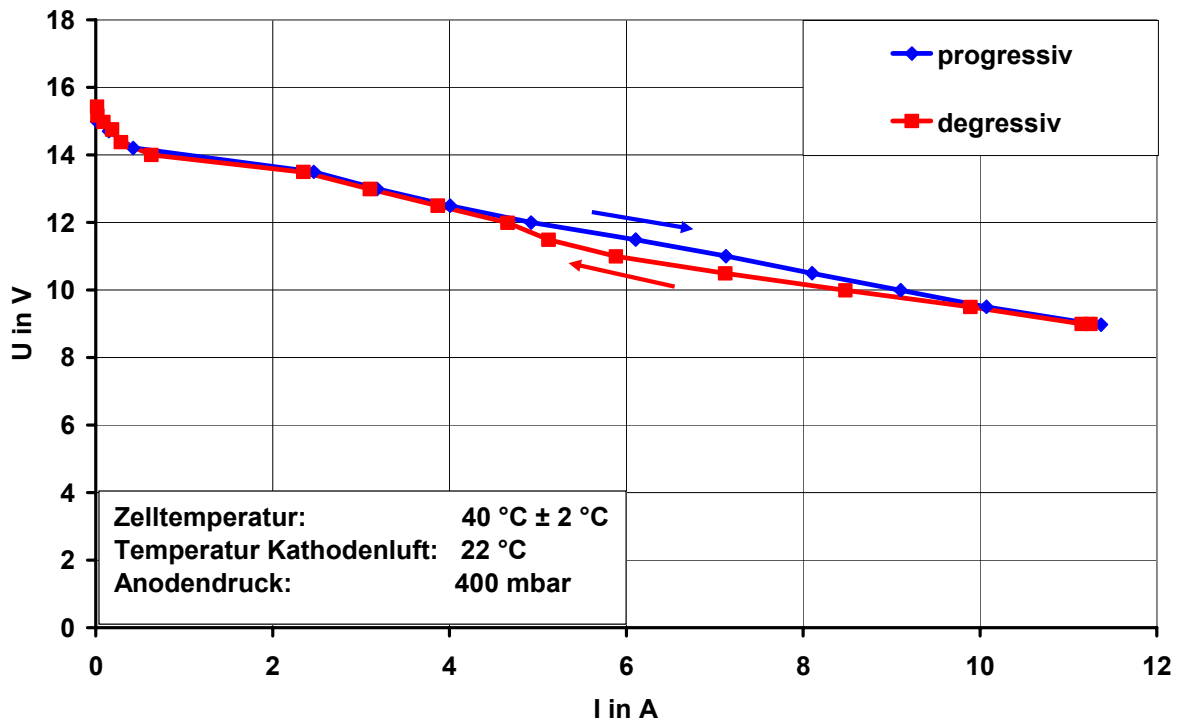
## 6.3 Messungen an Brennstoffzellensystemen

### 6.3.1 *Power Bag des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung*

Zur Beurteilung des technischen Potenzials von PEM-Brennstoffzellen im Leistungsbereich bis 1 kW dienen Messungen, die im Rahmen dieses Projektes an einem Prototyp des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) durchgeführt wurden. Der Power Bag, ein 12-V-System, basiert auf einem Stack mit 20 Zellen und einer maximalen Leistung von aktuell ca. 120 W. Als Speicher dient ein Metallhydridspeicher für 400 Normliter Wasserstoff, der für die Messungen durch eine 200-bar-Druckgasflasche ersetzt wurde. Die Luftversorgung des Stacks erfolgt über einen Ventilator. Die Regelung von Luftversorgung und Kühlung ist so ausgelegt, dass ein geringer Eigenstromverbrauch, reduzierte Geräuschemissionen und eine hohe Effizienz des Systems erreicht werden.

Bei der Betrachtung des Power Bag Systems ist zu berücksichtigen, dass es sich hierbei um einen Prototypen handelt, der den Technikstand des Jahres 2000 darstellt, und dass der Stack nicht mehr die ursprüngliche Leistung von 250 W abgeben kann. Ein Gerät dieser Größe (Volumen: 58 l) und mit diesem Gewicht (Masse inkl. Speicher: 28 kg) hätte nach dem heutigen Stand der Technik allein durch die Verbesserung des Stackdesigns eine Leistung von ca. 500 W /ZSW 03a/.

Die im Rahmen des Projektes gemessene U-I-Kennlinie des Systems ist in **Abbildung 6-7** dargestellt. Die Messung wurde bei einer Zelltemperatur von ca. 40 °C, einer Lufttemperatur von 22 °C und einem Anodenüberdruck von etwa 400 mbar durchgeführt.



**Abbildung 6-7:** U-I-Kennlinie ZSW Power Bag

Es zeigt sich der klassische Verlauf einer U-I-Kennlinie von Brennstoffzellen, der am Anfang der Kennlinie bei niedrigem Strom durch die Durchtrittsüberspannung und im weiteren Verlauf durch die Widerstandsüberspannung bestimmt ist. Der durch die Größe der Diffusionsüberspannung gekennzeichnete Bereich bei sehr hohen Strömen wird nicht erreicht, da durch die interne Regelung die minimale Klemmspannung des Systems begrenzt ist.

Der geringe Unterschied zwischen der aufsteigenden und der absteigenden Kurve deutet darauf hin, dass innerhalb der Zelle keine größeren Probleme bezüglich des Wassermanagements auftreten, die z.B. zu einem lokalen Austrocknen der Membran oder zu einer schlechten Sauerstoffversorgung aufgrund von Kondensatbildung führen. Die relativ einfache Kühlung des Stacks sowie die Zwangsbelüftung der Zelle, die wie auch die Wasserstoffzufuhr ohne Befeuchtung ausgelegt ist, sind für den Einsatz und den Temperaturbereich des Power Bags (max. 50 °C Stacktemperatur) ausreichend.

Entscheidend für die Effizienz des Systems und die maximale Betriebszeit einer Tankpatrone ist der Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems, dessen Verlauf über der Leistung für den ZSW Power Bag in **Abbildung 6-8** dargestellt ist.

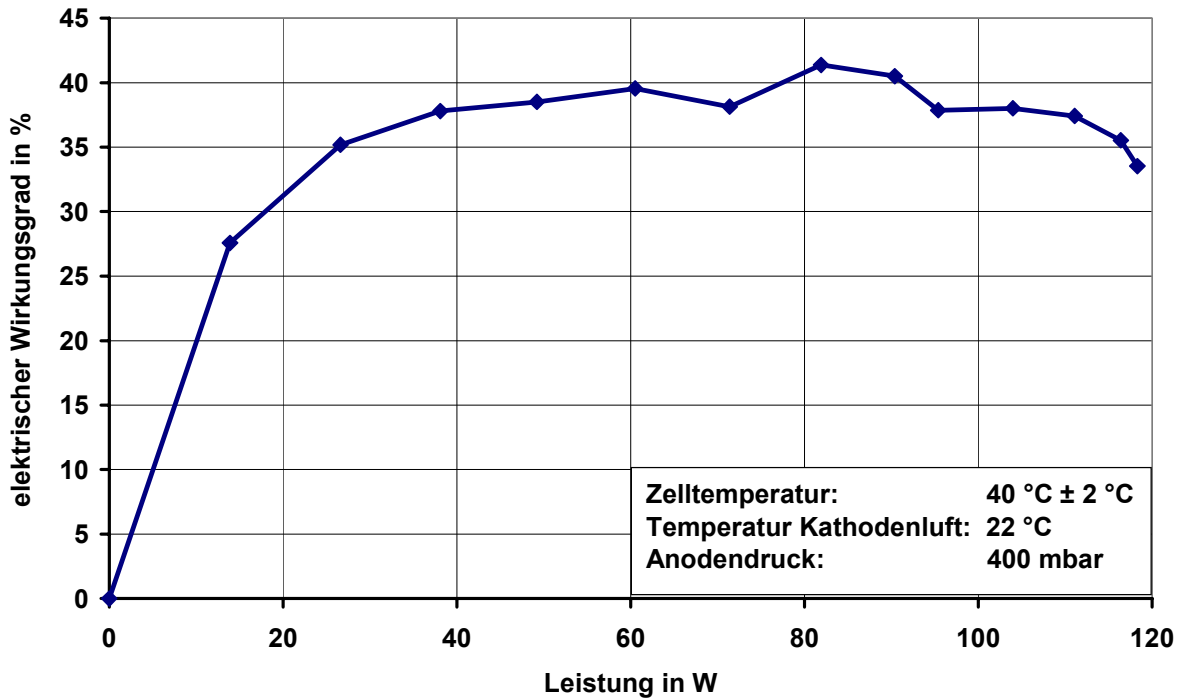


Abbildung 6-8: Wirkungsgradverlauf ZSW Power Bag

Von kleinen Leistungen kommend steigt der elektrische Wirkungsgrad bis 40 W sehr schnell und erreicht bei ca. 80 W seinen Höhepunkt von 42 %, bevor er anschließend wieder leicht abfällt. Geht man von einer maximalen Leistung von 120 W aus, erreicht das Power Bag schon bei ca. 25 % (entsprechend 30 W) den durchschnittlichen elektrischen Wirkungsgrad von 37 %. Bei einer Leistungsabgabe von ca. 70 W steigt die Zelltemperatur über 40 °C und die erste Stufe des Kühllüfters wird eingeschaltet, wodurch sich der Eigenverbrauch erhöht und damit der Wirkungsgrad verringert. Der deutliche Wirkungsgradabfall bei ca. 95 W wird durch die zweite Kühlerstufe verursacht, bei der die Lüfterdrehzahl erhöht wird.

Bei der Beurteilung des Wirkungsgrades ist darauf zu achten, dass das System schon eine erhebliche Laufzeit aufweist und damit die Aktivität des Katalysators sowie die Protonenleitfähigkeit der Membran nachgelassen haben. Festzuhalten ist noch, dass der Verlust von Brennstoff durch das Spülen der Anode (Purgen), das in einem festen Zeitintervall (während der Tests alle 10 min) durchgeführt wird, um durch die Membran diffundiertes Produktwasser zu entfernen, einen zu vernachlässigenden Einfluss auf den Wirkungsgrad des Systems hat.

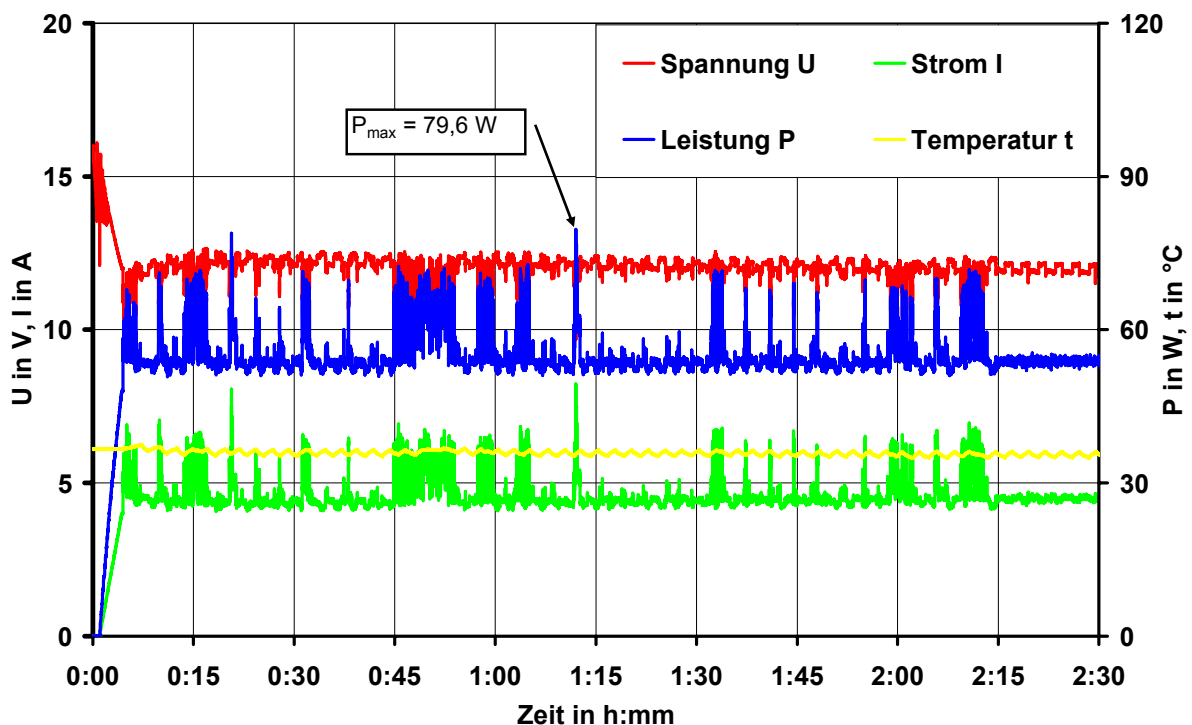
Für die Versorgung einer Anwendung mit Hilfe eines Brennstoffzellensystems ist neben der maximalen Leistung und dem Wirkungsgrad auch die Dynamik von großer Bedeutung. Wie an den Lastgängen in Kapitel 6.2 zu erkennen ist, treten bei akkubetriebenen Kleingeräten teilweise sehr große Leistungsänderungen innerhalb kurzer Zeit auf. Belastet man die Brennstoffzelle mit einer kontinuierlich zunehmenden Last, z.B. durch einen konstanten Stromanstieg, erreicht man sehr schnell die Leistungsgrenze des Power Bags. Der hochbelastende Lastgang des Akkuschaubers (vgl. Kapitel 3.3.2) könnte somit mit dem ZSW Power Bag nicht gedeckt werden.



Nun stellen die Lastgänge der Akkuwerkzeuge Extrembeispiele dar, wie sie nur bei wenigen Anwendungen vorkommen. In vielen Fällen tritt ein deutlich moderateres Lastprofil auf, bei denen der Leistungsbedarf mit einer Amplitude bis zu 20 % um einen Mittelwert schwankt. Einen solchen Verlauf hat z.B. der Lastgang eines Laptops. Abgesehen vom sehr raschen Stromanstieg beim Anschalten, liegt der Strombedarf im Mittel bei ca. 27 W und schwankt nach unten um max. 3 W und nach oben um bis zu 13 W.

Zur Beurteilung der Dynamik der Brennstoffzelle wurde ein solcher gemessener Notebook-Lastgang simuliert und dem System aufgeprägt. Berücksichtigt wurde dabei, dass die Maximalleistung der Brennstoffzelle mit ca. 120 W deutlich über der maximalen Leistungsaufnahme des Notebooks von ca. 40 W liegt. Die Ausgangsleistung eines angepassten Brennstoffzellensystems sollte somit für diesen Notebooktyp bei ca. 70 W liegen, um den Lastgang sicher abdecken zu können (vgl. auch /GEP 02/). Da das Power Bag nicht verändert werden konnte, wurde aus diesem Grund der Lastgang angepasst und linear hochskaliert, so dass entsprechend der maximalen Leistung von 120 W eine durchschnittliche Leistungsaufnahme von 54 W zu decken war. Einschränkend ist dazu anzumerken, dass hierbei davon ausgegangen wird, dass sich ein System mit halber Leistung in etwa so verhält wie das bestehende Power Bag. Dies ist sicherlich nur eine grobe Annäherung an die tatsächlichen Gegebenheiten. Einbaugröße, Wärmeableitung und andere Größen sind jedoch Faktoren, die im Rahmen dieser Untersuchung nicht berücksichtigt werden konnten.

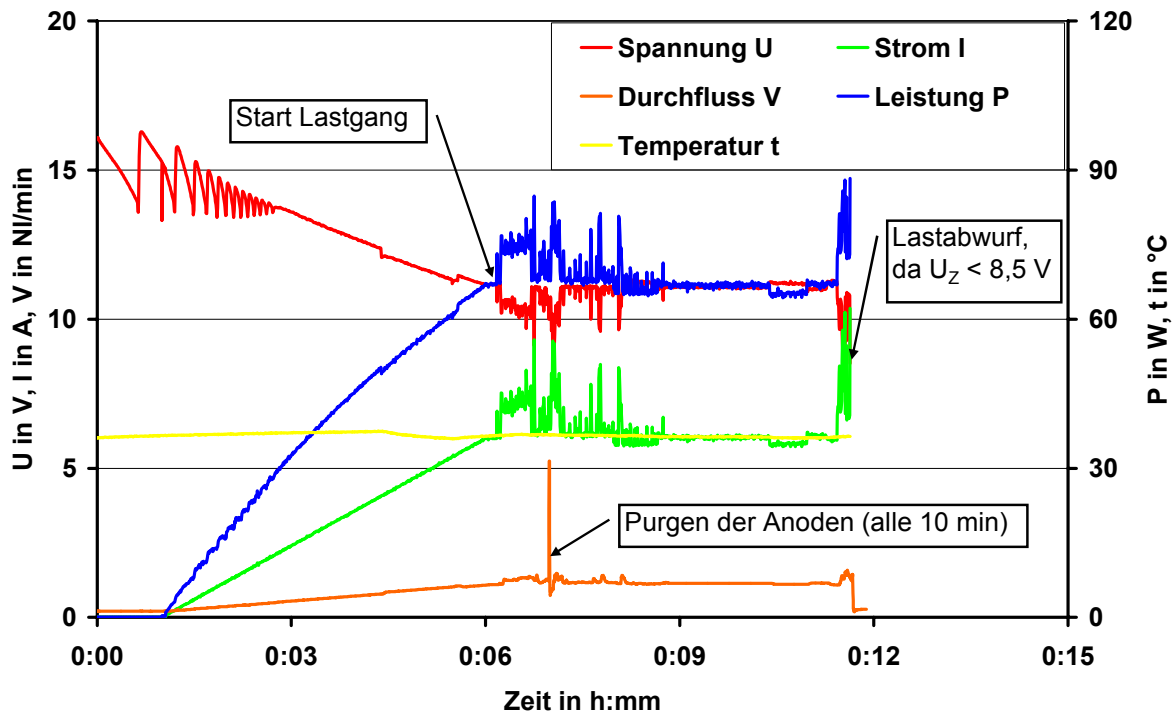
Wie in **Abbildung 6-9** zu erkennen ist, kann der Power Bag die dynamische Lastanforderung des simulierten Lastganges erfüllen und alle Lastspitzen abdecken.



**Abbildung 6-9:** Notebook Lastgang BatteryMark mit 2-facher Leistung

Der schnelle Lastanstieg des realen Anschaltvorgangs wurde hierbei jedoch nicht berücksichtigt. Hierfür wäre im Falle des Power Bags eine Pufferbatterie o.ä. notwendig. Bei einer geeigneten Dimensionierung eines modernen Brennstoffzellenstacks ist es aber möglich, auch den dynamischen Verlauf des Anfahrvorgangs zu decken

/GEP 02/. Auch **Abbildung 6-10** zeigt mit einer durchschnittlichen Leistung von ca. 70 W, dass die Dynamik des Brennstoffzellensystems einen begrenzenden Faktor darstellt und bei der Dimensionierung des Systems berücksichtigt werden muss.



**Abbildung 6-10:** Notebook Lastgang BatteryMark mit 2,5-facher Leistung

Auch hier wurde der schnelle Lastanstieg des Anfahrvorgangs durch eine flache Rampe überbrückt. Aber schon nach kurzer Zeit erfolgt ein Lastabwurf, da die Zellspannung aufgrund eines schnellen Lastwechsels unter 8,5 V fällt.

Somit kann festgehalten werden, dass die Versorgung eines Notebooks mit Hilfe eines Brennstoffzellensystems möglich ist, die Spitzenleistung des Stacks aber deutlich über der maximalen Lastanforderung des Laptops liegen muss.

### 6.3.2 Remote Power A 25 von Smart Fuel Cell

Die Firma SFC Smart Fuel Cell AG hat mit Ihrem Vorserienmodell SFC A 25 ein DMFC-System entwickelt, das nach den CE-Richtlinien und vom TÜV zertifiziert wurde und OEM-Kunden zur Erprobung bereitgestellt wird. Das Hybridsystem mit einem 25-W-Brennstoffzellenstack kann durch einen integrierten 4-Ah-Bleiakku eine Spitzenlast von bis zu 80 W abdecken. Die Nennspannung des Systems ist 12 V. Als Brennstoff wird reines Methanol verwendet, das in einem austauschbaren 2,5-l-Tank gespeichert wird.

Das System weißt drei verschiedene Betriebsweisen auf: „ON“, in der die Brennstoffzelle je nach Bedarf zugeschaltet wird, „SILENT“, bei der nur die Batterie zur Lastdeckung eingesetzt wird und keinerlei Betriebsgeräusche durch die Methanolfumpe u.ä. entstehen sowie die Betriebsweise „CHARGE“, bei der eine externe 12-V-Batterie durch die Brennstoffzelle geladen werden kann.

Bedingt durch den hohen Grad der Systemintegration war es bei den durchgeführten Messungen am SFC A 25 nicht möglich, die Stackspannung, den Eigenverbrauch der Hilfsaggregate oder den Ladewirkungsgrad des Bleiakkus zu bestimmen. Hier musste auf Herstellerangaben und Literaturwerte zurückgegriffen werden.

Zur Bestimmung des Systemwirkungsgrades wurde der Methanolverbrauch bei verschiedenen Laststufen bestimmt. Es zeigt sich, dass der Wirkungsgrad des Systems unabhängig von der abzugebenden Leistung konstant bei 15 % liegt. Dies ist durch den Aufbau und die Schaltung des Systems begründet, bei dem interner Batteriepuffer und Brennstoffzelle in Serie geschaltet sind und die Lastabdeckung primär durch die Batterie erfolgt. Die Brennstoffzelle wird erst angeschaltet, wenn die Klemmspannung der Batterie unter einen bestimmten Grenzwert sinkt. Sie wird dabei mit einer konstanten Leistung von 25 W betrieben, der typische Wirkungsgradverlauf einer Brennstoffzelle mit seinem Maximum im Teillastbereich wirkt sich somit nicht auf den Gesamtwirkungsgrad aus. Auch mögliche Effekte des unterschiedlichen Ladewirkungsgrad des Pb-Akkus bei verschiedenen Entladeströmen konnten nicht festgestellt werden.

Der gemessene Systemwirkungsgrad des SFC Remote Power A 25 von 15 % deckt sich mit den Angaben des Herstellers /SFC 03/. Bei einem Ladewirkungsgrad des Bleiakkus von ca. 90 % und einem angenommenem Eigenverbrauch des Systems von 20 % lässt sich somit ein Bruttowirkungsgrad von ca. 20 % für den DMFC-Stack berechnen. Gegenüber dem Wirkungsgrad eines PEMFC-Systems wie dem Power Bag des ZSW erscheint dies recht niedrig. Jedoch ist zu bedenken, dass es sich bei dem System von SFC um ein Hybridsystem handelt und die Direkt-Methanol-Brennstoffzelle gegenüber der wasserstoffbetriebenen PEMFC eine deutlich aufwendigere Peripherie wie Methanol-Pumpe, Gas- und Flüssigkeitsabscheider etc. benötigt. Auch sind die Bedingungen auf der Anodenseite der DMFC verfahrenstechnisch anspruchsvoller: ein Wasser-Methanol-Gemisch mit einer unterstöchiometrischen Methanol-Konzentration und die relativ niedrige Katalysatoraktivität für die stark thermisch gehemmte Methanoxidation stehen der nahezu reinen Wasserstoff-Atmosphäre und dem relativ gering eingeschränkten Stofftransport der PEM-Brennstoffzelle gegenüber. Die sich ergebende Diffusions- und Konzentrationsüberspannung und die damit verbundenen Verluste sind bei der DMFC systembedingt deutlich höher. Die Differenz beim elektrischen Wirkungsgrad der beiden Brennstoffzellentypen ist allerdings nicht nur auf die aufgrund der chemischen und physikalischen Eigenschaften aufwendigere Verfahrenstechnik bei der DMFC zurückzuführen, sondern zeigt auch den unterschiedlichen Entwicklungsstand der beiden Technologien.

Das dynamische Verhalten der Smart Fuel Cell A 25 entspricht dem des integrierten Bleiakkus und es kann davon ausgegangen werden, dass dessen Dynamik für alle Anwendungsfälle, die aufgrund der Leistungsgröße der Smart Fuel Cell A 25 von 80 W in Frage kommen, ausreichend hoch ist. Für portable Anwendungen mit sehr hohen Entladeströmen, bei denen ein geringes Gewicht vorrangig ist, werden meist Hochleistungs-Akkumulatoren, wie Nickel-Cadmium- oder Nickel-Metallhydrid-Akkus, eingesetzt. Bei Anwendungen mit geringem Gewichtseinfluss aber dennoch hohen Entladeströmen sind Bleiakkus als Batteriepuffer jedoch geeignet.

In **Abbildung 6-11** ist ein Entlade-Lade-Zyklus des Bleibatteriepuffers im SFC-System dargestellt.

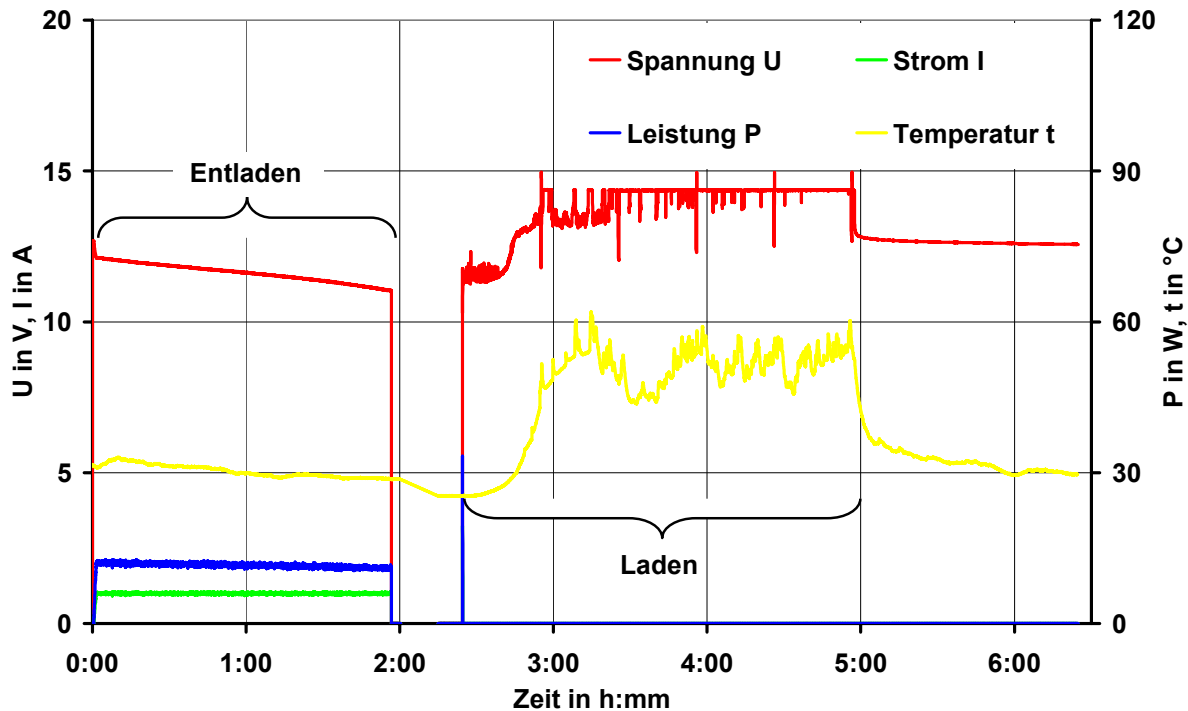


Abbildung 6-11: Lade-Entlade-Zyklus interner SFC-Akku

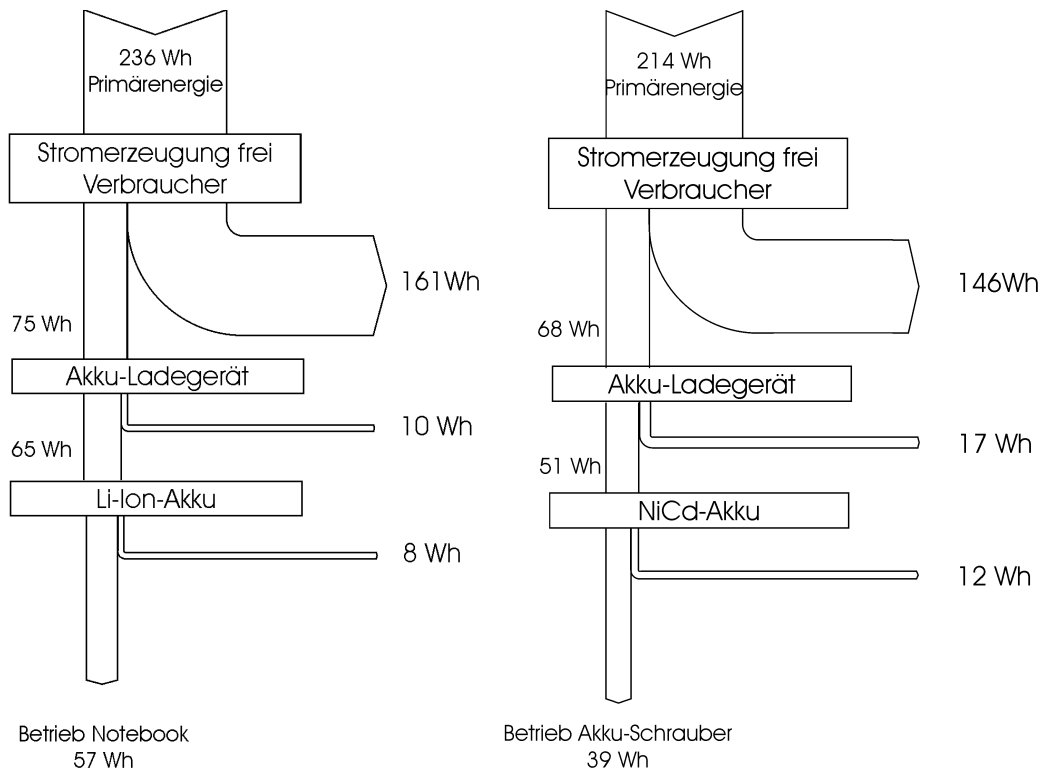
Anzumerken ist, dass bei den Messungen nur der während des Entladens vom System abgegebene Strom erfasst werden konnte, der interne Ladestrom vom Stack zum Akku hingegen aufgrund des geschlossenen Systems nicht gemessen wurde.

Das Entladen erfolgte bei konstantem Strom von 1 A bis zum Lastabwurf durch das System von SFC. Auch bei anderen Versuchen konnten nicht mehr als ca. 2,5 Ah aus dem Akku entnommen werden, obwohl dessen Kapazität vom Hersteller mit 4 Ah angegeben wird. Das Laden durch die DMFC nimmt ca. 2 h 30 min in Anspruch, wobei zu Beginn die am Ausgang des Systems anliegende Spannung entsprechend der Betriebstemperatur des Stacks stark ansteigt. Die Ausgangsspannung des Systems von SFC entspricht somit bei ausgeschalteter Brennstoffzelle der des Bleiakkus, die je nach Ladezustand zwischen 10,5 und 12,5 V liegt. Bei eingeschalteter Brennstoffzelle stellt sich, je nach Ladezustand des Akkus, zugeschalteter Nebenaggregate und abhängig von der Stacktemperatur, eine Spannung von 11,5 bis 14,4 V ein.

Die heutzutage bei der DMFC eingesetzten Katalysatoren, Diffusionsschichten und Membranen sind weitaus stärker von Degradationserscheinungen betroffen als die Materialien in PEM-Brennstoffzellen. So konnte beim Power Bag des ZSW im Rahmen dieses Projektes keine Leistungsabnahme beobachtet werden, wohingegen die abzugebende Leistung der Direkt-Methanol-Brennstoffzelle von SFC gesunken ist. Nach insgesamt ca. 300 Betriebsstunden liegt die Dauerleistung des Systems bei nur noch ca. 18 W. Nach Angaben des Herstellers ist die Degradation der Leistung der Smart Fuel Cell A 25 bei einer Betriebsweise mit geringer Durchschnittsleistung und längeren Pausenzeiten geringer.

## 6.4 Bestimmung des Energieverbrauchs

Der Energieverbrauch der portablen Geräte innerhalb der gesamten Lebensdauer hängt entscheidend vom Nutzerverhalten ab. So ist das Netzteil eines Laptops typischer Weise nur beim Laden des Akkus oder beim stationären Betrieb an eine Steckdose angeschlossen. Dahingegen ist die Ladestation eines Akku-Werkzeuges meist ununterbrochen in Betrieb und erzeugt durch Leerlauf und Erhaltungsladung hohe Verluste (vgl. **Abbildung 6-12**).



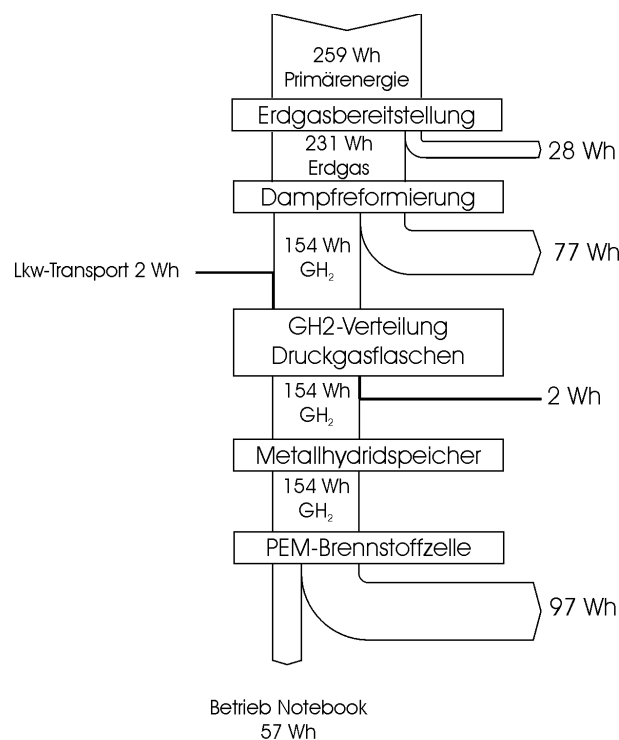
**Abbildung 6-12:** Energieflussdiagramm eines Notebooks mit Li-Ionen-Akku und eines Akkuschaubers mit NiCd-Akku und geregeltm Ladegerät

Anhand der Diagramme ist zu erkennen, dass die Batterieverluste beim Laptop deutlich geringer sind als bei dem Akkuschauber. Der Grund hierfür ist jedoch nicht der Einsatz unterschiedlicher Akku-Typen (Li-Ionen beim Notebook, NiCd beim Schrauber) oder ein möglicher Qualitätsunterschied zwischen den Ladegeräten, sondern primär die unterschiedliche Betriebsweise der Geräte. Der Notebookakku wird im Betrieb mit einem relativ konstanten Strom über einen längeren Zeitraum entladen. Dahingegen wird der NiCd-Akku in sehr kurzer Zeit mehrmals sehr stark belastet, d.h. der Entladestrom ist sehr dynamisch und es treten hohe Spitzenströme auf, was sich sehr ungünstig auf die dem Akku zu entnehmende Ladung auswirkt. Verluste durch Leerlauf entstehen entsprechend dem zu Grunde gelegtem Nutzerverhalten nur beim Akkuschauber. Diese summieren sich trotz der geringen Leistungsaufnahme von ca. 0,9 W im Stand-by auf 17 Wh pro Ladezyklus und entsprechen damit ca. der Hälfte der Nutzenergie von 39 Wh.

Der Energieverbrauch von stationären Kleingeräten ist weniger vom Nutzerverhalten als vielmehr von den äußeren Rahmenbedingungen abhängig. Bei der Ereignis gesteuert-

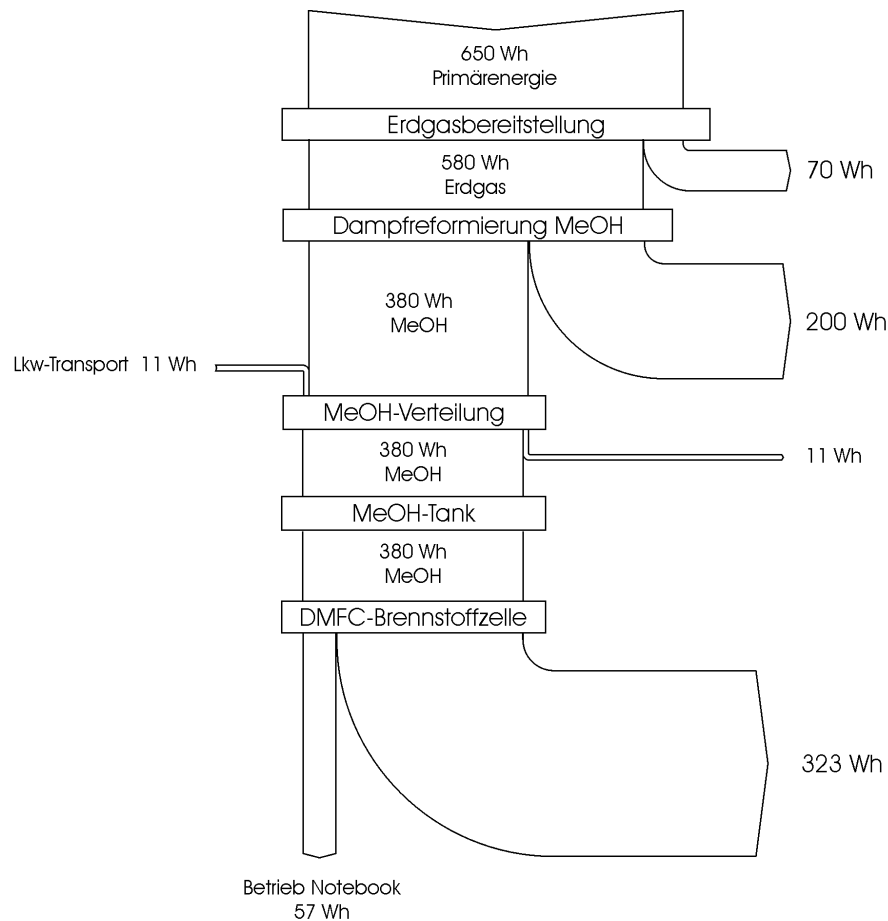
ten Straßen-Wetterstation (vgl. Kapitel 6.2.3) ergibt sich durch die Grundlast von ca. 2,5 W und die Spitzenbelastungen bis zu 5 W je nach Häufigkeit der Mess- und Sendeereignisse (vgl. Kapitel 6.2.3) ein Energieverbrauch von ca. 65 Wh am Tag. Bei Anlagen mit integrierter elektrischer Heizung ist der Energieverbrauch jedoch deutlich höher und kann bis zu 1750 Wh pro Tag erreichen. Um diesen Energiebedarf mit einem Hybridsystem aus Photovoltaikmodul und Bleiakku abzudecken, wäre ein sehr großes Solarpanel und ein großer Batteriespeicher notwendig, da der höchste Heizenergiebedarf in Zeiten geringer Solareinstrahlung benötigt wird.

Vergleicht man nun die Energiebereitstellung durch einen Akku und das öffentliche Stromnetz mit einer Versorgung durch die beiden Brennstoffzellensysteme, zeigt sich, dass keine energetischen Vorteile durch die direkte Umwandlung der chemischen in elektrische Energie bestehen. Beispielhaft ist dies in **Abbildung 6-12**, **Abbildung 6-13** und **Abbildung 6-14** für das untersuchte Notebook mit Li-Ionen-Akku dargestellt.



**Abbildung 6-13:** Sankey-Diagramm Notebook mit PEM-Brennstoffzellenbetrieb

Durch die hohen energetischen Verluste bei der Dampfreformierung von Erdgas und in der Brennstoffzelle ergibt sich bei der Stromversorgung mittels wasserstoffbetriebener PEM-Brennstoffzelle insgesamt ein Bereitstellungsnutzungsgrad von 22,7 %. Gegenüber dem Bereitstellungsnutzungsgrad von 24,2 % bei einem Li-Ionen-Akku und Netzbetrieb (vgl. **Abbildung 6-12**) bedeutet dies einen energetischen Mehraufwand von ca. 10 %. Bedingt durch den niedrigen Wirkungsgrad des DMFC-Systems sind hier die energetischen Aufwendungen mit einem Bereitstellungsnutzungsgrad von 8,8 % um den Faktor 2,75 höher, als bei der herkömmlichen Strombereitstellung.



**Abbildung 6-14:** Sankey-Diagramm Notebook mit DMFC-Brennstoffzelle

Hierzu ist anzumerken, dass der Endenergieverbrauch z.B. in den Bereichen Information und Kommunikation in Deutschland einen Anteil von 1,4 % am gesamten Endenergieverbrauch einnimmt. Die energiewirtschaftliche Bedeutung dieses Verbrauchssektors ist somit nahezu vernachlässigbar und eine Effizienzsteigerung ist kein relevanter Aspekt für den Einsatz von Brennstoffzellen in Kleingeräten wie z.B. Notebooks. Vielmehr steht der Kundennutzen im Vordergrund, der durch eine deutlich verlängerte Betriebszeit, einem schnellen „Wiederaufladen“ durch das einfache Austauschen der Tankpatrone und durch die mögliche Volumen- und Gewichtseinsparung erhöht wird.

So ließe sich mit der Smart Fuel Cell C 25 (vgl. Anhang) gegenüber herkömmlichen Li-Ionen-Akkus bei langer Betriebszeit eine Gewichtseinsparung erreichen. Nimmt man den elektrischen Wirkungsgrad des im Rahmen dieses Projektes untersuchten DMFC-Systems von 15 % zu Grunde, kann mit einer Methanolpatrone von 125 ml Tankinhalt (0,15 kg) ein Notebook mit einer durchschnittlichen Lastaufnahme von 27 W für ca. drei Stunden betrieben werden. Bedingt durch das Systemgewicht der Smart Fuel Cell C 25 (1,1 kg) ergibt sich ab einer Laufzeit über sechs Stunden (ab drei Patronen) eine Gewichtseinsparung gegenüber mehreren Li-Ionen-Akkumulatoren (je 0,45 kg).

Eine abschließende Bewertung des Einsatzes von Brennstoffzellen in Kleingeräten nach energiewirtschaftlichen und ökologischen Kriterien ist durch die Betrachtung des Energieverbrauches während der Nutzungsphase jedoch nicht möglich. Hierzu müssen auch Energie- und Materialaufwand bei der Herstellung, Emissionen schädlicher



Schadstoffe bei Produktion, Anwendung und Entsorgung - erwähnt sei hier das EU-weite Cadmium-Verbot ab dem Jahr 2008 - im Rahmen einer ganzheitlichen Bilanzierung von Brennstoffzellen und Batterien betrachtet werden.

## 6.5 Zusammenfassung der messtechnischen Untersuchungen

Anhand der durchgeführten Messungen an Notebook, Akkuschauber und Verkehrsnebenanlage sowie am ZSW Power Bag und dem Smart Fuel Cell A 25 lassen sich zusammenfassend einige Aussagen treffen, die Eingang in die Potenzialabschätzung finden.

So zeigen die Untersuchungen zur Dynamik der PEM-Brennstoffzellen wie dem ZSW Power Bag, dass der Ersatz von Hochleistungsakkus, wie sie in Akku-Werkzeugen eingesetzt werden, nicht möglich ist. Auch eine Direkt-Methanol-Brennstoffzelle ist ohne Zwischenspeicher aufgrund ihres Systemaufbaus (Methanol-Wasser-Gemisch geringer Konzentration, thermisch gehemmte Methanol-Oxidation) für die Deckung hochdynamischer Lastanforderungen von Kleingeräten ungeeignet. Da in vielen Fällen Akku-Werkzeuge von Handwerkern in Bereichen eingesetzt werden, in denen (noch) kein Netzanschluss vorhanden ist (auf Baustellen, für Wartungsarbeiten etc.), könnte jedoch ein portables Akkuladegerät, das mit einer Brennstoffzelle versorgt wird, Vorteile bieten. Es ließen sich die hohe Energiedichte von Wasserstoff- bzw. Methanol-speicher für eine netzunabhängige Versorgung nutzen, denn der gleichmäßige Ladestrom lässt sich von Brennstoffzellen entsprechender Leistung gut decken.


In vielen Anwendungsfällen ist jedoch durch den Einsatz eines Batteriepuffers, der teilweise auch zum Starten des Brennstoffzellensystems benötigt wird, bei geeigneter Dimensionierung des Stacks die Lastabdeckung vollständig möglich. Wirkungsgrad und Leistungsdichte der PEM-Brennstoffzelle sind auch bei kleinen Leistungsgrößen relativ hoch, für die Integrationsfähigkeit in portable Kleingeräte ist somit ein kompakter Wasserstoffspeicher von entscheidender Bedeutung. Die energetische Effizienz der Direkt-Methanol-Brennstoffzelle liegt zwar deutlich niedriger, jedoch ermöglicht der Einsatz von reinem Methanol sehr hohe Speicherdichte bei der Tankpatrone.

Bei stationären Kleingeräten sind viele technische Probleme, die heutzutage für den Einsatz von Brennstoffzellen in portablen Geräten noch ungenügend gelöst sind, weniger stark von Bedeutung. So spielen Gewicht und Volumen eine bei weitem geringere Rolle und der Einsatz herkömmlicher Wasserstoffspeicher ist möglich. Für die Versorgung netzferner Verkehrstelematikanlagen o.ä. bietet es sich deshalb an, durch die Kopplung der PV-Akku-Hybridsysteme mit einer Brennstoffzelle zum einen die Größe der benötigten Modulfläche und des Batteriespeichers zu verringern und zum anderen die Verfügbarkeit der Anlage zu erhöhen. Denn in vielen Fällen der Verkehrstelematik treten die höchsten Lastspitzen bei Witterungsverhältnissen wie Nebel und Frost auf. Nicht nur, dass diese Bedingungen für die Energieversorgung durch PV-Modul und Bleiakku sehr ungünstig sind, auch die Verfügbarkeit der Sensoren ist dann am stärksten gefordert.

## 6.6 Auslegungstool für Brennstoffzellensysteme

Im Rahmen des Projekts wurde ein Auslegungstool für Brennstoffzellensysteme zur Anwendungen in kompakten und portablen Geräten entwickelt (vgl. **Abbildung 6-15**). Damit kann generell beurteilt werden, ob die Brennstoffzellensysteme die technischen Rahmenbedingungen, wie vorhandene Bauräume bzw. Leistungscharakteristik der Geräte, erfüllen. Von Interesse sind dabei die technische Machbarkeit, die Aussage, ob die Lastanforderung von der Brennstoffzelle gedeckt werden kann (unter Berücksichtigung von Dynamik und Lastspitzen etc.), das Volumen, das Gewicht und die Laufzeit des Gesamtsystems inklusive der notwendigen Peripherie und des Speichers.

Auslegungstool für Brennstoffzellensysteme



---

Eingabe

System

Nennleistung des Systems  W

Nennspannung des Systems  V

Brennstoffzelle

BZ-Typ

Vorgabe von

max. Volumen des Systems  cm<sup>3</sup>

Nennlaufzeit bis Behältertausch  h

Speicher

Speichertyp

Wasseranteil bei MeOH  %

Beladendruck  MPa

Ergebnisse

System

	Volumen	Gewicht	Energiedichte
Brennstoffzelle	61,6 cm <sup>3</sup>	0,03 kg	1,25 W/cm <sup>3</sup>
+ Peripherie	5,0 cm <sup>3</sup>	0,125 kg	- -
= Brennstoffzellensystem	66,6 cm <sup>3</sup>	0,15 kg	0,41 W/cm <sup>3</sup>
+ Brennstoffspeicher	1297,2 cm <sup>3</sup>	1,32 kg	
= Gesamtsystem	1363,7 cm <sup>3</sup>	1,47 kg	0,028 W/cm <sup>3</sup>

Brennstoffzelle

Nennleistung	25 W
+ Leistungsbedarf der Peripherie	2,5 W
= Bruttoleistung	27,5 W
/ Bruttowirkungsgrad	0,4 -
= Brennstoffleistung	69 W
Nettowirkungsgrad	0,36 -

Speicher


Energie	688 Wh
gravimetrische Energiedichte	520 Wh/kg
volumetrische Energiedichte	530 Wh/l

**Abbildung 6-15:** Screenshot des Auslegungstools für Brennstoffzellensysteme

Berechnungen sind nach Vorgabe der erforderlichen Laufzeit ( $t_{\text{nenn}}$ ) oder des maximalen Volumens ( $V_{\text{max}}$ ) möglich, d.h. wenn beispielsweise die Nennleistung ( $P_{\text{nenn}}$ ) und die erforderliche Laufzeit bekannt sind, kann auf das Volumen des Gesamtsystems mit Brennstoffspeicher geschlossen werden (weitere Möglichkeit: Vorgabe von  $P_{\text{nenn}}$  und  $V_{\text{max}}$  und Berechnung von  $t_{\text{nenn}}$ ).

Die Berechnungen basieren auf eigenen Messungen und Literaturangaben. Es wurde nach verschiedenen Konfigurationen und Qualitätsstufen unterschieden. Die Parameter des Brennstoffzellenstacks, wie serielle Zellenzahl, Zellenfläche etc., lassen sich anhand der geforderten Leistung und gängigen Leistungsdichten ermitteln. Die benötigte Peripherie variiert je nach Aufbau, sodass ggf. Komponenten des Brennstoff- (Luftversorgung, Druckregler, -minderer), Wasser- und Wärmemanagements (Lüfter, Wärmeübertrager) sowie die Steuerung berücksichtigt werden müssen.

Bei der Eingabe der Systemparameter muss zunächst die Nennleistung und Nennspannung vorgegeben werden. Im Feld „Brennstoffzelle“ kann zwischen einer PEMFC



und DMFC sowie die Auslegung des Systems entweder nach der Kapazität, also der maximalen Laufzeit, oder dem maximalen Volumen gewählt werden. Im Feld „Speicher“ kann zwischen Stahlflaschen, Alu-Composite-Behältern, Vollverbund- und Metallhydrid-Speicher für PEMFC-Systeme bzw. Methanolkanistern für DMFC-Systeme unterschieden werden. Je nach gewähltem Speichertyp kann noch der Wasseranteil bei Methanol bzw. der Speicherdruck bei Wasserstoff vorgegeben werden.

Ergebnisse des Tools sind das Volumen, das Gewicht und die Energiedichte der Brennstoffzelle selbst, des Brennstoffzellensystems (inkl. Peripherie) und des Gesamtsystems (mit Speicher). Als Ergebnisse der Brennstoffzelle werden die Nenn- und Bruttoleistung sowie die Brutto- und Nettowirkungsgrade ausgegeben. Als rechnerische Größen ergeben sich der Energieinhalt sowie die gravimetrische und volumetrische Energiedichte des Speichers. Des Weiteren sind mit Hilfe des Auslegungstools für Brennstoffzellensysteme Aussagen zu vergleichenden Betrachtungen möglich. In **Abbildung 6-16** sind die Energiedichten verschiedener Batterie- und Brennstoffzellen-Typen bei einer Leistungsaufnahme von 25 W dargestellt.

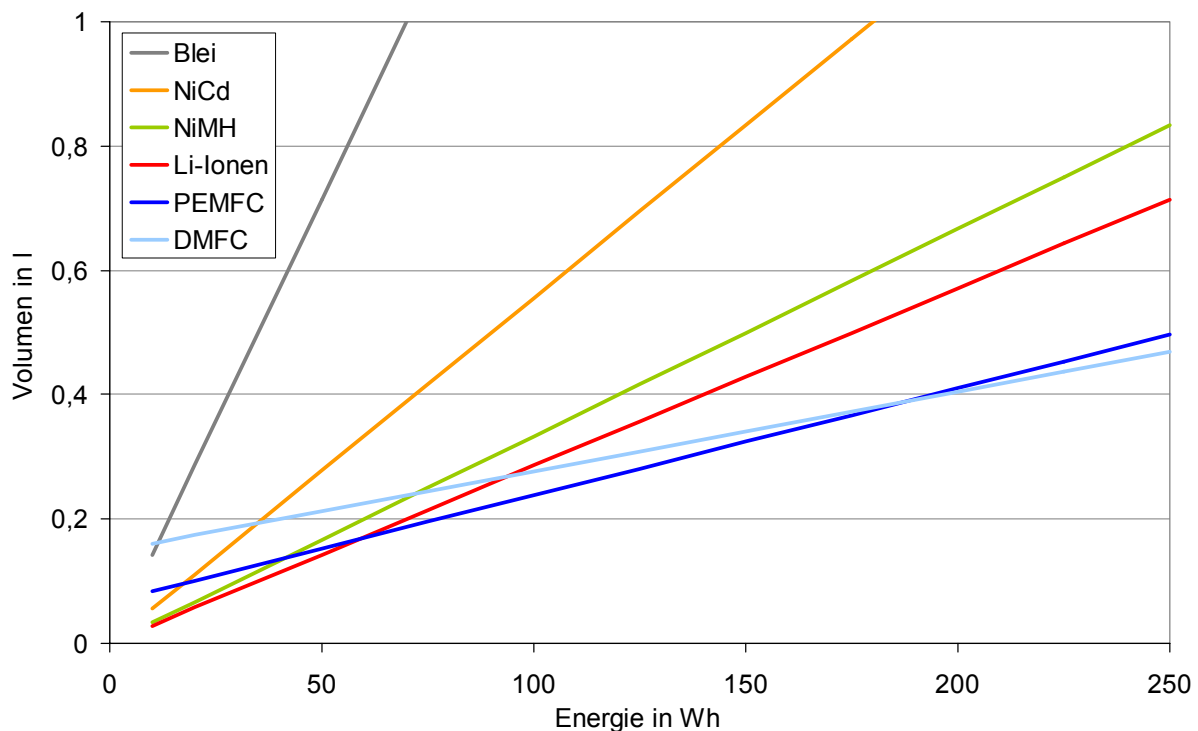


Abbildung 6-16: Energiedichten verschiedener Batterien /nach REN 01/ und von Brennstoffzellen mit einer Leistungsaufnahme von 25 W

Dabei fällt auf, dass PEMFC-Systeme ab einer Energiemenge von ca. 60 Wh und DMFC-Systeme ab ca. 100 Wh kleinere Volumina als die beste Akkutechnologie (Li-Ionen) benötigen. Ab einer Energiemenge von ca. 190 Wh sind die DMFC-Systeme aufgrund der höheren Speicherdichte des Methanols gegenüber PEMFC-Systemen im Vorteil.

Die Ergebnisse des Auslegungstools dienen im nachfolgenden Kapitel zur Beurteilung des technischen Potenzials von Brennstoffzellen in den einzelnen Gerätegruppen.

## 7 Potenzialabschätzung

In den vorangegangenen Kapiteln wurde die technische Machbarkeit der BZ-Stromversorgung für die drei betrachteten Geräte anhand von Messungen und Simulationsrechnungen untersucht. Auf dieser Basis wird im folgenden Abschnitt das zu erwartende Marktpotenzial von BZ-versorgten Geräten in Deutschland betrachtet.

### 7.1 Potenzialbegriffe und Methodik

Für die Abschätzung des Einsatzpotenzials müssen die betreffenden Marktsegmente näher beleuchtet werden. Neben technischen und strukturellen Rahmenbedingungen werden hier auch ökonomische Überlegungen berücksichtigt. Um die Marktchancen von Brennstoffzellensystemen zu identifizieren, werden die in der Literatur üblichen Potenzialbegriffe verwendet (z.B. /WOE 02, WEI 01/):

- *Theoretisches Potenzial*

Das theoretische Potenzial entspricht der theoretisch maximal möglichen Anzahl an Geräten, die mit Brennstoffzellensystemen versorgt werden könnten. In den hier betrachteten Fällen wird dieser Wert durch die aktuellen bzw. prognostizierten Bestandszahlen festgelegt. Das theoretische Potenzial ist jedoch - ohne Beachtung technischer und struktureller Rahmenbedingungen – für die Beurteilung der Marktchancen einer neuen Technologie wenig aussagekräftig und wird hier nur der Vollständigkeit halber aufgeführt.

- *Technisches Potenzial*

Das technische Potenzial ergibt sich aus dem theoretischen Potenzial unter Einbeziehung technischer und struktureller Rahmenbedingungen. Es ergibt sich aus dem theoretischen Potenzial vermindert um einen Anteil, der aus technischer oder struktureller Sicht (noch) nicht realisierbar ist bzw. noch Nachteile gegenüber konventioneller Technologie aufweist.

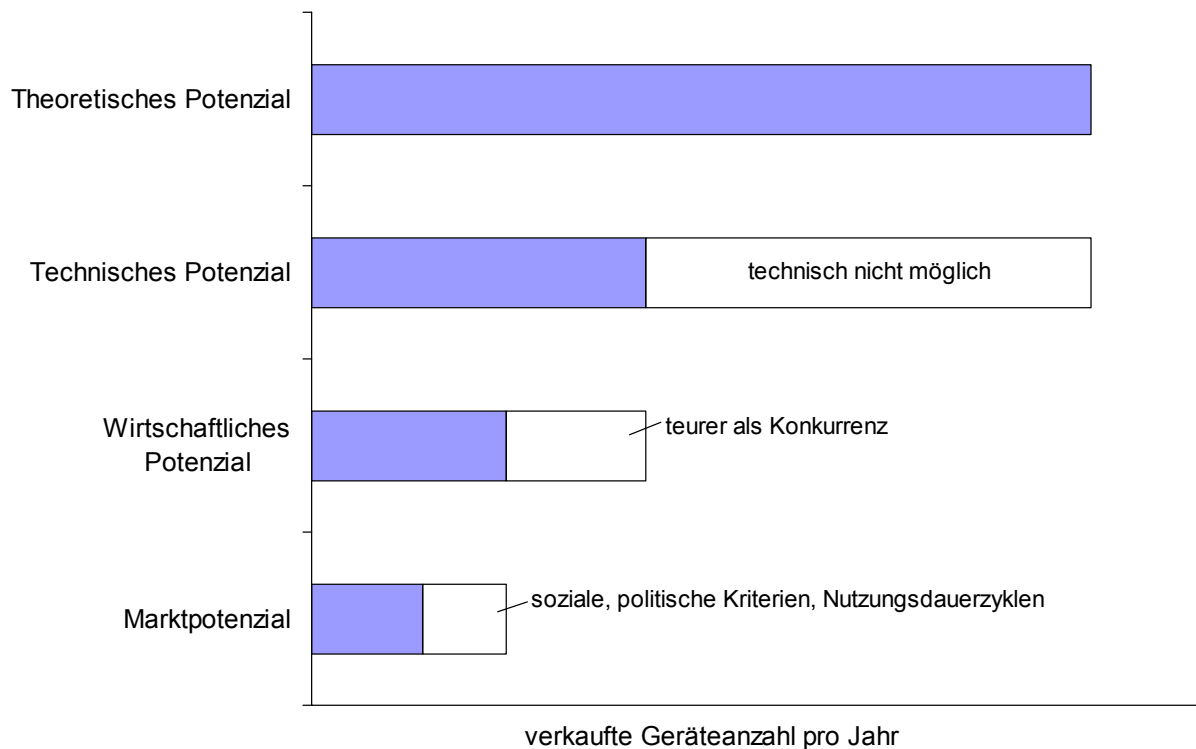
- *Wirtschaftliches Potenzial*

Das wirtschaftliche Potenzial stellt jenen Anteil dar, der aus Kundensicht kosteneffektiv ist. Das wirtschaftliche Potenzial berücksichtigt dabei neben den Investitionen auch Folgekosten sowie ggf. steuerliche Aspekte oder Förderungen und Subventionen.

- *Marktpotenzial und Marktvolumen*

Das Marktpotenzial ergibt sich aus dem wirtschaftlichen Potenzial, bereinigt z.B. um Effekte im Zusammenhang mit Nutzungszyklen, Kundengewohnheiten oder politische Rahmenbedingungen. Das Marktpotenzial ist eine fiktive, nicht beobachtbare Größe und bildet die Obergrenze für das Marktvolumen, der realistischen bzw. prognostizierten Absatzmenge für ein Produkt /WOE 02/.

Den qualitativen Zusammenhang zwischen den im Folgenden erläuterten Potenzialbegriffen verdeutlicht **Abbildung 7-1**.



**Abbildung 7-1:** Qualitative Darstellung von theoretischem, technischem, wirtschaftlichem und Marktpotenzial

## 7.2 Bestandsabschätzung

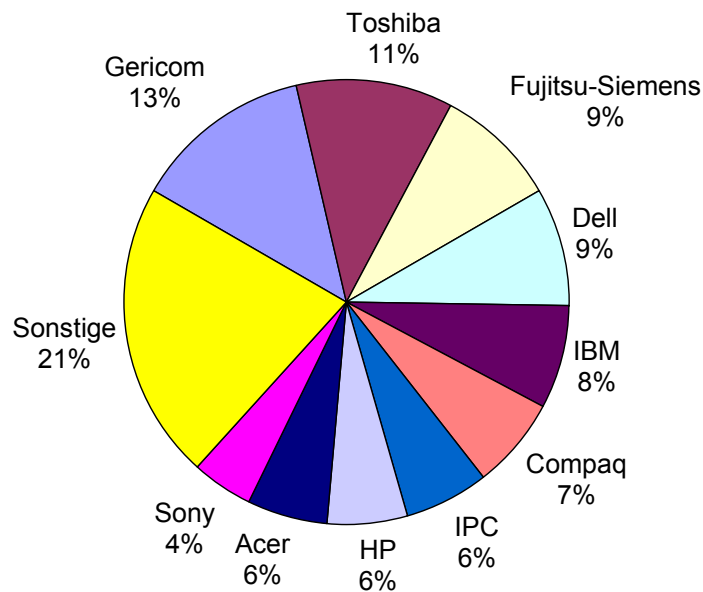
Durch Auswertung aktueller Marktdaten, Statistiken sowie Herstellerinformationen werden die heutige Marktsituation und die Bestandsdaten der betrachteten Geräte für Deutschland erhoben. Anhand dieser Basis kann die zu erwartende Entwicklung der Marktsegmente bis 2010 abgeschätzt werden.

### 7.2.1 Notebooks

Notebooks haben sich in den letzten Jahren zu einem nahezu gleichwertigen Ersatz von Desktop-Computern entwickelt. Neben dem Fortschritt in der Computertechnik und stetig sinkender Preise ist das wachsende Mobilitätsbedürfnis beim Käufer wesentlicher Grund für die hohen Absatzzahlen.

Die Weiterentwicklung der eingesetzten Akkus und damit verbundene längere Betriebsdauern von über drei Stunden ohne Netzversorgung spielen ebenso eine wichtige Rolle bei der wachsenden Nachfrage nach portablen Computern.

Allein im Jahr 2001 ist der Absatz an Notebooks um 21 % gegenüber dem Vorjahr gestiegen, während der Desktop-Markt lediglich 1,6 % erreichte /WIL 02/. Die Verkaufszahlen von Notebooks in Deutschland lagen im Jahr 2001 bei etwa 1,5 Mio. Stück und nahmen damit einen Anteil von 13,4 % am gesamten PC-Markt ein /RIN 02/. In **Abbildung 7-2** sind die Anteile der einzelnen Hersteller am deutschen Markt aufgeführt.



**Abbildung 7-2:** Marktanteile von Notebookherstellern in Deutschland im Jahr 2001 (Gesamtzahl 1,5 Mio. Stück) /RIN 02/

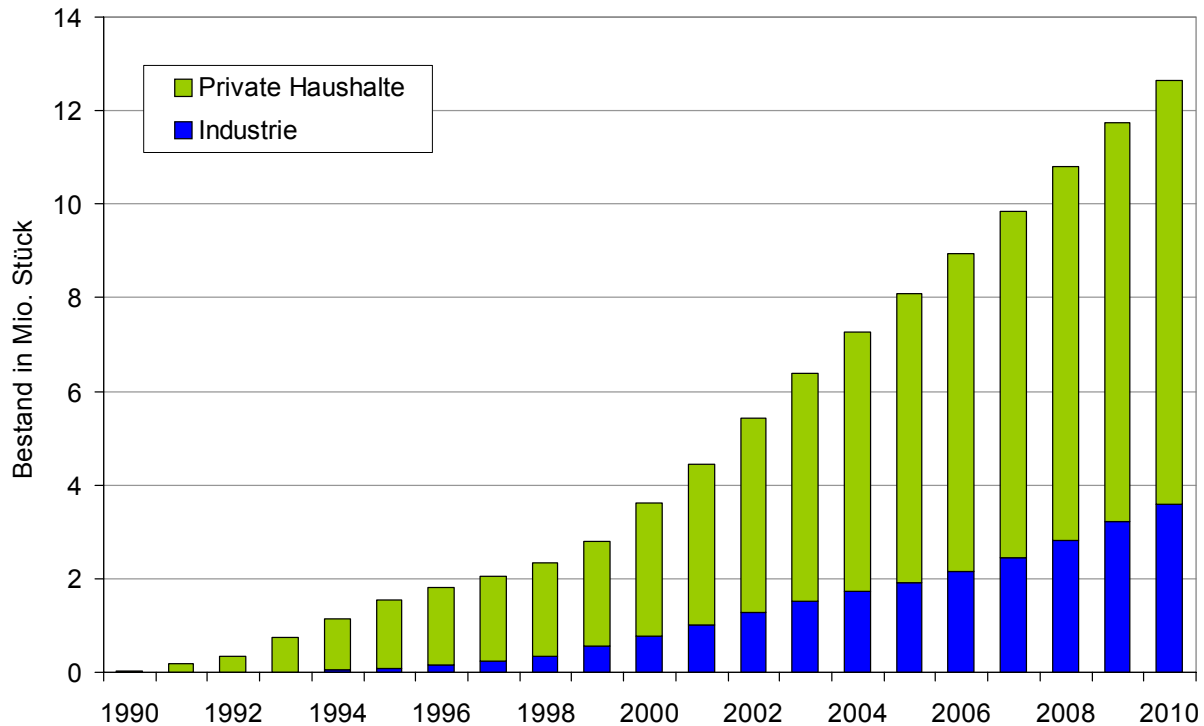
Keiner der Notebook-Anbieter nimmt in Deutschland eine dominierende Position ein. So hatte Gericom zwar im gesamten Jahr 2001 den größten Marktanteil, in den ersten beiden Quartalen des Jahres 2002 konnte Toshiba aber mehr Geräte absetzen /STA 02, ZSW 03a, STI 02/.

**Abbildung 7-3** zeigt die Entwicklung im deutschen Notebook-Bestand seit 1990 sowie ein - im Rahmen des Verbundprojekts IKARUS ermitteltes - Szenario bis 2010. War der Bestand an Notebooks in privaten Haushalten im Jahr 1990 praktisch noch Null, so liegt der Anteil heute mit etwa 4,8 Mio. Stück bei etwa 12,5 %, d.h. statistisch verfügt jeder achte Haushalt über ein Notebook. Die Entwicklung im kommerziellen Bereich verläuft ähnlich. Mit heute etwas mehr als 1,5 Mio. eingesetzten Notebooks erreichte der Ausstattungsgrad bezogen auf die Gesamtbeschäftigten in Deutschland in den letzten 8 Jahren rund 4 %.

In den kommenden Jahren werden weiter steigende Wachstumsraten erwartet. Vor allem im Bereich privater Haushalte wird mit einem großen Absatzzuwachs gerechnet, da Notebooks Platz sparen und mobil sind. Zudem geht der Trend hier zu Zweitcomputern und verstärkter Nutzung des Internets. Im kommerziellen Bereich wird der Zuwachs aufgrund der Konjunkturlage kurzfristig gering eingeschätzt. Mittelfristig dürfte aber auch in diesem Bereich - durch den immer geringeren Leistungsunterschied gegenüber Desktop-Computern - der Anteil an Notebooks am gesamten kommerziellen PC-Markt zunehmen /FOC 01/.

Der Bestand dürfte - nach dem Szenario - jährlich um etwa 1 Mio. Geräte zunehmen und im Jahr 2010 die Stückzahl von ca. 12,6 Mio. erreichen. Im Bereich der Privathaushalte wird ein Sättigungsgrad von etwa 20 % angenommen, d.h., jeder fünfte Haushalt ist dann mit einem Notebook ausgestattet. Für kommerzielle Anwendungen

rechnet man mit einem 10 %-igen Ausstattungsgrad bezogen auf die Gesamtbeschäftigtenzahl.



**Abbildung 7-3:** Entwicklung des Notebook-Bestands in Deutschland /IKA 02, IDC 03/

Da theoretisch jedes einzelne Notebook mit einer Brennstoffzelle versorgt werden könnte, ergibt sich aus der Entwicklung der Bestandszahlen das theoretische Potenzial. Einschränkend muss hier angemerkt werden, dass bei der Betrachtung der zukünftigen Bestandsentwicklung davon ausgegangen wird, dass Laptops auch in den kommenden Jahren in derselben oder in ähnlicher Form Verwendung finden. Ein möglicher Verdrängungseffekt, z.B. durch Tablet-PCs, oder sehr leistungsfähige PDA's ist hier nicht berücksichtigt. Die Bestandsentwicklung stellt eine Abschätzung der absoluten Obergrenze dar und dient als Basis für die Herleitung des technischen Potenzials.

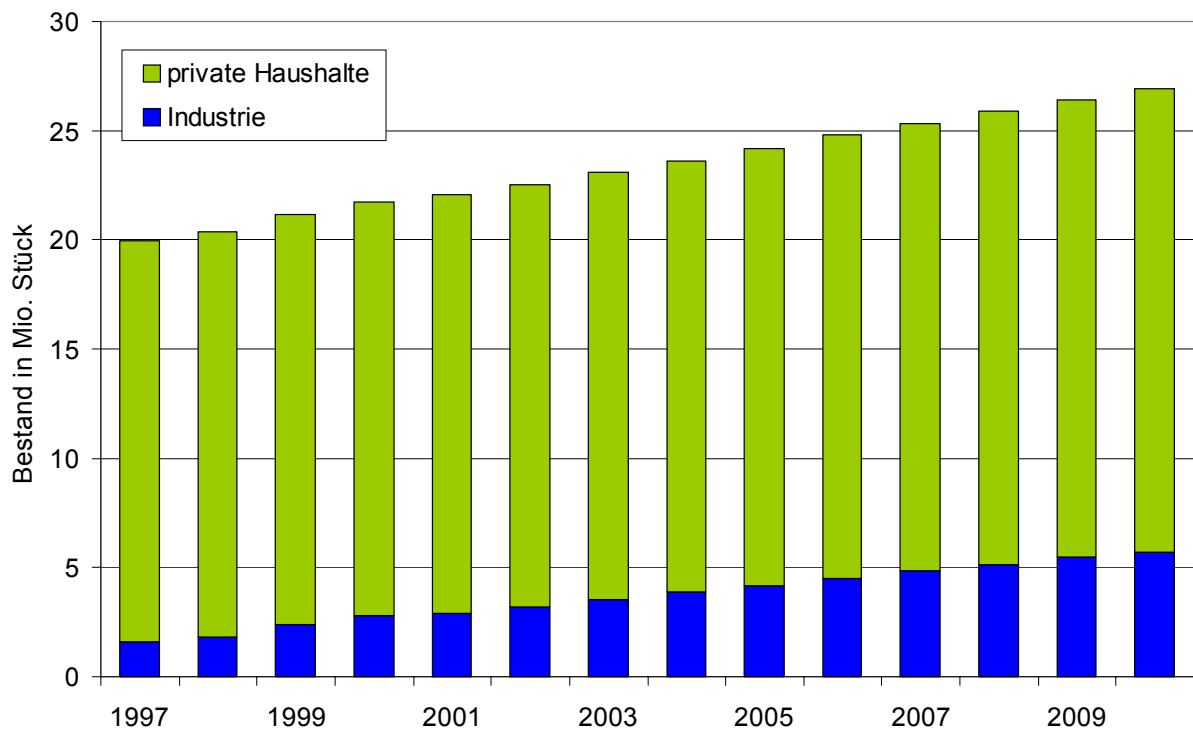
### 7.2.2 Akku-Werkzeuge

Das Marktvolumen für Elektrowerkzeuge betrug 1999 in Deutschland etwa € 665 Mio. und hatte ein Wachstum von 2 %. Der Markt für batteriebetriebene Werkzeuge konnte im gleichen Zeitraum ein Wachstum von 8 % verzeichnen und nahm mit € 173 Mio. einen Anteil von 26 % am gesamten Marktvolumen ein. Trotz des insgesamt stagnierenden Marktes bei Elektrowerkzeugen wuchs der Absatz bei Akku-Werkzeugen weiter an. Im Jahr 2000 war bereits jedes vierte in Deutschland verkaufte Elektrowerkzeug batteriebetrieben /MAR 00/. Weltweit wurden 2002 etwa 30 Mio. Akku-Werkzeuge verkauft. Nach Herstellerschätzung soll die verkaufte Stückzahl bis 2005 weltweit auf etwa 40 Mio. weiter steigen /MET 03/.

Für den Bestand an Akku-Werkzeugen liegen heute keine detaillierten Angaben vor. In einer Studie des Fraunhofer-Instituts für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI) wird eine Sättigung von 50 % im Jahr 1997 - bezogen auf private Haushalte - sowie ein



Wachstum auf 54 % in 2010 abgeschätzt /BÖD 00/. Bei der professionellen Anwendung in der Industrie dürfte der Anteil an Akku-Werkzeugen aufgrund der steigenden Leistungsfähigkeit der Geräte stark zunehmen. Angenommen wird ein Ausstattungsgrad - bezogen auf Arbeiter - von 15 % im Jahr 1997 und ein Wachstum auf etwa 50 % im Jahr 2010. **Abbildung 7-4** zeigt das auf Basis der recherchierten Marktdaten und eigener Berechnungen entwickelte Szenario der Bestandsentwicklung bei Akkuwerkzeugen. Daraus ergibt sich, dass heute in privaten Haushalten etwa 19,5 Mio. und in der Industrie etwa 3,5 Mio. Akku-Werkzeuge eingesetzt werden. Der Bestand dürfte - nach dem Szenario - jährlich um etwa 0,5 Mio. Geräte wachsen und im Jahr 2010 etwa 27 Mio. Stück erreichen.



**Abbildung 7-4:** Entwicklung des Akkuwerkzeug-Bestands in Deutschland /IKA 02, BÖD 00, eigene Berechnungen/

### 7.2.3 Verkehrsnebenanlagen

Aus dem breiten Spektrum der in Tabelle 3-2 dargestellten stationären Kleingeräte wurden aus der Produktparte Verkehrsnebenanlagen - Verkehrstelematik - die Anwendungen zur Verkehrsdatenerfassung betrachtet, da hier belastbares Datenmaterial zur Verfügung steht. Diese Anlagen haben das Ziel, den Verkehrs-, Witterungs- und Straßenzustand zu erfassen und über zentrale Auswertstationen Warnungen und Meldungen an die Verkehrsteilnehmer weiterzugeben. Darunter fallen im Wesentlichen Verkehrszähleinrichtungen und Straßenwetter-Messstationen.

In Deutschland kommen diese Verkehrsnebenanlagen hauptsächlich auf Autobahnen zum Einsatz. Exakte Bestandszahlen sind nicht vorhanden, da die Anlagen von den jeweils zuständigen Behörden oder privaten Gesellschaften betrieben werden. Eine

zentrale Erfassung steht noch aus, weshalb der Bestand anhand der (für Recherchen) zugänglichen Daten abgeschätzt wird.

Stationäre Verkehrszähleinrichtungen werden im mittleren Abstand von 4 km entlang der Autobahn installiert. Diese erfassen die Geschwindigkeit, die Anzahl und die Fahrzeugklasse (Pkw, Lkw, Busse etc.) der Verkehrsteilnehmer. Derzeit sind ca. 4.000 Stationen der Firma DDG und weitere der Firma Traffic Master im Einsatz /DDG 03, OTT 01/. Im Rahmen des Projekts Mobinet werden im Raum Bayern derzeit zusätzlich etwa 2000 bis 3000 Verkehrszähler (sog. Traffic Eyes) gebaut /NOR 03/.

Im Bereich der bundesdeutschen Autobahnen sind ca. 550 Straßenwetterstationen in einem mittleren Abstand von etwa 20 bis 25 km installiert, die im Rahmen des bundesweit eingeführten Straßenwetter-Informationssystems (SWIS) betrieben werden /MIC 03/.

Der Großteil heute eingesetzter Anlagen ist netzversorgt, da entlang von deutschen Autobahnen typischerweise die erforderliche Infrastruktur vorhanden ist. Ausnahmen bilden Anwendungen die zwischen den Fahrbahnen installiert werden, sowie Sensorensysteme, bei denen ein Netzanschluss nicht realisiert werden kann oder eine autonome Versorgung auf Grund geringer Leistungsanforderungen unproblematisch ist. Die Versorgung netzunabhängiger Verkehrsnebananlagen findet in der Regel mit kombinierten Photovoltaik-Batterie-Systemen statt.

Nach einer Prognose des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) dürfte der Personenverkehr bis 2015 um ca. 20 % gegenüber 1997 zunehmen. Das Aufkommen bei Güterverkehr dürfte um etwa 64 % steigen /BMV 00/. Seitens der Politik wird daher mittelfristig ein breite Anwendung von Verkehrstelematik forciert werden mit dem Ziel, Verkehrsabläufe effizienter zu gestalten, die Verkehrssicherheit weiter zu erhöhen und verkehrsbedingte Umweltbelastungen zu verringern /KEL 01/.

### 7.3 Potenziale von Brennstoffzellensystemen

Voraussetzung für das technische Potenzial ist die Option auf Realisierbarkeit einer Brennstoffzellenversorgung unter Berücksichtigung möglicher technischer Einschränkungen, beispielsweise durch Baugröße oder mögliche Luftversorgung. Wie aus den Untersuchungen der vorangegangenen Kapiteln hervorgeht, ist die Stromversorgung von Akku-Werkzeugen technisch nicht machbar. Bei Notebooks und portablen Geräten in vergleichbarer Leistungsgröße können Brennstoffzellensysteme praktisch als Akku-Ersatz eingesetzt werden. Bei stationären Anwendungen hängt die technische Machbarkeit stark von der geforderten Leistungsdynamik ab. Für den Einsatz in der untersuchten Straßenwetterstation ist das Brennstoffzellensystem nur in einem Hybrid-system (z.B. mit Supercap oder Akku zur Lastspitzenabdeckung) technisch sinnvoll realisierbar.

Neben den technischen Voraussetzungen wird das technische Potenzial vom jährlichen Gerätebedarf bestimmt. Dieser setzt sich aus dem Bestandszuwachs sowie aus prognostizierten Substitutionskäufen durch Geräteersatz zusammen. Speziell bei Geräten mit verhältnismäßig geringer Lebensdauer im Bereich weniger Jahre, wie beispielsweise bei Notebooks, nehmen Substitutionskäufe einen großen Anteil ein und können potenziell zu einem schnellen Marktwachstum für neue Technologien beitragen. Bei stationären

Anwendungen fällt der Anteil an Substitutionskäufen - bedingt durch heute bereits erreichbare lange Lebenszyklen - hingegen gering aus.

Das Marktpotenzial von Brennstoffzellensystemen wird zusätzlich geprägt durch den technischen Reifegrad des Systems, Fertigungskapazitäten und das Konsumentenverhalten /WOE 02/. Anhaltspunkte für diese Einflüsse bieten aktuelle Studien (z.B. /PEH 02, LOS 03/) sowie empirische Erfahrungen aus anderen Technologiebereichen, aus welchen der Zusammenhang zwischen Rentabilität und Verdrängungseffekten durch neue Technologien abgeleitet werden kann.

### 7.3.1 Notebooks

Der Abschätzung des technischen Potenzials bei Notebooks liegen die jährlichen Verkaufszahlen zu Grunde. Die jährlich verkaufte Stückzahl wiederum setzt sich aus dem Bestandszuwachs (vgl. 7.2.1) und einem Anteil von substituierten Altgeräten zusammen.

Bei der Quantifizierung des Substitutionsanteils wird angenommen, dass jedes Notebook am Ende seiner Lebensdauer durch ein neues Gerät ersetzt wird. Die Lebensdauer bzw. die mobile Einsatzfähigkeit wird typischer Weise durch den verwendeten Akkumulator begrenzt. Ein Neukauf eines Akkumulators rentiert sich häufig nicht, zumal die rasante technische Entwicklung in den letzten Jahren dazu führt, dass das Gerät nach wenigen Jahren bereits als veraltet gilt. Ein neuer Akku würde den Zeitwert des Gerätes übersteigen.

Entscheidend für die zukünftige Entwicklung der Verkaufszahlen ist die durchschnittliche Nutzungsdauer eines Notebooks. In der Literatur finden sich dazu keine verlässlichen Angaben. Der Gesetzgeber sieht für Notebooks allerdings einen Abschreibungszeitraum von vier Jahren vor, weshalb dieser Wert als durchschnittliche Lebensdauer angenommen wird /AFA 02/. Für die Entwicklung bis 2010 wird dieser Zeitraum als konstant angesehen, zumal der technologische Fortschritt in ähnlicher Geschwindigkeit vorangehen dürfte, ein Neukauf also notwendig wird um beispielsweise mit aktueller Software arbeiten zu können. Nach /KRA 97/ ist die Lebensdauer von technischen Geräten, die einem Verschleiß unterworfen sind über die Zeit normalverteilt. Der Zeitpunkt für den Neukauf eines Notebooks wird deshalb anhand des bekannten Bestandszuwachses mit der Methode der Wahrscheinlichkeitsrechnung bestimmt:

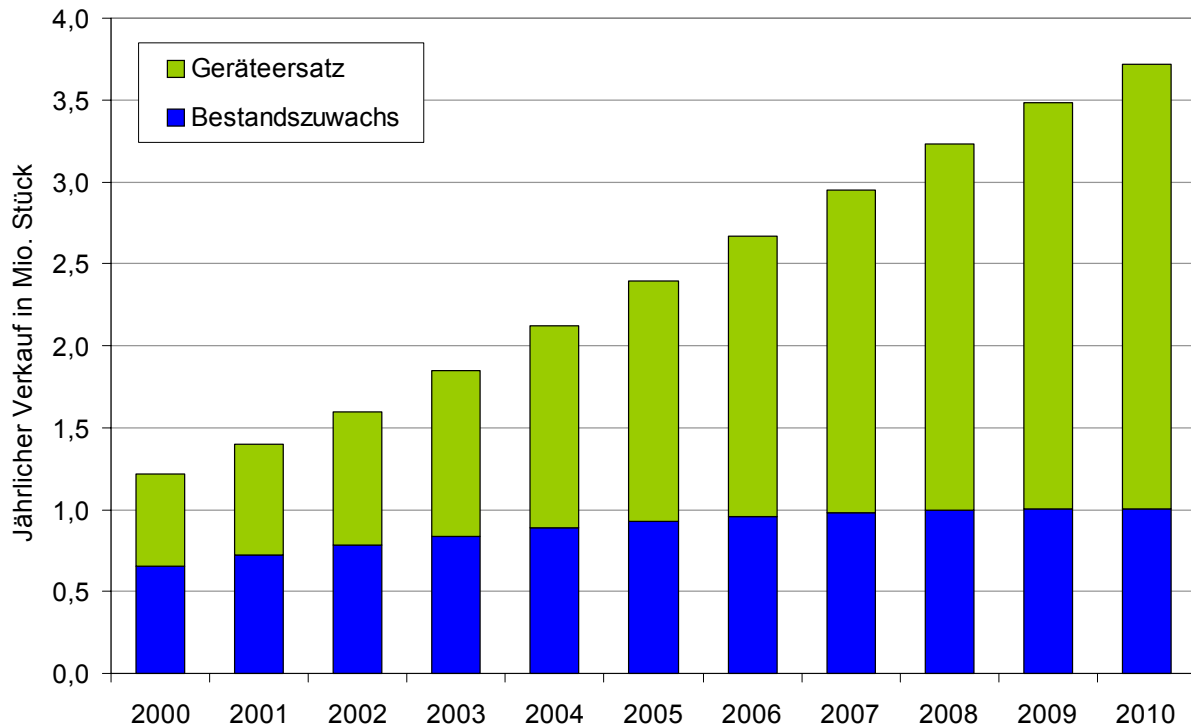
$$f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t-a}{\sigma} \right)^2}$$

mit  $\sigma$  Standardabweichung

a Erwartungswert

Der Erwartungswert a für den Neukauf eines Notebooks wird - wie oben beschrieben - auf 4 Jahre festgelegt. Die Neukaufwahrscheinlichkeit lässt sich als Integral über die Funktion bestimmen. Eine Standardabweichung von 1 Jahr bedeutet, dass 88 % der Notebooks innerhalb von 3 bis 5 Jahren ersetzt werden. Ein im Jahr 2000 gekauftes Notebook wird demnach mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 29 % innerhalb von 3 Jahren ausgetauscht. Erhöht man den Betrachtungszeitraum auf 5 Jahre, beträgt die Wahrscheinlichkeit bereits 94 %.

Auf der Basis des prognostizierten Wachstumsszenarios dürften 2010 etwa 3,7 Mio. Notebooks verkauft werden. Das Marktwachstum nimmt aufgrund der zunehmenden Marksättigung von 12 % im Jahr 2003 auf rund 7 % im Jahr 2010 ab. **Abbildung 7-5** zeigt die Prognose der jährlich verkauften Notebooks.



**Abbildung 7-5:** Szenario der jährlichen Notebook –Verkaufszahlen (technisches Potenzial) bis 2010 /IKA 02, IDC 03, eigene Berechnungen/

In mehreren Entwicklungsvorhaben wurde die technische Machbarkeit einer elektrischen Versorgung durch Brennstoffzellensysteme bereits dargestellt (vgl. Kap. 5.4). Dabei werden verschiedene Lösungsansätze verfolgt. Neben einer Integration der Brennstoffzelle in das Gerät sind auch eine BZ-betriebene Dockingstation oder Mobile-Office-Lösungen denkbar. Die beiden letzten Anwendungen dürften lediglich in der Markteinführungsphase eine Rolle spielen, da ein zusätzliches Gerät für den Nutzer und damit auch für das Marktchancen als Nachteil zu werten ist. Hinsichtlich eines Ersatzes herkömmlicher Akkus ist das vorrangige Entwicklungsziel die Integration des Brennstoffzellensystems in den Laptop. Mehrere Notebookhersteller verfolgen dieses Ziel, beispielsweise kündigt Toshiba die Markteinführung eines DMFC betriebenen Notebooks in 2004 an /TOS 03/. Entwicklungsarbeit ist vor allem in der weiteren Miniaturisierung, der Steigerung der Zuverlässigkeit der Systeme und der Kostensenkung bei der Produktion zu leisten.

Den potenziellen technischen Vorteilen und dem großen technischen Potenzial stehen die heute noch sehr hohen Kosten alleine für Brennstoffzellensysteme gegenüber, die noch Größenordnungen über denen von Akkus liegen. Verschiedene Studien belegen jedoch, dass durch Weiterentwicklung der Komponenten und Lernkurveneffekte Zielkosten von etwa 200 €/kW für PEM-BZ bis 2010 erreichbar sind /DIJ 02/.

Noch nicht absehbar ist nach wie vor die Frage, wie und in welcher Form Wasserstoff oder Methanol für den Endkunden bereitgestellt werden kann (vgl. Kap. 5.2.3 und 5.3.3), wobei die Kosten entscheidenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit und damit auf das erschließbare Marktpotenzial haben. Neben den wirtschaftlichen Aspekten ist heute noch eine Reihe rechtlicher Fragen offen, die ebenfalls ein Markthemmnis darstellen können, etwa die Verwendung von Wasserstoff in Flugzeugen.

Die Kosten von BZ-betriebenen Notebooks dürften mittelfristig im Vergleich zu herkömmlichen Akku betriebenen Notebooks nicht wirtschaftlich sein. Mit einer Markteinführung könnte dennoch früh gerechnet werden, da durch die erwarteten Vorteile - beispielsweise eine längere unterbrechungsfreie, netzunabhängige Betriebsdauer und schnelles Wiederaufladen - ein Einstiegsmarkt zu erwarten ist. Die verhältnismäßig kurze Nutzungsdauer von Notebooks von durchschnittlich 4 Jahren bietet gute Voraussetzungen für eine schnelle Marktdiffusion. Die weiter steigende Leistungsaufnahme von Notebooks begünstigt die Einführung von Brennstoffzellensystemen, da die Weiterentwicklung der Akkus an Grenzen stößt, bzw. mit Brennstoffzellensystemen neue Anwendungen erschließbar sind.

### **7.3.2 Akku-Werkzeuge**

Aus den messtechnischen Untersuchungen ging unter anderem hervor, dass eine elektrische Energieversorgung von Akku-Werkzeugen mit Brennstoffzellensystemen heute und auch in absehbarer Zukunft technisch nicht möglich ist. Wesentliche Gründe dafür sind die Anforderungen an die Kompaktheit und die hohen Spitzenlasten, die von Brennstoffzellensystemen nicht erfüllt werden können (vgl. Kap. 0). Aus heutiger Sicht kann durch Brennstoffzellensysteme als Ersatz von Hochleistungs-Akkus in Werkzeugen kein Potenzial erschlossen werden.

Im professionellen Einsatz der Werkzeuge auf Baustellen gestaltet sich das Wiederaufladen der Akkus heute oft schwierig. Ladegeräte werden an zentralen Stromverteilern oder an Fahrzeugbatterien angeschlossen. Alternativ werden auch portable Zusatzaggregate, beispielsweise mit integrierter Bleibatterie angeboten.

Der Einsatz von Brennstoffzellensystemen in portablen Akku-Ladestationen könnte eine Alternative zum direkten Akkuersatz darstellen. Vorteil dieser Lösung gegenüber einer batteriebetriebenen Ladestation ist die potenziell hohe Verfügbarkeit und Lebensdauer und gegenüber den leitungsgebundenen Lösungen die hohe Flexibilität. Die Anforderungen an Baugröße und Leistungsdynamik sind bereits mit dem heutigen Stand der Technik unproblematisch. Die Systeme müssten in einem Leistungsbereich von 25 bis 100 W arbeiten. Das Marktvolumen könnte aufgrund des erwarteten weiteren Anstiegs bei der Nutzung von Akku-Werkzeugen zukünftig stark steigen.

### **7.3.3 Verkehrsnebenanlagen**

Wie in Kap. 7.2.3 beschrieben, bezieht sich die Potenzialanalyse lediglich auf einen Ausschnitt der stationären Kleingeräte, der die Produktparte der Verkehrsnebenanlagen - Verkehrstelematik - umfasst und Anwendungen zur Verkehrsdatenerfassung betrachtet, da hier belastbares Datenmaterial vorliegt.

Wird die Verkehrsdatenerfassung auf alle Straßen außerhalb von Ortschaften bei einem mittleren Abstand von 4 km erweitert, ergibt sich bei einer Gesamtstraßenlänge von

230.800 km abzüglich der Ortsdurchfahrten von 52.256 km, bei denen ein Netzanschluss vorausgesetzt werden kann, ein technisches Potenzial von über 44.000 Verkehrsdatenerfassungsgeräte, die durch netzunabhängige Systeme versorgt werden müssten /STA 02, OTT 01/. Ein nennenswerter Zubau an Verkehrszählern im Bundes- und überregionalen Straßennetz ist kurzfristig aus wirtschaftliche Gründen jedoch nicht geplant /DDG 03/. Zurzeit werden hauptsächlich bestehende Geräte nach Ablauf der Nutzungsdauer ausgetauscht /BRA 03/. Nachdem fast ausschließlich netzversorgte Verkehrszählstationen installiert sind, ist das Marktvolumen in diesem Sektor derzeit sehr gering.

Der Bedarf an Straßenwetter-Messstellen hängt von den Erfahrungen der Winterdienste ab. Recherchen eines Herstellers haben ergeben, dass gestaffelt nach Straßenkategorien, eine durchschnittliche Dichte von 50 bis 80 km im Bereich Bundes-, Landes- und Kreisstraßen bereits ausreichend ist. Auf Autobahnen ist eine durchschnittliche Dichte von 20 bis 25 km größtenteils erreicht /SCHE 03/.

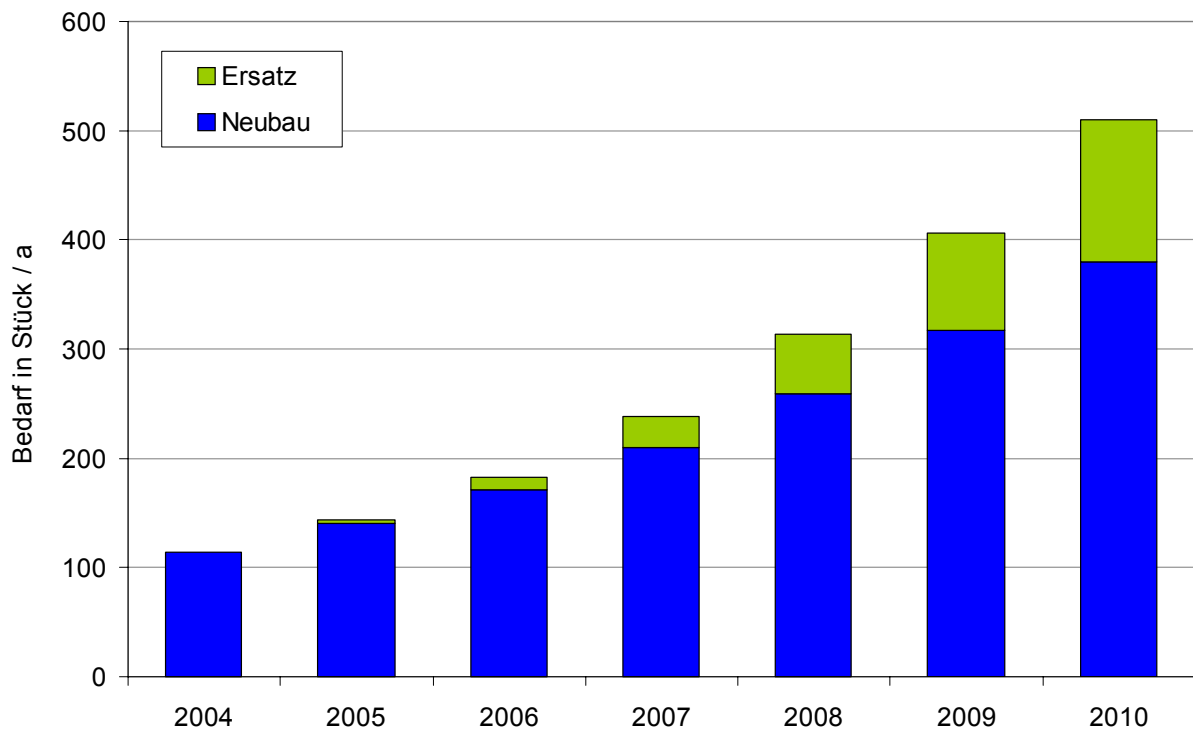
**Tabelle 7-1:** Theoretisches Potenzial für den Einsatz Brennstoffzellen versorgter Straßenwetter-Messstation für Deutschland /MIC 03/

Bundesland	Autobahnen	Überörtliche Straßen	SWIS GMA Autobahn	Bedarf an Messstellen
	km	Km	Stk.	Stk.
Schleswig-Holstein	445	9.881	35	164
Hamburg	81	231	9	3
Niedersachsen	1.263	28.095	85	468
Bremen	46	108	4	1
NRW	2.143	29.841	80	497
Hessen	931	16.340	40	272
Rheinland-Pfalz	809	18.396	48	306
Baden- Württemberg	1.008	27.445	83	457
Bayern	2.122	41.501	80	691
Saarland	226	2.066	15	34
Berlin	61	249	3	4
Mecklenburg-Vorp.	237	10.035	12	167
Brandenburg	766	11.575	38	192
Sachsen-Anhalt	220	9.902	10	165
Sachsen	403	13.283	20	221
Thüringen	252	7.857	13	130
<b>Bundesgebiet</b>	<b>11.013</b>	<b>226.805</b>	<b>575</b>	<b>3.772</b>

Da eine Netzversorgung vom Bauträger häufig gefordert wird bzw. das eine Netzversorgung heute oft kostengünstiger ist als eine autarke Stromversorgung, dürfte das technisch erschließbare Potenzial derzeit bei etwa 20 bis 25 % der ca. 3800 Messstationen liegen. Das Potenzial könnte aber in dem Verhältnis wachsen, wie kostengünstig und betriebssicher autarke Brennstoffzellensysteme zur Verfügung stehen /MIC 03/.



**Abbildung 7-6** zeigt ein Szenario für den zukünftigen Bedarf an autark versorgten Straßenwetter-Messstationen für Deutschland unter der Annahme, dass das theoretische Potenzial bis 2010 größer wird und der Anteil autark versorgter Stationen von 25 % im Jahr 2004, bedingt durch sinkende Investitionskosten und steigende Zuverlässigkeit der Systeme, jährlich um 5 % auf 55 % im Jahr 2010 steigt. Bei der Ermittlung des Potenzials durch den Ersatz bestehender Geräte wird - wie bei den Notebooks - die Methode der Wahrscheinlichkeitsrechnung zu Grunde gelegt (vgl. Kap. 7.3.1). Der Erwartungswert für die durchschnittliche Nutzungsdauer der autarken Stromversorgung wird mit 5 Jahren angenommen. Dieser Wert orientiert sich an heute typischerweise erreichten Nutzungsdauern der eingesetzten Batterien.



**Abbildung 7-6:** Szenario der jährlichen Bedarfs an autarken Straßenwetter-Messstationen (technisches Potenzial) für Deutschland bis 2010 /MIC 03, eigene Berechnungen/

Wie in Kap. 6.2.3 gezeigt wurde, ist die Versorgung mit einem Brennstoffzellensystem speziell in Kombination mit einem PV-Akku-Hybridsystem technisch sinnvoll machbar. Entwicklungsbedarf besteht jedoch noch bei einer weiteren Steigerung vor allem der Zuverlässigkeit, da Wartungsarbeiten bei einer dezentral gelegenen Station in der Regel mit einem großen Aufwand verbunden sind. Da Hersteller noch keine Leistungsgarantie oder eine Garantie lediglich für einen sehr kurzen Zeitraum geben, stellt diese Unsicherheit derzeit ein großes Markthemmnis dar.

Die Wirtschaftlichkeit hängt stark von den Bereitstellungskosten für Wasserstoff bzw. Methanol sowie den Investitionskosten für das Brennstoffzellensystem ab. Dem gegenüber stehen Kosteneinsparungen durch eine geringere PV-Generatorfläche und kleinere Batteriespeicher. Die Konditionierung der Batterien ist bei reiner photovoltaischer Versorgung häufig nicht optimal, was sich negativ auf die Lebensdauer auswirkt. Durch

Kombination mit einem Brennstoffzellensystem kann die Betriebsweise der Batterien verbessert und damit die Wirtschaftlichkeit erhöht werden.

Die Anforderung an die Verfügbarkeit bei Wettermessstationen ist mit nahezu 99 % sehr hoch. Moderne Wettermessstationen mit Nebeldetektion benötigen beispielsweise im Winter eine Heizung (vgl. Kap. 3.3.3), also zu Zeiten, wo in der Regel das Solarstrahlungsangebot nicht ausreicht. Wird eine ausreichende Zuverlässigkeit der Brennstoffzelle vorausgesetzt, kann in solchen Fällen ein Brennstoffzellensystem im Vergleich zum reinen PV-Akku-System bereits wirtschaftlich sein.

Bedingt durch das verhältnismäßig geringe Marktvolumen in Deutschland und relativ langen Nutzungsdauern der Geräte ist nicht mit einer schnellen Diffusion von Brennstoffzellensystemen in diesen Anwendungsbereich zu rechnen. Erst bei bedeutend geringeren Invest- und Brennstoffkosten und erhöhter Zuverlässigkeit dürfte sich ein größeres Marktpotenzial erschließen.

## 8 Ausblick

Der hier dargestellte Überblick der technischen Grundlagen und Potenziale von Brennstoffzellen in portablen und stationären Kleingeräten zeigt auf, dass für diese Technik in naher Zukunft der Markteintritt möglich ist. Anfangs könnte dies in Bereichen stattfinden, in denen auch konventionelle Techniken nur mit hohem finanziellen Aufwand zu einer zufrieden stellenden Lösung führen. Dies gilt vor allem für netzferne stationäre Anlagen der Verkehrstelematik oder der Umweltmesstechnik. Sind diese als Hybrid-system mit Solargenerator und Batteriespeicher ausgelegt, stehen den Kosten einer Brennstoffzelle die Einsparungen durch ein kleineres Photovoltaikmodul und einen kleineren Batteriespeicher gegenüber. Zudem lässt sich die Verfügbarkeit solcher Systeme erhöhen, da die durch die Brennstoffzelle abzugebende Energiemenge unabhängig von der solaren Einstrahlung ist und die Lebensdauer des Akkus erhöht werden kann, da ein geregeltes Laden auch bei ungünstigen Witterungsverhältnissen möglich ist. Darüber hinaus böte die Nutzung der Brennstoffzellenabwärme in manchen stationären Kleingeräten zusätzliche Vorteile. So sind die in Fahrscheinautomaten des ÖPNV eingebauten Drucker und auch die Elektronik moderner Zigarettensautomaten bei niedrigen Temperaturen sehr störanfällig. Aufgrund der hohen Kosten für die Erdarbeiten, die durch einen Anschluss ans öffentliche Stromversorgungsnetz entstehen, sind auch im innerstädtischen Bereich netzunabhängige Systeme nicht unüblich.

Technisch realisierbar sind auch Brennstoffzellensysteme für einige portable Kleingeräte, z.B. Notebook, Camcorder etc. Die heutzutage erreichbare Leistungs- bzw. Energiedichte ist mit denen fortschrittlicher Batterietechniken vergleichbar. Um einen Mehrwert für den Anwender, z.B. in Form einer längeren Betriebszeit bei gleichem Volumen und Gewicht, zu ermöglichen, sind aber noch einige Probleme zu lösen. Für den Einsatz der PEMFC sind vor allem kleine und leichte Wasserstoffspeicher notwendig, die entgegen den bisher verwendeten Metallhydridspeichern auch formflexibel sind und sich besser in die Geräte integrieren lassen. Die Wirkungsgradsteigerung steht bei der DMFC-Technik im Fokus der Entwicklungsarbeit. Bessere Membranen und spezielle Katalysatoren sowie ein verringerten Eigenverbrauch der Systemperipherie bieten ein großes Optimierungspotenzial. Sowohl bei der PEMFC als auch bei der DMFC ist durch ein verbessertes Packaging vor allem der Systemperipherie eine weitere Steigerung der Leistungsdichte möglich. Bis Brennstoffzellen sehr kompakte Geräte wie z.B. das oft angeführte Mobiltelefon mit Energie versorgen können, ist aber noch ein großes Stück Entwicklungsarbeit zu leisten.

Power-Tools mittels Brennstoffzellen zu betreiben, wird aufgrund der hier auftretenden extremen Spitzenlastströme zumindest mittelfristig nicht möglich sein. Dennoch bietet sich auch in diesem Bereich eine Anwendungsmöglichkeit für Brennstoffzellensysteme so z.B. in einem netzunabhängigen Ladegerät für Hochleistungsakkus. Ähnlich den von vielen Firmen vorgestellten Mobile-Office-Systemen handelt es sich hierbei um ein komplett neues Produkt, dass erst durch den Einsatz der Brennstoffzellentechnik sinnvoll realisierbar ist und bei dem die speziellen Vorteile dieser Technik, wie z.B. voneinander unabhängig dimensionierbare Leistung und Energieinhalt, voll zum Tragen kommen.

Brennstoffzellen stehen somit in vielen Bereichen der portablen und stationären Kleingeräte kurz vor dem Markteintritt und haben das Potenzial, innerhalb weniger Jahre über Nischenanwendungen in den Massenmarkt einzudringen. Abhängig von der Entwicklung der Brennstoffzellentechnik, aber auch der notwendigen Fertigungsverfahren, die eine kostengünstige und konkurrenzfähige Produktion ermöglichen, kann dieser Vorgang möglicherweise Synergieeffekte für die Einführung von BZ-Fahrzeugen und BZ-Heizungen bewirken. Die Brennstoffzellen mit kleinster Leistung wären somit der Wegbereiter für bedeutende Veränderungen in weiten Teilen der Energiewirtschaft.

## 9 Literaturverzeichnis

- AFA 02 Amtliche Abschreibungstabellen, Verlag neu Wirtschaftsbriefe, Herne/Berlin, 2002
- AGM 02 AGM Batteries Ltd., <http://www.agmbat.co.uk/liiontechnology.html>, 12.07.02
- ANG 00 Angloher, J.; Dreier, Th.: *Techniken und Systeme zur Wasserstoffbereitstellung - Perspektiven einer Wasserstoff-Energiewirtschaft (Teil 1)*, Wasserstoff-Initiative Bayern, München, 2000
- BMV 00 Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen: *Verkehrsbericht 2000*, Berlin, 2000
- BÖD 00 Böde, U., et.al.: *Detaillierung des Stromverbrauchs privater Haushalte in der Bundesrepublik Deutschland 1997-2010*, FhG ISI, Karlsruhe, 2000
- BRA 03 Siemens IST: *persönliche Auskunft von Herrn Braukmann*, 07.05.2003
- BÜN 01 Bünger, U.: *Entwicklungsstand und -perspektiven von Wasserstoffspeicher für mobile und portable Anwendungen*, Haus der Technik, Essen, 05/ 2002
- DBT 01 Deutscher Bundestag: *Brennstoffzellen-Technologie*, Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung, Drucksache 14/5054, 14. Wahlperiode, 2001
- DDG 03 DDG Gesellschaft für Verkehrsdaten mbH: *persönliche Auskunft von Herrn Fastenrath*, 20.01.2003
- DIJ 02 Dijkum van, P.: *The path to the Fuel Cell Economy*, f-cell Forum, Stuttgart, 2002
- DLR 03 Informationen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart, 2003
- EPA 98 United States Environmental Protection Agency: *Use of Coal Mine Methane in Blast Furnances*, Coalbed Methane Outreach Program, 1998
- FIN 98 Fink, S.; Langgaßner, W.; Wagner, U.: *Ganzheitliche energetische Bilanzierung von batteriebetriebenen Kleingeräten*, Elektrizitätswirtschaft Jg. 97 (1998), Heft 13, S. 13 ff
- FOC 01 FOCUS Marktanalysen: *Der Markt für Computer-Hard- und Software, Daten Fakten,Trends*, medialine-Onlineverlag, München, 2001
- FVS 01 Otto, A.: *Wasserstoffspeicherung in Niedertemperatur-Metallhydriden*, FVS Workshop, 2001
- GEP 02 Geppert, D.: *BZ-Systeme für Laptop-Computer und andere elektronische Geräte*, f-cell Forum, Stuttgart, 2002
- HAM 00 Hammann, P., Erichson, B.: *Marktforschung*, 4. Auflage, Fischer Verlag, Stuttgart, 2000
- HEB 01a Hebling Ch.: *Brennstoffzellen für portable und stationäre Anwendungen*, Environmental Forum – Seeking Quality Life through Sustainable Development, Freiburg, 2001
- HEB 01b Hebling, Ch.; Groos, U.: *Brennstoffzellen im kleinen Leistungsbereich*, f-cell Forum, Stuttgart, 2001
- IDC 03 IDC: *persönliche Auskunft von A. Salmeron*, 12.02.2003
- IKA 02 Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.: *Verbundprojekt IKARUS, Teilprojekt 8 - Querschnittstechnik*, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. in Zusammenarbeit mit IfE, TU München, München, 2002

- ISE 02 Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme: *Presseinformation*, Freiburg, 11.04.2002
- KIE 00 Kiehe, H.A.; et. al.: *Batterien: Grundlagen und Theorie, aktueller Stand und Entwicklungstendenzen*, Kontakt & Studium, Bd. 57, 4. Auflage, expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 2000
- KEL 01 Keller, H., et.al.: *Wirkungspotentiale der Verkehrstelematik zur Verbesserung der Verkehrsinfrastruktur und der Verkehrsmittelnutzung*, Prognos AG, Basel, 2001
- KOR 96 Kordesch, K.; Simaeder, G.: *Fuel Cells and their Applications*, Wiley-VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1996
- KRA 97 Krammer, Th.: *Brennstoffzellenanlagen in der Hausenergieversorgung- Instrumentarien und Potenziale*, IfE, TU München, München, 1997
- LED 01 Ledjeff-Hey, K.; Mahlendorf, F.; Roes, J. (Hrsg.): *Brennstoffzellen – Entwicklung, Technologie, Anwendung*, 2. Neub. Auflage, C.F. Müller Verlag, Heidelberg, 2001
- LIN 02 Linden, D.; Reddy T.B.: *Handbook of Batteries*, McGraw-Hill, New York, 2002
- LOS 03 Lossen, U., et.al.: *Einflussfaktoren auf den Markterfolg von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen*, Expert Verlag, Renningen, 2003
- MAR 00 Markt und Mittelstand, [www.vogel.de/presseinfo/2000-06-21/akku.html](http://www.vogel.de/presseinfo/2000-06-21/akku.html), 21.06.2000
- MET 01 Methanex: *Responsible Care Report 2000*, Vancouver, 2001
- MET 02 Methanol Institute, <http://www.methanol.org/fuelcell/>, 10.07.2002
- MET 03 Metabo GmbH: *persönliche Auskunft von P. Lorek*, 20.01.2003
- MIC 03 Schedler, K.: *Stand der Technik und Bedarf an autonomen Verkehrsnebenanlagen am Beispiel von Glättemeldeanlagen bzw. Straßenwetter-Messstationen*, Kurzbericht der Firma micKS MSR, Oberstdorf, 2003
- NOR 03 Siemens IST: *persönliche Auskunft von Herrn Nordmann*, 10.02.2003
- OTT 01 Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V.: *16. Symposium Photovoltaische Solarenergie, OTTI Energie-Kolleg 14.-16. März 2001*, Tagungsband, Regensburg, 2001
- OEK 98 ÖKO-Haus 2/98: *Test-Bohrmaschinen*, ÖKO-Test Verlag, Frankfurt, 1998
- PEH 02 Pehnt, M.: *Energierévolution Brennstoffzelle, Perspektiven, Takten, Anwendungen*, Wiley-VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 2002
- PRA 95 Prassek, A.: *Dynamische Energiebilanzierung verschiedener Traktionsbatterien*, Dissertation am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik, TU München, München, 1995
- REN 01 Rentz, O.; Engels, B.; Schultmann F.: *Untersuchung von Batterieverwertungsverfahren und -anlagen hinsichtlich ökologischer und ökonomischer Relevanz unter besonderer Berücksichtigung des Cadmiumproblems*, Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes, Karlsruhe, 2001
- RIE 02a Ries, U.; Thon, H.: *Marathon-Notebooks*, PC Professional 08/2002, VNU Business Publications Deutschland, München, 2002
- RIE 02b VNU Business Publications Deutschland: *Persönliche Mitteilung von U. Ries*, 24.07.2002
- RIN 02 Rink, J.: *Universalmaschine - Messlatte PC: Wie weit reicht das Notebook?*, c't 12/2002, Heinz Heise Verlag, Hannover, 2002
- RÖM 95 Falbe, J.; Regitz, M. (Hrsg.): *CD Römpp Chemie-Lexikon*, Thieme Verlag, Stuttgart, 1995

- SCHE 03 Micks MSR GmbH: *persönliche Auskunft von K. Schedler*, 17.01.2003
- SCHI 97 Schindler, V.: *Kraftstoffe für morgen – Eine Analyse von Zusammenhängen und Handlungsoptionen*, Springer-Verlag, Berlin, 1997
- SCI 01 Scintilla AG: *Geschäftsbericht 2001*, Solothurn, 2001
- SFC 01 Smart Fuel Cell AG: *Presseinformation 11. Oktober 2001*, Brunthal, 2001
- SFC 02 Smart Fuel Cell AG: *persönliches Gespräch mit M. Stefener*, 02.08.2002
- SFC 03 Smart Fuel Cell AG: Produktbeschreibung Smart Fuel Cell A 25, [http://www.smartfuelcell.de/de/produkte/binaries/a25\\_datenblatt.pdf](http://www.smartfuelcell.de/de/produkte/binaries/a25_datenblatt.pdf), 11.06.2003
- STA 02 Statistisches Bundesamt: *Statistisches Jahrbuch 2002*, Wiesbaden, 2002
- STI 02 Stiller, A.: *Notebooks bringen die Wende im europäischen PC-Markt*, Heise online-news 22.04.2002, [www.heise.de/newsticker/data/as-22.04.02-001/](http://www.heise.de/newsticker/data/as-22.04.02-001/), 29.07.2002
- TAB 01 Deutscher Bundestag, *Brennstoffzellen-Technologie*, Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung, Drucksache 14/5054, 14. Wahlperiode, 2001
- TOS 03 Pressemitteilung: *Toshiba introduces Small Form Factor DMFC for Portables*, <http://www.eyeforfuelcells.com/ReprotDisplay.asp?ReportID=1928>, 06.03.2003
- WEI 01 Weis, H.-C.: *Marketing*, 12. Auflage, Kiehl Verlag, Ludwigshafen, 2001
- WIL 02 Wilcox, J.: *IBM captured top spot in notebook sales*, Tech News,NEWS.Com, <http://news.com.com/2100-1040-251662.html?legacy=cnet>, 24.07.2002
- WOE 02 Wöhe, G., Döring, U.: *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*, 21. Auflage, Vahlen Verlag, München, 2002
- ZIT 02 Zittel, W.; Wurster, R.; Weindorf, W.: *Wasserstoff in der Energiewirtschaft*, [www.hydrogen.org/Wissen/w-i-energiew.html](http://www.hydrogen.org/Wissen/w-i-energiew.html), 10.07.2002
- ZSW 03a Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung: *persönliches Gespräch mit K. Steinhart*, 05.02.2003
- ZSW 03b Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg: <http://www.zsw-bw.de/de/index.html>, 05.06.2003





## 10 Anhang

	Li-Ionen-Akku	Mobile Power Box	DMFC Device	Hy-Cam	Impres	NEC-Prototyp	Marathonkoffer	Energy Docking Station
Beschreibung	zum Vergleich. Ausgereifter Stromlieferant für Notebooks, PDAs und Handys	externes Notebook-Pack	eigenständige Box fürs US-Militär	Profilkamera-Modul	Ladegerät für Li-Ion-Akkus	externes Notebook-Pack	Notebook-Docking-Station	schnelle Platte als externes Notebook-Pack
Hersteller/Entwickler	verschiedene (Matsushita, Sanyo, Toshiba, Sony u.a.)	Faunhofer ISE	Giner Electrochemical Systems	Faunhofer ISE	Motorola	NEC	Smart Fuel Cell (SFC)	Smart Fuel Cell (SFC)
Partner	--	Masterflex	DARPA, ARL	Ambient Recording	--	--	Consel	Medion
URL	--	www.masterflex.de, www.ise.fhg.de	www.ginerinc.com	www.ambient.de, www.ise.fhg.de	www.motorola.com	www.nec.co.jp	www.smartfuelcell.de	www.smartfuelcell.de
Marktreife	seit 1994	2004	k. A.	2004	2005	2005	2004	2004
Typ	chemischer Akkumulatort	PEMFC	DMFC	PEMFC	DMFC	DMFC	DMFC	DMFC
Einsatzbereich	Notebook (kleinere für PDA, Handy)	Mobile Computing (Notebook-Koffer)	Militär	Film-Set, Fernsehproduktion	Outdoor-Ladegerät	Notebook	externes Notebook-Pack	Docking Station fürs Notebook
Dauerlast	20 W	50 W	50 W	40 W	1 W	12 W	20 W	20 W
Spitzenlast	80 W	150 W	90 W	k. A.	2 W	18 W	50 W	40 W
Energiedichte (Gesamtsystem)	150 Wh/kg	61 Wh/kg	133 Wh/kg	57 Wh/kg	102 Wh/kg	125 Wh/kg	140 Wh/kg	140 Wh/kg
Wirkungsgrad	90 bis 95 % (beim Entladen)	k. A.	k. A.	k. A.	13 %	30 %	25 %	25 %
Tank (Inhalt)	--	Metallhydridspeicher	Patrone (k. A.)	Metallhydridspeicher	Patrone (100 ml)	Patrone (240 ml 10 % Methanol)	Patrone (125 ml reines Methanol)	Patrone (100 ml reines Methanol)
Energie pro Füllung	60 bis 70 Wh	300 Wh	800 Wh	280 Wh	62 Wh	100 Wh	140 Wh	115 Wh
Größe	14 x 8 x 2 cm <sup>3</sup>	43 x 18 x 17 cm <sup>3</sup>	45 x 33 x 17 cm <sup>3</sup>	17,5 x 17 x 12,8 cm <sup>3</sup>	812 cm <sup>3</sup>	k. A.	(ca. 1 Liter)	(ca. 0,8 Liter)
Gewicht (inkl. Tank und Brennstoff)	0,4 kg	5,4 kg	6 kg	4,9 kg	0,6 kg	0,8 kg	ca. 1 kg	ca. 0,8 kg
Lauzeit (pro Füllung)	3 h bis 5 h (Notebook, PDA)	15 h (Notebook)	16 h (bei 50 W)	8 h (Profilkamera)	60 h (Li-Ionen-Akkus laden)	3 h (Notebook)	7 h (Notebook)	5,5 h (Notebook)
Besonderheiten	nach spätestens 3 Jahren rapide Kapazitätsabnahme unabhängig von Benutzung	Microcontroller-gesteuert, derzeit 5 bis 10 handgeleitete Geräte im Einsatz	selbst entwickelte Membran mit verringertem Methanol-Crossover	zwei Metallhydridspeicher in der Hy-Cam. Für Profikameras im Außeneinsatz	reines Methanol, verdünnt mit von der Zelle erzeugtem Wasser	Kohlenstoffröhrchen (Fullerene) vergrößern die Aenderoberfläche	reines Methanol, verdünnt mit von der Zelle erzeugtem Wasser	reines Methanol, verdünnt mit von der Zelle erzeugtem Wasser
-- nicht vorhanden	k. A. keine Angabe							

	SFC A 25	Methanol Fuel Cell	Nexa™ Power Module	AIRGEN™	XcellentT	Replacer		
Beschreibung	portables Gerät für Wohnmobil und Boot	Notebook-Docking-Station	Stationäres Modul für netzunabhängige Stromversorgung	Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV)	Basisgerät zur portablen Energieversorgung	Batterieersatz zur Langzeit-Energieversorgung		
Hersteller/Entwickler	Smart Fuel Cell (SFC)	Toshiba	Ballard	Coleman Powermate	Institut für Technische Thermodynamik, DLR	Institut für Technische Thermodynamik, DLR		
Partner	--	--	--	Ballard	--	Nuvera		
URL	<a href="http://www.smartfuelcell.de">www.smartfuelcell.de</a>	<a href="http://www.toshiba.co.jp">www.toshiba.co.jp</a>	<a href="http://www.ballard.com">www.ballard.com</a>	<a href="http://www.airgen.com/">www.airgen.com/</a>	<a href="http://www.dlr.de/TT">www.dlr.de/TT</a>	<a href="http://www.dlr.de/TT">www.dlr.de/TT</a>		
Marktreife	2003	2004	2001	2003	2004	Prototyp		
Typ	DMFC	DMFC	PEMFC	PEMFC	PEMFC	PEMFC		
Einsatzbereich	Outdoor (Camping, Verkehrstechnik, Mobile Computing)	Notebook	OEM-Anwendungen	USV für private, kommerzielle, industrielle Zwecke	Camping, Freizeit			
Dauerlast	25 W	12 W	1.200 W	1.000 W	150 W	200 W bei 12 V (DC), 165 W bei 230 V (AC)		
Spitzenlast	80 W	20 W	K. A.	1.600 W (für 2 s)	K. A.	K. A.		
Energieichte (Gesamtsystem)	258 Wh/kg	133 Wh/kg		74 / 157 Wh/kg	83 Wh/kg	63 -167 Wh/kg		
Wirkungsgrad	25 %	22 %	37 - 45 %	35 % bei 500 W	K. A.	45 %		
Tank (Inhalt)	Patrone (2,5 l reines Methanol)	Patrone (100 ml mit 90 % Methanol)		Druckflasche (2.000 psi, 140 bar) mit 1,84 / 5,5 Nm <sup>3</sup>	Metallhydridspeicher (0,5 m <sup>3</sup> Wasserstoff)	Metallhydridspeicher (0,25 - 1,5 Nm <sup>3</sup> Wasserstoff)		
Energie pro Füllung	Ca. 2500 Wh	120 Wh		5,52 / 16,65 kWh	1,5 kWh	0,75 -4,5 kWh		
Größe	47,5 x 24 x 16 cm <sup>3</sup>	27 x 7,5 x 4 cm <sup>3</sup>	56 cm x 25 cm x 33 cm	69 x 40 x 48 cm <sup>3</sup>	50 x 20 x 30 cm <sup>3</sup>	42 x 18 x 22 cm <sup>3</sup>		
Gewicht (inkl. Tank und Brennstoff)	9,7 kg	0,9 kg	13 kg (ohne Tank)	46 kg (Gerät) 29 / 60 kg (Druckflasche)	18 kg	12 kg		
Laufzeit (pro Füllung)	80 h	10 h (Notebook)		4 / 11,5 h bei 500 W	10 h (Vollast)	1,7 - 10 h bei 200 W		
Besonderheiten	mehrere hundert Geräte im Feldversuch, Anwendung Camping (statt Dieselgeneratoren)	nur 90 % Methanol und 10 % Wasser werden verwendet		Für den amerikanischen Markt (120 V, 60 Hz)				
-- nicht vorhanden	k. A. keine Angabe							