

Brennstoffzellensysteme – ein Überblick

von Rolf Theenhaus und Klaus Bonhoff

Überblick

Die Umweltbelastungen durch Energienutzung sowie der steigende Weltenergiebedarf machen eine effiziente und schadstoffarme Nutzung von Energie notwendig. Vor diesem Hintergrund hat die Brennstoffzellentechnologie die Chance, einen Beitrag zur Energieversorgung der Zukunft zu leisten. Die Merkmale und die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten von Brennstoffzellensystemen werden in diesem Beitrag dargestellt.

The environmental strain caused by energy use and rising global energy demand renders an efficient utilization of energy at low emission levels paramount. In this situation, fuel cell technology offers an opportunity to make a future energy supply system more sustainable. This article describes the characteristics and multi-faceted application possibilities of fuel cell systems.

alle Betreiber energietechnischer Anlagen die Möglichkeit der Stromspeicherung in das öffentliche Netz an Bedeutung gewinnen. Neben diesem Wandel des Ordnungsrahmens führt die volkswirtschaftliche Marktentwicklung zu Veränderungen auf dem Strommarkt. Bei insgesamt nahezu stagnierendem Endenergieverbrauch wird der Anteil des Stromverbrauchs in Deutschland in den nächsten Jahrzehnten weiter wachsen. Weltweit führen die rasch wachsende Bevölkerung einerseits und die zunehmende Industrialisierung bzw. die Anpassung der Entwicklungsländer an die energieintensiven Gewohnheiten der führenden Industrienationen andererseits zu einem unvermeidbaren weiteren Anstieg des Weltenergieverbrauchs.

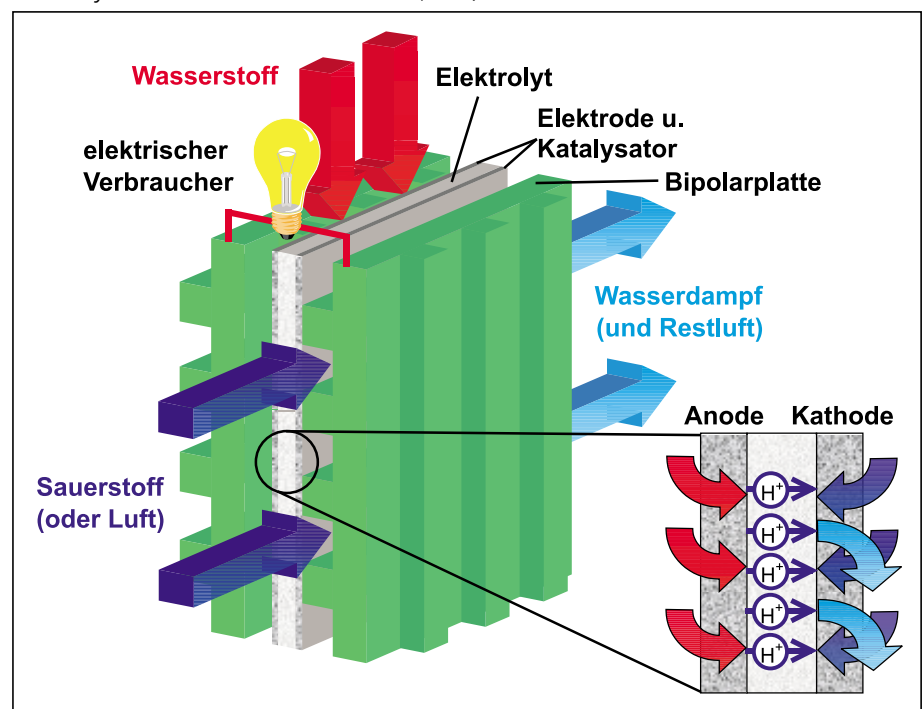
Diesen absehbaren Veränderungen stehen die Notwendigkeiten gegenüber, angesichts der Endlichkeit der fossilen Ressourcen und der globalen Auswirkungen der durch ihre Nutzung verursachten Luftschadstoffe auf das Klima, Energie zu sparen, fossile Energieträger rationell zu nutzen und Emissionen zu vermeiden oder zumindest zu reduzieren.

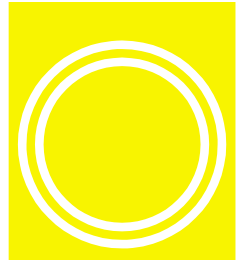
Das langfristige Ziel muss in allen Bereichen der Energieversorgung sein, den globalen Energiebedarf aus emis-

1. Einleitung

Der Energiemarkt in Deutschland unterliegt derzeit einem starken Wandel. Seit Inkrafttreten des neuen Energiewirtschaftsgesetzes Ende April 1998 findet ein scharfer Wettbewerb der Energieversorgungsunternehmen um den Stromkunden statt, was sinkende Strompreise zur Folge hat. Andererseits kann durch die Liberalisierung für

Abbildung 1: Funktionsschema einer Brennstoffzelle am Beispiel einer Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle (PEM)





sionsfreien oder regenerativen Energiequellen zu decken. Um dieses Ziel zu erreichen, ist ein technologischer Wandel notwendig, zu dem die Brennstoffzellentechnologie schon in der Übergangsphase einen erkennbaren Beitrag leisten kann.

2. Grundlagen und Merkmale von Brennstoffzellen

Eine Brennstoffzelle wandelt die in chemischen Energieträgern gespeicherte Energie direkt in elektrische Energie um. Der ideale Energieträger ist Wasserstoff. Der prinzipielle Aufbau einer Brennstoffzelle ist in [Abbildung 1](#) am Beispiel einer Polymer Elektrolyt Membran-Brennstoffzelle (PEM) dargestellt.

An der Anode wird Wasserstoff und an der Kathode Luft bzw. Sauerstoff zugeführt. Diese beiden mit Katalysatoren beschichteten Elektroden sind durch eine gasdichte Membran, dem Elektrolyten, voneinander getrennt, der bei der PEM-Brennstoffzelle aus

einem Polymer besteht. An der Anode dissoziieren die Wasserstoffmoleküle zu Protonen und Elektronen. Die Elektronen werden über einen äußeren Verbraucher geleitet und können dort elektrische Arbeit verrichten. Die Wasserstoff-Protonen werden durch die ionendurchlässige Membran zur Kathode transportiert. Dort reagieren sie mit dem vorhandenen Sauerstoff und den vom Verbraucher kommenden Elektronen zu Wasser. Aus den Gesetzen der Thermodynamik folgt für eine solche Einzelzelle eine maximale Leerlaufspannung von 1,23 V (Umgebungstemperatur, atmosphärischer Druck), die im Lastbetrieb typischerweise auf etwa 0,7 V absinkt. Der Teil des Wasserstoffenergieinhalts, der nicht in elektrische Energie umgewandelt werden kann, wird als Wärme frei. Zur Steigerung der Gesamtspannung sowie der Leistung werden Einzelzellen zu Stacks zusammengefügt.

Neben dem in einer PEM-Brennstoffzelle verwendeten Polymer können

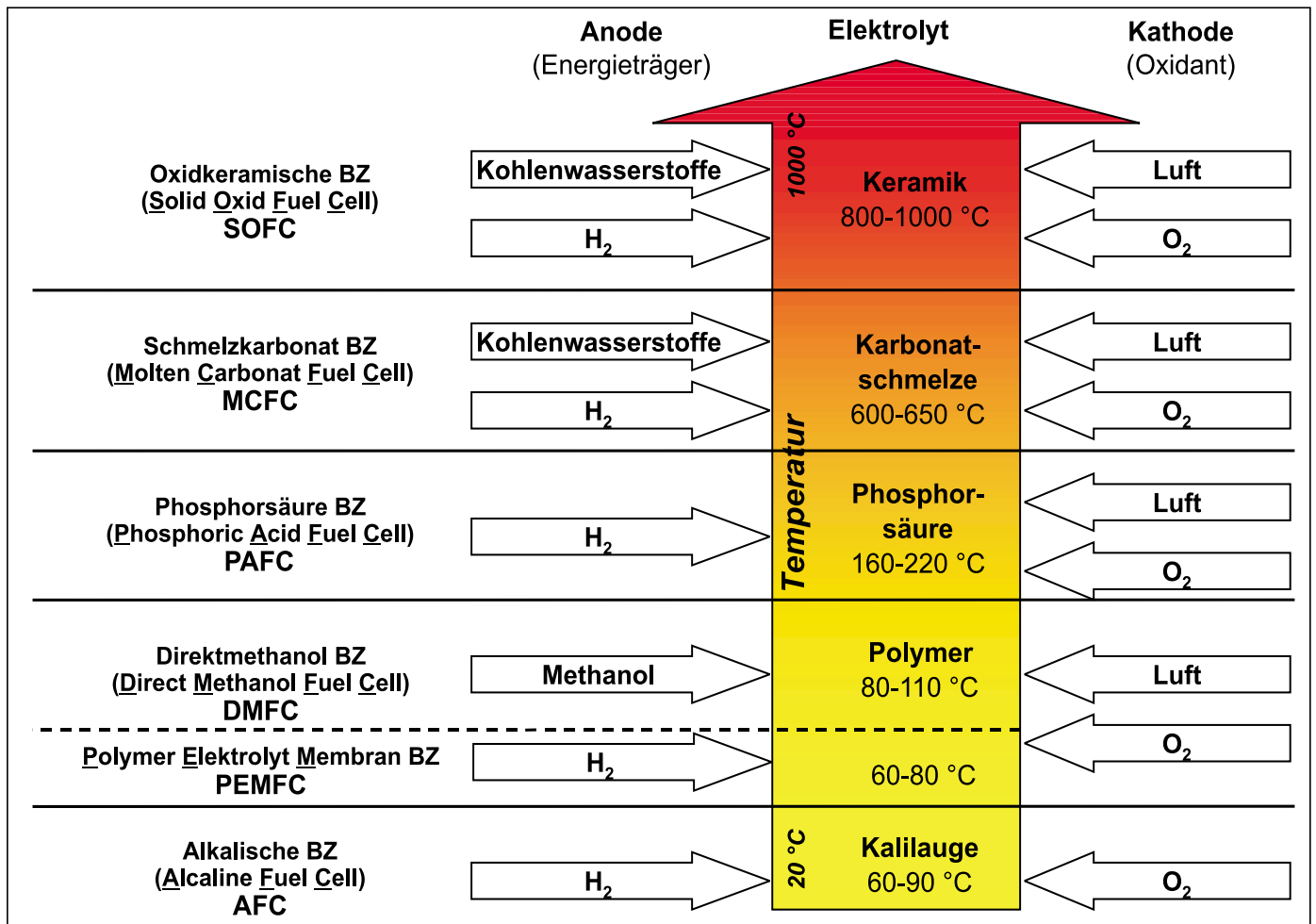
eine Reihe weiterer Materialien als Elektrolyt verwendet werden. [Abbildung 2](#) zeigt die heute verwendeten Brennstoffzellensysteme mit ihren gebräuchlichen Abkürzungen.

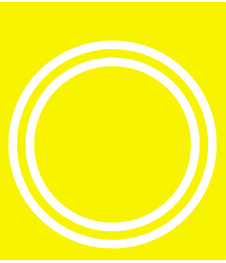
Die Grundfunktionen der Trennschicht zwischen der Anode und der Kathode

Gebräuchliche Abkürzungen für Brennstoffzellensysteme

AFC	alkaline fuel cell <i>alkalische Brennstoffzelle</i>
PEMFC	polymer electrolyte membrane fuel cell <i>Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle</i>
DMFC	direct methanol fuel cell <i>Direktmethanol-Brennstoffzelle</i>
PAFC	phosphor acid fuel cell <i>phosphorsaure Brennstoffzelle</i>
MCFC	molten carbonate fuel cell <i>Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle</i>
SOFC	solid oxide fuel cell <i>oxidkeramische Brennstoffzelle</i>

Abbildung 2: Brennstoffzellentypen





sind in allen Systemen dieselben: gasdichte Trennung von Brenngas und Sauerstoff einerseits sowie Durchlässigkeit für die an der jeweiligen Reaktion beteiligten Ionen andererseits.

Da die unterschiedlichen Elektrolyte bei unterschiedlichen Temperaturen eine für den effektiven Betrieb einer Brennstoffzelle genügend gute Ionenleitfähigkeit haben, unterscheidet man zwischen den Niedertemperaturbrennstoffzellen (AFC, PEM, DMFC, PAFC) und den Hochtemperaturbrennstoffzellen (MCFC, SOFC). Die Betriebstemperatur wirkt sich in zweierlei Hinsicht auf die Zelle aus: Zum einen nimmt die Gefahr der Vergiftung der Katalysatoren durch Verunreinigungen im Brenngas (z.B. Kohlenmonoxid) mit zunehmender Betriebstemperatur ab, zum anderen steigen die Anforderungen an die Konstruktionsmaterialien der Zelle, z.B. aufgrund der Wärmeexpansion beim An- und Abfahren der Zelle. Während die AFC, die PAFC und die MCFC bei Betriebstemperatur einen flüssigen Elektrolyten haben, sind die Elektrolyten der PEM und der SOFC fest.

Vorteile

Die Gründe, Brennstoffzellen heute für die verschiedensten Anwendungen zu nutzen, leiten sich aus den im Folgenden dargestellten Vorteilen ab, die Brennstoffzellen gegenüber konventionellen Verbrennungskraftprozessen haben.

Wirkungsgrade

Der elektrische Wirkungsgrad gibt an, welcher Anteil der im Energieträger chemisch gebundenen Energie in elektrische Energie umgewandelt werden kann. Die Prozesse der elektrochemischen Energieumwandlung der Brennstoffzelle unterliegen anderen Gesetzmäßigkeiten (Nernst) als die der Verbrennung der Wärmekraftmaschinen (Carnot). Hieraus leiten sich zwei wesentliche Vorteile für die Brennstoffzelle ab. Zum einen liegt der erreichbare Wirkungsgrad von Brennstoffzellensystemen über dem konventioneller Anlagen wie Motoren oder Turbinen. Zum anderen erreichen Brennstoffzellen den guten Wirkungsgrad über einen weiten Lastbereich, was sich insbesondere bei Anwendungen mit stark wechselndem Leistungsbedarf, wie z.B. Fahrzeugantrieb, positiv auswirkt. Schon heute werden

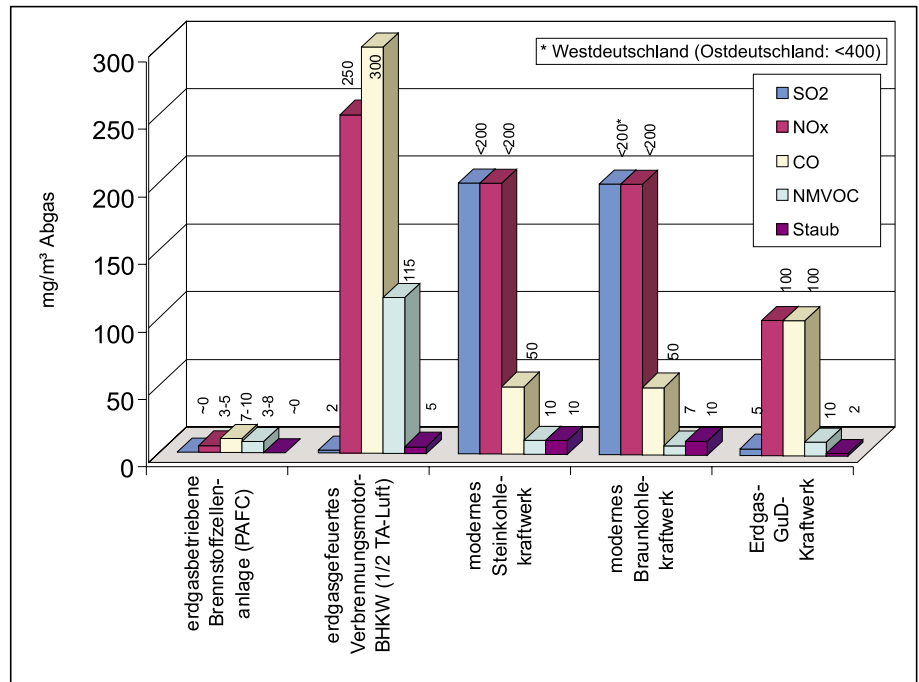


Abbildung 3: Spezifische Luftschadstoffemissionen verschiedener stationärer Elektrizitätserzeugungstechniken (Quelle: VDEW)

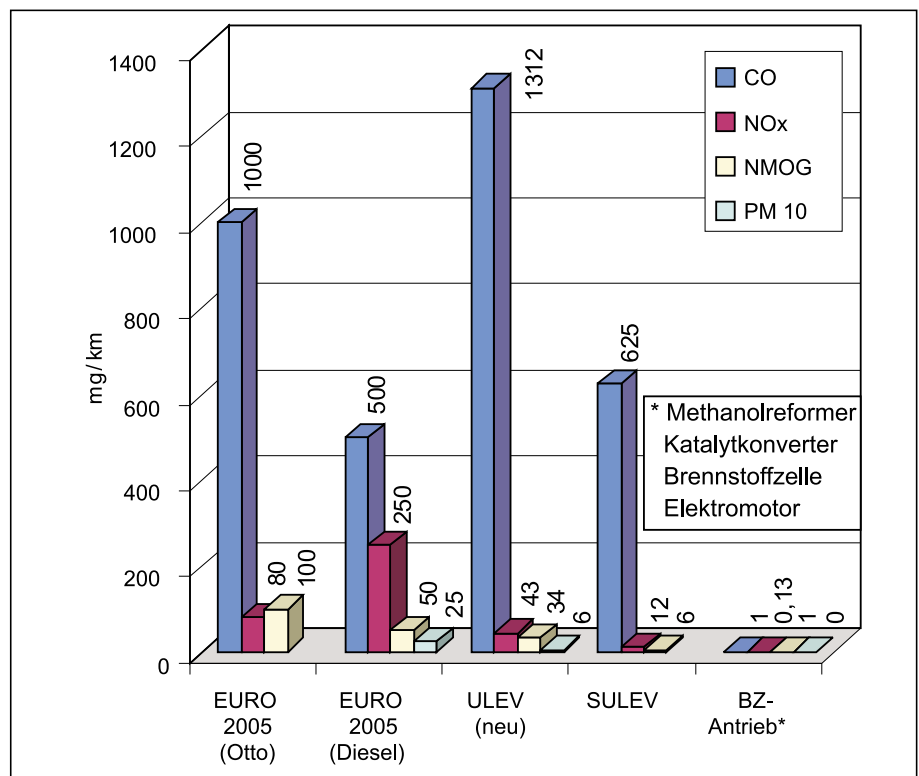
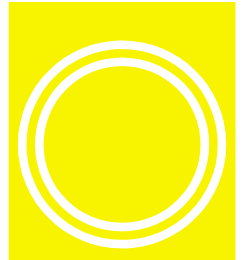


Abbildung 4: Vergleich der spezifischen limitierten Emissionen für den PKW-Antrieb (Quelle: Forschungszentrum Jülich)

mit Brennstoffzellensystemen die Wirkungsgrade konventioneller Anlagen erreicht oder auch überschritten. Die theoretische Grenze ist aber für Brennstoffzellensysteme bei weitem noch nicht erreicht, sodass noch ein hohes Entwicklungspotenzial vorhanden ist.

Schadstoffemissionen

Für den Fall, dass der Wasserstoff aus regenerativen Energiequellen hergestellt wird, ist die Bereitstellung elektrischer Energie in einer Brennstoffzelle emissionsfrei. Da die Basis der heutigen



Energieversorgung fossile Energieträger sind, muss die Bereitstellung des Wasserstoffs aus diesen kohlenstoffhaltigen Quellen im Hinblick auf die Emissionen berücksichtigt werden.

Für den Bereich der stationären Energieversorgung bietet sich aus heutiger Sicht Erdgas als Brennstoff für Brennstoffzellensysteme an. Dieses wird in einem der Brennstoffzelle vorgelagerten Prozess so weit aufbereitet, dass hauptsächlich Wasserstoff und Kohlendioxid entstehen. Messungen der darüber hinaus frei werdenden Luftschadstoffemissionen (SO₂, NO_x, CO, NMVC, Staub) an einem Brennstoffzellenblockheizkraftwerk (PAFC) zeigen den deutlichen Vorteil dieses Systems gegenüber konventionellen stationären Elektrizitätserzeugungstechniken ([Abbildung 3](#)).

[Abbildung 4](#) zeigt den Vorteil des Brennstoffzellensystems als PKW-Antrieb hinsichtlich der spezifischen limitierten Emissionen. Als Energieträger wird hier flüssiges Methanol verwendet.

Abwärmennutzung und Gesamtnutzungsgrad

Neben elektrischer Energie wird bei der Umwandlung in der Brennstoffzelle auch Wärme frei. Diese kann – abhängig von der Betriebstemperatur der Brennstoffzelle – genutzt werden. Die Abwärme der PEM (<80 °C) sowie der PAFC (<170 °C) bieten sich z. B. für die Nahwärmennutzung in Gebäuden an. Die hohen Temperaturen der MCFC (<650 °C) oder der SOFC (<950 °C) bieten die Möglichkeit der Fernwärmennutzung bzw. der Nutzung in industriellen Prozessen.

Aus der Nutzung der elektrischen zusammen mit der thermischen Energie ergibt sich ein hoher Gesamtnutzungsgrad bezogen auf den eingesetzten Brennstoff von bis zu 90 %. Die Kraft-Wärme-Kopplung bietet gegenüber heute eingesetzten Systemen, die getrennt Strom und Wärme bereitstellen, hinsichtlich des Nutzungsgrads und damit auch hinsichtlich der CO₂-Emissionen deutliche Vorteile.

Vorteile von Brennstoffzellen:

- hoher elektrischer Wirkungsgrad in einem weiten Lastbereich
- bei Wasserstoffbetrieb keine Emissionen
- bei Einsatz von Kohlenwasserstoffen und einer vorgelagerten Brennstoffaufbereitung nur sehr geringe Emissionen
- hoher Gesamtwirkungsgrad durch Abwärmennutzung
- einfache Leistungsanpassung durch modularen Aufbau
- mechanisch einfache Systeme ohne bewegte Teile
- keine Vibrationen
- geräuscharmer Betrieb

3. Anwendungen von Brennstoffzellensystemen

Die Verwendung fossiler Energieträger zur Deckung des weltweiten Energiebedarfs wird in den kommenden Jahrzehnten weiterhin unvermeidlich sein.

Für die Nutzung dieser kohlenstoffhaltigen Energieträger sind neben dem Brennstoffzellenstack weitere Komponenten notwendig. Ein allgemeines Schema eines kompletten Brennstoff-

zellensystems ist in [Abbildung 5](#) dargestellt. Der Energieträger (Benzin, Diesel, Methanol, Erdgas...) wird in einem Reformer in ein wasserstoffreiches Synthesegas umgewandelt. Nach weiterer Gasnachbehandlung und -reinigung wird der Wasserstoff der Brennstoffzelle zur Stromerzeugung zugeführt. Der Strom muss dann gegebenenfalls der elektrischen Last angepasst werden. Die Abwärme kann entweder im Prozess selber genutzt werden oder als Nutzwärme ausgekoppelt werden.

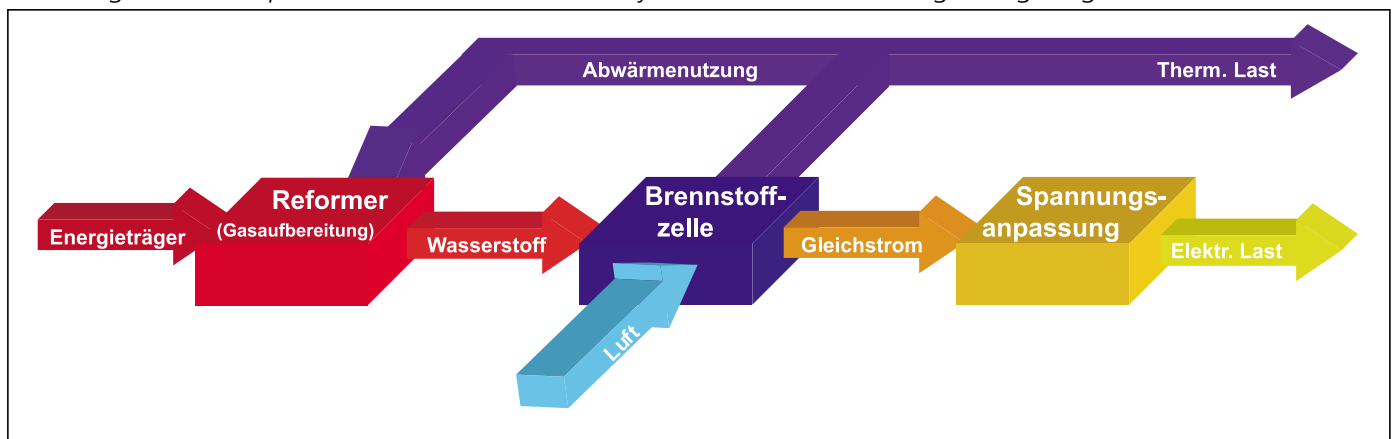
Die Anwendung, in der das Brennstoffzellensystem eingesetzt wird, legt die Rahmenbedingungen und die Anforderungen fest, woraus sich die Komplexität des Gesamtsystems ergibt (siehe [Abbildung 6](#)). So ist im Einzelfall zu entscheiden, welcher Reformer eingesetzt wird, welche Verunreinigungen im Wasserstoff für die Brennstoffzelle akzeptabel sind oder in welcher Form die Nutzenergien Strom und Wärme aufbereitet werden müssen.

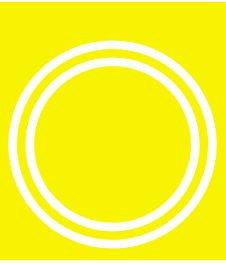
Im Folgenden werden die heute betriebenen, demonstrierten, entwickelten und diskutierten Anwendungen von Brennstoffzellensystemen dargestellt. Dabei wird zunächst auf die Nischenmärkte Raumfahrt und U-Boote und danach auf die Massenmärkte Fahrzeuge, stationäre Energieversorgung, Hausenergieversorgung und Batterie-Ersatz eingegangen.

3.1 Nischenmärkte

In Nischenmärkten sind in der Regel weniger die Kosten als vielmehr die Erfüllung spezieller Anforderungen das Kriterium für den Einsatz eines Pro-

Abbildung 5.: Basiskomponenten eines Brennstoffzellensystems für kohlenstoffhaltige Energieträger





dukts. So wird die Brennstoffzelle seit den sechziger Jahren in Raumfahrt- und militärischen Anwendungen (U-Boot) eingesetzt. Die Systeme müssen für diese Anwendungen autonom Strom bereitstellen und dabei möglichst einfach und in jedem Fall zuverlässig sein.

Brennstoffzellen in der Raumfahrt

Eine zuverlässige Energieversorgung ist die Voraussetzung für die Lebenserhaltung und für die Durchführung von Experimenten an Bord von Raumkapseln im Weltall. Schon die ersten Gemini-Missionen (1964-1966) hatten hierfür PEM-Brennstoffzellen an Bord, die aus Flüssig-Wasserstoff- und -Sauerstoff-Tanks versorgt wurden. Es folgten die Apollo-Missionen (1966-1972), in denen alkalische Brennstoffzellen (AFC) eingesetzt wurden. In beiden Fällen diente eine Nickel-Cadmium-Batterie als back-up-Versorgung. Im Space-Shuttle werden seit 1981 ebenfalls alkalische Brennstoffzellen eingesetzt. Die Back-up-Versorgung über Batterien gibt es dabei nicht mehr. Neben der Stromversorgung tragen die Brennstoffzellen mit dem entstehenden Wasser zur Trinkwasserversorgung der Astronauten bei.

Brennstoffzellen in U-Booten

Die Merkmale der Brennstoffzelle, vibrationsfrei und geräuscharm Strom zu erzeugen, spielen in der Versorgung von U-Booten eine entscheidende Rolle. Das für diese Anwendung bisher größte Brennstoffzellensystem (PEM, 3 x 3 Module à 34 kW) soll ab 2003 ein deutsches U-Boot der Klasse 212 antreiben und mit Strom versorgen. Der Wasserstoff wird in Metallhydridspeichern mitgeführt. Durch den Einsatz der Brennstoffzelle kann die Tauchzeit um den Faktor 5 gegenüber herkömmlicher Technologie verlängert werden.

3.2 Massenmärkte

Brennstoffzellensysteme in Fahrzeugen, zur stationären Energieversorgung, für die Hausenergieversorgung oder als Batterieersatz anzuwenden heißt, Märkte zu bedienen, in denen neben der Zuverlässigkeit die Wirtschaftlichkeit entscheidend ist. Der Einsatz kohlenstoffhaltiger Energieträ-

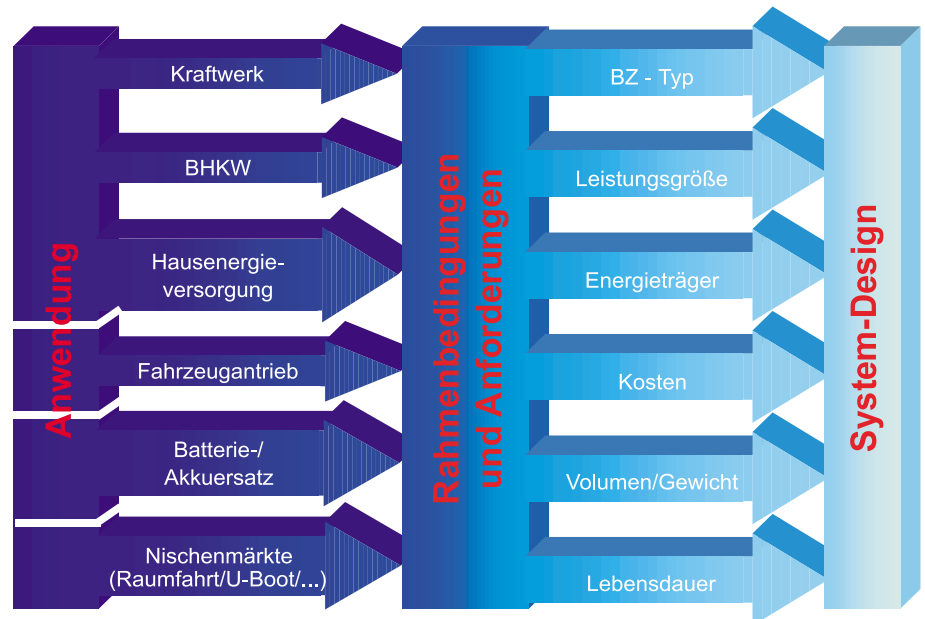


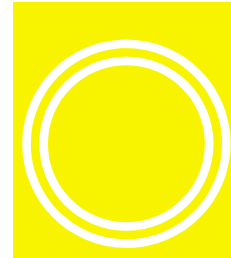
Abbildung 6: Einfluss der Anwendung auf die Komplexität des Brennstoffzellensystems

ger ist in diesen Märkten aufgrund der vorhandenen Infrastruktur in den nächsten Jahren unumgänglich (solare Wasserstoff wird erst sehr langfristig verfügbar sein können; Wasserstoff aus Kernenergie hängt an der Akzeptanzfrage dieser Energietechnik). Demnach ist der Bereitstellung von Wasserstoff durch Reformer und Gasnachbehandlung in diesen Systemen besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Dies hat auch Auswirkungen auf die Wahl des geeigneten Brennstoffzellentyps. Während die Niedertemperaturbrennstoffzellen nur sehr geringe Verunreinigungen vertragen und somit eine aufwendige Reinigung notwendig ist, kann bei den Hochtemperaturbrennstoffzellen hierauf verzichtet werden. Darüber hinaus spielen Fragen der notwendigen mechanischen Stabilität und des verfügbaren Volumens eine Rolle.

Brennstoffzellen für den Antrieb von Fahrzeugen

Bei der Verwendung von Brennstoffzellen für den Pkw-Antrieb wird die in der Brennstoffzelle erzeugte elektrische Energie einem Elektromotor zugeführt, der seinerseits mechanische Energie an den Antriebsrädern zur Verfügung stellt. Die Automobilkonzerne unternehmen derzeit große Anstrengungen, um in den nächsten Jahren mit Brennstoffzellen angetriebene Personen-Kraftwagen auf den Markt zu bringen. Dabei ist zu beachten, dass

diese Anwendung anspruchsvolle Anforderungen an das System stellt. Um konkurrenzfähig zu sein, dürfen die System-Kosten nicht mehr als 100 DM/kW betragen. Dabei muss dem begrenzten Platzangebot durch ein geringes Leistungsvolumen ($<1 \text{ l/kW}$) und ein geringes Leistungsgewicht ($<1 \text{ kg/kW}$) bei hoher mechanischer Stabilität Rechnung getragen werden. Zur Akzeptanz durch den Kunden gehört darüber hinaus eine ausreichend gute Dynamik des Gesamtsystems. Nur wenn die Fahreigenschaften und die Fahrleistungen denen verbrennungsmotorischer Antriebskonzepte gleichen oder diese übertreffen, haben Brennstoffzellen eine Chance, gegen diese zu bestehen. Weltweit wird für den Einsatz im Pkw die PEM-Brennstoffzelle favorisiert. Dieser im Grundsatz konstruktiv einfache Zelltyp bietet ein großes Potenzial, durch Massenfertigungsverfahren – wie Folienherstellung – die notwendige Kostenreduktion zu erreichen. Die hohen Anforderungen an die Qualität des verwendeten Wasserstoffs ($<10 \text{ ppm CO}$) erfordert jedoch eine aufwendige Gasaufbereitung, die in heutigen Systemen einen hohen Teil der Kosten und des Platzbedarfs ausmacht. Der derzeit favorisierte Energieträger ist das im Vergleich zu Benzin oder Diesel kohlenstoffarme Methanol, welches verhältnismäßig einfach reformiert werden kann. Aber auch Reformer für Benzin und Diesel sind heute in der Entwicklung, sodass die Frage des zum Einsatz



kommenden Brennstoffs zur Zeit nicht endgültig beantwortbar ist.

Im Sinne einer verfahrenstechnischen Vereinfachung des Gesamtsystems ist der Verzicht auf die Reformierung wünschenswert. Der Ansatz, Methanol direkt der Anode einer Polymer-Brennstoffzelle zuzuführen, wird weltweit untersucht. Dabei wird das Methanol direkt am Katalysator der Anode reformiert. Der Einsatz dieser so genannten Direktmethanol-Brennstoffzelle (DMFC) verspricht durch den Wegfall der Gas-aufbereitung sowohl Kosten- als auch Volumenreduktionen: Dabei sind die Vergiftung des Katalysators durch das bei der Reformierung entstehende Kohlenmonoxid sowie die Durchlässigkeit der Polymermembran für Methanol, was zu deutlichen Wirkungsgradverlusten führt, offene Probleme.

Den Aussagen der Automobilindustrie zufolge werden die technischen Probleme in den nächsten Jahren so weit gelöst sein, dass im nächsten Jahrzehnt erste brennstoffzellengetriebene Fahrzeuge in Serie gebaut werden. Hierdurch kann ein Beitrag geleistet werden, Emissionen von Stickoxiden, Partikeln u. a. vor allem in Ballungsräumen zu reduzieren (siehe [Abbildung 4](#)). Die großen Entwicklungspotenziale hinsichtlich der Systemwirkungsgrade lassen langfristig deutliche CO₂-Reduktionen erwarten. Der Einsatz von Wasserstoff als Energieträger wird heute bei Flottenfahrzeugen wie z.B. Bussen demonstriert. Durch die zentrale Betankung der Fahrzeuge ist der Aufbau einer lokalen Wasserstoffinfrastruktur denkbar. Darüber hinaus liegen die täglichen Fahrleistungen im Bereich weniger 100 km, sodass verfügbare Speicherverfahren für Wasserstoff ausreichende Reichweiten gewähren. In diesem Fall bedeutet der lokal vollkommen emissionsfreie Betrieb einen erheblichen Vorteil gegenüber verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen.

Brennstoffzellensysteme für die stationäre Energieversorgung

Der denkbare Einsatz stationärer Energieversorgungssysteme reicht von zentralen Blockheizkraftwerken zur autonomen Strom- und Wärmeversorgung von Siedlungen, Krankenhäusern o. ä. über Kraftwerke der Industrie an

Produktionsstandorten, die darüber hinaus Prozesswärme bereitstellen, bis hin zu Kraftwerken der Energieversorgungsunternehmen, die die öffentliche Grund-, Mittel- und Spitzenlast abdecken.

Wegen des modularen Aufbaus der Brennstoffzellenstacks lässt sich ihre Leistung an jede dieser Anwendungen anpassen. Darüber hinaus steht für die stationäre Energieversorgung eine Infrastruktur für den kohlenstoffarmen Energieträger Erdgas zur Verfügung, der gut geeignet ist, über einen vorgeschalteten Reformier Brennstoffzellen zu versorgen. Ein sehr wichtiges Kriterium, das eine Anlage in der stationären Energieversorgung erfüllen muss, ist eine hohe Lebensdauer bei einer möglichst geringen Alterung des Systems. Für Brennstoffzellensysteme liegt diese Zielgröße bei <0,25 % Wirkungsgradverlust in 1.000 Betriebsstunden (bei insgesamt >40.000 Betriebsstunden). Darüber hinaus muss abhängig von der Anwendung (Grundlast oder Spitzenlast) das An- und Abfahren der Anlagen genügend schnell und ohne zu große Materialermüdung erfolgen. Im Hinblick auf die Investitionskosten müssen mit Brennstoffzellensystemen mindestens 800 DM/kW (Gasturbine) bzw. 2.000 DM/kW (Kohlekraftwerk) erreicht werden.

Kommerziell verfügbar ist heute eine PAFC-Anlage mit einer elektrischen Leistung von 200 kW. Der Anteil der nutzbaren Abwärme und damit der Gesamtwirkungsgrad hängen stark von der gewünschten Temperatur ab. Zahlreiche Demonstrationsanwendungen in Deutschland und weltweit (>160 Anlagen) zeigen, dass mit dieser Technologie Strom und Wärme wartungsarm und verlässlich bereitgestellt werden können.

Zwei Trends sind heute zu beobachten: Auf der einen Seite werden PEM-Systeme entwickelt (250 kW) in der Hoffnung, die drastischen Kostenreduktionen, die für die mobile Anwendung notwendig sind, auch für die stationäre Anwendung zu nutzen und somit sehr wirtschaftlich Anlagen zu betreiben. Auf der anderen Seite erscheinen Hochtemperaturbrennstoffzellen (MCFC, SOFC) sehr interessant, da sie Abwärme auf einem hohen Temperaturniveau bereitstellen, die

z. B. zur Fern- oder Prozesswärmenutzung verwendet werden kann. Insbesondere bei der SOFC verspricht die Kopplung mit Gasturbinen elektrische Wirkungsgrade von über 70 %. Erste Demonstrationsanlagen dieses Konzepts mit einer elektrischen Leistung von 300 kW sollen im nächsten Jahr in Betrieb genommen werden. Vorteilhaft auf die Lebensdauer wirkt sich auch die geringe Empfindlichkeit der Hochtemperaturbrennstoffzellen gegenüber Verunreinigungen aus.

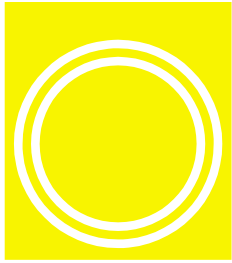
Brennstoffzellensysteme für die Hausenergieversorgung

Für den Einsatz in der Hausenergieversorgung bieten sich Brennstoffzellen in geradezu idealer Weise an. Sie werden dort – so die heutigen Konzepte – als Strom erzeugende Heizgeräte eingesetzt. Das heißt, dass zusätzlich zu der Umwandlung in der Brennstoffzelle ein nachgeschalteter Brenner betrieben wird, der zum einen das in der Brennstoffzelle nur unvollständig umgesetzte Anodenbrenngas verbrennt und zum anderen direkt mit Erdgas versorgt werden kann, um Spitzen im Wärmebedarf (Heizung, warmes Wasser) abzudecken. Das Brennstoffzellensystem wird parallel zum öffentlichen Stromnetz betrieben, sodass die elektrische Spitzenlast hierüber abgedeckt bzw. überschüssig produzierter Strom ins Netz eingespeist werden kann. Vergleicht man ein solches System mit einer Versorgung, bei der der Strom zu 100 % aus dem öffentlichen Netz bezogen und die Wärme in einem konventionellen Brennwärmeessel bereitgestellt wird, so können in einem durchschnittlichen Haushalt mit einem solchen System etwa ein Drittel der CO₂-Emissionen eingespart werden.

Wie bei der stationären Versorgung werden auch bei der Hausenergieversorgung die beiden Entwicklungslinien PEM- und SOFC-Systeme verfolgt.

Portable Brennstoffzellensysteme

Büro- und Kommunikationsgeräte, Notstromaggregate, Camping-, Haus- und Gartengeräte werden heute in zunehmenden Maße mit wieder aufladbaren Akkus versorgt, um einen netzunabhängigen Betrieb zu realisieren. Dabei wachsen die Ansprüche des Kunden im Hinblick auf die unterbre-



chungsfreie Betriebsdauer dieser Systeme.

PEM-Brennstoffzellen in Verbindung mit geeigneten Wasserstoffspeichern (z. B. Metallhydride) bilden einfache Systeme, die bei Umgebungstemperatur geringe Leistungen im Bereich weniger Watt für lange Betriebszeiten Umwelt schonend (Entsorgung von Batterien!) bereitstellen können. Gegenüber Akkus bieten sie den Vorteil, dass Leistung und Energieinhalt des Systems durch die Dimensionierung der Zelle bzw. des Speichers unabhängig voneinander festgelegt werden können. Die aufgrund ihres hohen spezifischen Gewichts für die mobile Anwendung in Fahrzeugen weniger geeigneten Metallhydridspeicher stellen für die portablen Anwendungen einen sicheren und bequemen Wasserstoffspeicher dar. Die Möglichkeit, einen flüssigen Energieträger (z. B. Methanol) direkt der Brennstoffzelle zuzuführen, würde wie für die Anwendung in Fahrzeugen bedeuten, Energie mit geringem Aufwand nachladen und mitführen zu können. Auch vor diesem Hintergrund wird die Entwicklung der DMFC betrieben.

4. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die oben dargestellten Anwendungen zeigen die Vielfalt und die Vorteile der Nutzung der Brennstoffzellentechnologie. Bevor Brennstoffzellen jedoch in diesen Märkten eingesetzt werden können, müssen sie zuverlässig und

wirtschaftlich betrieben werden können. Um die durch konventionelle Umwandlungstechniken vorgegebenen Standards zu erreichen, ist in den nächsten Jahren weiterer großer Forschungs- und Entwicklungsaufwand notwendig.

Die Stabilität der Werkstoffeigenschaften ist die Voraussetzung für eine lange Lebensdauer und damit für einen wirtschaftlichen Betrieb. Das Ziel der Entwicklungen sind kostengünstige Werkstoffe, die eine geringe Alterung aufweisen. Dies gilt insbesondere für die Polymermembran der Niedertemperaturbrennstoffzelle sowie für die keramischen Werkstoffe der SOFC. Darüber hinaus muss durch verfahrenstechnische und durch konstruktive Optimierung von Wasser-, Luft- und Wärmemanagement sowie durch die Entwicklung von massenproduktionsfähigen Fertigungsverfahren das Ziel verfolgt werden, preiswerte, effiziente und kompakte Brennstoffzellenstacks zu realisieren.

Die Entwicklung und Optimierung geeigneter Reformer für die heute verfügbaren Energieträger Benzin, Diesel und Erdgas ist ein entscheidender Schritt im Hinblick auf den Einsatz von Brennstoffzellen im Rahmen der bestehenden Infrastrukturen. Im Falle der Nutzung von Methanol oder Wasserstoff als Energieträger stellen die Kosten und die Entwicklung einer Infrastruktur zentrale Herausforderungen dar. Die Realisierung der Vision einer Wasserstoffenergiewelt bedarf darüber

hinaus der Entwicklung effektiver Wasserstoffspeicher mit hoher Energiedichte. Es muss betont werden, dass insgesamt auch längerfristig ein hoher Forschungs- und Entwicklungsaufwand erforderlich ist. Dabei hat die staatliche Forschungspolitik eine besondere Verantwortung, auch für Kontinuität zu sorgen.

5. Fazit

Durch die Entwicklung neuer Werkstoffe sowie durch verfahrenstechnische Optimierungen konnten seit den 60er Jahren neue Brennstoffzellensysteme entwickelt werden. Diese bieten die Möglichkeit, Strom und Wärme für stationäre oder mobile Anwendungen effizient und schadstoffarm zur Verfügung zu stellen. Durch den modularen Aufbau der Brennstoffzelle kann dabei ein Leistungsbereich von wenigen Watt bis zu einigen MW abgedeckt werden. Die Brennstoffzellentechnologie bietet die Chance, einen Beitrag zur Schonung der Ressourcen fossiler Energieträger und zur Reduzierung von Schadstoffemissionen zu leisten. Brennstoffzellen sind einerseits im Rahmen der heute verfügbaren Infrastruktur grundsätzlich einsetzbar, andererseits sind sie eine Technologie für zukünftige Energiesysteme, die ausgehend von regenerativen Energiequellen Wasserstoff als transportablen und speicherbaren Energieträger verwenden. Vor diesem Hintergrund stellen Brennstoffzellen ein Schlüsseltechnologiefeld für das nächste Jahrhundert dar.