



Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie

von Sebastian Martin

Die Energieversorgung ist eine entscheidende Grundlage für die Entfaltung von Wirtschaftskraft und Wohlstand in modernen Gesellschaften.

Aus diesem Grund wird angesichts des globalen Wachstums der Weltwirtschaft und der zunehmenden Weltbevölkerung die globale Energienachfrage bis 2030 drastisch steigen. Trotz aller Bemühungen, über Energieeinsparprogramme und Effizienzverbesserungen den Energieverbrauch zu senken, zeigt der Trend weiter in die entgegengesetzte Richtung. Die Fachanalyse „Energy Outlook 2030“ der BP prognostiziert, dass sich der weltweite Energieverbrauch bis 2030 um 39 Prozent erhöhen wird. Ungeachtet der weltweiten Zunahme der Bedeutung von erneuerbaren Energien werden bei der Deckung des Energiebedarfs die fossilen Brennstoffe Erdöl, Stein- und Braunkohle sowie Erdgas ihre dominierende Position behalten. So kommt BP zu der Aussage, dass im Jahre 2030 81 Prozent der welt-

weiten Energienachfrage über fossile Brennstoffe gedeckt werden.¹

Diese anhaltende Vorherrschaft fossiler Energieerzeugung lässt auch die globalen CO₂- und Schadstoffemissionen und die damit einhergehenden Risiken für Klima und Gesundheit weiter steigen.

Wasserstoff als umweltfreundlicher Energieträger

Die großen Hoffnungen im Hinblick auf die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie liegen somit in erster Linie in ihrer potenziellen Umweltfreundlichkeit, denn aus der Energiequelle Wasserstoff entsteht im Wesentlichen nur das saubere Reaktionsprodukt Wasser. Zudem können weitere wasserstoffhaltige Substanzen wie beispielsweise Methanol oder Erdgas als Brennstoffe für Brennstoffzellen zum Einsatz kommen und so ein Beitrag zur Dekarbonisierung von industriellen Prozessen

geleistet werden.²

Die Elektrifizierung von Prozessen unter dem Stichwort „power-to-x“ – wobei „x“ als Variable für Methan, Wärme, Wasserstoff oder andere synthetische Kraftstoffe/ Brennstoffe steht – ist deshalb ein wichtiger Baustein von Dekarbonisierungsstrategien. Insbesondere im Hinblick auf eine langfristige Reduktion von Treibhausgasemissionen in den Sektoren Verkehr und Industrie ist die Elektrifizierung von Prozessen sowie „power-to-x“ als Dekarbonisierungsstrategie an einen stark steigenden Anteil erneuerbarer Energiequellen in der Stromerzeugung gekoppelt.

Zu beachten ist, dass eine „echte“ Dekarbonisierung kaum möglich ist, wenn nicht nachhaltig erzeugter Strom zum Einsatz kommt, denn bei der Elektrifizierung von Prozessen steigt die Stromnachfrage und bedingt durch die zusätzlichen Prozessschritte bei der Erzeugung von synthetischen Kraft-

¹ Vgl. BP (2013). BP energy Outlook 2030, S. 49. Abgerufen von <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2013.pdf> am 12.06.2019.

² Vgl. Schoofs, S. & Lang, J. (1998). PEM Brennstoffzellen. BINE-Projekt-Info-Service Nr. 7, S. 1. Abgerufen von <https://www.bhkw-foezentrum.de/download/binepem.pdf> am 13.06.2019.

stoffen entstehen Umwandlungsverluste. In diesem Kontext ist zu berücksichtigen, dass aufgrund des wachsenden Anteils fluktuierender erneuerbarer Energiequellen an den Stromerzeugungsbeiträgen vermehrt Phasen entstehen werden, in denen der regenerativ erzeugte Strom nicht direkt von Endverbrauchern abgenommen werden kann. Durch den Einsatz von Brennstoffzellen besteht die Möglichkeit, diese Überschuss-Energie in Wasserstoff umzuwandeln. Mit entsprechender Speicherung und Anschlussnutzung bzw. Rückverstromung kann diese Energie einer sinnvollen Weiternutzung zugeführt werden.³

Grundlagen der Brennstoffzellen-Technologie

Die Brennstoffzellen-Technologie ist darüber hinaus vielseitig, dezentral und modular einsetzbar und erzeugt zeitgleich Strom und Wärme. Eine Kraft-Wärme-Kopplung, die eine Brennstoffausnutzung von bis zu 95 Prozent ermöglicht, bietet den Vorteil, dass Elektrizität bei hohen Wirkungsgraden, geräuscharm und bei geringen lokalen Emissionen erzeugt wird.⁴

Im Hinblick auf die Emissionen ist zu berücksichtigen, dass die eigentliche elektrochemische Umsetzung in der Brennstoffzelle, die als Kaltverbrennung von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser bezeichnet wird, emissionsfrei

ist. Emissionen können jedoch durch die vorgeschaltete Brennstoffaufbereitung entstehen und sind abhängig vom hierfür eingesetzten Energieträger. Der vergleichsweise hohe Wirkungsgrad beruht auch auf der Tatsache, dass in der Brennstoffzelle elektrische Energie ohne thermische und mechanische Zwischenschritte wie etwa bei Verbrennungsmotoren erzeugt wird.⁵

Es werden grundsätzlich drei zentrale Anwendungsbereiche von Brennstoffzellen unterschieden:⁶

- Stationär: Kraftwerke unterschiedlicher Größe zur Strom- und Wärmeversorgung von Objekten
- Mobil: Für den Antrieb von Fahrzeugen mit Elektromotor
- Portabel: Energieversorgung von mobilen Geräten

Die physikalischen Grundlagen für die Erzeugung von elektrischem Strom mit Hilfe von Brennstoffzellen basieren auf elektrochemischen Vorgängen zwischen Sauerstoff und Wasserstoff, wobei die genannte Kaltverbrennung von Sauerstoff mit Wasserstoff elektrochemisch betrachtet ein Vorgang mit Elektronenübergang ist.⁷

Werden Sauerstoff und Wasserstoff miteinander in Verbindung gebracht, reagiert der Wasserstoff unter Elektronenaufnahme (Oxidation) mit dem Sau-

erstoff, der seinerseits Elektronen abgibt (Reduktion).⁸

Wird nun durch eine Trennung des Reaktionsraumes diese freie Reaktion verhindert und durch den Einsatz eines Elektrolyten lediglich der Übergang von Ionen zugelassen, können die Elektronen über einen Verbraucher geleitet werden. Dabei wird der gewünschte Stromfluss erzeugt (vgl. Abb. 1).⁹

Ein Teil der im Wasserstoff gespeicherten chemischen Energie kann durch den beschriebenen Prozess in elektrische Energie umgewandelt werden. Der Ladungsausgleich erfolgt hierbei durch einen Ionentransport durch den Elektrolyten.¹⁰

Durch Reihenschaltung solcher einzelnen Zellen können die erzielten Spannungen und Leistungen entsprechend den Notwendigkeiten angepasst werden. Diese Reihenschaltungen von einzelnen Zellen werden Zellstapel bzw. Zell-Stacks genannt.¹¹

Das Kernstück einer jeden Brennstoffzelle (BZ) ist der Elektrolyt, weshalb verschiedene BZ-Typen auch nach der Art der verwendeten Elektrolyten unterschieden werden. Ein weiteres Merkmal zur Klassifizierung ist die Betriebstemperatur (vgl. Tabelle 1). Es existieren Niedertemperatur- und Hochtemperatur-Brennstoffzellen.¹²

³ Vgl. Hillebrandt, K., Samadi, S. & Fishedick, M. (2015). Wege zu einer weitgehenden Dekarbonisierung Deutschlands. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, S. 8. Abgerufen von https://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/DDPP_DE_summary_de.pdf am 11.06.2019.

⁴ Vgl. Jörissen, L., Garche, J., Rohland, B., Dienhart, H., Heinzel, A. & Bünger, U. (1999). Brennstoffzellen in der Kraft-Wärme-Kopplung – eine Energieoption für die Zukunft? In: Forschungsverbund Sonnenenergie (Hrsg.). Themen 98/99 (S. 86-93). Köln. S. 86.

⁵ Vgl. Hirschl, B. & Hoffmann, E. (2003). Zukunftstechnologie Brennstoffzelle? Diffusionsbedingungen und sozial-ökologische Forschungsempfehlungen unter besonderer Berücksichtigung dezentraler Energieversorgung. Schriftenreihe des IÖW 165/03. Berlin, S. 5.

⁶ Vgl. ebd.

⁷ Vgl. Ohl, M., Özdemir, E. D., Hartmann, N., Henßler, M. & Fleischer, B. (2015). Elektrolyse und Brennstoffzelle. Hauptfach- und APMB-Ver-such. Universität Stuttgart. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, S. 14. Abgerufen von <https://www.ier.uni-stuttgart.de/content/documentcenter/Skript-Brennstoffzelle.pdf> am 10.06.2019.

⁸ Vgl. ebd.

⁹ Vgl. ebd., S. 14-15.

¹⁰ Vgl. Kabza, A. (2018a). Funktion und Aufbau einer PEMFC. Abgerufen von <http://www.pemfc.de/pemfc.html> am 11.06.2019.

¹¹ Vgl. Hirschl & Hoffmann (2003), S. 16.

¹² Vgl. EnergieAgentur.NRW (2018). Brennstoffzellentypen und ihr Entwicklungsstand. Abgerufen von <https://www.energieagentur.nrw/brennstoffzelle/brennstoffzelle-wasserstoff-elektromobilitaet/brennstoffzellentypen> am 11.06.2018.

BZ-Typ	Proton Exchange Membrane	Alkaline	Phosphoric Acid	Molten Carbonate	Solid Oxide
	(PEMFC)	(AFC)	(PAFC)	(MCFC)	(SOFC)
Elektrolyt	protonenleitende Polysulfonsäure-Membran	30-50% KOH	konzentrierte Phosphorsäure	Karbonatschmelze (Li ₂ CO ₃ , K ₂ CO ₃)	Ionenleitende Karamik (YSZO)
Temperatur	50-80°C	60-90°C	160-220°C	620-660°C	800-1000°C
Brennstoff	H ₂ , CH ₄ , CH ₃ OH	H ₂	H ₂ , CH ₄	CH ₄ , Kohlegas, Biogas	H ₂ , CH ₄ , Kohlegas, Biogas
Reaktion Anode	H ₂ → 2H ⁺ + 2e ⁻	H ₂ + 2OH ⁻ → 2H ₂ O + 2e ⁻	H ₂ → 2H ⁺ + 2e ⁻	H ₂ + CO ₃ ²⁻ → H ₂ O + CO ₂ + 2e ⁻	H ₂ + O ²⁻ → 2H ₂ O + 2e ⁻
Reaktion Kathode	1/2 O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ → 2H ₂ O	1/2 O ₂ + H ₂ O + 2e ⁻ → 2OH ⁻	1/2 O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ → 2H ₂ O	1/2 O ₂ + CO ₂ + 2e ⁻ → CO ₃ ²⁻	1/2 O ₂ + 2e ⁻ → O ²⁻
Zellwirkungsgrad	50-60%	50-60%	55%	60-65%	55-65%
Lastwechsel	schnell	schnell	langsam	langsam	schnell (wenn heiß)
Betriebsbereitschaft	sofort	sofort	30 min aus "hot standby"	mehrere Stunden	mehrere Stunden
Anwendung	Raumfahrt, Fahrzeuge, KWK, U-Boote, mobile Stromerzeugung	Raumfahrt, Fahrzeuge, U-Boote	Stromerzeugung, KWK, Fahrzeuge	Stromerzeugung	Stromerzeugung
Vorteile	einfacher Aufbau, niedrige Temperatur, kurze Anlaufzeit	schnelle Kathodenreaktion durch hohe Temperatur	hoher Gesamtwirkungsgrad in Kombination mit KWK (bis 85%)	hohe Temperatur, flexible Brennstoff-Verwendung	hohe Temperatur, einfaches Handling durch Festelektrolyt
Nachteile	teure Katalysatoren, empfindl. gegenüber Brennstoff-Verunreinigungen (CO)	komplizierte Entfernung von CO ₂ aus BZ und Restluft	Pt-Katalysator, niedrige Ströme und Leistung, sehr groß und schwer	Korrosion, beschleunigte Alterung der Zellkomponenten	beschleunigte Alterung der Zellkomponenten

Tabelle 1: Brennstoffzellen-Typen mit Ihren Charakteristika, vgl. Kabza (2018b). Verschiedene Technologien von Brennstoffzellen. Abgerufen von <http://www.pemfc.de/fctypes.html> am 12.06.2019.

Hochtemperatur-Brennstoffzellen benötigen für ihren einwandfreien Betrieb Temperaturen von mindestens 550° Celsius und eignen sich vorwiegend für stationäre Anwendungen.¹³

Was passiert in mobilen Brennstoffzellen?

Im Folgenden werden die in der Brennstoffzelle ablaufenden Prozesse anhand einer Polymerelektrolytbrennstoffzelle (PEMFC) beschrieben. Diese Art der Brennstoffzellen kommt hauptsächlich in mobilen Anwendungen und ohne Nutzung der Abwärme zum Einsatz.¹⁴ In Forschung und Entwicklung sowie in Feldtests der Wirtschaft genießt die PEMFC höchste Aufmerksamkeit.¹⁵

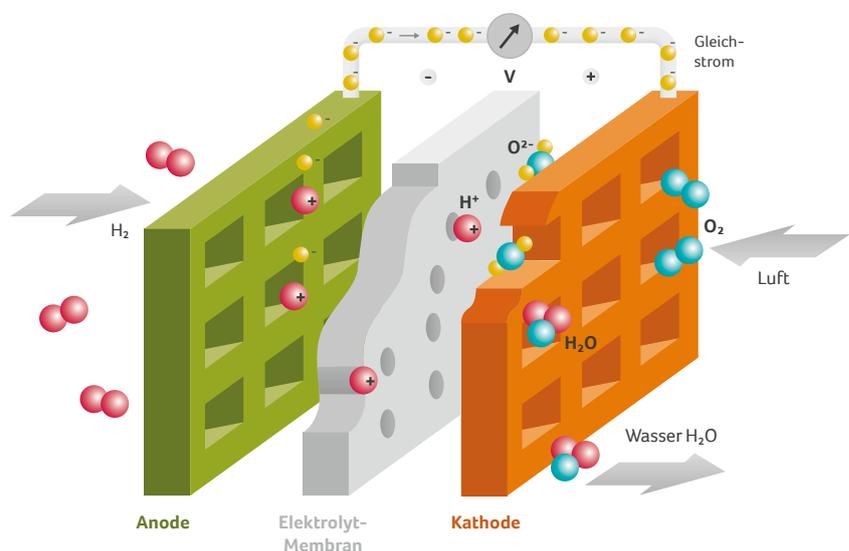


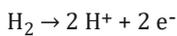
Abbildung 1: Elektrochemisches Funktionsprinzip einer PEMFC
 Quelle: EnergieAgentur.NRW (2018) / Vaillant

¹³ Vgl. ebd.

¹⁴ Vgl. Chemie.de (o. J.). Polymerelektrolytbrennstoffzelle. Abgerufen von <http://www.chemie.de/lexikon/Polymerelektrolytbrennstoffzelle.html> am 12.06.2019.

¹⁵ Vgl. Hassmann, K. (2016). Brennstoffzellen – Typen, Anwendungen, Wirtschaftlichkeit. Bayern Innovativ. Abgerufen von <https://www.bayern-innovativ.de/seite/brennstoffzellen-typen-anwendungen> am 11.06.2019.

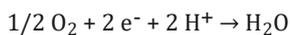
In der PEMFC besteht der Elektrolyt aus einer protonenleitenden Membran, wobei die Membran von den beiden Elektroden (Anode und Kathode) eingefasst ist.¹⁶ Anodenseitig wird Wasserstoff durch einen Edelmetall-Katalysator zu Protonen oxidiert und gibt jeweils sein Elektron ab:



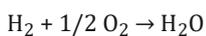
Den Minus-Pol einer Zelle bildet die Anode, da hier die Elektronen aus dem System abgeführt werden. Die Protonen wandern von der Anode durch die Elektrolyt-Membran zur Kathode.

Am Plus-Pol, der Kathode, werden die Elektronen wieder dem System zugeführt. Durch diese Elektronen wird der an der Kathode bereitgestellte Sauerstoff reduziert und nimmt die durch den Elektrolyten gewanderten Protonen auf.¹⁷

Als Produkt entsteht bei dieser Reaktion Wasser.



Die Gesamtreaktion lautet demnach:



Der für den Ablauf der chemischen Reaktion in der Brennstoffzelle notwendige Ladungsausgleich erfolgt also durch

die Wanderung von Ionen durch den Elektrolyten. Dabei ist zu beachten, dass je nach BZ-Typ der Elektrolyt sauren oder basischen Charakter haben kann. In sauren Elektrolyten erfolgt der Ladungsausgleich durch die Wanderung von Protonen und in basischen Elektrolyten durch Wanderung von Oxidionen.¹⁸

Anwendungsbeispiele von PEMFCs

Zum Einsatz kommen PEMFCs beispielsweise in PKWs, LKWs, Bussen, Straßenbahnen, Zügen und Schiffen oder auch bei Lasten-Pedelecs. Entscheidendes Qualitätskriterium mobiler PEMFC-Systeme ist neben der Stoßunempfindlichkeit und einer kompakten Bauform vor allem die Gewährleistung einer schnellen Lastdynamik.¹⁹

Beispiel Bus

Im Kontext der Anwendung von Brennstoffzellen in Überlandbussen wurde am 3. Juni 2019 das Konsortium „H2Bus“ gegründet, das sich aus Wasserstoff- und Busunternehmen zusammensetzt. Ziel des Konsortiums ist eine Bündelung der Aktivitäten in der Wertschöpfungskette. Im Rahmen eines von der EU mit 40 Millionen Euro unterstützten Projektes (CEF – Connecting Europe Facility Programm) sollen 600 Busse mit Hochleistungs-Brennstoffzellenmodulen ausgestattet werden. Jeweils 200 dieser Busse sollen inklusive der zugehörigen Infrastruktur in Lettland, Dänemark und Großbritannien eingesetzt werden. In Kombination mit dem Förderprogramm

JIVE (Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe) soll diese Zahl bis 2023 auf 1.300 brennstoffzellenbetriebene europäische Transitbusse erweitert werden.²⁰

Beispiel Flugzeug

Brennstoffzellen stellen zudem eine Möglichkeit dar, emissionsfreies Fliegen zu verwirklichen. Am 29. September 2016 absolvierte das weltweit erste viersitzige Passagierflugzeug mit Brennstoffzellenantrieb seinen Jungfernfahrt.²¹ Unter der Leitung der Gruppe Energiesystemintegration des Instituts für Technische Thermodynamik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Stuttgart wurde das Passagierflugzeug mit leistungsstarken und auf die Bedingungen in der Luftfahrt angepassten PEM-Brennstoffzellensystemen ausgestattet. In Kombination mit Hochleistungs-Akkumulatoren erreicht das Flugzeug Spitzengeschwindigkeiten von bis zu 200 Kilometer pro Stunde bei einer Reichweite von bis zu 1.500 km. ■

¹⁶ Vgl. Rost, U., Brodmann, M. & Sagewka, C. (2015). Erzeugung einer Membran-Elektroden-Einheit für Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen. Poster. Westfälische Hochschule Gelsenkirchen. Abgerufen von https://www.w-hs.de/fileadmin/public/user_upload/Poster_2015-15.pdf am 12.06.2019.

¹⁷ Vgl. Kabza (2018a).

¹⁸ Vgl. ebd.

¹⁹ Schoofs & Lang (1998), S.3

²⁰ IWR Digitale Medien (2019, 11. Juni). Ballard Power senkt Kosten und stellt neue Brennstoffzellen-Generation vor. Abgerufen von <https://www.iwr.de/news.php?id=36093> am 19.08.2019.

²¹ Schmid, A. (2019, 25. Juni). Elektro-Flugzeuge: abheben mit der Brennstoffzelle. Abgerufen von <https://edison.handelsblatt.com/ertraeumen/elektro-flugzeuge-abheben-mit-der-brennstoffzelle/24693890.html> am 19.08.2019.



Über den Autor

Sebastian Martin hat Kunststoff- und Elastomertechnik an den Hochschulen für angewandte Wissenschaften Rosenheim und Würzburg studiert. Die Schwerpunkte seiner Arbeit liegen in den Themenbereichen Digitalisierung, nachhaltige Technologien und Energieeffizienz.

Über die atene KOM

Die atene KOM GmbH aus Berlin begleitet den öffentlichen Sektor bei der Projektentwicklung in den Bereichen Digitalisierung, Energie, Mobilität, Gesundheit und Bildung.

Wir bringen Kommunen, Landkreise und Unternehmen zusammen und entwickeln gemeinsam die Infrastruktur für die Zukunft. Die Stärkung des ländlichen Raums steht im Fokus unserer Arbeit.

www.atenekom.eu