

# Biogas in PEM-Brennstoffzellen

*Die Nutzung von Biogas in Brennstoffzellen kombiniert vorteilhaft eine kostengünstige regenerative Energiequelle mit einer Technologie, die hohe Wirkungsgrade und Umweltverträglichkeit verspricht. Erstmals wird die Eignung von Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellensystemen (PEMFC) zur Verstromung von Biogas experimentell nachgewiesen. Messungen an einer 650 W<sub>el</sub>-Laboranlage zeigen im Betrieb mit einer Leistungsdichte von 0,14 W/cm<sup>2</sup> einen Zellwirkungsgrad von 58 %. Mit einem Wirkungsgrad von etwa 38 % erweist sich der verwendete Dampfreformer als kritische Komponente. Eine Modellkalkulation auf Basis eines optimierten PEM-Brennstoffzellensystems lässt elektrische Systemwirkungsgrade von über 40 % erwarten.*

Dr.-Ing. Volkhard Scholz und Dipl.-Ing. (FH) Ralf Schmersahl sind wissenschaftliche Mitarbeiter im Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB), Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam (Direktor: Prof. Dr.-Ing. J. Zanke); e-mail: [vscholz@atb-potsdam.de](mailto:vscholz@atb-potsdam.de)  
Dr.-Ing. J. Arnold und Dipl.-Ing. F. Beckmann von der Schalt- und Regeltechnik GmbH Berlin sowie PD Dr. B. Linke und Dipl.-Ing. J. Mumme vom ATB Potsdam wird für die Unterstützung gedankt.  
**Referierter Beitrag der LANDTECHNIK, die Langfassung finden Sie unter LANDTECHNIK-NET.com.**

## Schlüsselwörter

Brennstoffzelle, PEM, Biogas, Dampfreformer

## Keywords

Fuel cell, PEM, biogas, steam reformer

## Literatur

Literaturhinweise sind unter LT 05104 über Internet <http://www.landwirtschaftsverlag.com/landtech/lo-cal/fliteratur.htm> abrufbar.

Mit der Brennstoffzelle befindet sich eine Technologie in Entwicklung, die eine viel versprechende Alternative zur konventionellen Nutzung gasförmiger Kohlenwasserstoffe in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen bietet. Brennstoffzellen verursachen deutlich geringere Lärm- und Schadstoffemissionen und erreichen höhere elektrische Wirkungsgrade, insbesondere im Teillastbetrieb. Für den stationären Betrieb wird vorwiegend Erdgas als Brennstoff verwendet. Da Biogas ähnliche Eigenschaften wie Erdgas hat, bietet sich dessen Verwendung in Brennstoffzellen an, zumal es mit Abstand der kostengünstigste erneuerbare Energieträger hierfür ist. Allerdings hat Biogas eine geringere Energiedichte, einen deutlich höheren Kohlendioxidgehalt und verschiedene schädliche Begleitstoffe, wie Schwefelverbindungen und Ammoniak [1].

Von den insgesamt sechs verschiedenen Brennstoffzellentypen kommen für Biogas vorzugsweise die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC), die Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC), die Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC) und die Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle (PEMFC) in Betracht [2, 3]. Die PAFC ist bereits kommerziell verfügbar und wird in mehreren 200 kW<sub>el</sub>-Pilotanlagen zur Verstromung von Klärgas eingesetzt, wobei die Zukunftsaussichten unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten allerdings ungünstig beurteilt werden [4, 5, 6]. Die Eignung der MCFC und der SOFC für Bio- und Klärgas konnte in den letzten drei Jahren mit mehr oder weniger Erfolg experimentell nachgewiesen werden [7, 8]. Für die PEM-Brennstoffzelle steht dieser Nachweis trotz intensiver Bemühungen noch aus.

## Material und Methoden

Die Gasversorgung des Brennstoffzellenversuchsstandes erfolgt mit Biogas aus zwei Fermentern mit Feststoffvergärung (Stallmist und Maissilage). Die Variation des Methangehaltes wird durch Zugabe technischer Gase (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>) realisiert.

Die Versuchsanlage besteht aus dem Reformiermodul mit integrierter Entschwefelung und dem Brennstoffzellenmodul mit elektronischer Last. Letzteres verfügt über zwei unabhängige Brennstoffzellenstacks (Zellstapel). Der so genannte Teststack mit vier Zellen (150 W<sub>el</sub>) ist für Untersuchungen zum Schadgas einfluss vorgesehen, der Laststack mit 14 Zellen (650 W<sub>el</sub>) dient zur Ermittlung des Betriebsverhaltens und der energetischen Kenngrößen. Die Brennstoffaufbereitung erfolgt in einem in den USA entwickelten Dampfreformer mit zweistufigem Shiftreaktor und selektiver Oxidation. Der Apparat integriert die Gaskompression, die Entschwefelung und die Dampferzeugung und verfügt über eine interne Wärmerückgewinnung (Bild 1).

Die Gasesstechnik besteht aus einem Prozessgas-Analysesystem und einem Trommelgaszähler. Die Analyse der Prozessgase erfolgt über drei Probenports. Damit wird die Zusammensetzung von Biogas, Reformat und Anodenabgas bestimmt und aufgezeichnet (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, CO). Die Kontrolle der Sauerstoffkonzentration (O<sub>2</sub>) und der Schwefelwasserstoff-Belastung (H<sub>2</sub>S) er-



Bild 1: Brennstoffzellenversuchsstand des ATB

Fig. 1: Fuel cell test stand of the ATB

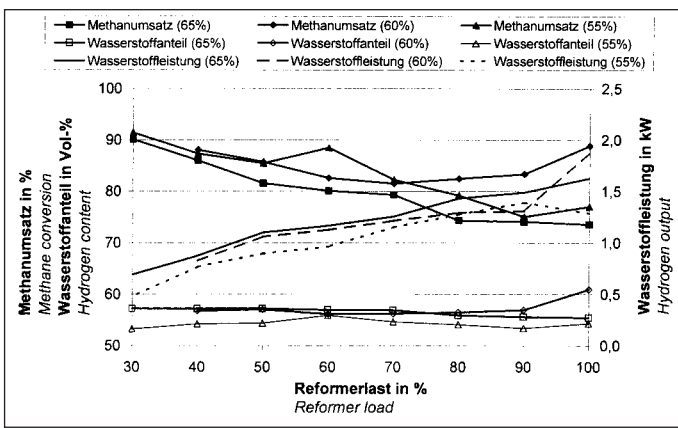


Bild 2: Methanumsatz des Reformers sowie Wasserstoffanteil und -leistung in Abhängigkeit von der Last und dem Methangehalt des Biogases

Fig. 2: Conversion methane in the reformer and hydrogen content and capacity versus load and methane content of biogas

folgt mit einem handelsüblichen Deponie-gasmonitor.

### Reformerleistung

Im Unterschied zu den Hochtemperaturbrennstoffzellen (MCFC und SOFC) erfordert die PEM-Brennstoffzelle ein weitgehend kohlenmonoxidfreies Brenngas. Um den bei der Reformierung gebildeten CO-Anteil auf unter 10 ppm zu senken, wird das Reformat mittels selektiver Oxidation gereinigt (Zugabe von Luftsauerstoff). Ein völlig kohlenmonoxidfreies Gas wird bei einer Luftmenge von über 5 % des Reformatvolumenstromes erreicht. Unter 2,5 % treten stochastisch CO-Maxima > 250 ppm auf, deren Ursache unklar ist [9].

Zweck der Reformierung ist die Erzeugung von Wasserstoff. Voraussetzung für eine hohe Wasserstoffleistung (an Wasserstoff gebundener Energiestrom) ist ein hoher Methanumsatz. Die diesbezüglichen Messergebnisse zeigen einen deutlichen Rückgang der Methanumsatzrate mit steigender Reformerlast, was auf eine unzureichende Katalysatoraktivität hinweist. In Abhängigkeit vom Methangehalt des Biogases sinkt die Umsatzrate von über 90 % bei Teillast auf unter 80 % bei Volllast. Die Gründe für dieses Verhalten werden in der relativ geringen Reformierungstemperatur von 700 bis 740 °C vermutet (Bild 2).

Der Wasserstoffgehalt und die Wasserstoffleistung des Reformats werden geringfügig vom Methangehalt des Biogases bestimmt. Eine Erhöhung des CH<sub>4</sub>-Gehalts von 55 auf 65 % bewirkt eine mittlere Zunahme des H<sub>2</sub>-Gehaltes von 53 auf 56 %.

### Stromdichte-Spannungs-Kennlinien

Das Betriebsverhalten von Brennstoffzellen wird durch Stromdichte-Spannungs-Kennlinien gekennzeichnet. Mit zunehmender Stromdichte sind eine abnehmende Spannung und damit ein sinkender Zellwirkungsgrad zu verzeichnen. Diese Charakteristik

führt zu Schwierigkeiten bei der Festlegung einer Nennleistung, da ein Zielkonflikt zwischen hoher Leistung und Wirkungsgrad besteht. Die Kennlinienverläufe des Gesamtstacks für unterschiedliche Rohgaszusammensetzung (55 % bis 65 % CH<sub>4</sub>) zeigen, dass bei Stromdichten bis zu 0,25 A/cm<sup>2</sup> die Spannungen kaum voneinander abweichen.

Die Kennlinien der Einzelzellen weisen demgegenüber deutliche Unterschiede auf. Ein Vergleich der Einzelzellspannungen der leistungsfähigsten Zelle 7 und der schwächsten Zelle 2 zeigt eine mit zunehmender Leistung wachsende Differenz, die bei einer Stromdichte von 0,35 A/cm<sup>2</sup> mehr als 100 mV beträgt, was einem Wirkungsgradunterschied von über acht Prozentpunkten entspricht (Bild 3).

### Wirkungsgrad

Zur energetischen Bewertung der Versuchsanlage wird eine Leistungsbilanz für verschiedene Betriebspunkte erstellt. Die Messungen ergeben einen elektrischen Bruttosystemwirkungsgrad  $\eta_{\text{Sys}}$  von 12 % bei einer Stromdichte von 0,29 A/cm<sup>2</sup> und einem Brennstoffnutzungsgrad  $\mu_f$  von 70 %. Im Teillastbereich beträgt der Wirkungsgrad  $\eta_{\text{Sys}} = 11 %$  bei  $\mu_f = 62 %$ .

Die Ursache für den niedrigen Gesamtwirkungsgrad  $\eta_{\text{Sys}}$  ist neben dem mit weniger als 38 % Wirkungsgrad sehr ineffizienten Reformer auch in der Verfahrensgestaltung zu suchen, da mit dem Anodenabgas ein großer Teil der chemisch gebundenen Energie das System ungenutzt verlässt. Der Bedarf an elektrischer Hilfsenergie ist mit 3 bis 5 % der Nutzleistung zu veranschlagen [10, 11].

Auf Grundlage der Versuchsergebnisse und belastbarer Literaturwerte wird eine Abschätzung des erreichbaren Bruttosystemwirkungsgrads  $\eta_{\text{Sys}}$  für die Verstromung von Biogas mit PEM-Brennstoffzellen vorgenommen [9]. Dabei wird eine Verfahrensführung mit Nutzung des Anodenabgases zur Bereitstellung der Reformierungswärme

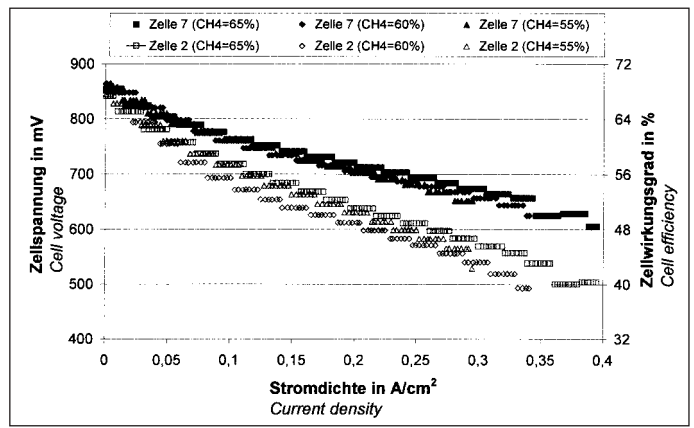


Bild 3: Stromdichte-Spannungs-Kennlinien ausgewählter Einzelzellen

Fig. 3: Characteristic curves of current density and voltage of selected single cells

betrachtet, wie sie an der Bergakademie TU Freiberg entwickelt und erprobt wird [12, 13]. Der Modellrechnung liegt die Annahme eines optimierten Systems zugrunde (Brennstoffnutzungsgrad 71 % und 83 %; Reformerwirkungsgrad 68 % nach Herstellerangaben für den verwendeten Laborreformer und 80 % nach Literaturangaben; Methanumsatzrate 97 %; Wechselrichterwirkungsgrad 95 %). Im Ergebnis wird für die günstigste Betriebsvariante ein elektrischer Systemwirkungsgrad von 39 % bis 42 % kalkuliert. Verbesserungen, wie sie durch Entwicklungssprünge der noch jungen Brennstoffzellentechnologie, vor allem im Bereich der Membranentwicklung, zu erwarten sind, sind hierbei nicht berücksichtigt.

### Schlussfolgerungen

Die Eignung der PEM-Brennstoffzellentechnologie zur Verstromung von Biogas wird nachgewiesen. Wie Messungen an einer noch nicht optimierten 600 W<sub>el</sub>-Versuchsanlage zeigen, werden bei einer Stromdichte von 0,2 A/cm<sup>2</sup> Zellwirkungsgrade von bis zu 58 % erzielt. Dieser Wert wird jedoch nur von einzelnen Zellen erreicht. Die Gründe hierfür werden in einer ungleichmäßigen Durchströmung und Befeuchtung der Zellen vermutet.

Als kritische Systemkomponente erweist sich der Dampfreaktor mit einem thermischen Wirkungsgrad von nur etwa 38 % und einem Methanumsatz von 75 bis 90 %. Eine Modellbetrachtung auf der Basis der stärksten Einzelzelle ergibt für ein optimiertes System mit Nutzung des Anodenabgases zur Bereitstellung der Reformierungswärme einen elektrischen Bruttosystemwirkungsgrad von über 40 % bei einer Leistungsdichte der Brennstoffzelle von 0,14 W/cm<sup>2</sup>. Zur Erreichung dieses Wirkungsgrades ist allerdings noch ein erheblicher Entwicklungsaufwand erforderlich.