



Brennstoffzelle

Christine Meußler, SS 02; Juliane Fleissner, WS 14/15; Sebastian Rampp, SS 20

Gliederung

| | | |
|-----|---|---|
| 1 | Anwendung | 1 |
| 2 | Aufbau einer Brennstoffzelle | 2 |
| 3 | Funktionsweise der Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle | 3 |
| 4 | Thermodynamische Betrachtung der PEMFC | 4 |
| 5 | Kinetische Betrachtung der PEMFC | 6 |
| 6 | Vor- und Nachteile | 7 |
| 6.1 | Vorteile | 7 |
| 6.2 | Nachteile | 7 |
| 7 | Aus der Geschichte | 8 |
| 8 | Weitere Typen von Brennstoffzellen | 9 |

Einstieg 1: Die fossilen Brennstoff-Vorkommen gehen zur Neige und damit werden auch die Preise für Benzin, Diesel usw. immer weiter steigen. Aber das ist uns und unserer Wirtschaft zuzuschreiben. Überall in der Technik schreiten wir voran, sei es bei der Entwicklung vom Schwarz-Weiß-Röhren-Fernseher bis hin zum 3D-HD-Plasmafernseher oder bei der Entwicklung der Mobil-Telefone, die oft leistungstärker sind als mancher Computer. Nur unsere Fahrzeug-Antriebe funktionieren noch nahezu genauso, wie vor 130 Jahren. Eigentlich ist es auch hier an der Zeit voranzuschreiten und auf einen alternativen Antrieb oder Brennstoff umzusteigen. Wasserstoff als Brennstoff ist doch eigentlich eine Alternative, die uns bereits lange bekannt ist und großes Potential besitzt. Tatsächlich werden schon einige Brennstoffzellen-Typen eingesetzt. Wo diese bereits Anwendung finden, wie diese funktionieren und welche Vor- und Nachteile sie uns bringen soll im Folgenden geklärt werden.

Einstieg 2: Als sich meine Familie an Weihnachten getroffen hat, haben mein Onkel und ich über Autos geredet. Da er bei einem Autohersteller arbeitet hat er erzählt, dass zurzeit viel an der Brennstoffzellentechnik zum Antrieb geforscht wird. Daraufhin habe ich mich gefragt, ob das Problem dieser Antriebsart die Brennstoffzelle selbst ist oder ob es mit der Wasserstofflagerung zu tun hat.

1 Anwendung

Für die Brennstoffzellentechnik gibt es einige mögliche Anwendungen. So können Brennstoffzellen in kleinen Einheiten zur Strom- und Wärmeversorgung von einzelnen Haushalten, oder als Kraftwerke (stationäre Energie-Versorger) für Wohnanlagen und öffentliche Gebäude, wie beispielsweise das Röhn-Klinikum in Bad Neustadt, genutzt werden.

Eine weitere Einsatzmöglichkeit ist der Einsatz in Fahrzeugen, um diese umweltfreundlicher zu betreiben. Auch für Handys, Handy-Ladestationen, Laptops und andere tragbare Elektrogeräte wäre die Brennstoffzelle als Akku-Ersatz denkbar. In der Raumfahrt wird diese Technik schon lange eingesetzt, da für die Flüge sowieso Sauerstoff mit an Bord sein muss. Das bei der Brennstoffzelle entstehende Wasser findet hier sogar noch Anwendung als Trinkwasser für die Astronauten. Auch im Militär ist diese Technik schon länger im Gebrauch und wird z. B. zur Energiegewinnung in U-Booten eingesetzt.

2 Aufbau einer Brennstoffzelle

Prinzipiell sind Brennstoffzellen nichts Geringeres, als eine Galvanische Zelle, die aus zwei Galvanischen Elementen besteht. Als galvanisches Element bezeichnet man eine elektrochemische Halbzelle, in der die freie Energie eines chemischen Vorgangs in freie elektrische Energie umgewandelt wird. Galvanischen Zellen können unterteilt werden in:

- nicht regenerierbare Primär-Elemente (z. B. Batterien)
- regenerierbare Sekundär-Elemente wie Akkumulatoren (wieder aufladbar)
- Brennstoffzellen, bei denen die reagierenden Substanzen während der Reaktion zu- und die Oxidationsprodukte abgeleitet werden, wodurch eine kontinuierliche Stromerzeugung möglich ist.

Somit ist die Brennstoffzelle ein galvanisches Element, in dem durch elektrochemische Oxidation einer leicht oxidierbaren Substanz (z. B. Wasserstoff, Methanol) mit Sauerstoff („elektrochemische Verbrennung“) elektrische Energie erzeugt wird. Sie besteht aus zwei katalytisch wirksamen, porösen und deshalb für die Reaktionsprodukte durchlässigen Metall-Elektroden (Platin, Nickel) oder metallbeschichteten Kohle-Elektroden, zwischen denen sich ein Elektrolyt befindet (Phosphor- bzw. Schwefelsäure, Kalilauge, Salzsäure, Salzsäuremelzen aus Alkalicarbonaten oder Alkalichloriden, Ionen leitende keramische Feststoffe). Die beiden Elektrolyt-Lösungen sind durch eine Membran voneinander räumlich getrennt.

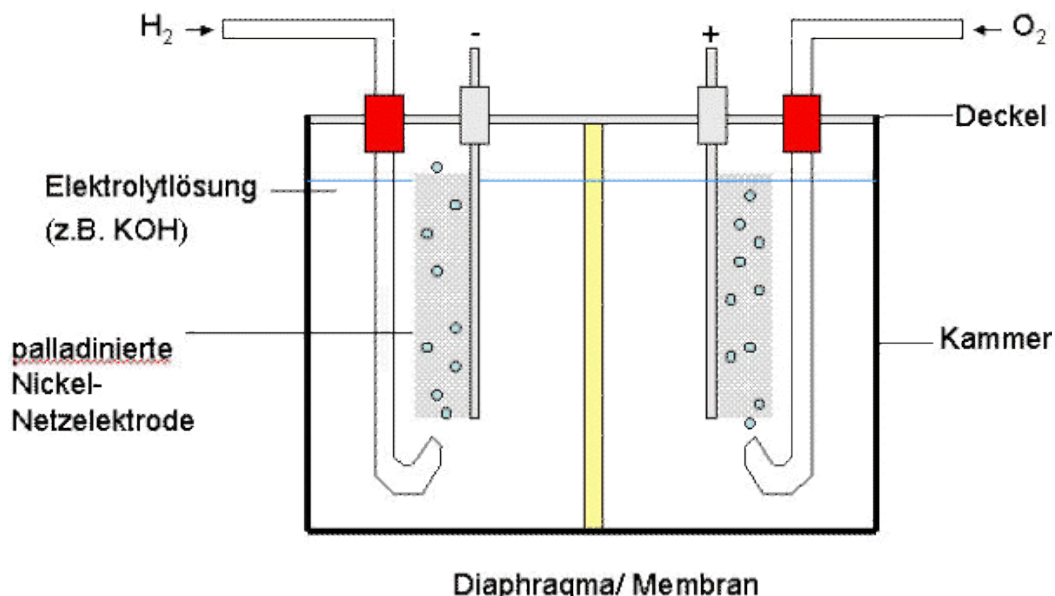
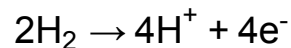


Abb. 1: Allgemeiner Aufbau einer Brennstoffzelle

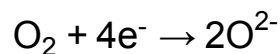
3 Funktionsweise der Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle

Das bekannteste Beispiel für eine Brennstoffzelle ist die mit Wasserstoff und Sauerstoff betriebene Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle (oft fälschlicherweise als Knallgaszelle bezeichnet): PEM-BZ, (**P**roton **E**xchange **M**embrane **F**uel **C**ell, Polymermembran BZ) mit Nafion als Membranmaterial. Sie gehört zu den Niedertemperatur-BZ.

Von außen wird unter Druck kontinuierlich Wasserstoff (H_2) an die „Brennstoff-Elektrode“ (Anode) und Sauerstoff (O_2) an die „Oxidator-Elektrode“ (Kathode) herangeführt. Die Wasserstoff-Moleküle werden an der Anode in Wasserstoff-Ionen (Protonen, H^+) u. Elektronen (e^-) zerlegt:



Die Protonen strömen durch den Elektrolyten und die Membran zur Kathode, die Elektronen laden die Anode negativ auf. Die Sauerstoff-Moleküle der Kathode werden durch Aufnahme von Elektronen in Sauerstoff-Ionen(O^{2-}) zerlegt, wobei sich die Kathode positiv auflädt:



Es entsteht so zwischen den beiden Elektroden eine Spannung von etwa 1 Volt. Verbindet man beide Elektroden über einen äußeren Stromkreis, an dem ein elektrischer Verbraucher (z. B. Glühlampe oder Propeller) angeschlossen ist, so fließen die Elektronen über diesen von der Anode zur Kathode und leisten dabei elektrische Arbeit. An der Kathode verbinden sich die Wasserstoff- und Sauerstoff-Ionen zu Wasser, das kontinuierlich aus dem Elektrolyten abgetrennt wird. Die Gesamt-Reaktion:



entspricht der Knallgasreaktion, die, durch räumliche Trennung der Oxidation des H_2 von der Reduktion des O_2 , in kontrollierter Form stattfindet.

Aufgrund der geringen Spannung (1 V), die eine einzelne Brennstoffzelle liefert, müssen für gewöhnlich mehrere Brennstoffzellen zu einer Brennstoffzellen-Batterie zusammen geschaltet werden.

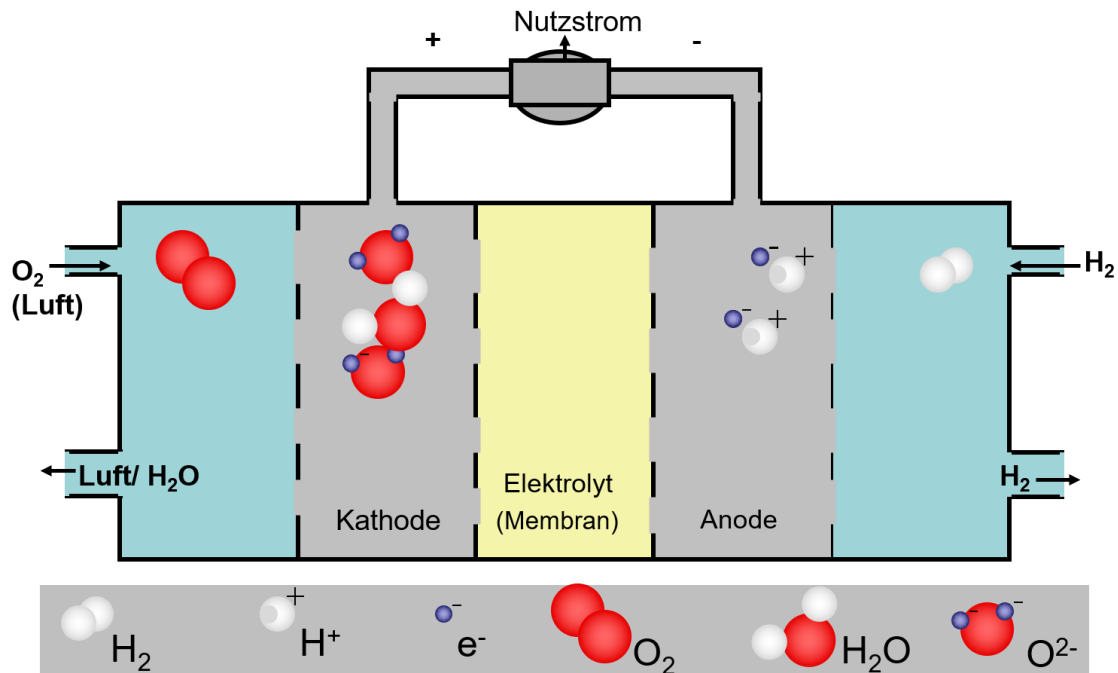
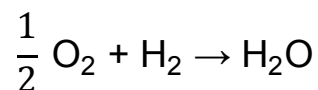


Abb. 2: Aufbau einer PEM-Brennstoffzelle
[Animation in PowerPoint](#)

4 Thermodynamische Betrachtung der PEMFC

Um zu bestimmen wie viel Energie eine Brennstoffzelle generieren kann muss man einige Aspekte der Thermodynamik betrachten. Der folgende Abschnitt bezieht sich auf die Reaktion:



Da es sich bei einer Brennstoffzelle um ein Galvani-Zelle handelt, muss zunächst einmal die Standardzellspannung bestimmt werden. Diese wird mit der Formel

$$E^\square = -\frac{\Delta_R G^\square}{z \cdot F}$$

mit z der Anzahl der Übertragenen Elektronen und F der Faraday-Konstante berechnet.

Um die Freie Reaktionsenthalpie $\Delta_R G^\square$ zu berechnen, werden zuerst die Reaktionsenthalpie $\Delta_R H^\square$, sowie die Entropie $\Delta_R S$ benötigt. Dabei ist zu beachten, dass unterschieden werden muss, ob das entstehende Wasser in der flüssigen oder der gasförmigen Phase vorliegt.

Zunächst soll die Reaktionsenthalpie $\Delta_R H^\square$ berechnet werden. Dazu werden die Werte $\Delta H_{\text{H}_2}^\square = 0 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$, $\Delta H_{\text{O}_2}^\square = 0 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$, $\Delta H_{\text{H}_2\text{O(g)}}^\square = -241,82 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$, $\Delta H_{\text{H}_2\text{O(l)}}^\square = -285,83 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$ benötigt. Mit der Formel

$$\Delta_R H^\square = \sum_{\text{Produkte}} \nu \Delta H^\square - \sum_{\text{Edukte}} \nu \Delta H^\square$$

ergeben sich die folgenden Reaktionsenthalpien:

$$\Delta_R H_{\text{H}_2\text{O(l)}}^\square = \Delta H_{\text{H}_2\text{O(l)}}^\square - \Delta H_{\text{H}_2}^\square + \frac{1}{2} \Delta H_{\text{O}_2}^\square = -285,83 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

und

$$\Delta_R H_{\text{H}_2\text{O(g)}}^{\square} = \Delta H_{\text{H}_2\text{O(g)}}^{\square} - \Delta H_{\text{H}_2}^{\square} + \frac{1}{2} \Delta H_{\text{O}_2}^{\square} = -241,82 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}.$$

Für die Berechnung der Entropie ΔS^{\square} werden die folgenden Werte benötigt: $\Delta S_{\text{H}_2}^{\square} = 130,684 \frac{\text{J}}{\text{K mol}}$, $\Delta S_{\text{O}_2}^{\square} = 205,138 \frac{\text{J}}{\text{K mol}}$, $\Delta S_{\text{H}_2\text{O(g)}}^{\square} = 188,83 \frac{\text{J}}{\text{K mol}}$, $\Delta S_{\text{H}_2\text{O(l)}}^{\square} = 69,91 \frac{\text{J}}{\text{K mol}}$. Mit der Formel

$$\Delta_R S^{\square} = \sum_{\text{Produkte}} \nu \Delta S^{\square} - \sum_{\text{Edukte}} \nu \Delta S^{\square}$$

ergeben sich die folgenden Reaktionsenthalpien:

$$\Delta_R S_{\text{H}_2\text{O(l)}}^{\square} = \Delta S_{\text{H}_2\text{O(l)}}^{\square} - \left(\Delta S_{\text{H}_2}^{\square} + \frac{1}{2} \Delta S_{\text{O}_2}^{\square} \right) = -163,343 \frac{\text{J}}{\text{K mol}}$$

und

$$\Delta_R S_{\text{H}_2\text{O(g)}}^{\square} = \Delta S_{\text{H}_2\text{O(g)}}^{\square} - \left(\Delta S_{\text{H}_2}^{\square} + \frac{1}{2} \Delta S_{\text{O}_2}^{\square} \right) = -44,423 \frac{\text{J}}{\text{K mol}}.$$

Nun kann die Freie Reaktionsenthalpie mit der Formel

$$\Delta_R G^{\square} = \Delta_R H^{\square} - T \Delta_R S^{\square}$$

berechnet werden, wobei als Temperatur die Raumtemperatur (298 K) verwendet wird. Somit erhält man die folgenden Freien Reaktionsenthalpien:

$$\Delta_R G_{\text{H}_2\text{O(l)}}^{\square} = \Delta_R H_{\text{H}_2\text{O(l)}}^{\square} - T \Delta_R S_{\text{H}_2\text{O(l)}}^{\square} = -237,15 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

und

$$\Delta_R G_{\text{H}_2\text{O(g)}}^{\square} = \Delta_R H_{\text{H}_2\text{O(g)}}^{\square} - T \Delta_R S_{\text{H}_2\text{O(g)}}^{\square} = -228,58 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}.$$

Somit ergeben sich die Standardzellpotenziale:

$$E_{\text{H}_2\text{O(l)}}^{\square} = -\frac{\Delta_R G_{\text{H}_2\text{O(l)}}^{\square}}{z \cdot F} = 1,23 \text{ V}$$

und

$$E_{\text{H}_2\text{O(g)}}^{\square} = -\frac{\Delta_R G_{\text{H}_2\text{O(g)}}^{\square}}{z \cdot F} = 1,18 \text{ V}.$$

Als letztes muss noch die Änderung des Standardzellpotenzials bei der Änderung der Temperatur betrachtet werden.

$$\frac{\partial E^{\square}}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial T} \left(-\frac{\Delta_R G^{\square}}{z \cdot F} \right) = \frac{\partial}{\partial T} \left(-\frac{\Delta_R H^{\square} - T \Delta_R S^{\square}}{z \cdot F} \right) = \frac{\Delta_R S^{\square}}{z \cdot F}$$

Damit ergeben sich die folgenden Temperaturänderungen:

$$\frac{\partial E_{\text{H}_2\text{O(l)}}^{\square}}{\partial T} = \frac{\Delta_R S_{\text{H}_2\text{O(l)}}^{\square}}{z \cdot F} = -0,85 \frac{\text{mV}}{\text{K}}$$

und

$$\frac{\partial E_{\text{H}_2\text{O(g)}}^{\square}}{\partial T} = \frac{\Delta_R S_{\text{H}_2\text{O(g)}}^{\square}}{z \cdot F} = -0,23 \frac{\text{mV}}{\text{K}}.$$

Setzt man nun die Standardzellpotenziale, sowie die Änderung in die Nernst'sche Gleichung

$$E = E^{\square} - \frac{RT}{zF} \ln \left(\frac{\prod_{\text{Produkte}} p^{\nu}}{\prod_{\text{Edukte}} p^{\nu}} \right)$$

ein, so erhält man die Spannung, die die Brennstoffzelle liefert.

$$E(T, p_{H_2}, p_{O_2}, p_{H_2O}) = \begin{cases} 1,23 \text{ V} - 0,85 \frac{\text{mV}}{\text{K}} (T - 298 \text{ K}) - \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{1}{p_{H_2} \cdot p_{O_2}^{0,5}} \right), T < 373 \text{ K} \\ 1,18 \text{ V} - 0,23 \frac{\text{mV}}{\text{K}} (T - 298 \text{ K}) - \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{H_2O}}{p_{H_2} \cdot p_{O_2}^{0,5}} \right), T \geq 373 \text{ K} \end{cases}$$

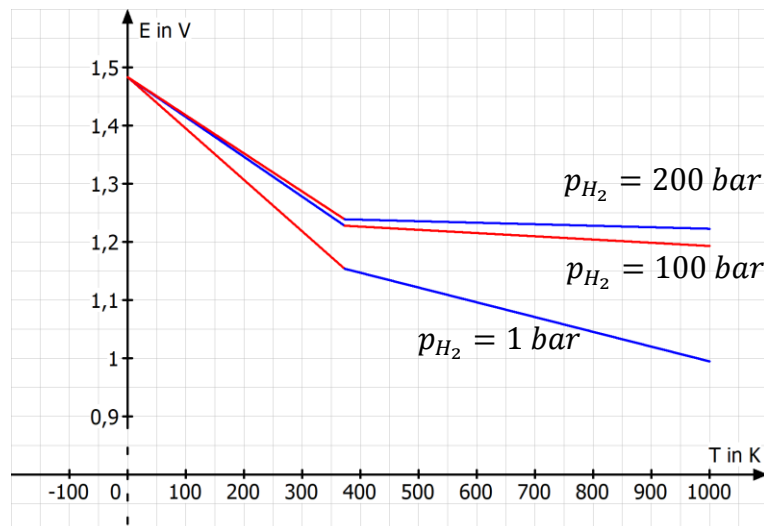


Abb. 3: Theoretische Spannung einer PEMFC in Abhängigkeit von der Temperatur bei einem Partialdruck von H_2O von $p=0,8$ bar und einem Partialdruck von O_2 von $p=0,21$ bar bei verschiedenen Wasserstoff-Partialdrücken

Aus der Nernst'schen Gleichung und Abb. 3 lassen sich folgende Aussagen über die PEMFC treffen:

- Je höher die Temperatur, desto geringer die Spannung
- Je höher der Partialdruck von H_2O , desto geringer die Spannung
- Je höher der Partialdruck von H_2 , desto höher die Spannung
- Je höher der Partialdruck von O_2 , desto höher die Spannung

5 Kinetische Betrachtung der PEMFC

Da die thermodynamische Betrachtung nur für Systeme im Gleichgewicht gilt, muss die Kinetik der Brennstoffzelle ebenso betrachtet werden, da sie nicht mehr im Gleichgewicht ist sobald der Stromkreis geschlossen wird. Dazu wird die Kennlinie einer Brennstoffzelle benötigt.

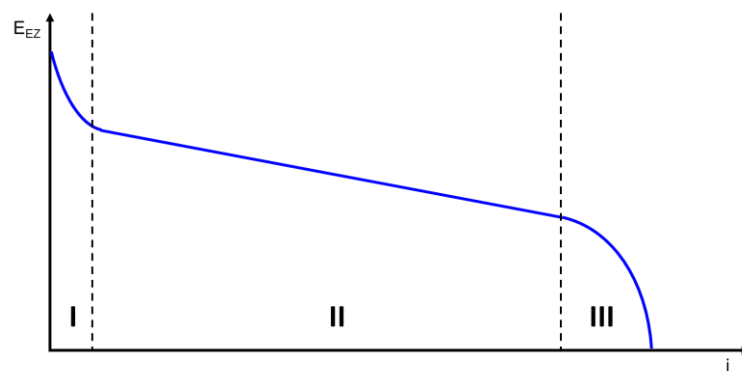


Abb. 4: Schematische Kennlinie einer Brennstoffzelle

Im Bereich I kommt es vor, dass Wasserstoffmoleküle durch die Membran diffundieren, wodurch der Elektrodenstrom um zwei Elektronen vermindert wird. Im Lastbetrieb kann dieser Effekt vernachlässigt werden. Im Ruhezustand oder bei geringen Stromdichten kann dieser Effekt einen großen Einfluss auf das Zellpotenzial haben und dieses verringern.

Im nächsten Bereich (II) kommt es zu einem nahezu linearen Spannungsverlust, durch die Widerstände der ionischen und elektrischen Leitung in der Brennstoffzelle.

Im letzten Bereich (III) kommt es zu einem Rapiden Abfall, da die Edukte nicht mehr schnell genug zu den Reaktionsstellen transportiert werden können und/oder die Produkte nicht schnell genug abtransportiert werden, wodurch die Brennstoffzelle erstickt wird.

6 Vor- und Nachteile

6.1 Vorteile

Ein wichtiger Vorteil der Brennstoffzelle gegenüber anderen Methoden zur Energiegewinnung ist ihre hohe Effizienz. Sie hat einen hohen Wirkungsgrad (43 – 68%) aufgrund der direkten Energieumwandlung in elektrischen Strom. Im Vergleich zu anderen mechanischen Energieumwandlungen sind hierbei keine beweglichen Motorteile vorhanden, die zu Verschleiß und Energie-Verlusten durch Reibung führen.

Ein weiterer Grund weshalb die Brennstoffzellentechnik in der Zukunft wichtig wird, ist dass diese sehr Umweltschonend ist. Sie produziert als Abgas lediglich Wasser und sie benötigt keine fossilen Brennstoffe. Auch die Lärmbelästigung, die bei anderen Energieumwandlern vorhanden ist, fehlt hier gänzlich.

Die Brennstoffzelle hat ein gutes Anfahrverhalten und eine schnelle Reaktion auf Lastenwechsel. Außerdem arbeitet sie bei geringen Betriebstemperaturen. So benötigt das Niedertemperatursystem lediglich Temperaturen zwischen 60°C und 120°C.

Ein letzter wichtiger Punkt ist ihre Lange Lebensdauer im Vergleich zu herkömmlichen Batterien und Akkumulatoren. Auch ihre schnelle Betankung ist nicht zu vernachlässigen.

6.2 Nachteile

Die Brennstoffzellentechnik ist noch teuer, weshalb sie noch nicht so verbreitet ist. So sind Brennstoffzellen-Autos noch nicht in Massenproduktion und es sind nur wenige Exemplare auf den Straßen zu finden.

Ein weiterer Nachteil ist die Empfindlichkeit der Elektroden gegenüber CO im Brenngas. Dieses Problem kann jedoch durch den gezielten Einsatz von bestimmten Katalysatoren minimiert werden.

Auch die Membran hat einige Schwachstellen. Aufgrund der Anforderungen ist sie sehr flexibel, wodurch ihre Verarbeitung erschwert wird. Des Weiteren kann der Gasaustausch an ihr nicht vollständig verhindert werden, wodurch die Leistungsfähigkeit etwas geringer wird. Sie muss auch dauerhaft feucht gehalten werden, da sie sonst ihre Leitfähigkeit verliert. Um diese Nachteile aus dem Weg zu schaffen, wird an neuen Membranen geforscht, die weniger Probleme aufweisen.

7 Aus der Geschichte

Das Grundprinzip der Brennstoffzelle wurde bereits 1839 von William Grove entdeckt. Die technische Realisierung und Nutzung scheiterte jedoch an erheblichen Material-Problemen. Nach 1920 gelang die Entwicklung von Gasdiffusionselektroden mit Platin als Katalysator-Material, die einen Niederdruck-Temperaturbetrieb ermöglichten.

Die Arbeiten von F. T. Bacon in den 50er und 60er Jahren zur alkalischen Brennstoffzelle bildeten die Grundlage zur Nutzung in der Raumfahrt bei der ersten Mond-Landung.

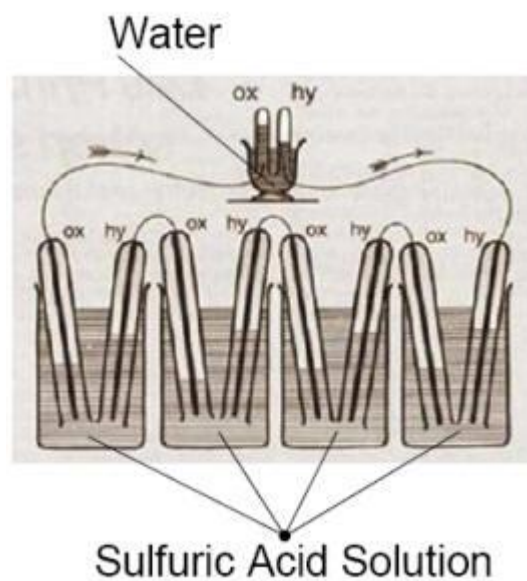


Abb. 5: W. Grove und seine Ur-Brennstoffzelle [20]

8 Weitere Typen von Brennstoffzellen

| | Zelltyp | Betriebs-temperatur | Elektro-lyt | Brenn-stoff | Anwendung | Wirk.-grad |
|------------------------------|-------------------------------|---------------------|------------------|---|---|------------|
| Nieder-tempera-tur-BZ | Polymer-Elektrolyt-BZ (PEMFC) | 60 - 90°C | Polymer-membran | Wasser-stoff, Re-former-gas (Me-thanol) | Raum-, Schifffahrt, Elektroauto, Blockheiz-kraftwerke | 50 - 60% |
| | Alkalische BZ (AFC) | 50 - 90°C | Kalilauge | Wasser-stoff | Raumfahrt, Schifffahrt | 50 - 65% |
| Mittel-tempera-tur-BZ | Phosphor-säure-BZ (PAFC) | 200°C | Phos-phor-säure | Wasser-stoff, Re-formgas | 1 - 100 MW -Kraftwerk | 35 - 40% |
| Hoch-tempera-tur-BZ | Karbonat-schmelzen-BZ (MCFC) | 650°C | Calcium-carbonat | Wasser-stoff, Me-than | 1 - 100 MW - Kraftwerk, 50 - 500 kW-Blockheiz-kraftwerk | 35 - 40% |
| | Festkera-mik-BZ (SOFC) | 850 - 1000°C | Calcium-carbonat | Wasser-stoff, Me-than, Kohle-Gas | 1 - 100 MW - Kraftwerk, 50 - 500 kW-Blockheiz-kraftwerk | 50 - 60% |

Zusammenfassung: Brennstoffzellen sind eine echte Alternative zu herkömmlichen Energie-Trägern und gelten als große Hoffnungsträger für die Umwelt: Sie erzeugen weniger umweltschädliche Gase, weisen einen hohen Wirkungsgrad auf und sind dazu noch extrem leise.

Dabei sollte nicht aus den Augen verloren werden, dass die Spannung einer Brennstoffzelle ist von vielen Faktoren abhängig, wie der Temperatur, den Partialdrücken der Edukte (und der Produkte), sowie von kinetischen Einflüssen.

Abschluss 1. Brennstoffzellen sind im Gegensatz zu anderen Energie-Technologie-zweigen noch extrem ausbaufähig. Natürlich überwiegen zur Zeit Nachteile wie beispielsweise zu hohe Kosten in der Herstellung. Aufgrund ständiger Forschung sind Effizienz-Steigerungen (Wirkungsgrad, Miniaturisierung) und Kosten-Senkungen abzusehen. Momentan haben Brennstoffzellen einen Wirkungsgrad von ca. 30%. Ein Benzinmotor liefert 20 - 30%. 40 bis 60% wäre für Brennstoffzellen wünschenswert und für die Zukunft als realistisch zu erachten.

Erste Prototypen von brennstoffzellbetriebenen Fahrzeugen sind bereits heute im Einsatz. Selbst Brennstoffzell-Busse fahren schon regelmäßig in manchen Städten und auch Tankstellen (z. B. Total) wollen ihre Vertriebsstellen mit grünem Wasserstoff, aus Hybridkraftwerken (eines z. B. in Prenzlau), beliefern. Somit sind schon die ersten Weichen gestellt und es ist zu hoffen, dass von nun an Jahr für Jahr mehr Brennstoffzellen-Fahrzeuge auf unseren Straßen zu sehen sind, vorausgesetzt die momentan noch bestehenden Nachteile können weitestgehend minimiert werden.

Abschluss 2: Das es heutzutage noch immer so wenige Brennstoffzellenautos auf den Straßen gibt liegt nicht an der Brennstoffzelle. Diese würde in einem Stack genug Leistung erbringen, um ein Auto anzutreiben.

Die derzeitigen Probleme der Brennstoffzellenautos sind die Wasserstofflagerung im Auto, sowie das zu schlecht Ausgebaute System der Wasserstofftankstellen.

Quellen:

1. Gülzow, E., Brennstoffzellen – ein Überblick über den Stand der Technik, Phys. B. 53, Nr. 1, 1997.
2. Kordes, Karl V.; Simader, Günther R.: Fuel Cell and their Applications, VCH, 1996.
3. Beck, Wolfgang; Killian, Ludwig: Chemie3, Oldenburg-Verlag, München 1996.
4. Grunwald, Bernd; Scharf, Karl-Heinz: Elemente Chemie Bayern 11, Ernst Klett Schulbuchverlag, Stuttgart, 1994.
5. Borucki, Hans; Fischer, Wilhelm: Schüler Duden Chemie, Dudenverlag, Mannheim 1995.
6. Linsmeier, Klaus-Dieter: Brennstoffzelle: Kunstvolle Membranen, Spektrum der Wissenschaft, September 2001, S. 66-69.
7. Baier, W.: Siemens Standpunkt, Strom mit Hilfe der Elektrochemie: sauber, leise und noch sehr teuer, Nov. 1993.
8. <http://www.sueddeutsche.de/index.php?url=wissenschaft/dossier/04789>, 10.07.2002 (Quelle verschollen, 03.08.2020)
9. <http://www.sueddeutsche.de/index.php?url=wissenschaft/dossier/04795>, 10.07.2002 (Quelle verschollen, 03.08.2020)
10. <http://www.psrc.usm.edu/mauritz/naion.html>, 10.07.2002 (Quelle verschollen, 03.08.2020)
11. <http://www.rhoen-klinikum-ag.com/konzern/index.asp>, 13.07.2002 (Quelle verschollen, 03.08.2020)
12. P. Berger, H2Tec, Apr. 2000, S.17.
13. Reiche, A.; Haufe, S.; Chemie in unserer Zeit, Heft 38, Wiley-VCH-Verlag, Weinheim 2004, 400-411, (Abb. 1)
14. <http://www.diebrennstoffzelle.de/zelltypen/pemfc/anwendung.shtml>, 02.10.14
15. <http://www.fz-juelich.de/portal/DE/Forschung/EnergieUmwelt/Brennstoffzellen/SOFC/node.html>, 05.10.14 (Quelle verschollen 03.08.2020)
16. <http://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/energie-wende-dank-wasserstoff-wind-im-tank-a-793840.html>, 14.10.14
17. <http://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/verknuepfung-von-erneuerbarem-strom-sektor-und-verkehr>, 14.10.14 (Quelle verschollen 03.08.2020)
18. <http://www.hydrogeit.de/wasserstoff-motor.htm>, 14.10.14
19. <http://www.hydrogeit.de/vergleich.htm>, 14.10.14
20. https://de.wikipedia.org/wiki/William_Grove, 16.02.2016
21. Atkins, Peter W.; de Paula, Julio, Physikalische Chemie, WILEY-VCH Verlag, Weinheim 2013

22. Kurzweil, Peter, Brennstoffzellentechnik, Springer Verlag, Wiesbaden 2016
23. <http://www.pemfc.de/pemfc.html>, 03.06.2020
24. https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/2335/1/Dissertation_Helmut_L%C3%B6hn_mit_Lebenslauf_211110.pdf, 03.06.2020