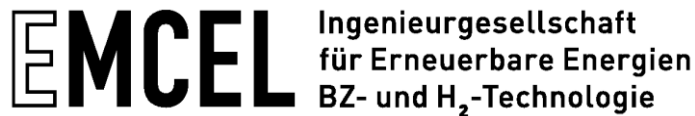


Einsatz der Brennstoffzellentechnik in der Industrie - Chancen und Möglichkeiten der BZ-Technik im Bergwerks- und Hüttenwesen

Dipl.-Ing. (FH) Marcel Corneille, mc@emcel.com

Dipl.-Ing. Timo Mittag, tm@emcel.com



1 Zusammenfassung

Dieser Artikel beschreibt die Chancen und Möglichkeiten der Brennstoffzellentechnologie im Bergwerks- und Hüttenwesen. Brennstoffzellen sind elektrochemische Energiewandler, die ein Brenngas, typischerweise Wasserstoff, in elektrische Energie umwandeln. Dieser Prozess ist leise, geräusch- und emissionsarm sowie äußerst effizient. Brennstoffzellen bieten weitere Mehrwerte, wie zum Beispiel die energetische Verwertung von Nebenprodukten (z.B. Gichtgas), die Produktion von Wasser und Inertgasen (sauerstoff-abgereicherte Luft) und eine modulare Bauweise. Brennstoffzellen besitzen daher das Potential, konventionelle Energiewandler in vielen Bereichen zu ersetzen. Dadurch stehen Brennstoffzellen Anwendungen zur Verfügung, in denen Verbrennungskraftmaschinen nicht einsetzbar sind. Zurzeit befindet sich die Brennstoffzellentechnologie in einem Zustand technischer Marktreife. Jedoch stehen vergleichsweise hohe Investitionskosten einem breiten Markteintritt insbesondere in Branchen mit hohen Stückzahlen, wie beispielsweise der Automobilindustrie, entgegen.

Abschließend werden praktische Anwendungsbeispiele aus dem Umfeld des Bergwerks- und Hüttenwesens genannt. Es wird hier auf die Anwendung von Brennstoffzellen zur energetischen Verwertung von Gichtgas, die Möglichkeiten zur unterbrechungsfreien Stromversorgung sowie den Einsatz in Minenlokomotiven eingegangen.

2 Einleitung

Bereits 1838 wurde das Prinzip der Brennstoffzelle, die elektrochemische Umwandlung von Wasserstoff in elektrische Energie, durch Sir William Grove entdeckt. Zunächst

blieb das Potential dieser Entdeckung jedoch ungenutzt. Erst in den 1960er Jahren erfolgten die ersten produktiven Einsätze von Brennstoffzellen im Rahmen des Apollo-Programms der NASA. In den folgenden Jahrzehnten wurde das Potential der Technologie auch im zivilen Bereich erkannt. Angetrieben von der näher rückenden Energiewende erlebte die Brennstoffzellentechnologie um die Jahrtausendwende einen großen Entwicklungsschub und erreichte eine erste technische Marktreife. Neben zahlreichen Förder- und Demonstrationsprojekten wurden auch erste kommerzielle Produkte entwickelt, die hohen Anklang am Markt fanden. Auch weitere Branchen entdeckten die Brennstoffzellentechnologie als Zukunftsperspektive. Der potentielle Einsatz unter anderem in den Bereichen der Energieversorgung, der Automobilindustrie, der Hausversorgung sowie unzählige Einsatzmöglichkeiten in der portablen Stromversorgung und der Notstromversorgung verhalfen zur breiteren Wahrnehmung in der Öffentlichkeit.

3 Funktionsweise einer Brennstoffzelle

Brennstoffzellen sind elektrochemische Energiewandler, die einen kontinuierlich zugeführten Brennstoff (z.B. Wasserstoff) in elektrische Energie umwandeln. Das Prinzip ähnelt dem einer Batterie, jedoch erfolgt die Brennstoffzufuhr von außen (extern), daher ist die Kapazität prinzipiell unbegrenzt. Die Umwandlung des Brenngases in elektrische Energie erfolgt direkt und ist daher im Vergleich zu Verbrennungskraftmaschinen frei von rotierenden Teilen, was sich in einem verringerten Wartungsaufwand, verminderter Geräusentwicklung und geringeren Vibrationen positiv auswirkt.

Das allgemeine Funktionsprinzip von Brennstoffzellen lässt sich an Hand von zwei durch eine Membran getrennte Gasräume beschreiben. Der eine Gasraum wird von einem brennbaren Gasgemisch durchströmt, der andere Gasraum wird von einem sauerstoffhaltigen Gas, meistens Umgebungsluft, durchströmt. Die Membran ist für die Gase selbst nicht durchlässig, jedoch für die Ionen mindestens eines Gases. Permeiert („wandert“) das Gas durch die Membran, muss es daher Elektronen austauschen – gibt man ihm diese Möglichkeit dadurch, dass man an der Membran beidseitig Leiter anbringt, kann man zwischen diesen eine Spannung abgreifen. Die ausgetauschten Elektronen wandern durch den elektrischen Leiter und stellen den produzierten elektrischen Strom dar. Auf der anderen Seite der Membran, findet der gegenteilige Prozess statt: Die durch die Membran gelangenden Ionen bilden, zusammen mit dem im angrenzenden Gasraum befindlichen Gas, das Verbrennungsprodukt (typischerweise Wasser H_2O , je nach Treibstoff ggf. auch CO_2).

Grundsätzlich gibt es verschiedene Brennstoffzellentypen, deren Unterschied vor allem in der eingesetzten Membran liegt. Die meisten Brennstoffzellentypen verwenden protonenpermeable Membranen. In diesem Fall ist Wasserstoff der Brennstoff der Brennstoffzelle, und Wasserstoffionen (Protonen) permeieren durch die Membran.

Anhand dieser Brennstoffzellenklasse wird im Folgenden das oben angesprochene, allgemeine Prinzip beispielhaft erklärt.

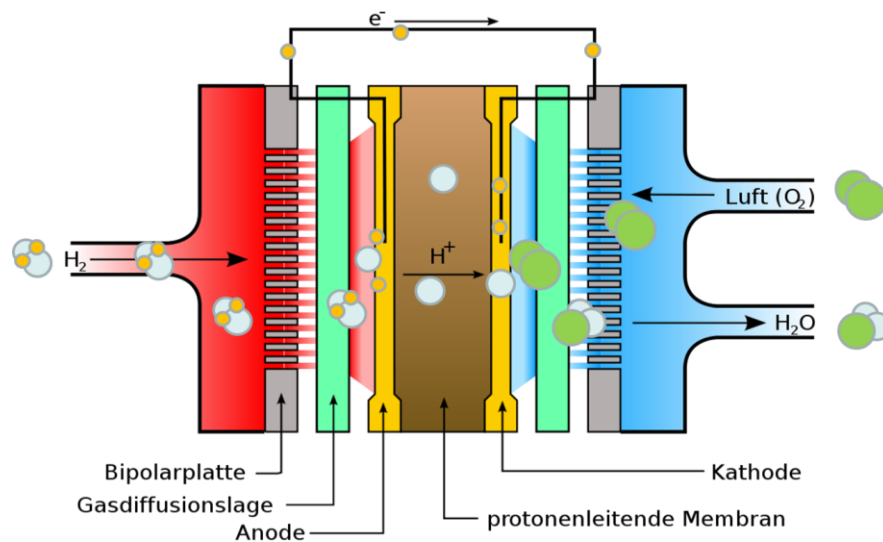
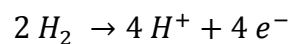
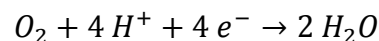


Abb. 3.1: Schematische Zeichnung einer PEM Brennstoffzelle

Abb. 3.1 zeigt die schematische Darstellung einer Polymerelektrolytbrennstoffzelle (PEM-FC), eines heute sehr verbreiteten Brennstoffzellentyps. Dieser Brennstoffzellentyp zeichnet sich durch gute Produktionseigenschaften, eine niedrige Betriebstemperatur und gute dynamische Eigenschaften aus. Das Brenngas muss ein wasserstoffhaltiges Gas sein. Dieses wird dem an die Anode angrenzenden Gasraum zugeführt. Die Wasserstoffatome dissoziieren an der katalytisch aktiven Anode. Die Wasserstoffionen (Protonen) permeieren durch die Membran, während die Elektronen durch elektrische Leiter abgegriffen werden und den nutzbaren Strom des Prozesses darstellen:



Auf der anderen Seite der Membran befindet sich die Kathode, deren Gasraum von einem sauerstoffhaltigen Gasgemisch, in der Regel Umgebungsluft, durchströmt wird. Die Sauerstoffatome dissoziieren an der Kathode und verbinden sich mit den durch die Membran strömenden Wasserstoffionen und den über die elektrisch leitende Kathode zugeführten Elektronen zu Wassermolekülen:



Insgesamt gibt sich also eine Verbrennung von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser, wobei Reduktion und Oxidation räumlich getrennt voneinander ablaufen. Der Umsatz an Brenngas ist stets durch die abgegriffene Strommenge begrenzt, man spricht daher von kontrollierter Verbrennung.

Das beschriebene Prinzip entspricht der Reaktion in einer einzelnen (Brennstoff-) Zelle. Um eine höhere Ausgangsspannung zu erreichen, werden in Brennstoffzellensystemen in der Regel mehrere Zellen seriell verschaltet. Diese so genannten Brennstoffzellenstacks bilden zusammen mit Peripheriekomponenten (Lüfter, Sensoren, Ventile) ein Brennstoffzellensystem, eine modulare Einheit, die alle zur Stromerzeugung benötigten Komponenten beinhaltet.

Zusätzlich zur hier dargestellten PEM-Brennstoffzelle existieren noch weitere Brennstoffzellentypen, deren Unterschiede insbesondere in den verwendeten Elektrolyten, der Betriebstemperatur sowie den verwendbaren Brenngasen / Treibstoffen liegen. So kann die Betriebstemperatur zwischen 60°C und bis über 800°C liegen. Verwendbare Gase können Wasserstoff und wasserstoffhaltige Gasgemische sein, aber auch Kohlenstoffmonoxid (CO), Methangas (CH₄), Methanol (CH₃OH) oder ähnliche sein. Mittels vorgeschalteten Reformierungsreaktoren können diese Gasgemische aus nahezu allen kohlenstoff- und wasserstoffhaltigen Ausgangsstoffen bereitgestellt werden. Diese Brennstoffflexibilität ist ein weiterer Vorzug der Brennstoffzellentechnologie.

4 Chancen und Risiken

Der Markt für Brennstoffzellen besitzt ein gigantisches Potential. Die Brennstoffzellentechnologie ist in der Lage, eine Vielzahl der herkömmlichen Energiewandler (Verbrennungsmotoren, Gasturbinen, Dampfkraftprozesse, Batterien etc.) zu ersetzen. Weiterhin ergeben sich neue Anwendungsfelder, in denen bisherige Technologien nicht einsetzbar sind – beispielweise aufgrund Ihres Sauerstoffbedarfs, der produzierten Abgase oder ihrer Baugröße. Viele Studien sehen die Brennstoffzellentechnologie derzeit vor Ihrem Durchbruch zum Massenmarkt. Die Produkte sind technisch ausgereift für die Massenproduktion. Große Märkte sind etwa der Fahrzeugbau, die Haus- und Industrierversorgung mit Strom und Wärme und die netzautarke oder portable Stromversorgung. Als derzeitiges Markteintrittshemmnis werden häufig der Preis der Komponenten sowie die erst im Aufbau befindliche Infrastruktur für Wasserstoff angesehen. Diese Probleme sind konventionelle Markteintrittsbarrieren, die durch größere Investitionen überwunden werden können. Diese Investitionen können staatliche Subventionen und Förderungen sein, jedoch auch durch first-mover und Pioniere erfolgen, die eine Investition in Kauf nehmen, um sich als Erste an einem aufstrebenden Markt zu beteiligen. Da die kommerzielle Nutzung von Brennstoffzellen in einigen Marktsegmenten bereits erfolgreich ist, scheint ein guter Zeitpunkt erreicht, um den Einsatz der Technologie auch in anderen Marktsegmenten zu forcieren.

5 Anwendungen und Vorteile

Stromerzeugung: Die Stromwandlung von Wasserstoff in Brennstoffzellen erfolgt mit einem hohen Wirkungsgrad. Wasserstoff lässt sich mittels Wasserelektrolyse unbegrenzt herstellen und unbegrenzt lagern. Die Bereitstellung von Strom erfolgt kontrolliert und nach Bedarf. Brennstoffzellensysteme lassen sich in variablen Baugrößen realisieren, haben keine oder vernachlässigbare Geräusch- und Abgasemissionen und arbeiten vibrationsfrei. Hierdurch ergeben sich im Bereich der stationären, portablen und mobilen Stromerzeugung viele Vorteile und neue Anwendungsfelder.

Wärme / Kälte: Als Nebenprodukt der Stromerzeugung fällt eine gewisse Menge an Wärmeenergie an. Das Abwärmenniveau ist durch die gleichbleibende Betriebstemperatur konstant. Je nach Wahl des Brennstoffzellentyps kann das Temperaturniveau von 60°C bis über 800°C betragen. Die Wärmeenergie kann als Haus- oder Prozesswärme verwendet werden oder mittels einer Kälteabsorptionsmaschine zur Kühlung verwendet werden.

Energetische Verwertung: Brennstoffzellen bieten aufgrund Ihrer Brennstoffflexibilität die Möglichkeit, brennbare Abfallprodukte effizient in Strom umzuwandeln. Auch niederkalorische Gase können verwendet werden.

Kosten reduzieren: Aufgrund des geringen Wartungsaufwands, der hohen Energieeffizienz und der einfachen Abgasbehandlung bieten Brennstoffzellen ein hohes Potential für Kosteneinsparungen gegenüber konventionelle Energiewandlern. Außerdem lassen sich durch neuartige Einsatzbereiche teilweise erhebliche Opportunitätskosten einsparen und neue Geschäftsfelder erschließen. Derzeit ist insbesondere auch die Möglichkeit interessant, staatliche Förderung für Brennstoffzellenprojekte zu erhalten.

Betrieb in (teil-)geschlossenen Räumen: Aufgrund des vergleichsweise geringen Sauerstoffbedarfs und dem Entfall von schädlichen Abgasen lassen sich Brennstoffzellen auch in Gebieten einsetzen, in denen die Sauerstoffzuleitung und die Abgasableitung nicht oder nur begrenzt möglich ist – beispielsweise unter Tage, in Kühlräumen oder Lagerhallen. Wird ein Brennstoffzellensystem sogar mit Sauerstoffflaschen versehen, benötigt es keinen Luftsauerstoff mehr – und produziert ausschließlich Wasser als Produkt / Abgas.

Schutzgas / Schutzatmosphäre: Die Abgase der Brennstoffzelle sind nicht nur ungiftig und zumeist frei von klimaaktiven Gasen, sondern bieten zusätzliche Mehrwerte: Bei Betrieb mit Umgebungsluft ergibt sich durch den Sauerstoffverbrauch ein stickstoffreiches Produktgas, das als Schutzatmosphäre zum Beispiel zum Oxidations- und Brandschutz verwendet werden kann. Weiterhin lässt sich Wasser gewinnen – was

insbesondere für mobile Anwendungen (z.B. Kreuzfahrtschiffe, Flugzeuge) interessant sein kann.

Leistungsbereich: Ein weiterer Marktvorteil der Brennstoffzellentechnologie ist die Skalierbarkeit der Technologie, die sich durch den modularen Aufbau ergibt. Brennstoffzellen lassen sich in allen Leistungsklassen einsetzen – von unter 1 W bis über 1 MW.

6 Anwendungsbeispiel – Unterbrechungsfreie Stromversorgung

Brennstoffzellensysteme bieten gegenüber den herkömmlichen Energielieferanten für USV-Systeme, Generatoren und Batterien, einige Vorteile. Sie erlauben eine unbeschränkte Überbrückungsdauer, da sie laufend mit Wasserstoff versorgt werden können. Im Standby wird kein Wasserstoff verbraucht und es existiert keine Selbstentladung wie bei Batterien. Im Bedarfsfall springt das System schnell an und erzeugt den angeforderten Strom. Der Leistungsbereich lässt sich durch modulare Bauweise exakt auf die Anforderungen abstimmen. Die Lebensdauer ist deutlich höher, wobei der Wartungsaufwand geringer ist – beides wirkt sich positiv auf die Gesamtbetriebskosten (TCO) aus. Hinzu kommt, dass sich selbst strengste Umweltvorschriften problemlos einhalten lassen, da die Systeme frei von Abgasen, vibrationsarm und leise sind. Im System sind keine Säuren oder umweltschädlichen Stoffe verbaut, wie es bei Batterien häufig der Fall ist.



Abb. 6.1: Beispiel für ein Brennstoffzellensystem zur Notstromversorgung (Quelle: Willida, UTC; CC-SA-BY)

7 Anwendungsbeispiel – Stromerzeugung aus Gichtgas

Anhand einer Brennstoffzelle zur energetischen Nutzung von Gichtgas soll das Potential der energetischen Umwandlung von Nebenprodukten verschiedener Herkunft in Brennstoffzellen aufgezeigt werden. Angenommen wird folgender Gichtgasstrom aus einem Hochofen:

- Volumenstrom: 500.000 m³/h
- Temperatur: 200°C
- Zusammensetzung: 30% CO₂, 30% CO, 53% N₂, 2% H₂

Von diesem Gichtgasstrom soll beispielhaft 1% abgezweigt werden, und einem Brennstoffzellensystem zugeführt werden. Jegliche andere Aufteilung ist selbstverständlich möglich. Bereits mit 1% des Volumenstroms können mittels der Brennstoffzelle beispielsweise die folgenden Energiemengen erzeugt werden:

- Elektrische Leistung: 1,5 MW
- Wärmeleistung: 1 MW

8 Anwendungsbeispiel – Minen-Lokomotive

In Minen-Lokomotiven für den Einsatz unter Tage können Brennstoffzellensysteme einige ihrer Vorteile gegenüber anderen Antriebskonzepten ausspielen – beispielsweise ihren geringen Sauerstoffbedarf, ihre hohe Effizienz und die unschädlichen Abgase. Die Zusammensetzung und Temperatur der Abgase erlauben einen problemlosen Einsatz auch in nicht optimal gelüfteten Einsatzgebieten, ohne ein Risiko (z.B. durch CO-Belastung) für Menschen und Güter darzustellen. Außerdem ist die Verfügbarkeit einer Brennstoffzellen-Lok deutlich höher eines vergleichbaren Batteriefahrzeugs. Die Betankung des Fahrzeugs kann unter Tage erfolgen und geschieht in wenigen Minuten.

In einigen Minen wurden diese Lokomotiven bereits erprobt. Ein aktuelles Beispiel ist der in Johannesburg ansässige Anglo American Platinum Konzern. Seit diesem Jahr werden 5 Minen-Lokomotiven (10 Tonnen) mit Brennstoffzellenantrieb in einer Mine eingesetzt. Der Konzern sieht insbesondere in der hohen Energiespeicherdichte und der schnellen Betankungszeit große Vorteile und ist vom Durchbruch der Technologie überzeugt.



Abb. 8.1: Einweihung einer 10t-Brennstoffzellen-Lokomotive durch Anglo American Platinum
(Quelle: Vehicle Projects, Inc.)

Hinweis: Dieses Manuskript mit farbigen Abbildungen sowie die Folien der gehaltenen Präsentation können sie auf unserer Website herunterladen:

<http://www.emcel.com/akida2012>