

BRENNSTOFFZELLEN - eine neue Art der Energieerzeugung?

L. Steuernagel, D. E. Kaufmann

Paul-Scherrer-Institut, CH-5232 Villigen, Schweiz

Institut für Organische Chemie, TU Clausthal, D- 38678 Clausthal-Zellerfeld

Brennstoffzellen können, ähnlich wie Batterien, chemische Energie direkt in elektrische Energie umwandeln, wobei hier allerdings im Gegensatz zu den Batterien die Reaktanden und Produkte kontinuierlich zu- und abgeführt werden können. Das elektrochemische Prinzip der Brennstoffzelle entdeckte Sir William Grove bereits 1839, als er Wasserdampf an einem erhitzten Platindraht zu Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff (O₂) zerlegte und diese Produkte über eine **kalte Verbrennung** in der Brennstoffzelle wieder zu Wasser umsetzte.

Brennstoffzellen zeichnen sich durch einen hohen Wirkungsgrad (), ihre Schadstoffarmut, den modularen Aufbau und die sehr gute Eignung zur Kraft-Wärme-Kopplung aus.

Beim *Gemini-Raumfahrtprogramm* der NASA leisteten Brennstoffzellen (Polymerelektrolytmembranbrennstoffzellen (PE(M)FC) mit einem $\eta = 60\%$) bereits 1963 viele tausend Betriebsstunden im Weltraum. In Deutschland baute Siemens elektrische Antriebe für Transporter (17,5 kW) und U-Boote (100 kW) (alkalische Brennstoffzelle).

Für mobile Anwendungen steht mittlerweile die PE(M)FC im Vordergrund, die für emissionsarme und effizientere Fahrzeugantriebe genutzt werden kann.

Ein weiteres Anwendungsgebiet für die Brennstoffzelle ist die allgemeine Stromversorgung auf Erdgasbetrieb, wobei diese zentral und dezentral erfolgen kann. Hierbei bestimmen zwei Entwicklungsarten das Gesamtbild, wobei die eine das Blockheizkraftwerk mit 200 - 300 kW_{el} zur Wärme-Kraft-Kopplung, und die andere das Kleinsystem mit 1 bis 5 kW für Wohnhäuser darstellt.

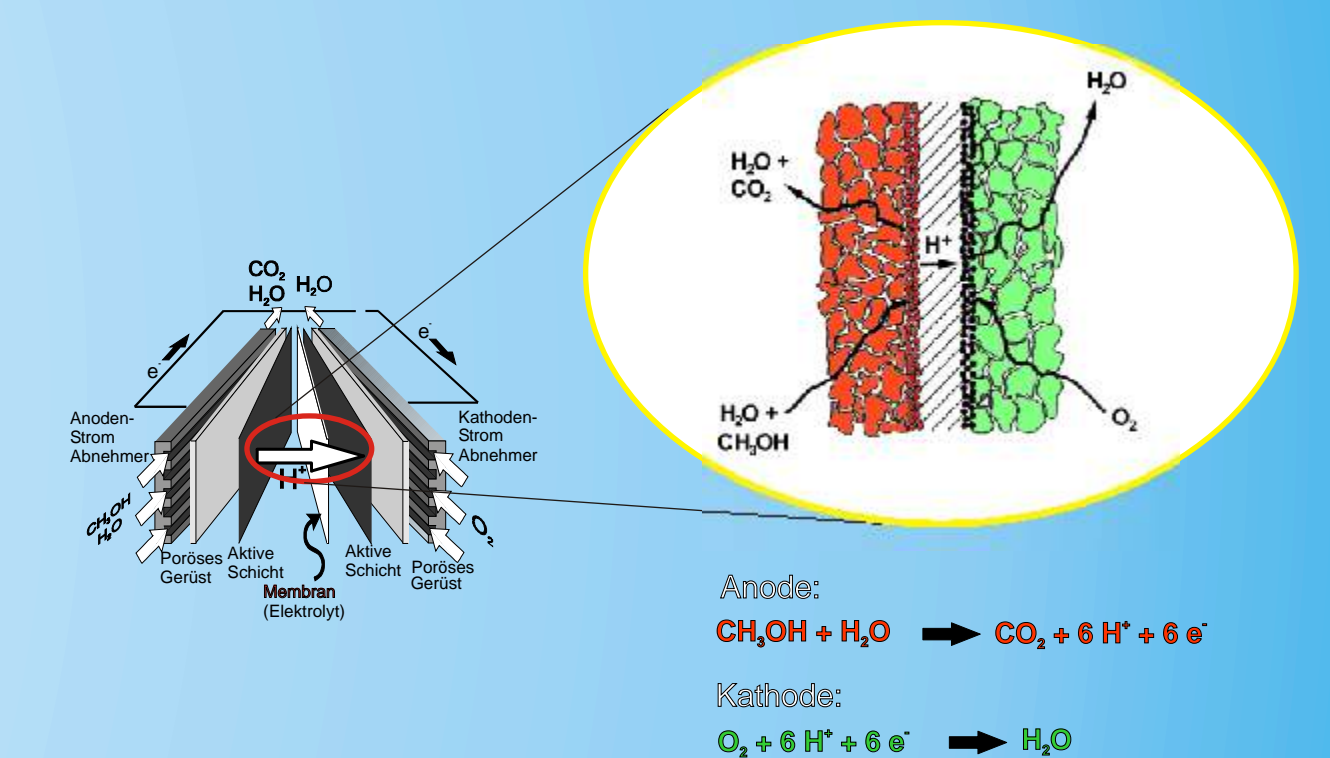
Ebenso wird versucht, Brennstoffzellen als Klein-Stromversorger im Leistungsbereich von 1 bis 500 W für Handys, Laptops o.ä. zu verwenden.

Brennstoffzelle	Elektrolyt	Temp. [°C]	Elektrischer Wirkungsgrad [%]	Brenngas, Oxidans	Anode	Kathode	Anwendung
AFC Alkalische Brennstoffzelle <i>alkaline fuel cell</i>	Kalilauge 30 % KOH	80	Zelle: 60 – 70 System: 62	Nur reinst Wasserstoff Reinst Sauerstoff	H ₂ + 2 OH ⁻ + 2 e ⁻ → 2 H ₂ O	½ O ₂ + H ₂ O + 2 e ⁻ → 2 OH ⁻	Raumfahrt, Militär
PE(M)FC Polymer elektrolyt (membran) brennstoffzelle <i>polymerelectrolyt (membrane) fuel cell</i>	Protonen- leitende Membran (z.B. Nafion 117 R, DOW)	80	Zelle: 50 – 68 System bei Erdgasbetrieb: 43 – 50 (Reformer, Luftverdichter)	Wasserstoff Sauerstoff, Luft	H ₂ + 2 e ⁻ → 2 H ⁺	2 H ⁺ + ½ O ₂ + 2 e ⁻ → 2 H ₂ O	Elektroantriebe, Block-Heiz- Kraftwerke (BHKW), Batteriesersatz, Raumfahrt, Militär
DMFC Direkt-Methanol- Brennstoffzelle <i>direct methanol fuel cell</i>	Protonen- leitende Membran (z.B. Nafion 117 R, DOW)	80 – 130	Zelle: 20 – 30	Methanol Sauerstoff, Luft	CH ₃ OH + H ₂ O CO ₂ + 6 H ⁺ + 6 e ⁻	½ O ₂ + 6 H ⁺ + 6 e ⁻ → 3 H ₂ O	Elektroantriebe
PAFC Phosphorsäure- Brennstoffzelle <i>phosphoric acid fuel cell</i>	Konzentrierte Phosphorsäure (H ₃ PO ₄)	200	Zelle: 55 System bei Erdgasbetrieb: 40	Wasserstoff Sauerstoff, Luft	H ₂ + 2 e ⁻ → 2 H ⁺	2 H ⁺ + ½ O ₂ + 2 e ⁻ → 2 H ₂ O	BHKW, Stromerzeugung
MCFC Karbonat-schmelzen- Brennstoffzelle <i>molten carbonate fuel cell</i>	Alkalicarbonat- schmelzen (Li ₂ CO ₃ , K ₂ CO ₃)	650	Zelle: 65 System bei Erdgasbetrieb: 55 – 60 (MCFC +Dampfmaschine; reine Stromerz.); 60 – 65 (interne Reformierung)	Erdgas, Kohlegas, Biogas, Wasserstoff Sauerstoff, Luft	H ₂ + CO ₃ ²⁻ → H ₂ O + CO ₂ + 2 e ⁻	CO ₂ + ½ O ₂ + 2 e ⁻ → CO ₃ ²⁻	BHKW, reine Stromerzeugung
SOFC Oxidkeramische Brennstoffzellen <i>solid oxide fuel cell</i>	Yttrium-stabilisiertes Zirkondioxid (ZrO ₂ /YO ₃)	800 – 1000	Zelle: 60 – 65 System bei Erdgasbetrieb: 55 – 60 (SOFC + Gasturbine; reine Stromerz.); 60 – 65 (interne Reformierung)	Erdgas, Kohlegas, Biogas, Wasserstoff Sauerstoff, Luft	H ₂ + O ²⁻ → H ₂ O + 2 e ⁻	½ O ₂ + 2 e ⁻ → O ²⁻	BHKW, reine Stromerzeugung



Der anodenseitig herangeführte Brennstoff (im nebenstehenden Fall Methanol) tritt durch die Gasdiffusionselektrode und reagiert dort mit dem Katalysator (Platin) über mehrere Reaktionen zu Kohlendioxid, Protonen und Elektronen. Die entstehenden Elektronen wandern über den Stromabnehmer zum Verbraucher, die Protonen durch die Membran zur Kathode. Das Kohlendioxid entweicht.

Auf der Kathodenseite, zu der Sauerstoff transportiert wird, der ebenfalls durch die Gasdiffusionselektrode diffundiert, reagiert dieser an der Katalysatorschicht unter Aufnahme von Elektronen und den durch die Membran penetrierten Protonen zu Wasser. Das Wasser wird aus der Brennstoffzelle abgeführt.



Für die allgemeine Reaktion $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ können einige repräsentative Daten der Brennstoffzelle berechnet werden.

Die maximal erreichbare Zellspannung errechnet sich mit

$$U_{\text{th}} = -\frac{H^0}{n F} = -\frac{-285.8 \text{ kJ mol}^{-1}}{2 \cdot 96487 \text{ mol}^{-1} \text{ C}} = 1,48 \text{ V}$$

Bei der Annahme, dass das Produktwasser gasförmig anfällt, errechnet sich die Spannung mit dem unteren Heizwert des Wasserstoffs ($H^0_{\text{U}} = -241.8 \text{ kJ/mol}$) zu 1,25 V.

Die reversible Spannung U_{rev}^0 , die aus G^0_0 berechnet werden kann, beträgt

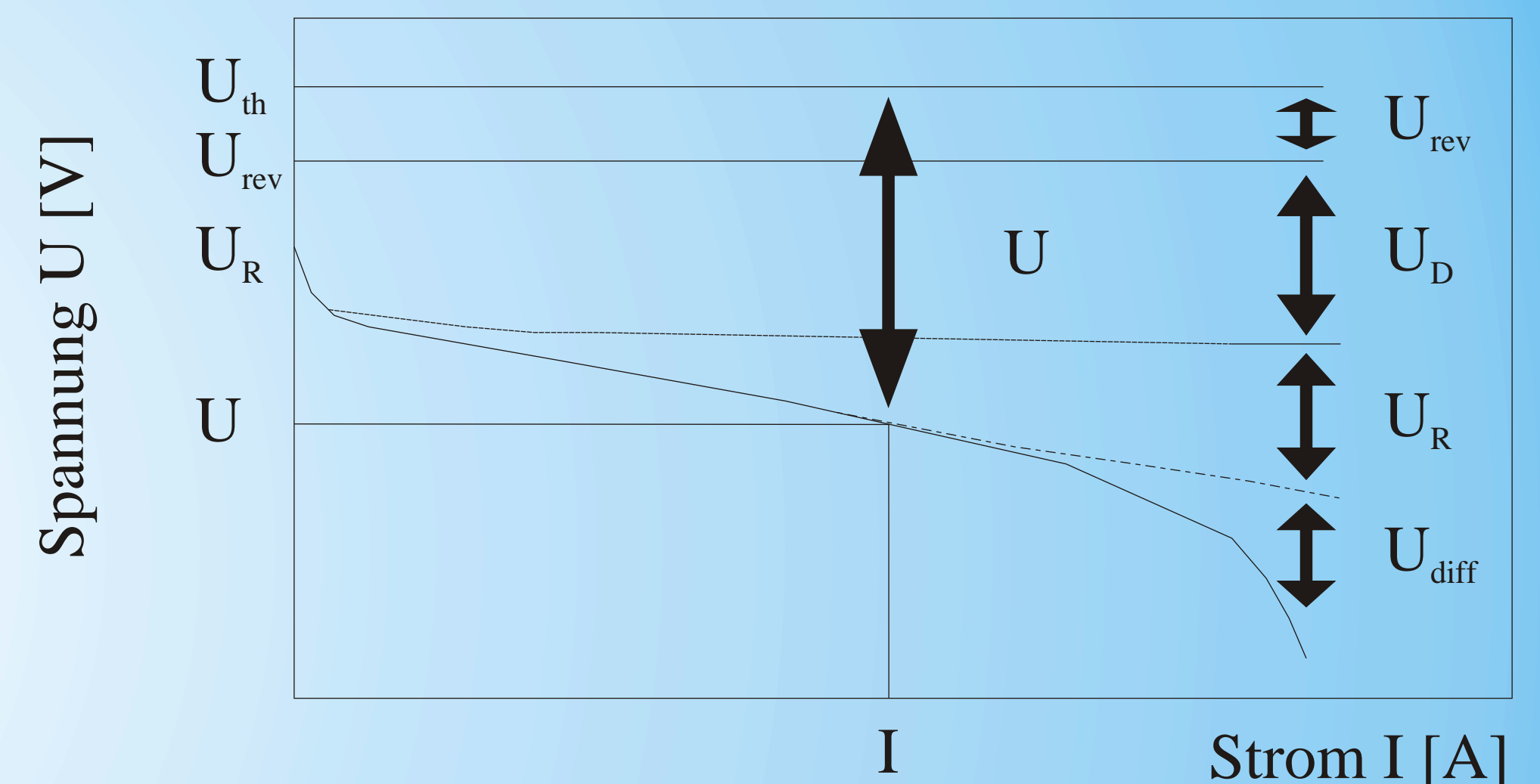
$$U_{\text{rev}}^0 = -\frac{G^0_0}{n F} = -\frac{-237.3 \text{ kJ mol}^{-1}}{2 \cdot 96487 \text{ mol}^{-1} \text{ C}} = 1,23 \text{ V}$$

Der ideale Wirkungsgrad beträgt über 80 %

$$\eta_{\text{max}} = \frac{G^0_0}{H^0_0} = \frac{U_{\text{rev}}^0 \cdot n \cdot F}{H^0_0} = \frac{1,23 \cdot 2 \cdot 96487 \text{ V C mol}^{-1}}{-285.8 \text{ kJ mol}^{-1}} = 83,3 \%$$

Beim Vorliegen des Produktwassers in der Gasphase beträgt η_{max} sogar 94,5 %.

Die Strom-Spannungskurve (Kennlinie) einer Brennstoffzelle ergibt das folgende Diagramm



Der Spannungsverlust der Zelle kann als Summe der Einzelspannungen (reversible Spannungsdifferenz, Durchtrittsspannung, Widerstandsspannung und Konzentrationsspannung) betrachtet werden.

$$U = U_{\text{rev}} + U_{\text{D}} + U_{\text{R}} + U_{\text{Diff}}$$

Da die Brennstoffzelleneinheit (Brennstoffzellenstack = Brennstoffzellenstapel) im gesamten Antriebssystem "nur" den Energiekonverter darstellt, werden noch einige zusätzliche Geräte, sowohl Energiewandler (Elektromotor, Verdampfer) als auch Brennstoffkonverter (z.B. Reformer) benötigt, die die im Brennstoff enthaltene chemische Energie in elektrische Energie umwandeln. Diese Energie kann nachfolgend in stationären (z.B. Blockheizkraftwerke) als auch in portablen (z.B. Automobilen) Anwendungen verwendet werden.

Ein neues Forschungsgebiet für Brennstoffzellenanwendungen stellen auch Handys, Laptops und ähnliche Kleingeräte zur portablen Nutzung dar.

Weiterführende Literatur:

K. Ledjeff-Hey, F. Malkendorf, J. Roes, *Brennstoffzellen - Entwicklung, Technologie, Anwendung*, 2. Auflage, C.F. Müller Verlag, Heidelberg, 2001

W. Gajewski, *Die Brennstoffzelle - ein wiederentdecktes Prinzip der Stromerzeugung*, Spektrum der Wissenschaft, 1995

A. K. Kordes, G. Simader, *Fuel cells and their applications*, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1996

Journal: *Fuel cell*, VCH Verlagsgesellschaft, 2001