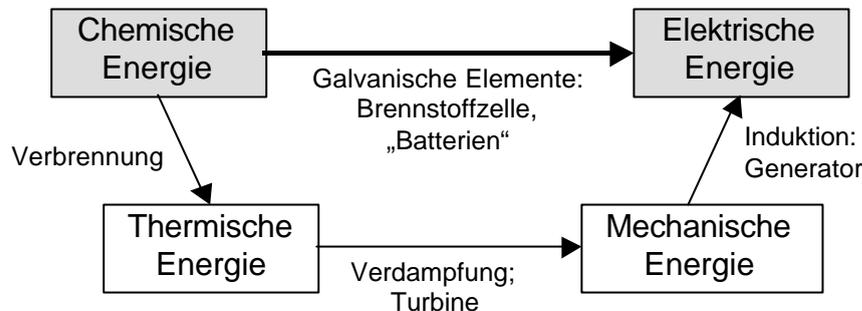


# Brennstoffzellen

## 0. Einführung / Allgemeines

Brennstoffzellen sind Vertreter galvanischer Elemente. Solche zeichnen sich dadurch aus, chemische Energie direkt in elektrische Energie zu überführen, also im Gegensatz zum derzeit weit etablierten Prinzip der Verbrennungskraftwerke mehrere verlustbehaftete Energiewandlungen zu umgehen:



Die bekanntesten galvanischen Elemente sind gemeinhin als „Batterien“ bezeichnete Zellen (*Primärelemente*) sowie Akkumulatoren (*Sekundärelemente*), welche wir insbesondere zur mobilen Versorgung elektrischer Kleinverbraucher einsetzen.

Die Problematik der Primärelemente ist hinreichend bekannt:

- Die verfügbare Energiedichte ist relativ niedrig.
- Im Vergleich dazu ergibt sich ein sehr schlechtes Verhältnis hinsichtlich Preis, Lebensdauer sowie ökologischer Belastung (hoher Rohstoffeinsatz; häufig Verwendung von Schwermetallen).
- Das grundsätzliche Problem solcher Batteriesysteme ist deren stoffliche Abgeschlossenheit: Es lassen sich weder die Reaktanden (Edukte) zu- noch die Abfallstoffe (Produkte) abführen.

Brennstoffzellen, deren Prinzip der „*kalten Verbrennung*“ erstmals der englische Physiker Sir William Grove (1811 bis 1896) 1939 entdeckte, versprechen genau diese Probleme (bei im Grunde gleichem Funktionsprinzip) zu lösen:

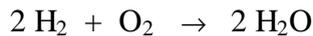
- Die Edukte (Brennstoffe) lassen sich kontinuierlich zu- und die Produkte (typischerweise nur Wasser) kontinuierlich abführend.
- Lebensdauer, Energiedichte, Leistung und Umweltverträglichkeit übertreffen die herkömmlichen Batteriesysteme bei weitem.
- Moderne Bauweisen lassen den Einsatz von Brennstoffzellen in unterschiedlichsten Anwendungen, von der mobilen Kleinalelektronik über Kfz bis hin zum Kraftwerk, zu.

## 1. Elektrochemisches Funktionsprinzip

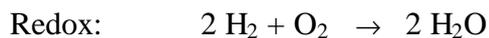
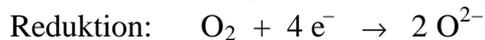
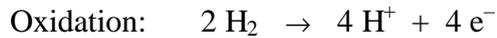
Wir müssen uns an dieser Stelle kurz mit dem Wesen chemischer Reaktionen befassen, wollen uns dabei aber auf sog. *Redoxreaktionen* und unter diesen speziell auf *Verbrennungsvorgänge* konzentrieren.

Solche Reaktionen kommen grundsätzlich durch einen Austausch von Valenzelektronen zwischen den Reaktionsteilnehmern zustande, jeweils mit dem Ziel, die Edelgaskonfiguration (2 bzw. 8 Valenzelektronen auf der äußeren Schale) und damit einen energetisch besonders günstigen (niedrigen) Zustand zu erreichen.

Betrachten wir exemplarisch die Verbrennung von Wasserstoff, also die Reaktion mit Sauerstoff, welche durch folgende Summengleichung beschrieben wird:



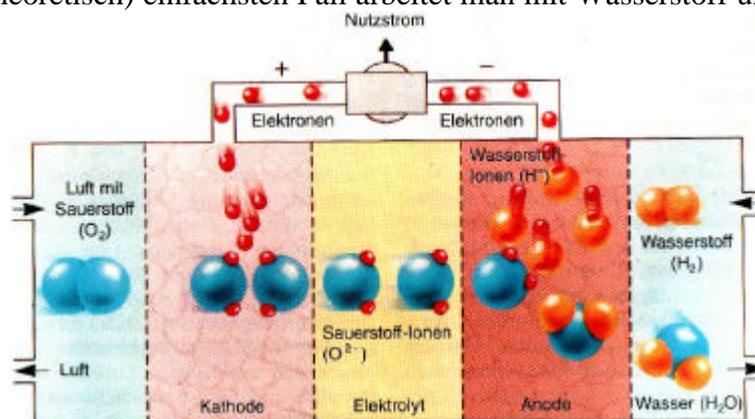
Da es sich um eine *Übertragung* von Valenzelektronen handelt, muß einer der Partner als *Elektronendonator* (hier der Wasserstoff) und der andere als *Elektronenakzeptor* (hier der Sauerstoff) fungieren. Der Prozeß der Elektronenabgabe heißt *Oxidation*, der Prozeß der Elektronenaufnahme *Reduktion*. Beide Vorgänge lassen sich separat notieren; in der Summe erhält man dann genau obige Gleichung. Die Gesamtreaktion heißt *Redoxreaktion*, da sie aus den Teilvorgängen der Reduktion und Oxidation zusammengesetzt ist:



Die freiwerdende Energie erscheint beim Verbrennungsvorgang hauptsächlich in Form von Wärme. Ein Stromfluß ist nicht festzustellen, da die Reaktionspartner hinreichend durchmischt sind und daher sofort „chemische Kurzschlüsse“ bilden.

Sofern man aber die Vorgänge von Oxidation und Reduktion räumlich voneinander trennen kann, sollten sich die übertragenen Elektronen als Nutzstrom verwenden lassen. Genau dieses Prinzip kommt in allen elektrochemischen Elementen (wie z.B. den klassischen Batteriesystemen) zur Anwendung und liegt auch der Brennstoffzelle zugrunde.

Im (technisch und theoretisch) einfachsten Fall arbeitet man mit Wasserstoff und Sauerstoff:



Der gasförmige Sauerstoff wird auf die Kathode geleitet und lagert sich dort kurzfristig an. Die austretenden Elektronen bewirken die Dissoziation\* des  $\text{O}_2$ -Moleküls und reduzieren es zu  $\text{O}^{2-}$ -Ionen. Auf der anderen Seite des Systems wird gasförmiger Wasserstoff kurzfristig an der Anode gebunden, dissoziiert ebenfalls, wird jedoch durch Abgabe seiner Elektronen zu  $\text{H}^+$  oxidiert. Die Elektronen fließen (über einen an die Elektroden angeschlossenen Verbraucher) als Nutzstrom zur Kathode. (Solche Brennstoffzellen liefern Spannungen zwischen ca. 0,7 und 1 V.) Innerhalb der Brennstoffzelle muß nun natürlich noch eine Neutralisation der Anionen und Kationen erfolgen; dazu müssen durch den Elektrolyten entweder die  $\text{O}^{2-}$ -Ionen oder die Protonen ( $\text{H}^+$ ) transportiert werden. Im dargestellten Beispiel kommt ein  $\text{O}^{2-}$ -leitender Elektrolyt zum Einsatz (es gibt aber ebenfalls protonenleitende Elektrolyten). Auf der Anodenseite treffen  $\text{O}^{2-}$  und  $\text{H}^+$  aufeinander und verbinden sich zu Wasser, welches als ungiftiges Abgas aus der Zelle entfernt wird.

Anstelle von reinem Sauerstoff kann auch Luft als Oxidationsmittel verwendet werden (wegen des geringeren Partialdrucks des darin nur zu etwa 21% enthaltenen Sauerstoffs muß diese dann aber unter erhöhtem Druck, also mittels Kompressor, eingeleitet werden). In diesem Falle böte die Verwendung eines protonenleitenden Elektrolyten Vorteile: Das Wasser entstünde nun nämlich auf

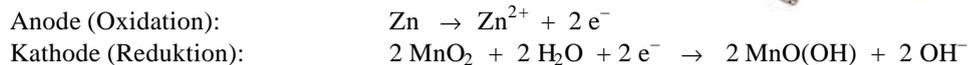
\* Dissoziation: Zerfall eines Moleküls; speziell unter Bildung von Ionen.

der Kathodenseite und könnte, zusammen mit der ohnehin austretenden Abluft (genauer: Restluft), direkt abgeführt werden. –

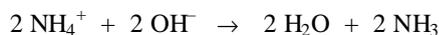
*EXKURS:* Zum Vergleich sei hier noch kurz das Funktionsprinzip der herkömmlichen Batteriesysteme am Beispiel einer handelsüblichen Trockenzelle dargestellt:

Die Kathode wird üblicherweise durch einen Graphitstab gebildet; die Anode ist der Zinkbecher. Die Anordnung liefert eine Spannung von ca. 1,5 V.

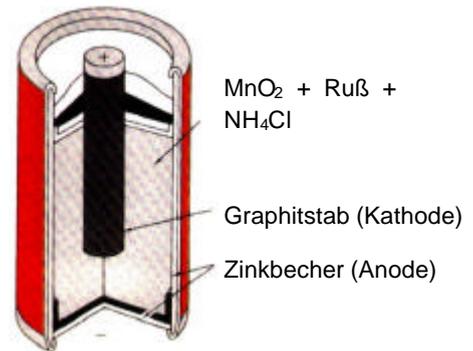
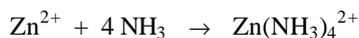
Bei angelegter Last zersetzt sich der Zinkbecher (Zink wird zu  $Zn^{2+}$  oxidiert) und wird damit zur Anode bzw. nach außen hin zum negativen Pol. An der Kathode wird durch die austretenden Elektronen der umhüllende Braunstein ( $MnO_2$ ) reduziert; es treten ferner verschiedene Sekundärreaktionen mit dem Elektrolyten ein:



Der Elektrolyt stellt  $NH_4^+$ -Ionen bereit, welche zusammen mit dem an der Kathode frei gewordenen  $OH^-$  Ammoniak ( $NH_3$ ) bilden:



Das Ammoniak reagiert mit den  $Zn^{2+}$ -Ionen zu einem löslichen Komplex und hilft somit, die Anodenoberfläche von den Reaktionsprodukten zu befreien:



## 2. Typen von Brennstoffzellen / Anwendungen

Brennstoffzellen werden nach ihren unterschiedlichen Betriebstemperaturen in Nieder-, Mittel- und Hochtemperaturaggregate unterteilt. Ferner unterscheidet man die Art des Elektrolyten.

Die Tabelle gibt einen Überblick über verschiedene Typen von Brennstoffzellen (Stand 1995):

Name	Betriebstemperatur (in °C)	Elektrolyt	Brennstoff	h (in %)	Anwendung	Stand der Technik
Alkalische Brstz. ( <i>alkaline fuel cell, AFC</i> )	80 bis 90	Kalilauge	H <sub>2</sub>	50 bis 65	Transport, Raumfahrt, Schifffahrt	50 bis 100 kW, im Handel, teuer
Polymer-Elektrolytmembran-Brstz. ( <i>PEMFC</i> )	60 bis 80	Polymermembran (Nafion)	H <sub>2</sub> ; reformiertes Methan o. Methanol	50 bis 60	Transport, E-Auto, Raumfahrt, Schifffahrt, Haushalt	20 kW, hohe Leistungsdichte; 30 bis 40 kW für U-Boote in Entw.
Phosphorsaure Brstz. ( <i>phosphoric acid fuel cell, PAFC</i> )	200	Phosphorsäure	H <sub>2</sub> ; reformiertes Methan	35 bis 45	1- bis 100-MW-Kraftwerke, 50- bis 500-kW Blockheizkraftwerke	
Schmelzcarbonat-Brstz. ( <i>molten carbonate FC, MCFC</i> )	650	Calciumcarbonat	H <sub>2</sub> ; Methan	45 bis 60	1- bis 100-MW-Kraftwerke, 50- bis 500-kW Blockheizkraftw.	100-kW-Prototypen
Festkeramik-Brstz. ( <i>solid oxide fuel cell, SOFC</i> )	850 bis 1000	Zirkonoxid	H <sub>2</sub> ; Methan; Kohlegas	50 bis 60	1- bis 100-MW-Kraftwerke, 50- bis 500-kW Blockheizkraftw.	25-kW-Prototypen

Die *alkalische Brennstoffzelle* zeichnet sich durch hohe Wirkungsgrade aus und kam im übrigen zuerst zur technischen Anwendung (1963 in der Raumfahrt). Zudem erfordert sie (außer den Edelmetallelektroden) nur relativ preiswerte Materialien.

Die *PEMFC* wurde bereits erfolgreich in U-Booten eingesetzt. Sie verspricht ein vielfältiges Einsatzspektrum, z.B. netzunabhängige Strom- und Wärmeversorgung von Gebäuden oder elektrische Versorgung von Kfz (als Antrieb, Hybridantrieb oder anstelle der Lichtmaschine als

Versorger für die „klassischen“ elektrischen Verbraucher im Auto). Die Stapel (*Stacks*) in Reihe bzw. parallel geschalteter PEMFCs zeigen gerade für solche Anwendungsbereiche attraktive Eigenschaften: Die Zellen können bei Umgebungstemperatur hochgefahren werden und besitzen mit max. 80°C eine relativ geringe Betriebstemperatur. Sie lassen sich zudem schnell ein- und ausschalten und reagieren sehr schnell auf Lastwechsel. Die hohe Leistungsdichte mit Gesamtleistungen in der Größenordnung von 40 kW macht sie zu einem interessanten Kandidaten für Kfz. Probleme bereitet jedoch die Speicherung des Wasserstoffs sowie die Tatsache, daß PEMFCs optimaler Weise mit reinem Sauerstoff betrieben werden müssen. Offensichtlich ist aber die Verwendung von Luft erstrebenswerter. Neben diesen rein technischen Fragen müssen für einen breiteren Einsatz die Produktionskosten (durch Einsparung teurer Edelmetall-Katalysatoren und Membranen sowie durch höher automatisierte Produktion) noch deutlich gesenkt werden. Immerhin, erfolgreiche Prototypen existieren bereits, so z.B. der unten abgebildete Gabelstapler mit PEMFC-Antrieb, welcher seit August 1997 erprobt wird. (Vergl. auch Abschnitt 6.)

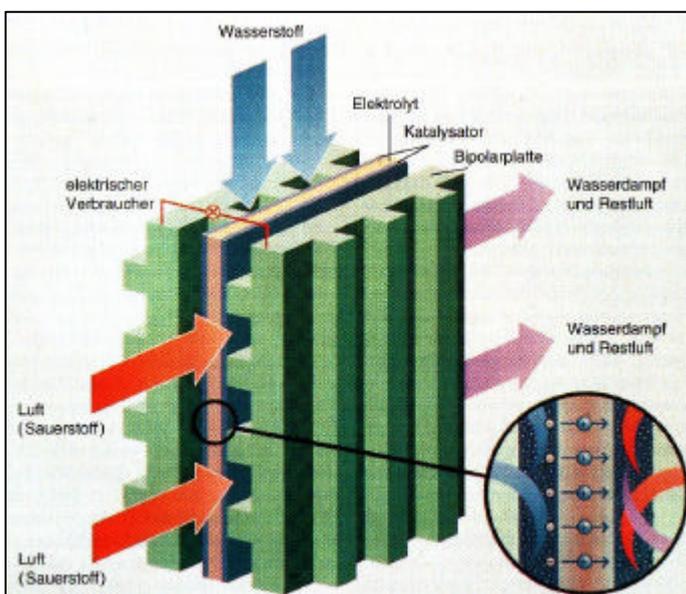
Zum Aufbau von PEM-Brennstoffzellen:

Ein besonderer Konstruktionsvorteil besteht in dem Elektrolyten: Dieser ist keine Flüssigkeit, sondern eine nur Zehntelmillimeter dünne, feste Membran. Ein dafür geeigneter Werkstoff ist z.B. eine Nafion-Folie; das ist ein Material aus hydrophobem (wasserabweisendem) Tetrafluorethen (ähnlich dem Teflon), welches mit hydrophilen (wasseranziehenden) Sulfonsäure-Gruppen (SO<sub>3</sub>H) versetzt ist. Das Polymer Teflon gewährleistet die notwendige mechanische und chemische Stabilität; die „Dotierung“ mit SO<sub>3</sub>H ermöglicht eine gute Protonenleitung, läßt jedoch Elektronen sowie die elektrisch neutralen Gase (kaum) durch.

Auf die Elektrolytmembran werden beidseitig dünne Katalysatoren und Elektrolyten aufgebracht; der Katalysator besteht z.B. aus einer sehr feinen Platinschicht. Es schließen sich sog. Bipolarplatten an, welche mehrere Aufgaben erfüllen:

- Gleichmäßige Zuführung der Reaktanden (O<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>) zu den Elektroden.
- Abführung von Wärme und Strom.
- Einschluß der Membran-Elektroden-Einheit von beiden Seiten und somit Bildung einer Einzelzelle.

Über die Platten können die Einzelzellen schließlich zu Stapeln (*Stacks*) elektrisch gekoppelt werden. Offensichtlich richtet sich die Anzahl der Komponenten nach den Anforderungen hinsichtlich Strom und Spannung (Zellenspannung 0,6 bis 1 V). Der Wirkungsgrad solcher Aggregate liegt zwischen 50 und 80 %; Leistungsdichte ca. 1 kW/cm<sup>2</sup> mit 1 W/cm<sup>2</sup> und 2 A/cm<sup>2</sup>.



oben: Gabelstapler mit PEMFC-Antrieb; seit August 1997 bei der Solar-Wasserstoff-Bayern GmbH in Erprobung.

links: Bauschema einer PEM-Einzelzelle.

*MCFCs* bieten den Vorteil, direkt mit kohlenstoffhaltigen Brenngasen (Methan) betrieben werden zu können und dabei ordentliche Wirkungsgrade zu erzielen; demgegenüber steht jedoch die Aggressivität der Carbonatschmelze, welche die Standzeit der Werkstoffe noch zu sehr begrenzt. *SOFCs* sind ebenfalls besonders für den Kraftwerksbau von Interesse; jedoch stellen auch hier die hohen Temperaturen große Herausforderungen an die Werkstoffentwicklung.

### 3. Wirkungsgrad, Kennlinien, Verlustmechanismen

Aus obiger Tabelle geht bereits hervor, daß der besondere Charme von Brennstoffzellen in ihrem hohen Wirkungsgrad liegt. Theoretisch sind sogar Werte bis dicht an 100% erreichbar. Daß dies in der Praxis nicht möglich wird, liegt an den Werkstoffeigenschaften (s. 4.) sowie den Verlusten, welche bei der Stromentnahme auftreten.

Der ohmsche Widerstand ist für variable entnommene Stromdichten konstant. Hingegen läuft eine Reihe verlustbehafteter Teilschritte, abhängig von der entnommenen Stromdichte, ab, welche wir am Beispiel der Kathode einer Festkeramik-Hochtemperatur-Brennstoffzelle (SOFC) mit Zirkonoxid-Elektrolyt (ein  $O^{2-}$ -Leiter) betrachten wollen (vergl. umseitige Graphik):

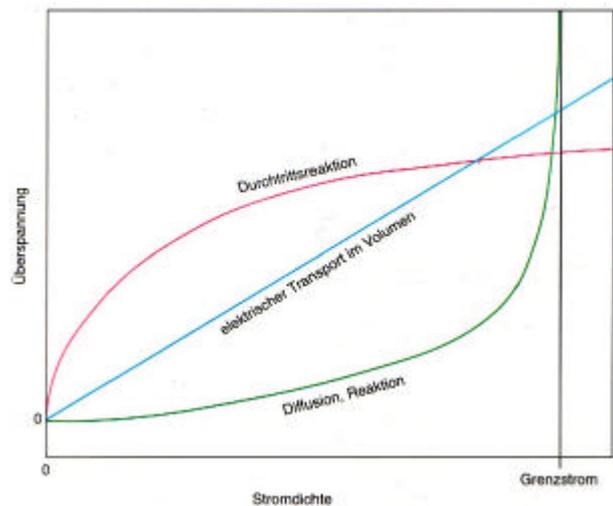
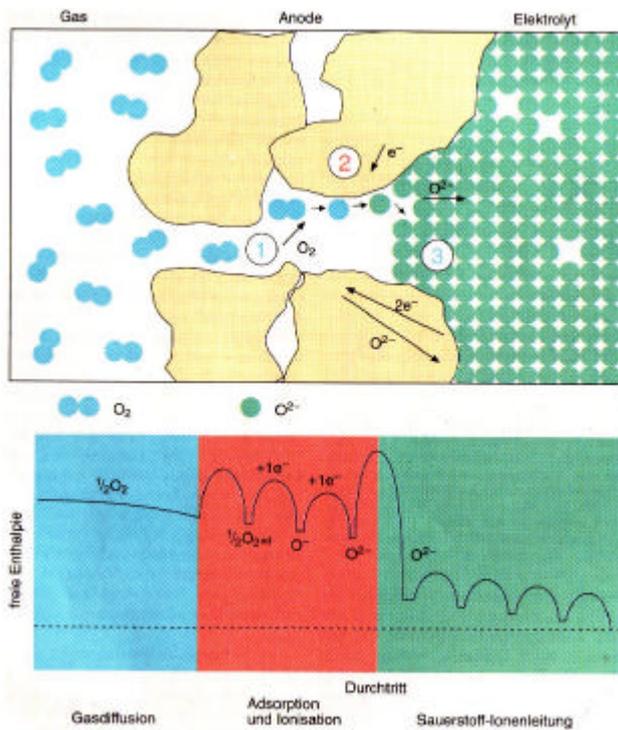
- Der Sauerstoff muß gasförmig herantransportiert werden; das kann durch einen erhöhten Betriebsdruck unterstützt werden. Entscheidend ist die Diffusion des Gases in den porösen Elektrodenbereich hinein, welche durch den Konzentrationsunterschied für  $O_2$  zwischen Elektrode und Gasphase getrieben wird.
- Das Gas muß sich nun an die Oberfläche der Elektrode anlagern (*Adsorption*), wird dort in die Atome aufgespalten (*Dissoziation*) und nimmt dann Elektronen auf (*Reduktion / Ionisation*), so daß die  $O^{2-}$ -Ionen entstehen.
- Die  $O^{2-}$ -Ionen müssen sich von der Metalloberfläche (typischerweise ein sorgfältig gewähltes, geeignet katalytisch aktives Metall, Metalloxid oder Gemisch) lösen, in den Festelektrolyten übertreten und zur Anodenseite wandern.
- Ein entsprechend komplexes Geschehen findet an der Anode statt. Es endet damit, daß sich gemäß  $O^{2-} + 2 H^+ \rightarrow H_2O$  Wasser bildet, welches schließlich als (vollkommen unschädliches) Abgas abzuführen ist.

Wird die Zelle durch einen angeschlossenen Verbraucher belastet, ist jedem der genannten Teilschritte ein Widerstand bzw. eine Minderung der verfügbaren Spannung (eine sog. *Verlustspannung*) zuzuordnen.

Die nachfolgende Graphik illustriert die geschilderten Prozesse; die Kennlinien zeigen die Beiträge zum Widerstand.

Der *Durchtrittswiderstand* (bedingt durch den Eintritt von  $O^{2-}$  in den Elektrolyten) reagiert empfindlich auf den Stromfluß und nimmt mit steigender Belastung ab. Strombegrenzend wirkt hingegen die *Diffusionshemmung*: Treibend für die Zufuhr der Reaktanden ist, wie gesagt, die Diffusion durch Konzentrationsunterschiede zwischen Gasphase und Elektrode, welche bei der Heranführung aus der Gasphase nicht beliebig schnell gehen kann.

Alle Teilreaktionen können nur an der sog. *Drei-Phasen-Grenze* zwischen Katalysator, Elektrolyt und Gasraum ablaufen, also dort, wo die Gase sowohl mit einem elektronischen als auch mit einem ionischen Leiter Kontakt haben. Es ist offensichtlich, daß diese aktive Oberfläche durch poröse Gasdiffusionselektroden möglichst groß gestaltet werden sollte.



#### 4. Materialanforderungen

Das Thema der Materialanforderungen sei hier nur kurz gestreift; ich möchte einige bislang noch ungenannte Punkte ansprechen.

- Sowohl das Elektrodenmaterial als auch die übrigen Materialien der Brennstoffzelle müssen chemisch äußerst widerstandsfähig (inert) sein. Neben ggf. aggressiven Elektrolyten müssen sie sowohl dem stark oxidierenden Milieu an der Kathode ( $O_2$ -Zuführung) als auch dem stark reduzierenden Milieu an der Anode ( $H_2$ -Zuführung) standhalten.
- Die werkstofftechnische Bewältigung der großen Temperaturen (bzw. Temperaturdifferenzen beim Ein-/Ausschalten) v.a. bei MCFC und SOFC ist eine besondere Herausforderung.
- Die Verschaltung der Einzelblöcke zu Aggregaten erfordert hinreichend mechanische Belastbarkeit. Daraus ergeben sich hohe Anforderungen auch an den Elektrolyten:
- Der Elektrolyt sollte aus mechanischer Sicht optimaler Weise ein Festkörper sein, wohingegen elektrotechnische Erwägungen einen flüssigen Elektrolyten bevorzugen lassen (immerhin haben diese einen um etwa eine Größenordnung besseren Leitwert als Feststoffe). Entscheidend für die Funktion der ganzen Brennstoffzelle ist, daß der Elektrolyt ein möglichst guter Ionenleiter (je nach Bauweise der Brennstoffzelle für  $O^{2-}$  oder  $H^+$ ) ist, für Elektronen jedoch einen möglichst guten Isolator darstellt. Zudem muß der Elektrolyt ein Hindurchdiffundieren der (noch) gasförmigen Reaktanden verhindern, da diese sonst im Innern „chemische Kurzschlüsse“ (Lokalelemente) bilden. Der oben bereits erwähnte Werkstoff für die Elektrolyt-Membran, Nafion, bietet viele der geforderten Eigenschaften, bereitet jedoch Schwierigkeiten bei nicht optimal gehaltenen Betriebsbedingungen, ist relativ teuer und zudem ökologisch bedenklich (FKW!).
- Die verwendeten Werkstoffe müssen untereinander chemisch kompatibel sein und trotzdem die hohen elektrotechnischen Anforderungen erfüllen. Z.B. darf die Affinität der Katalysator-/Elektroden-Kombination zum Gas nicht zu hoch und nicht zu niedrig sein; ist sie zu niedrig,

kann kein geeigneter Ladungsträger austausch stattfinden; ist sie zu hoch, wird der Durchtritt der Ionen in den Elektrolyten behindert.

- Ganz offensichtlich hilft eine möglichst kompakte Bauweise, Verluststrecken zu minimieren.
- Gewisse Einflüsse können die Standzeiten der teuren Anlagen drastisch mindern: Wird z.B. ein kohlenstoffhaltiger Brennstoff eingesetzt, kann Kohlenmonoxid (CO), welches ein starkes Katalysatorgift ist, diesen vorzeitig unbrauchbar machen.
- Schließlich dürfen die Palette der benötigten Rohstoffe (z.B. sehr teure Katalysatormaterialien) sowie ernstzunehmende ökonomische und ökologische Fragen nicht außer Acht gelassen werden.

## 5. Zur Brennstoffversorgung

Die optimale Brennstoffversorgung ist grundsätzlich mit einer Kombination aus reinem Wasserstoff und Sauerstoff gegeben. Darauf bauen auch die Perspektiven einer nachhaltigen Energiewirtschaft auf:  $\text{H}_2$  und  $\text{O}_2$  lassen sich gemäß  $2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{H}_2 + \text{O}_2$  in Elektrolyse-Anlagen, welche durch Solarzellen mit Elektrizität versorgt werden, gewinnen. Die Gase kann man speichern und z.B. für den umweltfreundlichen Betrieb von Brennstoffzellen verwenden.

Leider ist der Gesamtwirkungsgrad hierbei mit weniger als 10 % noch zu niedrig. Entwicklungsbedarf dürfte wohl im besonderen auch bei den Solarzellen bestehen. Derzeit jedenfalls sind die Investitionskosten um ein Vielfaches höher als bei konventionellen Techniken; auch läßt sich die Fertigungsenergie erst nach etlichen Betriebsjahren zurückgewinnen.

Eine Solar-Wasserstoff-Kreislaufwirtschaft ist also offenbar noch nicht konkurrenzfähig, bleibt aber im Rahmen der Diskussion um nachhaltige Energieversorgung eine sehr vielversprechende Option.

Im realen Betrieb treten zwei praktische Schwierigkeiten bei der Gasversorgung auf:

1. Es ist offensichtlich anwendungsfreundlicher, anstelle reinen Sauerstoffs den atmosphärischen Sauerstoff aus der Luft zu verwenden.
2. Die Speicherung von Wasserstoff ist problematisch.

Lösungsansätze ergeben sich z.B. folgender Art:

1. Die Verwendung von Luft als Oxidationsmittel ist im allgemeinen möglich, wenngleich sie eine Kompromißlösung darstellt und nicht die optimale Nutzung der Brennstoffzelle erlaubt. Häufig ist es erforderlich, die Luft zuvor durch einen Kompressor auf einen Druck von ca. 2 bis 8 bar zu bringen, was natürlich einen Teil der gewonnenen Energie beansprucht.
2. Zur Speicherung des Reduktionsmittels (des Brennstoffs,  $\text{H}_2$ ) gibt es verschiedene Konzepte: Um komprimierten Wasserstoff (ca. 200 bar) aufzunehmen, bedarf es eines relativ großen Volumens; ein 50-Liter-Tank reicht gerade für etwa 1 kg. Eine Variante ist, verflüssigten Wasserstoff zu tanken; das ist jedoch energetisch sehr aufwendig (die Verflüssigung verbraucht 30% des Energiegehalts); zudem entweicht permanent ein gewisser Teil des Gases.

Eine Alternative wäre, auf organische (kohlenstoffhaltige) Brennstoffe auszuweichen. Es bieten sich dazu z.B. Methan ( $\text{CH}_4$ ) oder Methanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) an. Methanol hat den erhebliche Vorteil, ohnehin flüssig zu sein. Solche Stoffe erfordern aber vor dem Einsatz in der Brennstoffzelle einen Reformierungsprozeß (z.B. gemäß  $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{H}_2 + \text{CO}_2$ ); gerade bei geringen Betriebstemperaturen besteht die Gefahr, aktive Oberflächen durch Katalysatorgifte (CO) zu schädigen. Immerhin erweitert die Verwendung von Stoffen wie Methanol erheblich den Einsatzbereich von Brennstoffzellen; übrigens lassen sich Methanol und andere Alkohole gut biologisch herstellen.

## 6. Aktuelles Anwendungsbeispiel

Brennstoffzellen sind ein hochaktuelles Thema in Forschung und Technologie – das zeigt jüngst eine Mitteilung aus der Automobiltechnik (Spektrum der Wissenschaft, Mai 2001):

BMW stellt eine Variante seines neuen 7er Modells mit einem ungewöhnlichen Energieversorgungskonzept vor:

- Angetrieben wird das Fahrzeug von einem Verbrennungsmotor (in konventioneller „heißer Verbrennung“, also durch die Expansion des explodierenden Brennstoffgemisches). Die Neuerung am Motor besteht darin, daß er sowohl mit Benzin, als auch mit Wasserstoff betrieben werden kann. Beide Stoffe werden in separaten Tanks gespeichert; geht der Wasserstoff zu Ende, wird auf Benzin umgeschaltet. Beide Tanks zusammengenommen, sind damit Reichweiten von über 1000 km möglich. Zugleich bietet der Motor gewohnten Fahrkomfort. Besonders reizvoll bei diesem Konzept ist, daß die Vorteile der hohen Leistungsdichte eines Verbrennungsmotor und die Umweltfreundlichkeit der Wasserstoffverbrennung kombiniert werden.
- Die gesamte Bordelektronik sowie die übrigen Stromverbraucher werden nicht mehr, wie traditionell üblich, durch eine am Motor mitlaufende Lichtmaschine versorgt. Diese Aufgabe übernimmt nun eine *Brennstoffzelle* (übrigens vom oben bereits eingehend diskutierten PEM-Typ). Sie wird – motorunabhängig – direkt aus dem Wasserstofftank gespeist. Die Vorteile sind offensichtlich: Auch wenn der Motor nicht läuft, lassen sich z.B. die Klimaanlage oder Heizung starten. Die Brennstoffzelle liefert eine deutlich höhere Leistung als die Lichtmaschine, das allerdings nur genau dann, wenn die Leistung von den angeschalteten elektrischen Verbrauchern auch benötigt wird. Im Gegensatz zur permanent mitlaufenden Lichtmaschine läßt sich somit im Stadtverkehr etwa ein Liter Benzin pro 100 Kilometer einsparen.

Der Wasserstoff wird in gekühlter, verflüssigter Form (-253°C) in einem Thermosflaschen-ähnlichen Isoliertank gespeichert. Bei Entnahme von Wasserstoff sinkt der Druck über der Flüssigkeit und weiterer Wasserstoff verdampft; das bewirkt eine effektive Nachkühlung des flüssigen H<sub>2</sub>. Im Vergleich zu stark komprimiertem Wasserstoff hat die Flüssiglagerung einige praktische Vorteile: Die Energiedichte ist etwa viermal größer (und erreicht damit etwa 3 kWh/l; zum Vergleich: bei Benzin und Diesel sind es etwa 10 kWh/l); gleichzeitig umgeht man den aus Sicherheitsgründen bedenklich hohen Druck. Das Tanken des Flüssig-H<sub>2</sub> ist unproblematisch.

Die Zielsetzung von BMW klingt gut: Weitere Verbraucher im Auto (Wasserpumpe, Ölpumpen, Bremskraftverstärker etc.) sollen von der effizienteren Brennstoffzelle versorgt werden und somit den Motor entlasten. Bis zum Ende des Jahrzehnts sollen mehrere tausend Limousinen dieser Art in Betrieb und das Netz von Wasserstofftankstellen entsprechend ausgebaut sein.



Eine Brennstoffzelle versorgt die Bordelektronik und andere Stromverbraucher.

---

### Quellen:

- Spektrum der Wissenschaft, Juli 1995, S. 88 ff.
- Spektrum der Wissenschaft, Februar 1999, S. A44 ff.
- Spektrum der Wissenschaft, Mai 2001, S. 82 ff.
- Chemie – einfach alles, Atkins / Beran, VCH, S. 667 ff.