

Ein Experiment mit Brennstoffzellen

Röbbe Wünschiers, Quedlinburg

Dieser Artikel behandelt den Energieträger Wasserstoff und seinen möglichen Einsatz bei mobilen Computern. Darüber hinaus wird ein einfaches Experiment vorgestellt, wie man zu Hause Wasserstoff gewinnen und mittels einer Brennstoffzelle in elektrischen Strom umwandeln kann. Mittels der vom Autor entwickelten Software *MeasureSuite* für Psion Palmtops und einem Analog/Digital-Wandler lassen sich die Betriebsdaten der Brennstoffzelle aufzeichnen.

Heute muss man kein Pessimist mehr sein um zu behaupten, dass die weltweit zugänglichen Reserven an Energierohstoffen in naher Zukunft erschöpft sein werden. Steinkohle wird voraussichtlich noch für 150 Jahre reichen, Erdöl, Erdgas und Uran dagegen werden schon in rund 50 Jahren verbraucht sein. Diese Zahlen machen deutlich, dass die Zeit bei der Suche nach alternativen Energiequellen drängt. Modelle einer zukünftigen Energiewirtschaft beschreiben jedoch nicht nur neue Energiequellen, sondern auch neue Energieträger. Aufgrund seiner Eigenschaften kommt dem Wasserstoff eine bedeutende Position zu. Daher hat die Verwendung von Wasserstoff als Energieträger bereits eine lange Tradition in der Raumfahrt. Aus diesem Bereich kommen entscheidende Entwicklungsimpulse wie etwa die Konstruktion effizienter Brennstoffzellen zur Erzeugung elektrischer Energie. Ähnlich dem Raumfahrer ist auch der PDA nutzende Reisende auf eine unabhängige Stromversorgung angewiesen.

Wasserstoff als Energieträger

In zunehmendem Maße wird Wasserstoff als ein ökologisch verträglicher und ökonomisch realisierbarer Energieträger diskutiert. Mit vielen Pilotprojekten



Der Autor

PD Dr. Röbbe Wünschiers studierte Biologie und promovierte in Pflanzenphysiologie an der Universität Marburg. 2006 habilitierte er sich an der Universität zu Köln in Genetik. Seit 1995 forscht er u.a. im Bereich der biologischen Wasserstoffgewinnung. Gegenwärtig arbeitet er bei der BASF Plant Science Tochter SunGene GmbH und lehrt Bioinformatik an der Universität zu Köln.

zeigt die Industrie ihre Entschlossenheit, an der Etablierung eines neuen Energiezeitalters mitzuwirken: Wasserstoff betriebene Busse, Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerke, Wasserstoff betriebene PKWs von allen großen Autoherstellern und, in Form von Prototypen, Notebooks und PDAs, die mit Wasserstoff angetrieben werden. Dabei ist die Idee nicht neu. Bereits 1870 schrieb Jules Verne in seinem Buch „Die geheimnisvolle Insel“: „Ich glaube, dass Wasser eines Tages als Brennstoff verwendet werden wird, dass Wasserstoff und Sauerstoff, aus welchen es besteht, entweder zusammen oder getrennt verwendet, eine unerschöpfliche Quelle für Wärme und Licht sein werden, und zwar von einer weit größeren Stärke, als Kohle es vermag... Das Wasser ist die Kohle der Zukunft“. Die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger liegt vor allem in seinen physikalischen Eigenschaften begründet. Mit rund 33 kWh/kg hat Wasserstoff eine viel höhere Energiedichte als fossile Energieträger wie Benzin (12 kWh/kg) oder Erdgas (14 kWh/kg). Im Vergleich dazu bringt ein Bleiakкумуляtor sogar nur 0,025 kWh/kg. Bei der Verbrennung von Wasserstoff in Luft gespeisten Motoren entstehen neben geringen Mengen Stickoxiden ausschließlich Wasserdampf. Bei der Erzeugung elektrischer Energie aus Wasserstoff und Luft in Brennstoffzellen (katalytische Verbrennung) entsteht sogar nur Wasser als Endprodukt (siehe unten).

Stromerzeugung durch Brennstoffzellen

Um einen PDA mit Wasserstoff zu betreiben, muss die im Wasserstoff enthaltene Energie zunächst in Strom umgewandelt werden. Dieser Prozess erfolgt in Brennstoffzellen. Dies sind gasbetriebene „Batterien“, die durch eine elektrochemische Verbrennung des Wasserstoffs eine Gleichspannung erzeugen (Abbildung 1). Da Brennstoffzellen bei Versuchen zur Umkehr der Elektrolyse entstanden, bestehen sie auch aus den selben Komponenten. In zwei durch einen Elektrolyten getrennten Kammern befinden sich je eine Anode, die dem Wasserstoff Elektronen entzieht und eine Kathode, die den Sauerstoff negativ auflädt. Die Kathoden- und Anodenreaktionen beinhalten jeweils die Spaltung der Sauerstoff- bzw. Wasserstoffmoleküle, wobei die Elektrodenoberfläche (z.B. platinierter

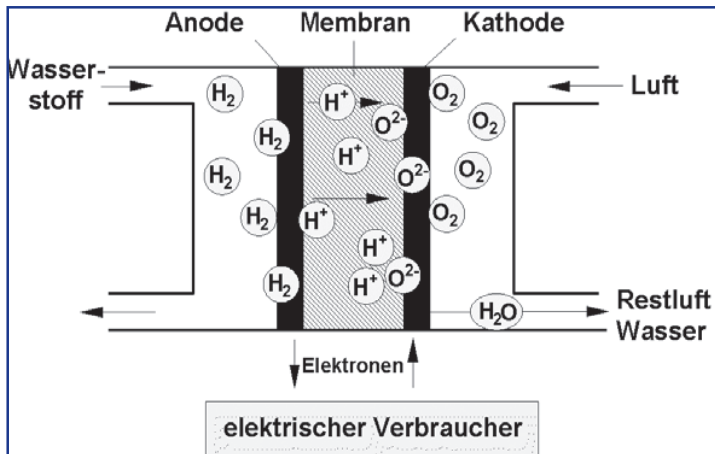
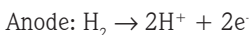


Abbildung 1: Funktionsweise einer PEM-(Polymer-Elektrolyt-Membran) Brennstoffzelle.

Aktivkohle) die elektrochemische Umsetzung katalysiert:



Die abgreifbare Zellspannung liegt bei 500-700 mV. Aus diesem Grunde werden meist mehrere Zellen in Reihe geschaltet, um eine höhere Spannung zur Verfügung stellen zu können.

Der Elektrolyt, der nur Protonen durchlässt, ist das Kernstück aller Brennstoffzellen. Nach seiner Art und der daraus resultierenden Betriebstemperatur werden die Brennstoffzellen-Typen benannt. Von mehreren Typen hat sich die Polyelektrolyt-Membran- (PEM-) Brennstoffzelle, die bei niedrigen Temperaturen arbeitet, zum Renner entwickelt. Der Elektrolyt besteht hier aus einer dünnen Polymerfolie, die im feuchten Zustand eine hohe Durchlässigkeit für Protonen aufweist.

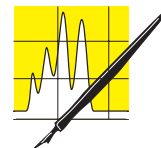
Einige Brennstoffzellen können auch mit anderen Brennstoffen wie z.B. Erdgas oder Methanol betrieben werden. Toshiba stellte auf der CeBit 2003 den weltweit ersten Prototypen eines Notebooks mit Direktmethanol-Brennstoffzelle vor. Die gesamte Energieversorgungseinheit ist bei diesem System als externes Modul verwirklicht und versorgt ein Libretto Notebook für rund 5 Stunden mit Strom. Dann muss die Methanolkartusche gegen eine neue ausgetauscht werden. Bis die reine Wasserstofftechnologie zur Marktreife gelangt, will Toshiba das Methanolsystem als Zwischenlösung in den Markt einführen.

Wasserstoff für Kleincomputer

In einer Zeit, in der Mobilität nicht nur gefordert ist, sondern auch einen Trend darstellt, finden elektronische Kleingeräte eine immer größere Verbreitung. So haben die Bürger Europas heute im Durchschnitt mehr als ein Mobiltelefon und die Infrastruktur für die mobile Kommunikation, wie z.B. Wireless LANs, hat in jüngster Zeit rapide zugenommen. Zu dieser Infrastruktur gehören aber auch Steckdosen für den

Betrieb von Notebooks in Zügen, Verkaufstände für Akkuaufladepacks und Automaten für Batterien.

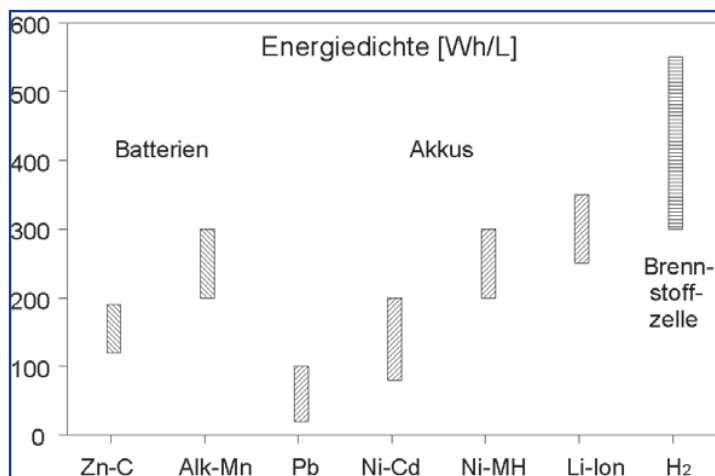
Jedem Nutzer ist klar, wo der Nachteil der Technologien liegt: im Stromverbrauch. Nun gehen alle Prognosen zum Energiebedarf elektronischer Kleingeräte davon aus, das dieser steigt. Mehr Leistungsfähigkeit geht also einher mit mehr Leistungsbedarf. Die Verwendung energiesparender Bauelemente kann diesem Trend nicht in ausreichendem Maße entgegenwirken. Der einzige gangbare Ausweg aus diesem Dilemma ist die Erhöhung der Energiedichte



AUFSÄTZE

der verwendeten Energiespeicher. Abbildung 2 gibt eine Übersicht der Energiedichte unterschiedlicher Systeme in Wattstunden pro Volumen Energiespeichermedium. Hier zeigt die Brennstoffzelle ihre Stärke. Zum Einsatz kommen könnte sie immer dann, wenn besonders lange Betriebszeiten gefragt sind. Die gegenwärtig besten Batterien können z.B. ein Notebook für rund 4 Stunden mit Strom versorgen. Mit einer Brennstoffzelle könnte diese Zeit ohne weiteres verdoppelt werden. So hat das Fraunhofer Institut in Zusammenarbeit mit der Freiburger Universität erste Prototypen von Brennstoffzellen vorgestellt, die in mobilen Geräten Betriebszeiten von 10 Stunden ermöglichen sollen. Außerdem ist bei Brennstoffzellen mit einer viel höheren Lebensdauer zu rechnen, da Ladezyklen entfallen. Stattdessen wird die Brennstoffzelle kontinuierlich mit Wasserstoff versorgt. Auch vom ökologischen Standpunkt führt die Brennstoffzelle das Feld der mobilen Energielieferanten an. Alle Komponenten sind voll recycelfähig.

Abbildung 2: Entwicklung der Energiedichte (in Wattstunden pro Liter Volumen) verschiedener mobiler Stromlieferanten. Zn-C: Zink-Kohle-Batterie; Alk-Mn: Alkali-Mangan-Batterie; Pb: Blei-Akkumulator; Ni-Cd: Nickel-Cadmium-Akkumulator; Ni-MH: Nickel-Metallhydrid-Akkumulator; Li-Ion: Lithium-Ionen-Akkumulator; H₂: Brennstoffzelle.



Wie wird die Praxis aussehen? Man wird den Wasserstoff in Kartuschen kaufen, die nach Gebrauch entweder gegen gefüllte getauscht oder an Ladestationen direkt aufgeladen werden. Auch teilweise geleerte Kartuschen lassen sich wieder füllen. Die Angst vor dem Memoryeffekt gehört der Vergangenheit an. Bei entsprechendem Design der Brennstoffzelle kann sogar ein schneller Tausch der Kartusche während des Betriebs des Notebooks oder PDAs erfolgen – reboot entfällt.

Die derzeit sicherste und handhabbarste Methode zur Speicherung kleiner Wasserstoffmengen bei Raumtemperatur sind so genannte Hydridspeicher. Darin ist der Wasserstoff an eine Matrix gebunden und liegt somit weder als Gas noch als Flüssigkeit vor. Der Befüllung eines solchen Speichers würde nur wenige Minuten in Anspruch nehmen. Ein wichtiger Punkt wird sein, dass sich alle Firmen frühzeitig auf ein einheitliches Wasserstoffspeicherformat einigen. Dann dürfte es in Zukunft keine Rolle mehr spielen, ob man sich für den PDA neue Batterien, oder Akku-Refill-Packs, kauft oder kurz seinen Wasserstoffspeicher tauscht oder füllen lässt.

Woher kommt der Wasserstoff?

Wasserstoff ist nur ein Energieträger: zu seiner Gewinnung wird Energie verbraucht. Aufgrund seiner großen Reaktionsfreudigkeit kommt Wasserstoff auf der Erde kaum ungebunden vor und es gibt somit keine natürlichen Lagerstätten, die erschlossen werden könnten. Daher muss der Wasserstoff über energieaufwendige Zerlegungsverfahren aus seinen Verbindungen gewonnen werden. Klassischer Weise wird die Erzeugung unter Einsatz von Primär- oder von Sekundärenergieträgern unterschieden.

Abbildung 4: Schematische Darstellung der Verwendung eines analog-digital Konverters zur Aufzeichnung der Betriebsdaten eines Bioreaktors. Von dem Wasserstoff produzierenden Bioreaktor werden die Temperatur und Beleuchtungsstärke, von der Brennstoffzelle (FuelCell) die Spannung gemessen. Der analog-digital Konverter ist an einen Psion (EPOC PDA) angeschlossen, der die Daten in einen Textfile abspeichert und damit zur Datenanalyse zur Verfügung stellt.

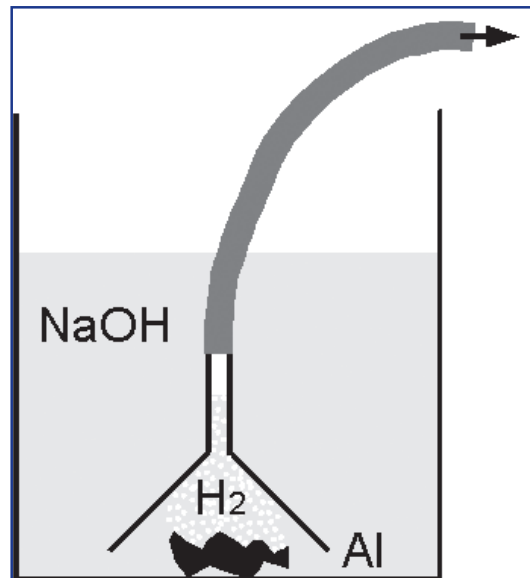
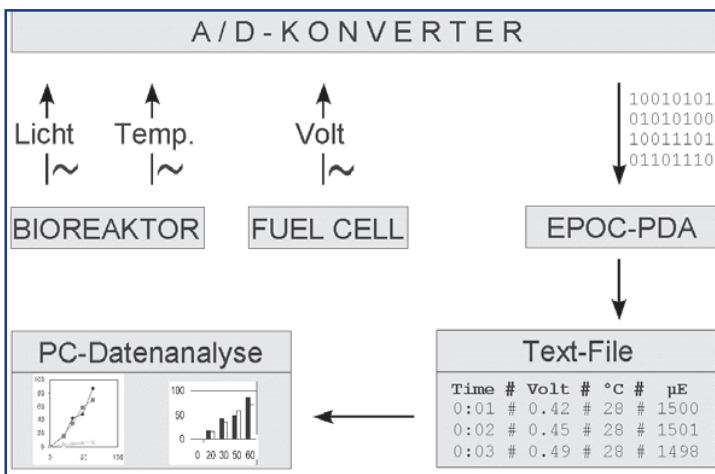


Abbildung 3: Herstellung von Wasserstoff (H_2) durch die Reaktion von Aluminium (Al) in Natriumhydroxidlösung (NaOH). Das Wasserstoffgas wird von einem umgekehrten Trichter aufgefangen. Über einen an den Trichter angeschlossenen Schlauch wird das Gas einer Brennstoffzelle zugeführt.

Die primärenergetische Wasserstoffherzeugung erfolgt vor allem aus Kohlenwasserstoffen, vorwiegend Erdgas, Erdöl und Kohle. Die für die Zerlegung notwendige Energie wird in der Regel autotherm durch die Verbrennung eines Teils des Einsatzenergieträgers bereitgestellt. Über 96% der gegenwärtigen weltweiten Wasserstoffproduktion von rund 500 Milliarden Kubikmeter geht von fossilen Primärenergieträgern aus, was rund 2% des Weltenergiebedarfs entspricht. Die sekundärenergetische Erzeugung von Wasserstoff erfolgt überwiegend aus Elektrizität mittels der Elektrolyse.

Regenerative Wasserstoffherzeugung

Von besonderem Interesse ist die regenerative Wasserstoffherzeugung mit Hilfe der Sonnenenergie. Die derzeit dominierende Technik zur solaren Wasserstoffgewinnung ist die Photovoltaik. Hierbei wird mit Hilfe von Solarzellen Strom erzeugt, der genutzt wird, um Wasser elektrolytisch in Wasserstoff- und Sauerstoffgas zu zerlegen.

Doch hat die solar-elektrolytische Wasserspaltung auch Nachteile. Vor allem die hohen Produktionskosten und der energetische Aufwand für die Herstellung von Solarzellen führen dazu, dass diese Technik bislang überwiegend in subventionierten Pilotanlagen Anwendung findet. Die Gesteungskosten für 1 kWh gasförmige Wasserstoffenergie betragen rund 4 Cent bei der Reformierung von Wasserstoff, 20 Cent bei der Elektrolyse unter Verwendung des derzeit vorherrschenden Strommixes und voraussichtlich rund 75 Cent beim Einsatz von Solarstrom.

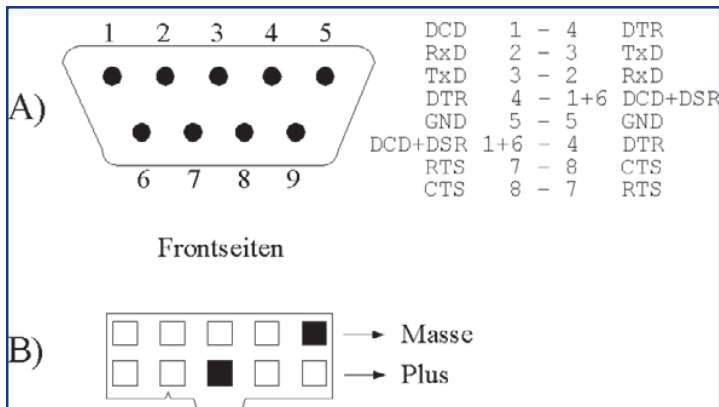


Abbildung 5: Pinbelegung der verwendeten Stecker. A) Über ein Nullmodem-Adapter wird der A/D-Wandler mit der seriellen Schnittstelle des Psions verbunden. Für den Selbstbau zeigt die Graphik, welche Pins der beiden 9-Pol SUB-D Stecker miteinander verbunden werden müssen. B) Die Graphik zeigt, welche Kontakte des A/D-Wandler Ausgangs mit der Brennstoffzelle verbunden werden (schwarz markiert). – Die Stecker sind jeweils von der Vorderseite gezeigt, d.h. die Lötkontakte befinden sich auf der abgewandten Seite.

Biologische Wasserstoffherzeugung

Viele Mikroorganismen (z.B. Bakterien) produzieren Wasserstoff während der Gärung. Das Ausgangsmaterial kann z.B. Klärschlamm sein. Auf diese Art und Weise produzieren viele Kläranlagen Biogas (Faulgas), das neben Wasserstoff aber auch andere brennbare Gase wie z.B. Methan enthält. Einige Mikroorganismen sind in der Lage die Energie des Sonnenlichtes zur Produktion von Wasserstoff aus Wasser zu verwenden: Algen und Cyanobakterien. Die Frage, ob sich dieser Prozess der Photowasserstoffbildung wirtschaftlich nutzen lassen wird, ist derzeit schwer zu beantworten. Man kann sicherlich nicht erwarten, dass wir in Zukunft Wasserstoff ausschließlich mit Mikroalgen produzieren. Es ist aber nicht ausgeschlossen, dass sie einen Beitrag leisten werden, so wie heute die Wasserkraft einen Beitrag zu unserer Stromversorgung leistet.

Hightech@Home

Kitzelt es Ihnen in den Fingern jetzt selbst Hand anzulegen und mit Wasserstoff zu hantieren? Es gibt eine Reihe von Möglichkeiten im Haushalt Wasserstoff (H₂) zu produzieren. Die einfachste Variante ist vielleicht die Reaktion von Aluminiumfolie mit einer Lauge – wir wollen dies großzügig einen Chemoreaktor nennen. Dazu löst man 12 Gramm Natriumhydroxid (NaOH) in 100 ml Wasser (H₂O; Achtung, das Wasser erwärmt sich auf rund 50°C, und die Lösung ist ätzend – bei Berührung mit der Haut sofort mit kaltem Wasser spülen). Bei der Verwendung von Leitungswasser entsteht eine Trübung – dies ist normal. Gibt man jetzt einen kleinen Streifen Aluminiumfolie (Al) in die Lösung, so löst sich diese bei starker Gasbildung auf. Was passiert? Aluminium ist ein reaktionsfreudiges Metall, das normalerweise von einer schützenden Oxidschicht

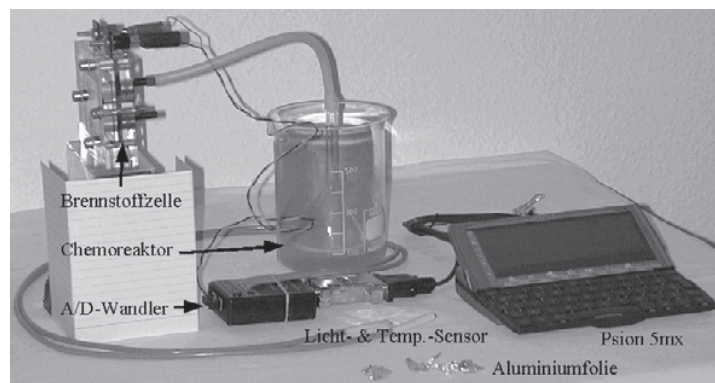
bedeckt ist (Aluminiumoxid,). In der Natriumhydroxidlösung löst sich die Oxidschicht auf. Dadurch kann das Aluminium mit der Base reagieren: Auf diese Weise entstehen in dem Chemoreaktor aus 0,8 Gramm Aluminiumfolie rund 1 Liter Wasserstoff. Also: bitte unbedingt nur einen kleinen, etwa 1 Centmünzen großen Schnipsel verwenden – man kann später immer noch nachlegen.

Der entstehende Wasserstoff wird von einem umgekehrten Trichter aufgefangen und über eine Schlauchverbindung einer Brennstoffzelle zugeführt (Abbildung 3). Zur Veranschaulichung kann an die Brennstoffzelle z.B. ein Solarmotor angeschlossen werden. Diese zeichnen sich durch hervorragende Anlaufeigenschaften aus.

So richtig Spaß macht das Ganze natürlich erst, wenn man die Messdaten per Palmtop auswerten kann. Da wird als analog-digital Konverter (A/D-Wandler) der Umweltpion der Firma Modulbus GmbH eingesetzt. Dieser hat einen integrierten Licht-, Temperatur- und Lautstärkesensor und besitzt darüber hinaus einen Spannungseingang, der direkt an die Brennstoffzelle angeschlossen werden kann (Abbildung 4). Der A/D-Wandler wird über einen Nullmodem-Adapter (Abbildung 5) an das serielle PC-Verbindungskabel des Psion 5mx Palmtops angeschlossen. Abbildung 6 zeigt den gesamten Versuchsaufbau mit Chemoreaktor, Brennstoffzelle und Datenloggingsystem (A/D-Wandler & Psion PDA). Um mit dem A/D-Konverter kommunizieren zu können hat der Autor mit der Psion eigenen Programmiersprache OPL das Interface MeasureSuite geschrieben (Abbildung 7). Mit dieser Software können die Messdaten in den Psion eingelesen und



Abbildung 6: Der Versuchsaufbau. Der Licht- und Temperatursensor wird über ein Kabel aus dem A/D-Wandler herausgeführt – in diesem Versuch haben sie allerdings keine Funktion. Über ein Nullmodem-Adapter ist der A/D-Wandler an den seriellen Eingang des Psion angeschlossen.



Time [min]: 0.43		Data Read: 17
		Data Saved: 3
Light [Lux]:	10138	Temp [°C]: 20
U(bat) [V]:	4.2	Noise [%]: off
Resist [kOhm]:	off	Voltage [V]: 0.1
Digital [1/0]:	1	
Press any key to stop		
MeasureSuite [V1.1] rw@biowasserstoff.de		

Abbildung 7: Screenshot von MeasureSuite auf einem Psion Series 5. Die Software ermöglicht die Anbindung des analog-digital Konverters an den Psion.

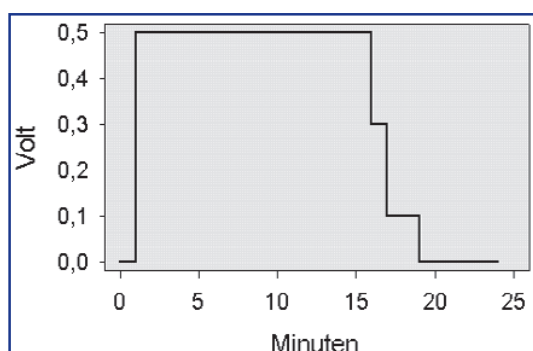
dort ausgewertet werden. MeasureSuite läuft auf allen gängigen EPOC32 basierenden Systemen, wie Psion 5/revo/netbook und dem Nokia Communicator. Außerdem steht eine auf MS Windows 98/Me/XP lauffähige Version zur Verfügung. Kurz nach Beginn der Wasserstoffproduktion im Chemoreaktor, wenn sich die Totvolumina des Trichters und des Schlauches mit Wasserstoff gefüllt haben, wird die Betriebsspannung von rund 500 mV erreicht (Abbildung 8). Nach dem Ende der Wasserstoffproduktion, wenn die Aluminiumfolie vollständig aufgelöst ist, fällt die Spannung langsam wieder ab.

Alle hier beschriebenen Experimente hat der Autor getestet. Dennoch können weder der Autor noch die Herausgeber die Verantwortung für direkte oder indirekte Schäden, die durch das Nachvollziehen der Experimente entstehen, übernehmen. Wer es gerne solider hat, dem sei der Kosmos-Experimentierkasten Brennstoffzelle empfohlen. Hierbei handelt es sich um ein kleines Modellauto, das von einem Brennstoffzellen getriebenen Elektromotor angetrieben wird. Der Wasserstoff wird „on board“ durch Solarstrom getriebene Elektrolyse erzeugt.

Bezugsquellen (Stand: 01/03/08)

- Natriumhydroxid (NaOH, ca. 2 Euro) Diese Chemikalie bestellen Sie am besten bei einer Apotheke.

Abbildung 8: Spannung an der Brennstoffzelle. Kurz nach Beginn der Wasserstoffproduktion im Chemoreaktor wird die Betriebsspannung von rund 500 mV erreicht. Nach dem Ende der Wasserstoffproduktion fällt die Spannung langsam ab.



- Laborgeräte (Glasgefäße, Trichter, ca. 6 Euro) Biologie-Bedarfs-Handel: www.biologie-bedarf.de, 600ml Becherglas (Bestell-Nr.: 511171, 3,80 Euro), 60mm Glastrichter (Bestell-Nr.: 514121, 2,70 Euro)
- Silikoschlauch (ca. 1 Euro) Baumarkt oder Modellbaugeschäft (am besten Trichter mitnehmen)
- Kosmos Experimentierkasten Brennstoffzelle (ca. 129 Euro) Zu erhalten in größeren online oder offline Spielwarengeschäften.
- Brennstoffzelle (ca. 90 Euro) h2-interpower GmbH: www.h2-interpower.de, h-tec Wasserstoff-Energie-Systeme GmbH: www.h-tec.com
- Analog-Digital Wandler Umweltspion (ca. 44,50 Euro) AK-MODUL-BUS Computer GmbH: www.ak-modul-bus.de
- Nullmodem-Adapter & A/D-Stecker (knapp 3 Euro) Conrad Elektronik: www.conrad.de. Für den Selbstbau des Nullmodem-Adapters werden zwei 9-Pol SUB-D Stifteleisten (male, Artikel-Nr. 742066-14, 52 Cent) und ein Gehäuse (Artikel-Nr. 711730-14, 1,12 Euro) benötigt. Als A/D-Stecker wurde ein Pfosten-Steckverbinder in Schneidklemmtechnik (2x5 Pol, Artikel-Nr. 702013-14, 86 Cent) verwendet.
- Solarmotor mit Propeller (ca. 11 Euro) Conrad Elektronik: www.conrad.de. Solarmotor B-148 (Artikel-Nr.: 198080-14, 9,18 Euro) mit passender Luftschraube (Artikel-Nr.: 228290-14, 1,95 Euro)
- MeasureSuite Software für Psion 5/revo/netbook (5 Euro) MeasureSuite Software für Psion 5/revo/netbook (5 Euro) und MS Windows kann unter <http://hydaba.uni-koeln.de:8200/software/> heruntergeladen werden. Zur Evaluierung besitzt das Programm einen Simulationsmodus. Die Registrierung kostet 5 Euro.

Falls Sie an weiteren Informationen interessiert sind, dann werfen Sie doch einen Blick auf folgende Internetseiten:

- www.hyweb.de behandelt verschiedene Aspekte von Wasserstoff als Energieträger.
- www.biowasserstoff.de legt den Fokus auf die biologische Erzeugung von Wasserstoff. **CLB**

Weiterführende Literatur

- Wünschiers & Lindblad (2002) Hydrogen in Education - A Biological Approach. *Int. J. Hydrogen Energy* 27: 1131-1140
- Mahlke & Wünschiers (2002) Biologische Wasserstoffgewinnung mit Grünalgen. *Unterricht Biologie* 273: 43-48
- Wünschiers (2001) Biologische „Elektrolyse“ durch Mikroalgen. *CLB*, 2001, 52: 168-174
- Wünschiers (2000) Light dependent production of hydrogen gas by green algae. *The future energy carrier in the classroom?* *J. Biol. Edu.* 34: 214-217
- Wünschiers & S. Borzner (1999) Wasserstoff als Energieträger. *CLB*, 1999, 50: 141-146
- Wünschiers & R. Schulz (1998) Photosynthese und Wasserstoff: Grundlagen und Nutzung. *Biologie in Unserer Zeit* 28: 130-136