

**ENERGIEMANAGEMENT FÜR BRENNSTOFFZELLENSYSTEME  
IN FAHRZEUGEN**

**Einleitung.** Dieser Bericht beschäftigt sich mit dem Aufbau und der Auslegung eines Energiemanagements für Brennstoffzellen in Fahrzeugen (als Energieversorgung für den Antrieb oder das Bordnetz). Brennstoffzellensysteme in Fahrzeugen benötigen für einen effizienten Betrieb ein komplexes Last- bzw. Energiemanagement, um den Energiefluss zwischen der Brennstoffzelle, dem Energiespeicher (Batterie und gegebenenfalls Doppelschichtkondensator) und den Verbrauchern optimal zu regeln. Dabei spielen leistungselektronische Stellglieder eine wichtige Rolle.

**Brennstoffzellentechnik.** Im mobilen Bereich werden, zumindest für den Fahrzeugantrieb, PEM-Brennstoffzellen favorisiert. Diese weisen gerade im Teillastbereich gute Wirkungsgrade auf. In Abb. 1 ist die ablaufende Reaktion in einer PEM-Brennstoffzelle schematisch dargestellt. Die sich an den Elektroden einstel-

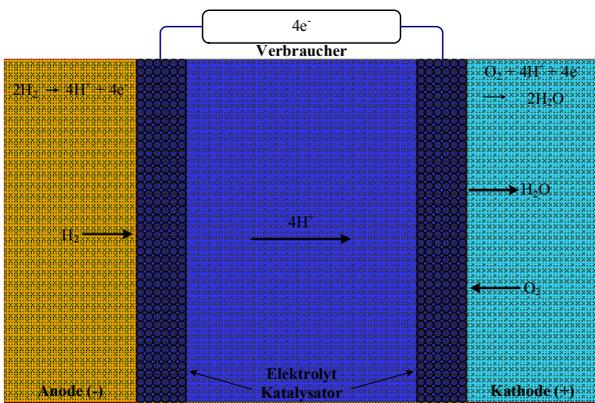


Abb. 1. Reaktionsabläufe in einer PEM-Brennstoffzelle

lende Potentialdifferenz kann mit der Nernstgleichung (1) beschrieben werden, sie stellt die Leerlaufspannung dar [2]^

$$U_0 = U_0^0 + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \ln \left\{ \frac{p_{H_2} \cdot p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{H_2O}} \right\} \quad (1)$$

Dabei ist R die universelle Gaskonstante, F die Faradaykonstante, n die Anzahl der ausgetauschten Elektronen, T die Temperatur der Zelle und  $p_i$  sind die Partialdrücke der an der Reaktion teilnehmenden Medien. Mit der Belastung der Brennstoffzelle bzw. des Brennstoffzellenstacks treten Verluste, so genannte Überspannungen auf (s. Abb. 2). Für die Gesamtspannung resultiert:

$$U = U_0 - U_{Act} - U_{Ohm} - U_{Conc} \quad (2)$$

Dabei treten bei kleinen Stromstärken hauptsächlich Aktivierungsverluste ( $U_{Act}$ ) auf, die mit folgender Gleichung

beschrieben werden können:

$$U_{Act} = \frac{R \cdot T}{\alpha \cdot n \cdot F} \cdot \ln \left( \frac{j}{j_0} \right) = b \cdot \log_{10} \left( \frac{j}{j_0} \right) \quad (3)$$

Dabei ist  $\alpha$  der Durchtrittsfaktor, b der so genannte Tafelparameter und  $j_0$  die Austauschstromdichte. Im Nennarbeitsbereich der Brennstoffzelle dominieren Ohmsche Verluste ( $U_{Ohm}$ ) (4), die hauptsächlich durch den spezifischen Elektrolytwiderstand hervorgerufen werden:

$$U_{Ohm} = j \cdot r_{Ohm} \quad (4)$$

Mit zunehmender Stromdichte nimmt auch die Konzentrationsüberspannung ( $U_{Conc}$ ) zu. Bei Erreichen der Grenzstromdichte bricht die Zellspannung schlagartig ein, da nicht mehr genügend Wasserstoffionen durch die Membran transportiert werden können:

da nicht mehr genügend Wasserstoffionen durch die Membran transportiert werden können:

$$U_{Conc} = \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \left( 1 - \frac{j}{j_g} \right) \quad (5)$$

In Abb. 3 wird der Vergleich zwischen einer real gemessenen und einer mit dem Modell simulierten Kennlinie aufgezeigt. Dabei wurde der Bereich der Konzentrationsüberspannung nicht berücksichtigt, da ein Betreiben der Brennstoffzelle im Bereich der Grenzstromdichte zu irreversiblen Schäden führt. In Tab.1 sind die für die Simulation

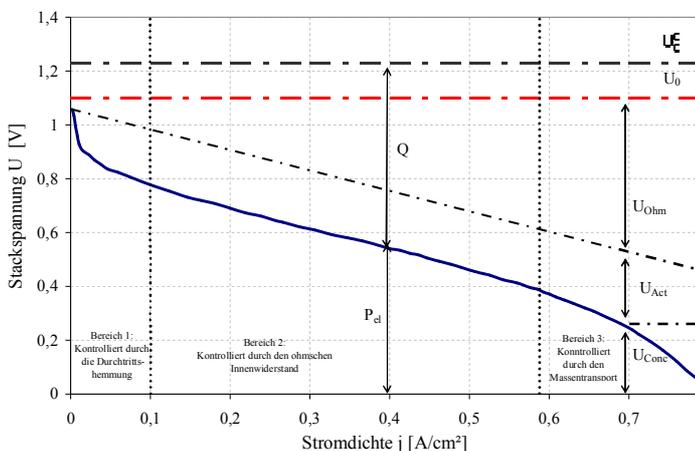
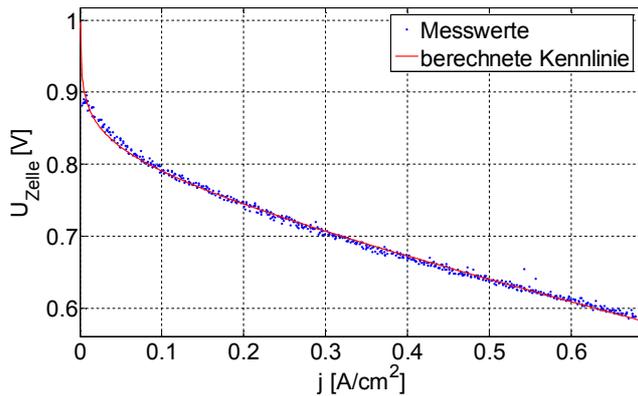


Abb. 2. U-j-Kennlinie einer Brennstoffzelle

verwendeten Parameter dargestellt.

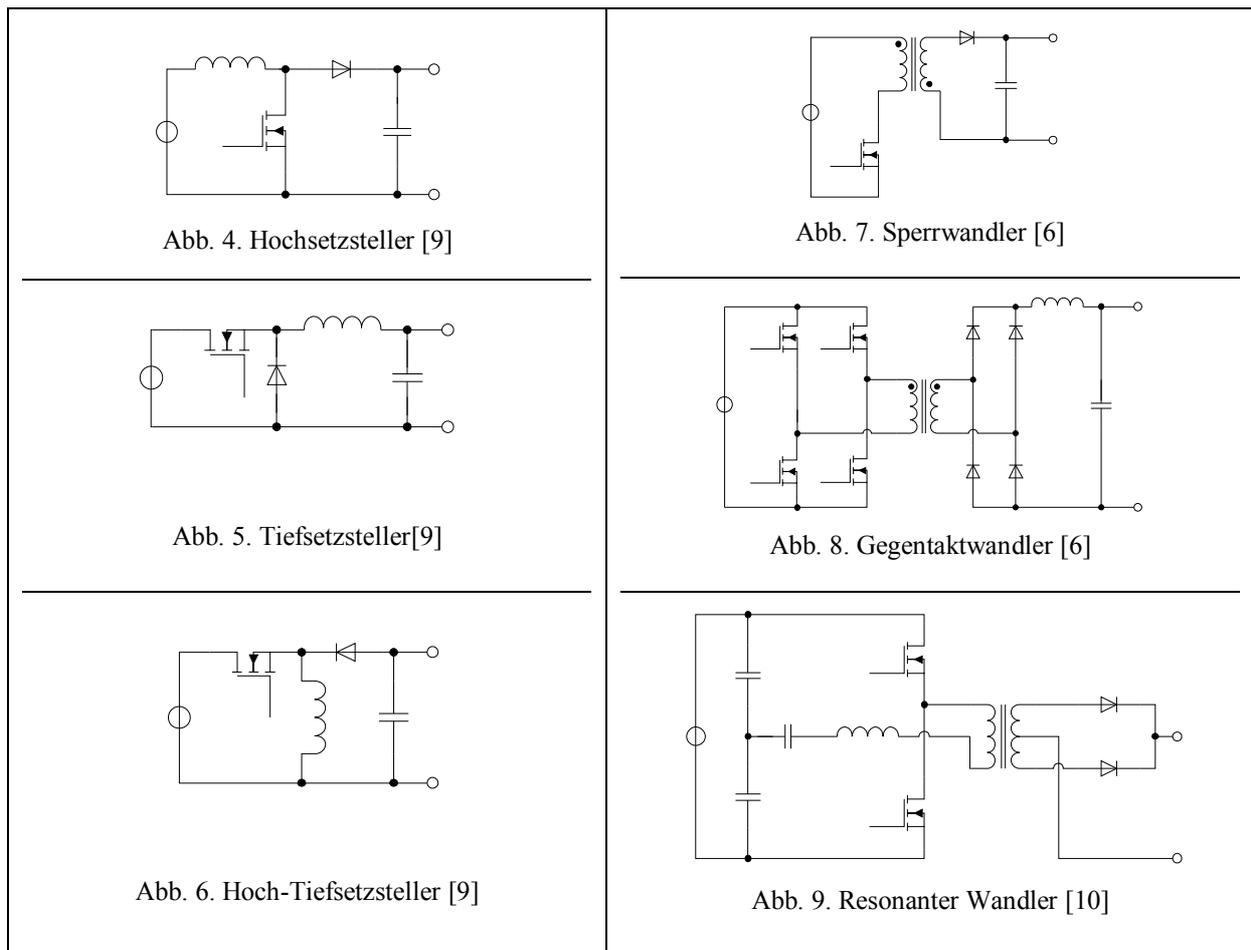


Parameter	Wert	Einheit
$U_0$	1,091	V
$b$	0,06645	V
$r_{\text{Ohm}}$	0,2595	$\Omega \cdot \text{cm}^2$
$j_0$	$7,384 \cdot 10^{-06}$	$\text{A}/\text{cm}^2$
$j_g$	1,9	$\text{A}/\text{cm}^2$

Tab. 1 - Verwendete Parameter

Abb. 3. U-j-Kennlinie einer Brennstoffzelle berechnet und gemessen

**Leistungselektronik - DC/DC-Wandler.** Für die Angleichung der verschiedenen Spannungsebenen bei der Verwendung von Brennstoffzelle, Generator, Batterie und gegebenenfalls Doppelschichtkondensator in einem Automobil ist der Einsatz von Leistungselektronik unumgänglich. Hierbei gibt es eine Vielzahl an möglichen Topologien. Tab. 2 zeigt typische Schaltungen zur Spannungsanpassung. Hochsetzsteller (Abb. 4), Tiefsetzsteller (Abb. 5) und Hochtiefsetzsteller (Abb. 6) sind einfache Schaltungen, die ohne Transformator auskommen.



Tab. 2 - Topologien

Bei einem Spannungsübersetzungsverhältnis unterhalb 1:3 sind diese Schaltungen vorteilhaft einsetzbar. Bei größeren Spannungsübersetzungsverhältnissen ist es günstiger, Schaltungen mit einem Transformator und mehreren Halbleitern zu verwenden.

terbauteilen zu verwenden, welche die Schaltungen aber aufwendiger werden lassen. Vorteilhaft beim Einsatz eines Transformators sind das variable Übersetzungsverhältnis und die galvanische Trennung (Sicherheitsaspekt). Der Einsatzbereich des Sperrwandlers (Abb. 7) liegt im Bereich kleiner Leistungen unterhalb 150W [6,7]. Hingegen sind der Gegentakt- (Abb. 8) und der resonante Wandler (Abb. 9: eine mögliche Variante) für Applikationen größerer Leistungen geeignet [8].

**Energiemanagement.** Damit Brennstoffzellensysteme in Fahrzeugen gegenüber konventionellen Antrieben und Energiewandlern konkurrenzfähig sind, muss deren Energieeffizienz optimiert und die Lebensdauer verbessert werden. Dabei spielt das Energiemanagement eine wichtige Rolle. In Abb. 10 ist eine mögliche Topologie für einen elektrischen Fahrzeugantrieb mit einer Brennstoffzelle als Energiewandler abgebildet. Die Abb. 11 zeigt eine Topologie zur zusätzlichen Versorgung eines elektrischen KFZ-Bordnetzes (APU – auxiliary power unit). Der neue europäische Fahrzyklus (NEFZ) dient dem Antriebskonzept als Sollwertvorgabe und der zusätzlichen Energieversorgung als Eingangssignal für den Verbrennungsmotor. Aus der Differenz der durch den Generator bereitgestellten Leistung zu der von den Verbrauchern geforderten Leistung ergibt sich die Leistung, die durch das Brennstoffzellensystem bzw. den Energiespeicher geliefert werden muss. Durch den stochastischen Charakter des Verbrauchs und der Bereitstellung der elektrischen Energie ist eine Regelung durch ein entsprechendes Energiemanagement unabdingbar [1].

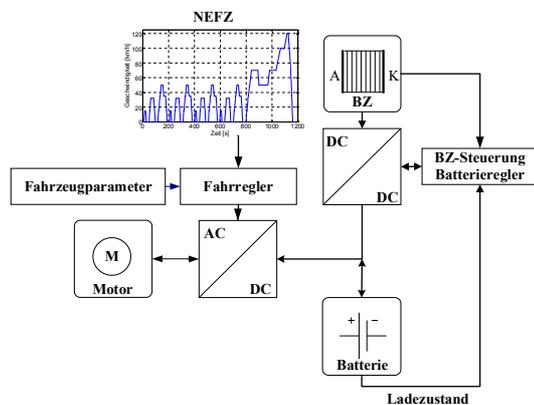


Abb. 10. Topologie für Antriebskonzept

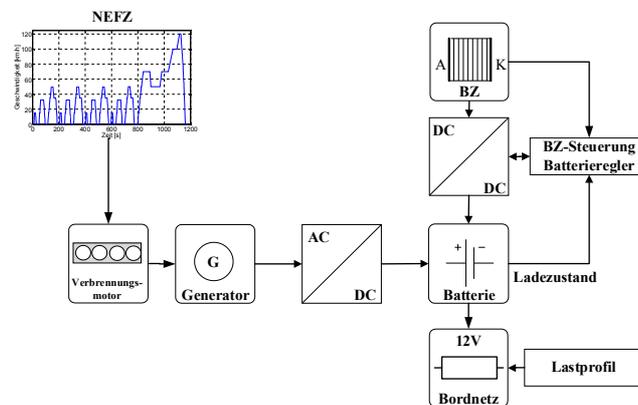


Abb. 11. Topologie für APU

In Abb. 12 ist der Wirkungsgrad für den Brennstoffzellenstack und das Brennstoffzellensystem über dem Strom aufgetragen. Dabei wird zum einen der gute Teillastwirkungsgrad des Stacks bei niedrigen Strömen und zum anderen der optimale Systemwirkungsgrad im mittleren Leistungsbereich deutlich. An dieser Abbildung lässt sich auch die Notwendigkeit für ein optimales bzw. wirtschaftliches Energie- und Lastmanagement beschreiben. Denn die zum Betreiben des Brennstoffzellenstacks benötigte Peripherie hat einen je nach Systemgröße nicht unerheblichen Leistungsbedarf. Somit muss eine bestimmte Grundlast bereitgestellt werden, die, wenn dies durch den Brennstoffzellenstack geschieht, zu einem ineffizienten Betriebszustand führt. Daher ist es sinnvoll, einen Energiespeicher zu verwenden, um immer im optimalen Betriebspunkt zu arbeiten. Denn bei geringen Lasten kann die überschüssige Leistung dazu verwendet werden, den Energiespeicher zu laden, um im optimalen Arbeitsbereich zu fahren. Sind die Speicher voll, sollte die Brennstoffzelle abgeschaltet und das System komplett durch den Energiespeicher versorgt werden. Auch kann der Energiespeicher zusätzlich zum Erreichen höherer Leistungen dienen. Die Lebensdauer des Brennstoffzellensystems kann bei einem quasi stationären Betrieb des Stacks verbessert werden, da durch den Energiespeicher kritische Zustände im System vermeidbar sind. Somit werden das Auftreten einer erhöhten Platinkorrosion im Leerlauf und eine mögliche Unterversorgung mit Reaktanden im Grenzstrombereich minimiert.

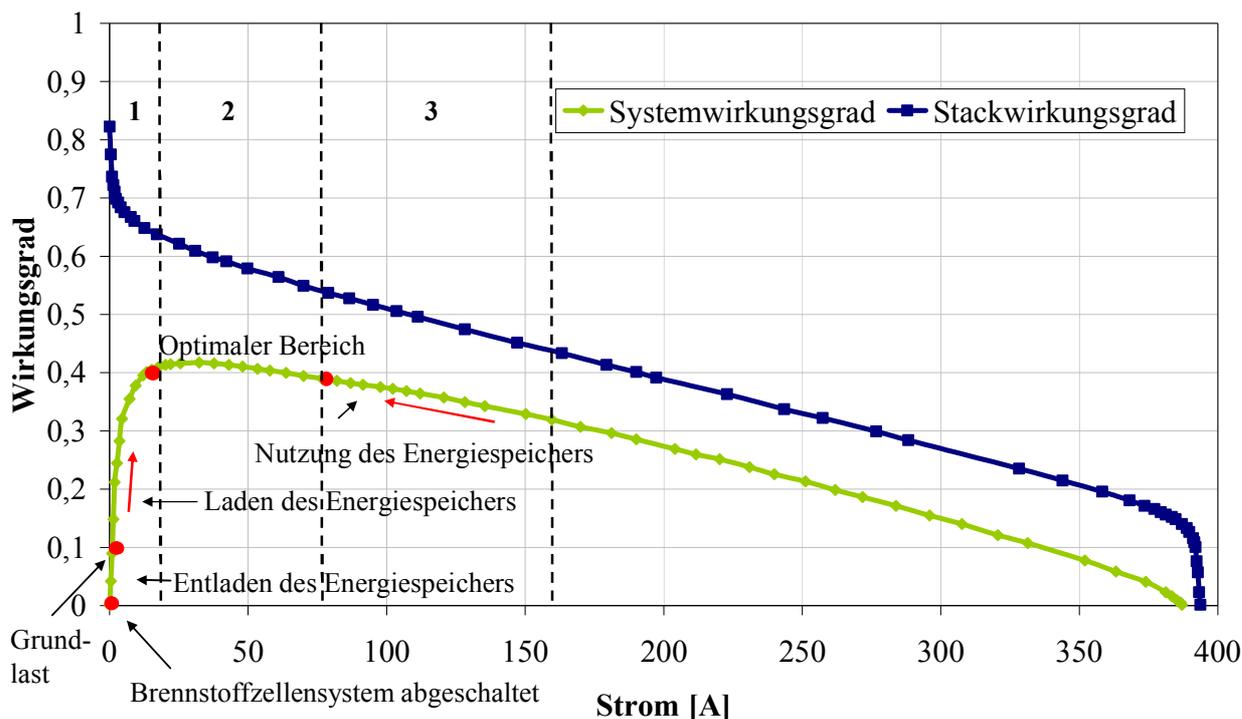


Abb. 12. Effizienz einer PEM-Brennstoffzelle

**Zusammenfassung.** In diesem Bericht wird die Bedeutung eines Energiemanagements für Fahrzeuge mit Brennstoffzellensystemen zur optimalen Betriebsführung diskutiert. Ein Vorteil bei der Verwendung dieses Managements ist eine erhöhte Lebensdauer und damit eine steigende Wirtschaftlichkeit bzw. Verfügbarkeit. Dabei spielen leistungselektronische Stellglieder eine bedeutende Rolle, die die verschiedenen Spannungsebenen untereinander anpassen. Außerdem werden mögliche Topologien für den Einsatz von Brennstoffzellensystemen in Automobilen aufgezeigt, in denen Energiemanagements Verwendung finden können.

**Danksagung.** Die Autoren danken dem Kultusministerium des Landes Sachsen-Anhalt für die finanzielle Förderung der Forschungsarbeiten zu diesem Thema.

#### Literatur.

1. Dildey: „Die PEM-BZ als alternativer PKW Antrieb“, Shaker Verlag, Braunschweig, 2005.
2. “Fuel Cell Handbook 7th Edition”, U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory; Under Contract No. DE-AM26-99FT40575, 2004.
3. O. Garcia: “DC/DC-Wandler für die Leistungsverteilung in einem Elektrofahrzeug mit Brennstoffzellen und Superkondensatoren“, Dissertation ETH Zürich, 2002.
4. B.H. Andreas: „Die Polymer-Elektrolyt Brennstoffzelle – Charakterisierung ausgewählter Phänomene durch elektrochemische Impedanzspektroskopie“, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2002.
5. Lander: “Power Electronics”, Third Edition McGraw-Hill Company, London 1993.
6. K. Billings: “Switchmode Power Supply Handbook”, McGraw-Hill, Inc., New York 1989.
7. R. Tarter: “Solid-State Power Conversion Handbook”, John Wiley & Sons, Inc., New York 1993.
8. O. Kilgenstein: “Switched-Mode Power Supplies in Practice”, John Wiley & Sons, Chichester 1994.
9. Trzynadlowski: “Introduction to Modern Power Electronics“, John Wiley & Sons, Inc., New York 1998.
10. J. Vithayathil: “Power Electronics Principles and Applications”, McGraw-Hill, Inc., New York 1995.