

Biogas in PEM-Brennstoffzellen

Volkhard Scholz und Ralf Schmersahl

Abteilung Technik der Aufbereitung, Lagerung und Konservierung, Institut für Agrartechnik, Potsdam-Bornim

Die Nutzung von Biogas in Brennstoffzellen ist eine vorteilhafte Kombination einer kostengünstigen regenerativen Energiequelle mit einer Technologie, die hohe Wirkungsgrade und hohe Umweltverträglichkeit verspricht. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wird erstmalig die Eignung von Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellensystemen (PEMFC) zur Verstromung von Biogas experimentell nachgewiesen. Dieser Brennstoffzellentyp zeichnet sich durch niedrige Arbeitstemperaturen, einen modularen Systemaufbau und geringe Kosten aus. Messungen an einer 650 W_{el}-Laboranlage zeigen im Betrieb mit einer niedrigen Leistungsdichte von 0,14 W/cm² einen Zellwirkungsgrad von 58 %. Mit einem Wirkungsgrad von etwa 38 % erweist sich der verwendete Dampfreformer als kritische Komponente. Modellrechnungen auf Basis eines optimierten PEM-Brennstoffzellensystems zeigen, dass elektrische Systemwirkungsgrade von über 40 % erreicht werden können.

Schlüsselwörter

Brennstoffzelle, PEM, Biogas, Dampfreformer

Problem und Zielstellung

Die Brennstoffzellentechnologie bietet eine viel versprechende Alternative zur konventionellen elektrodynamischen Nutzung gasförmiger Kohlenwasserstoffe in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen. Brennstoffzellen verursachen deutlich geringere Lärm- und Schadstoffemissionen und erreichen höhere elektrische Wirkungsgrade, insbesondere im Teillastbetrieb. Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen (PEMFC) weisen eine vergleichsweise hohe Leistungsdichte auf und stellen durch die niedrigen Arbeitstemperaturen geringe Materialansprüche, was niedrige Kosten ermöglicht.

PEM-Brennstoffzellensysteme werden im stationären Bereich für den Brennstoff Erdgas entwickelt. Da dieser Brennstoffzellentyp nur Wasserstoff verwerten kann, ist die Reformierung des Erdgases zu einem wasserstoffreichen Gas (Reformat) erforderlich. Biogas hat ähnliche Eigenschaften wie Erdgas und ist mit Abstand der kostengünstigste erneuerbare Energieträger. Allerdings hat Biogas eine geringere Energiedichte, einen deutlich höheren Kohlen-

dioxidgehalt und weist so genannte Brennstoffzellengifte auf, wie Schwefelverbindungen und Ammoniak [1].

Das Ziel ist die Entwicklung und Erprobung eines PEM-Brennstoffzellensystems als eine effiziente, kostengünstige und betriebssichere Technologie zur Verstromung von Biogas. Im Vordergrund stehen zunächst der experimentelle Eignungsnachweis und die Ermittlung der für einen optimalen Betrieb er-

forderlichen Systemparameter. Zur Abschätzung des erreichbaren elektrischen Wirkungsgrades erfolgt die Berechnung der wichtigsten energetischen Kenngrößen für ein optimiertes System.

Stand der Forschung

Grundlagen

Im Jahr 1839 wurde der Brennstoffzelleneffekt von Sir William Robert Grove erstmals experimentell nachgewiesen [2]. Das Prinzip der Stromerzeugung mit Brennstoffzellen ist die elektrochemische Energiewandlung von Brenngasen in einer Energiezelle, einem der Batterie vergleichbaren galvanischen Element. Jede Zelle enthält zwei Elektroden. An der Anode wird das Brenngas zugeführt und an der Kathode der (Luft-) Sauerstoff. Die Elektroden sind durch eine Elektrolytmembran räumlich getrennt. Als Brenngas kommt vorwiegend Wasserstoff zum Einsatz, der in der so genannten Brennstoffzellenreaktion mit Luftsauerstoff zu Wasser oxidiert (Bild 1).

Mitte des vergangenen Jahrhunderts begann in verstärktem Maße die technische Nutzung des Brennstoffzellenprinzips.

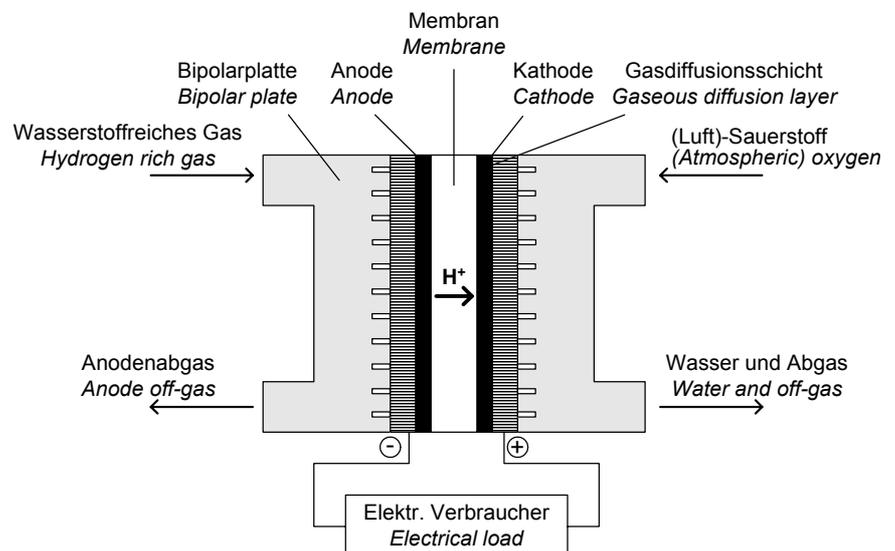


Bild 1: Grundprinzip der Brennstoffzelle

Ende der 50er Jahre entwickelte z. B. Allis-Chalmers einen 20 kW Brennstoffzellen-Traktor, später folgte der Einsatz in Unterseebooten und Raumschiffen [3]. Heute befinden sich neben den bereits seit Mitte der 90er Jahre kommerziell verfügbaren Phosphorsäure-Brennstoffzellen (PAFC) verschiedene Brennstoffzellentypen zur dezentralen Kraft-Wärme-Kopplung im Feldversuchsstadium. Eine breite Markteinführung der Hausenergiesysteme auf Brennstoffzellenbasis wird gegen Ende dieses Jahrzehntes erwartet.

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. Die Vorteile der beiden erstgenannten Typen, den Hochtemperaturbrennstoffzellen, bestehen in höheren Systemwirkungsgraden in Folge der thermischen Integration der Reformierung. Die PAFC ist als bisher einziges Brennstoffzellensystem zum Einsatz in Blockheizkraftwerken – auch für Klärgas – kommerziell verfügbar, wobei die Zukunftschancen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ungünstig beurteilt werden [4, 5]. Die Eignung der MCFC und der SOFC für Bio- und Klärgas konnte in den vergangenen drei Jahren mit mehr oder weniger Erfolg experimentell nachgewiesen werden [6, 7]. Für die PEM-Brennstoffzelle steht dieser Nachweis trotz intensiver Bemühungen noch aus [8, 9].

Das Einsatzgebiet der Niedertemperaturbrennstoffzellen PEMFC und PAFC wird in Blockheizkraftwerken (BHKW) im Leistungsbereich bis 250 kW_{el} gesehen, wobei die PEM-Brennstoffzelle erhebliche Kostenvorteile verspricht [4]. Die Anwendungsgebiete der Hochtemperaturzellen liegen in erster Linie im Bereich der industriellen Kraft-Wärme-Kopplung und der dezentralen Stromerzeugung ab 200 kW_{el}. Die Einteilung und Benennung der verschiedenen Brennstoffzellentypen erfolgt in der Regel nach der Art des verwendeten Elektrolyten (**Tabelle 1**).

Tabelle 1: Wesentliche Eigenschaften praxisrelevanter Brennstoffzellentypen [4, 10, 11, 12, 13, 14]

	PEMFC Polymer-Elektrolyt-Membran-BZ	PAFC Phosphorsäure-BZ	MCFC Schmelzkarbonat-BZ	SOFC Oxidkeramische-BZ
Temperatur in °C	60 - 90	160 - 220	600 - 660	800 - 1000
Mobiles Ion	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Brenngas	H ₂	H ₂	H ₂ , CO	H ₂ , CO
Reformierung	extern	extern	extern, intern	extern, intern
Leistung in kW _{el}	0,1 - 250	50 - 10.000	200 - 100.000	1 - 100.000
El. Wirkungsgrad in %	30 - 50	40 - 45	53 - 57	30 - 57
Brennstoffzellengifte	S-Verbindungen, Halogene, NH ₃ , Siloxane, CO	S-Verbindungen, Halogene, NH ₃ , Siloxane, CO	S-Verbindungen, Halogene, NH ₃ , Siloxane	S-Verbindungen, Halogene, NH ₃ , Siloxane
Kostenziel in €/kW _{el}	500 - 1500	1000-1250	1250 - 1500	1000 - 1200
Entw.-Stadium	Feldversuche	Kommerziell	Feldversuche	Feldversuche

Biogasaufbereitung und Wasserstofferzeugung

Derzeit befinden sich verschiedene Brennstoffzellensysteme für die dezentrale Energieversorgung auf Erdgasbasis in Entwicklung. Der Einsatz von Biogas als Brennstoff erfordert die technische Anpassung und Optimierung der Systeme, denn Biogas weist einige Unterschiede zu Erdgas auf (**Tabelle 2**). Der Methananteil und damit die Energiedichte ist geringerer und variabel. Der hohe Gehalt an katalysatorschädigenden Begleitgasen, vor allem Schwefelverbindungen, erfordert eine zusätzliche Gasreinigung.

Die Nutzung von Erdgas und Biogas in Brennstoffzellen erfordert die Umwandlung des zugeführten Methans. Stand der Technik ist die Dampfreformierung, wie sie großtechnisch in der Petrochemie zur Gewinnung von Synthesegas zur Anwendung kommt. Bei der Dampfreformierung erfolgt eine katalytische Umsetzung des Methans mit Wasserdampf zu Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid.

Tabelle 2: Zusammensetzung und Heizwert von Erdgas und Biogas

	Erdgas	Biogas
CH ₄ in %	84-98	50-75
CO ₂ in %	0,1-1,5	25-50
N ₂ in %	0,8 - 9,9	0-10
O ₂ in %	-	0 - 2
C _n H _{2n+2} in %	0,9-8,3	-
H _u in kWh/Nm ³	9,2-10,6	5-7,5

Die Reformierungstemperaturen liegen bei 650-800 °C, so dass Hochtemperaturbrennstoffzellen die Wärmeentwicklung der Brennstoffzelle zur Bereitstellung der Reformierungsenergie nutzen können. Niedertemperaturbrennstoffzellen erfordern eine externe Reformierung. Neben der eigentlichen Dampfreformierung werden die Prozessschritte Entschwefelung, Kohlenmonoxidkonvertierung (CO-Shift) und die Kohlenmonoxideliminierung in das Reformiermodul integriert. Die thermochemische Energiewandlung der zugeführten Wärme erhöht dabei die chemisch gebundene Energie des Prozessgases um etwa 35 % [15]. Der thermische Reformierwirkungsgrad η_{Ref} kann über 80 % im Vollastbetrieb erreichen und sinkt bei Teillast [16]. Dem Reformierungsreaktor folgt ein 1- oder 2-stufig ausgeführter CO-Shift. Anschließend weist das Erdgasreformat einen auf das trockene Gas bezogenen Wasserstoffanteil von 75-80 % auf. Der Kohlenmonoxidanteil beträgt weniger als 1 % [16].

Um den Kohlenmonoxidgehalt auf unter 10 ppm zu reduzieren, erfordern PEM-Brennstoffzellen aufgrund der niedrigen Arbeitstemperatur von 60-90 °C eine zusätzliche Gasfeinreinigung [15]. Dies geschieht durch die katalytisch vermittelte selektive Oxidation (Selox) des Kohlenmonoxids mit zugeführtem Luftsauerstoff.

PEM-Brennstoffzellen

Die Entwicklungsaktivitäten zur PEM-Technologie konzentrieren sich auf drei

Anwendungsgebiete:

1. Mobiler Einsatz als Fahrzeugantrieb
2. Stationärer Einsatz zur dezentralen Energieversorgung mit Kraft-Wärme-Kopplung
3. Portabler Einsatz für Kleingeräte

Für den portablen und mobilen Einsatz wird reiner Wasserstoff als Brenngas favorisiert. Die Vorzüge liegen in einem einfachen Systemaufbau (kein Anodenabgas) und in der hohen Leistungsdichte von mehr als 1 W_{el} pro cm^2 Zellfläche bei einem Wirkungsgrad bis 50 % [17]. Die Leistungsdichten und Wirkungsgrade der Brennstoffzellen zur stationären Energieerzeugung aus Erdgas sind geringer als die der Wasserstoffzellen.

Das Herz der Systeme ist der Brennstoffzellenstapel (Stack). Diese funktionelle Einheit besteht aus mehreren, gestapelten Einzelzellen. Dabei werden die Membran-Elektroden-Einheiten (MEA) durch die medienführenden Bipolarplatten getrennt. Der Stack ist von peripheren Systemkomponenten zur Medienversorgung, Kühlung, Prozesssteuerung und Konditionierung des erzeugten Gleichstroms umgeben.

Erste Erfahrungen mit erdgasbetriebenen PEM-Brennstoffzellensystemen im Feldversuchs- und Demonstrationsstadium zeigen elektrische Nettosystemwirkungsgrade von 25 % bei 5 kW_{el} bis 35 % bei $200 \text{ kW}_{\text{el}}$ [18, 19]. Für eine Serienfertigung werden nach verschiedenen Angaben Wirkungsgrade von 30-42 % bei Standzeiten des Brennstoffzellenstacks von 40.000 h erwartet. Eine an der Universität Gesamthochschule Essen durchgeführte Optimierung einer Anlage mit 1 kW_{el} lieferte einen maximalen elektrischen Systemwirkungsgrad von 42 % [16].

Einsatz von Biogas in Brennstoffzellen

Neben dem vom ATB verfolgten Ansatz sind in Europa Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zu drei unterschiedlichen Biogas-Brennstoffzellensystemen bekannt. Von der Firma Schmack Biogas A.G. durchgeführte Untersuchungen haben die Anpassung der Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC) in Gestalt des Hot Module der Firma MTU an Biogas zum Ziel [6]. Schwerpunkt des Projekts ist die Entwicklung eines leistungsfähigen, preis-

werten Entschwefelungsverfahrens. Ein an der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft angesiedeltes Projekt verfolgt die Dampfreformierung von Biogas mit anschließender CO_2 -Abtrennung. Der gewonnene Wasserstoff soll in einer Wasserstoff-PEMFC verstromt werden. In der Schweiz erprobt das Unternehmen Sulzer Hexis AG den Biogasbetrieb eines angepassten Festoxid-Brennstoffzellensystems (SOFC) zur Hausenergieversorgung. Neben dem Systemverhalten stehen auch hier Untersuchungen zur Gasreinigung im Vordergrund [7].

Die genannten Forschungsvorhaben zeichnen sich dadurch aus, dass die Anpassung der Erdgastechnologie an Biogas durch eine modifizierte Gasaufbereitung angestrebt wird. Im Vordergrund steht dabei die Entfernung der im Biogas enthaltenen katalysatorschädigenden Begleitgase, den Brennstoffzellengiften. Die Reinheitsanforderungen an das Biogas werden dabei im Wesentlichen durch die Reformierungskatalysatoren bestimmt. Aber auch die Brennstoffzellenelektroden werden z.B. durch Schwefelverbindungen kumulativ und irreversibel geschädigt [20]. Die gegenüber Erdgas höhere Kohlendioxidfracht bedingt eine veränderte Reformerauslegung. Das Reformat weist einen kleineren Wasserstoffanteil und damit einen geringeren Wasserstoffpartialdruck auf, der eine geringere Zellspannung zur Folge hat. Die Anpassung des Brennstoffzellenstacks kann konstruktiv durch Änderungen der Strömungskanäle (flow fields) und der Katalysatorbelegung der Anode erfolgen [21].

Material und Methoden

Rohgasbereitstellung

Die Gasversorgung der Brennstoffzellenversuchsanlage des ATB erfolgt mit Biogas aus zwei Fermentern zur Feststoffvergärung [22, 23]. Als Substrat kommt eine Mischung aus vergorenem Stallmist, frischem Stallmist und Mais-silage zum Einsatz (**Tabelle 3**). Das erzeugte Biogas wird in einem Folienspeicher mit 16 m^3 Fassungsvermögen gespeichert. Die für einen Teil der Versuche erforderliche Variierung des Methangehaltes erfolgt durch Zugabe von technischen Gasen (CH_4 , CO_2).

Tabelle 3: Ausgangsmaterial und Rohgaszusammensetzung

	Fermenter 1	Fermenter 2
Substrat	50% Impfmist 25% Frischmist 25% Maissilage	50% Impfmist 50% Frischmist
CH_4 in %	58-60	57-59
CO_2 in %	40-42	41-43
O_2 in %	0-1	0-0,7
H_2S in ppm	44-180	35-60

Versuchsaufbau

Die Versuchsanlage besteht aus dem Reformiermodul mit integrierter Entschwefelung und dem Brennstoffzellenmodul (**Bild 2**). Beide Module verfügen über eine eigene speicherprogrammierbare Steuerung (SPS). Die SPS des Brennstoffzellenmoduls übernimmt die übergeordneten Funktionen wie die Initialisierung der Start- und Stoppverfahren sowie die Lastvorgabe.

Die Medienversorgung der Versuchsanlage sichert die Biogaszufuhr und die Bereitstellung von deionisiertem Wasser und Leitungswasser zur Speisung von Kühlkreisläufen. Entstehendes Kondensat wird aufgefangen und entsorgt. Außer der Kathodenabluft der Brennstoffzelle werden sämtliche Abgase über separate Leitungen abgeführt. Die beim Betrieb entstehende Wärme wird an die Umgebung abgegeben. Die von der Brennstoffzelle erzeugte elektrische Energie wird mittels der integrierten elektronischen Last in Wärme umgesetzt.

Das Brennstoffzellenmodul verfügt über zwei unabhängige Brennstoffzellenstacks. Ein Teststack mit 4 Zellen ($150 \text{ W}_{\text{el}}$) dient zur Untersuchung des Schadgaseinflusses, der Laststack mit 14 Zellen ($650 \text{ W}_{\text{el}}$) ist für die Untersuchung des Betriebsverhaltens und die Ermittlung der energetischen Kenngrößen vorgesehen.

Die Brennstoffaufbereitung erfolgt durch einen in den USA entwickelten Dampfreformer mit zweistufigem Shiftreaktor und selektiver Oxidation. Die Reformierlast wird durch den eingehenden Prozessgasmassenstrom $\dot{m}_{\text{Bio,Pro}}$ im Bereich von 20-100 % ($1,4-5,8 \text{ NI/min}$) geregelt. Für den Betrieb mit 60 % Methan im Biogas wird eine maximale Wasserstoffleistung von $2,3 \text{ kW}$ bei einem Wasserstoffanteil von 64 % ange-

geben. Dies entspricht einem Wasserstoffmassenstrom von 0,87 kg/h (Bild 3).

Das Reformiermodul integriert die Gaskompression, Entschwefelung sowie die Dampferzeugung und verfügt über eine interne Wärmerückgewinnung. Das Rohgas wird durch den Kompressor C-1 auf 720 mbar verdichtet. Anschließend wird der Gasstrom geteilt. Das Brenngas wird dem atmosphärischen Brenner H-1 zugeführt, und das Prozessgas wird zwei kupferimprägnierten Aktivkohlefiltern zugeleitet, die Schwefelwasserstoff adsorbieren. Das gereinigte Gas gelangt über einen Massenflussregler (MFC)

und wird auf dem Weg in den Reformierungsreaktor mit Dampf im S/C-Verhältnis von 3,5 (Molenstrom Dampf zu Methan) gemischt. Das Gemisch wird über einen Wärmetauscher vorgewärmt, in den Dampfreformer R-1 eingeleitet und durchströmt den ringförmigen Reformierungskatalysator (G-90B), wobei es durch die Wärme aus dem Brenneraum und die Wärme des im Gegenstrom durch den inneren Zylinder abgeführten Reformats erhitzt wird. Am Ausgang des Katalysatorbetts wird so eine Temperatur von etwa 720-840 °C erreicht (TE-103). Das Reformat aus dem Dampfreformer wird über einen Wärme-

tauscher geführt, mit 250-300 °C durch die beiden Shiftstufen geleitet und gekühlt. Die Kühlung auf etwa 30 °C führt zur Kondensatbildung, das im Kondensatabscheider V-2 zurück gewonnen wird. Anschließend wird das Reformat der Selektiven Oxidation (Selox) zugeführt. Die Selox besteht aus den wassergekühlten Katalysatoren R-3A und R-3B (40-50 °C). Die Kühlung erfolgt durch die Kopplung an den Kühlkreislauf der Brennstoffzelle.

Das Reformat wird der Brennstoffzelle durch einen beheizten Schlauch zugeführt. Je nach Ventilstellung wird es in den Anodenraum eines der beiden Brennstoffzellenstacks oder durch einen Bypass direkt zum Anodenausgang geleitet. Im Brennstoffzellenstack strömt es durch die Strömungskanäle der Bipolarplatten an der Polymer-Elektrolyt-Membran (Primea 5620, 207 cm² Membranfläche) entlang. Das Anodenabgas wird an die Außenluft geführt. Ein Stellventil ermöglicht die Druckregelung.

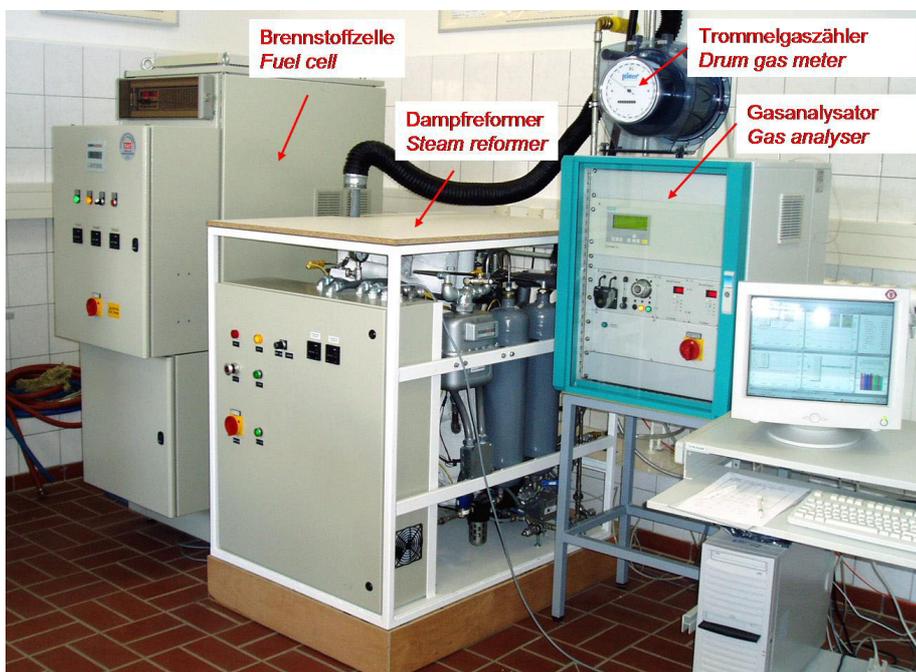


Bild 2: Brennstoffzellenversuchsstand des ATB

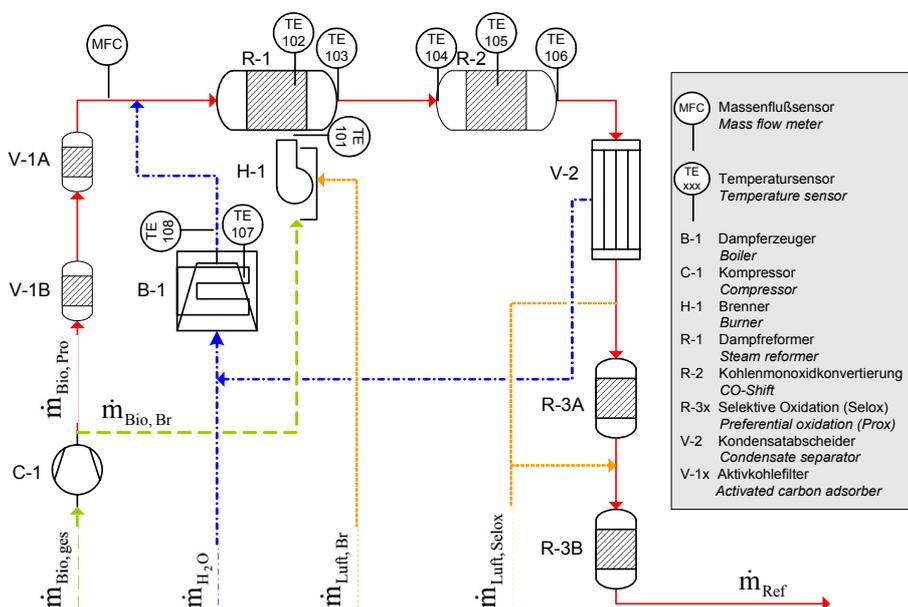


Bild 3: Prozessflussdiagramm des Biogasreformers

Gasanalyse

Die Gasesstechnik besteht aus einem Prozessgas-Analysesystem des Berliner Unternehmens Pronova, einem handelsüblichen Deponiegasmonitor und einem Trommelgaszähler zur Erfassung der zugeführten Gasmenge. Die Messung der Prozessgase erfolgt über drei Probenports. Damit wird die Zusammensetzung von Biogas, Reformat und Anodenabgas bestimmt und aufgezeichnet. Während die Bestimmung der CH₄-, CO₂- und CO-Volumenanteile durch Infrarot-Spektroskopie erfolgt, wird die H₂-Konzentration durch einen Wärmeleitfähigkeitsdetektor ermittelt.

Die Überwachung der Sauerstoffkonzentration und der H₂S-Belastung des Biogases erfolgt mit dem Deponiegasmonitor. Der Biogas-Gesamtvolumenstrom wird mit einem Trommelgaszähler gemessen, und der Biogas-Prozessvolumenstrom wird mit dem thermischen Massenflussregler des Reformers bestimmt.

Versuchsprogramm

Zur Beurteilung des Reformers, der Brennstoffzelle und des Gesamtsystems werden in 5 Versuchsreihen insgesamt

65 Versuche durchgeführt. Für den Reformier werden der Einfluss der selektiven Oxidation auf die Reformatzusammensetzung und das Betriebsverhalten für Biogas mit unterschiedlichen Methangehalten untersucht. Dazu werden der Seloxluftvolumenstrom und die Reformierlast (Prozessgasvolumenstrom) variiert (Versuchsreihen I, II). Für die Brennstoffzelle werden Stromdichte-Spannungs-Kennlinien für verschiedene Biogaszusammensetzungen aufgenommen und Untersuchungen zum Einfluss des Wasserstoffüberströmung auf Zellspannung und Leistung durchgeführt (III, IV). Die energetische Bewertung des Gesamtsystems erfolgt durch Ermittlung der Leistungsbilanzen für verschiedene Lastpunkte (V) (Tabelle 4).

Versuchsauswertung

Die Versuchsauswertung erfolgt durch die Ermittlung wesentlicher Kenngrößen von Reformier, Brennstoffzelle und Gesamtsystem (Tabelle 5). Für den Reformier werden die Methanumsatzrate u (Gl. 3) und der Reformierwirkungsgrad η_{Ref} (Gl. 4) bestimmt. Das Betriebsverhalten und die Leistungsfähigkeit der Brennstoffzelle werden durch Stromdichte-Spannungs-Kennlinien beschrieben. Die flächenbezogene Stromdichte i ist für Baugröße und Kosten von Bedeutung und wird als Verhältnis der Stromstärke I_{BZ} zur Membranfläche A_{Z} definiert. Als Bezugswert für den elektrischen Zellwirkungsgrad wird der untere Wasser-

stoffheizwert $H_{\text{u}} = -241,8 \text{ kJ/mol}$ gewählt. Aus diesem errechnet sich über die Beziehung

$$U_{\text{Z,rev}} = \frac{-\Delta'G}{2 \cdot F} \quad (1)$$

eine thermoneutrale Maximalspannung von $U_{\text{Z,rev}} = 1,25 \text{ V}$. Dies führt zu der durch Gleichung 4 gegeben, gut handhabbaren Definition des Zellwirkungsgrades.

Tabelle 5: Kenngrößen von Brennstoffzellensystemen [10, 25]

Bezeichnung	Berechnung	
Methanumsatz	$u = \frac{m_{\text{CH}_4, \text{nutz}}}{m_{\text{CH}_4, \text{zu}}}$	(2)
Reformierwirkungsgrad	$\eta_{\text{Ref}} = \frac{\dot{m}_{\text{H}_2} \cdot h_{\text{u,H}_2}}{\dot{m}_{\text{CH}_4} \cdot h_{\text{u,CH}_4}}$	(3)
Zellwirkungsgrad	$\eta_{\text{Z}} = \frac{U_{\text{Z}}}{1,25 \text{ V}}$	(4)
Brennstoffnutzungsgrad	$\mu_{\text{f}} = \frac{\dot{m}_{\text{H}_2, \text{umgesetzt}}}{\dot{m}_{\text{H}_2, \text{zugeführt}}}$	(5)
Stackwirkungsgrad	$\eta_{\text{BZ}} = \mu_{\text{f}} \cdot \frac{U_{\text{BZ}}}{z \cdot 1,25 \text{ V}}$	(6)
Systemwirkungsgrad	$\eta_{\text{Sys}} = \frac{P_{\text{el}}}{\dot{m}_{\text{B}} \cdot h_{\text{u,B}}}$	(7)

Durch Verschaltung von Einzelzellen ergibt sich die übergeordnete strömungstechnische und elektrische Einheit, der Brennstoffzellenstack. Während strö-

mungstechnisch eine Parallelschaltung der Zellen erfolgt, liegen die einzelnen Zellen elektrisch in Reihe, so dass sich die Spannungen zu U_{BZ} addieren. Da nicht der gesamte zugeführte Brennstoff durch die Zellen umgesetzt wird, treten weitere Leistungsverluste auf. Als Maß für die Brenngasausnutzung wird der Brennstoffnutzungsgrad μ_{f} (Gl. 6) definiert. Gleichung 7 liefert den Stackwirkungsgrad η_{BZ} für eine Brennstoffzelle mit z Einzelzellen. Der elektrische Bruttosystemwirkungsgrad η_{Sys} (Gl. 8) beschreibt das Verhältnis von elektrischer Nutzleistung zur zugeführten Brennstoffleistung ohne dabei die zusätzlich eingebrachte Hilfsenergie zu berücksichtigen.

Ergebnisse

Selektive Oxidation

Die PEM-Brennstoffzelle erfordert ein weitgehend kohlenmonoxidfreies Brenngas. Um einen CO-Anteil $< 10 \text{ ppm}$ zu erzielen, erfolgt die Feinreinigung des Reformats durch selektiven Oxidation mit Luftsauerstoff. Die Versuche zeigen bei einem Seloxluftvolumenstrom bis etwa 2,5 % des Reformatvolumenstromes ein Auftreten von kurzzeitigen CO-Maxima von mehr als 250 ppm, deren Ursache unklar ist. Ein kohlenmonoxidfreies Produktgas wird erst bei einer Luftzugabe von $\geq 5 \%$ sicher erreicht (Bild 4).

Tabelle 4: Versuchsprogramm

Versuchsreihe	Versuchsnummer	Versuchszahl	Versuchsdauer	CH4-Anteil	Reformierlast	BZ-Stromstärke	Seloxluftvolumenstrom	
	-	-	min	%	%	A	l/min	
I	Untersuchungen zum Einfluss der selektiven Oxidation auf die Reformatzusammensetzung	1.1	20	7	60	25 - 100	-	0 - 2
		1.2	3	15	60	100 - 25	-	0 - 0.4
		1.3	3	15	60	100 - 30	-	0.5 - 2
II	Bestimmung der Reformierleistung	2.1	8	7	55	30 - 100	25	1
		2.2	8	7	60	30 - 100	25	1
		2.3	8	7	65	30 - 100	25	1
III	Aufnahme der Stromdichte-Spannungs-Kennlinien	3.1	1	10	55	100	0 - 90	1
		3.2	1	10	60	100	0 - 90	1
		3.2	1	10	65	100	0 - 90	1
IV	Untersuchungen zum Einfluss der Wasserstoffüberströmung auf den Wirkungsgrad	4.1	2	15	55	100 - 20	20, 40	1
		4.2	2	15	60	80 - 20	20, 40	1
		4.3	2	15	65	60 - 20	20, 40	1
V	Ermittlung der Leistungsbilanz	5.1	2	15	60	100	60, 50	1
		5.2	2	15	60	75	40, 20	1
		5.3	2	15	60	50	35, 20	1

Mit steigender Luftzugabe sinken der Wasserstoff- und Kohlendioxidgehalt des Reformats. Das leichte Absinken des CO_2 -Anteils ist auf den Verdünnungseffekt zurückzuführen. Die stärkere Reduzierung der H_2 -Konzentration wird durch die Reaktion des Wasserstoffs mit überschüssigem Luftsauerstoff hervorgerufen.

Wie der Anstieg des Stickstoffanteils bei sinkender Reformierleistung zeigt, bewirkt die reformerinterne Steuerung des Luftvolumenstroms kein gleich bleibendes Reformatgas/Luft-Verhältnis. Mit geringerer Reformierlast führt ein steigender Luftüberschuss zu einer geringfügig schlechteren Reformatqualität, d.h. dass Wasserstoffkonzentration und Energiedichte sinken, obwohl eine vollständige Kohlenmonoxidfreiheit vorliegt. Für den weiteren Betrieb der Versuchsanlage wird eine Luftzugabe von 5 % des Reformatvolumenstroms bei Volllast eingestellt.

Reformerleistung

Das Ziel der Reformierung ist die Erzeugung von Wasserstoff. Voraussetzung für eine gute Wasserstoffleistung ist ein hoher Methanumsatz. Die Versuche zeigen ein Absinken der Methanumsatzrate mit steigender Reformierlast, was auf eine unzureichende Katalysatoraktivität hinweist. Der geringste Methanumsatz von 74 % wird für Biogas mit 65 % Methan bei Volllast ermittelt. Bei 30 % Teillast steigt die Umsatzrate bei allen Biogasvarianten auf etwa 90 %. Die Gründe für den geringen Umsatz werden in den relativ niedrigen Reformierungstemperaturen von 700-740 °C vermutet (**Bild 5**).

Die dargestellten Messwerte sind über einen Zeitraum von 5 Minuten gemittelt. Das Reformat weist keine konstante Zusammensetzung auf. Der Wasserstoffgehalt schwankt innerhalb von 5 Minuten um maximal 4,5 Vol-%.

Die Biogasreformierung führt in Abhängigkeit vom Methananteil zu unterschiedlichen Wasserstoffgehalten im Reformat. Die Versuche zeigen einen durchschnittlichen Wasserstoffanteil von 53-56 % (**Tabelle 6**). Der Spitzenwert für Biogas mit 60 % Methan wurde mit einer höheren Reformierungstemperatur von 840 °C bei Volllast erreicht.

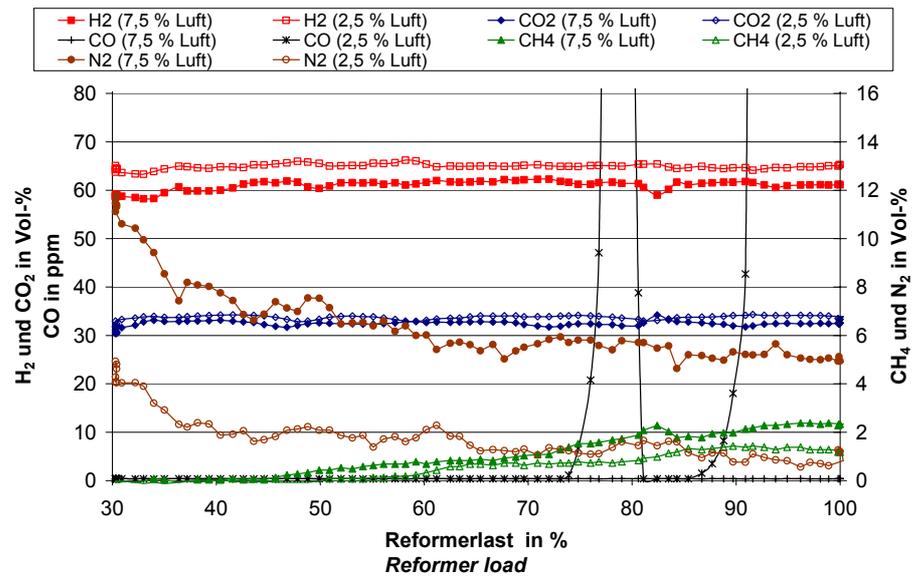


Bild 4: Reformatgaszusammensetzung für unterschiedliche Seloxluftvolumenströme

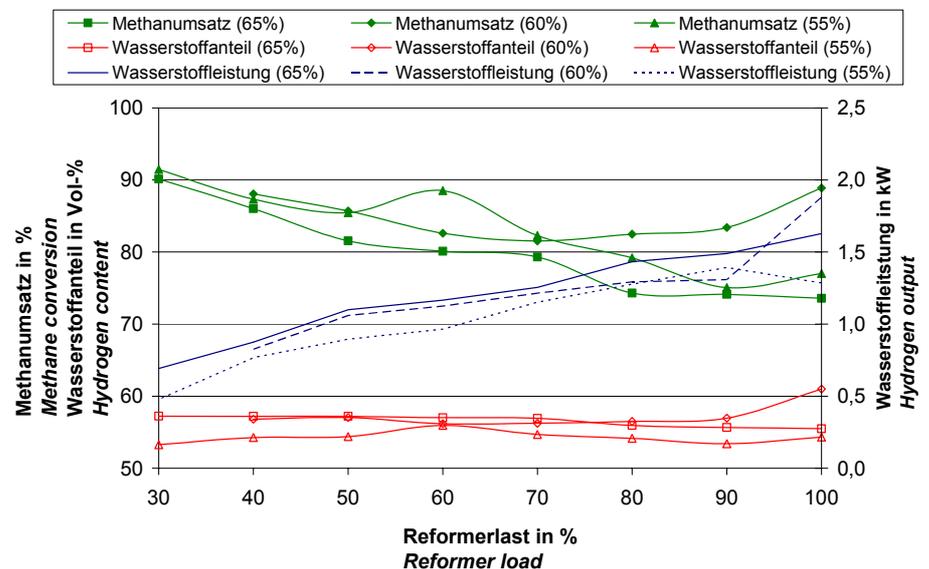


Bild 5: Methanumsatz und Wasserstoffleistung in Abhängigkeit vom Methananteil (Klammerwerte) des Biogases

Tabelle 6: Wasserstoffanteil im Reformat für unterschiedliche Biogaszusammensetzungen (Mittelwerte über den gesamten Lastbereich)

CH ₄ -Anteil im Biogas	H ₂ -Anteil im Reformat
55%	53%
60%	55%
65%	56%

Stromdichte-Spannungs-Kennlinien

Das Betriebsverhalten einer Brennstoffzelle wird durch Stromdichte-Spannungs-Kennlinien charakterisiert. Mit zunehmender Stromdichte sind eine abnehmende Spannung und damit ein sinkender Zellwirkungsgrad zu verzeichnen, d. h. dass bei der Festlegung eines Betriebspunktes hohe Nennleistungen zu

niedrigen Zellwirkungsgraden führen. Die Kennlinien für unterschiedliche Rohgaszusammensetzungen (Biogas mit einem Methananteil von 55-65 %) zeigen, dass die Stackspannungen für Stromdichten bis 0,25 A/cm² kaum voneinander abweichen (**Bild 6**).

Mit steigender Stromdichte führt der unterschiedliche Methananteil, bzw. der daraus resultierende unterschiedliche Wasserstoffanteil des Reformats, zu größeren Spannungsdifferenzen. So erreicht die Versuchsanlage bei Biogas mit 65 % Methan eine Spitzenleistung von 600 W_{el}. Bei einem Methananteil von 55 % werden nur 500 W_{el} erzielt, bevor das Absinken der schwächsten Einzelzellspannung auf unter 450 mV zum Abbruch der Messung führt.

Der Kennlinienverlauf der Einzelzellen zeigt erhebliche Unterschiede. Ein Vergleich der leistungsfähigsten Zelle 7 mit der schwächsten Zelle 2 zeigt einen über den gesamten Leistungsbereich wachsenden Unterschied in den Zellspannungen. Bei einer Stromdichte von 0,2 A/cm² beträgt der Unterschied ca. 80 mV. Bei einer Stromdichte von 0,35 A/cm² steigt die Differenz auf über 100 mV, entsprechend einem Unterschied von über 8 Wirkungsgradprozenten. Die Gründe werden in einer ungleichmäßigen Durchströmung vermutet (**Bild 7**).

Wasserstoffüberströmung

In der Brennstoffzelle wird nur ein Teil des zugeführten Wasserstoffs umgesetzt, da auch am Ende des Strömungsweges entlang der Membran ein ausreichender Wasserstoffpartialdruck zur Aufrechterhaltung des transmembranen Protonenstroms erforderlich ist. Das Verhältnis von zugeführter zu genutzter Wassermenge, der Kehrwert des Brennstoffnutzungsgrades μ_f , ist das Wasserstoffüberströmungsverhältnis α_H . Deswegen Einfluss auf die Zellspannungen ist bis zum Erreichen einer kritischen Grenze gering. Diese ist abhängig von der Stromstärke und liegt für den untersuchten Stack bei einer 1,3-1,5 fachen Überströmung für 20 A und einem Wert von etwa 1,4-1,6 für 40 A. Eine höherer Methananteil im Biogas und damit ein höherer H₂-Anteil im Reformat ermöglicht eine geringere Überströmung (**Bild 8**).

Auch bei den Auswirkungen des Überströmungsverhältnisses auf die Spannungen bestehen große Unterschiede zwischen den Einzelzellen. Bei $\alpha_H < 1,25$ (20 A) bzw. $\alpha_H < 1,4$ (40 A) brechen die Zellspannung einzelner Zellen (Zelle 5) zusammen. Andere Zellen (Zelle 7) zeigen hingegen nur geringe Veränderungen (**Bild 9**).

Die Einstellung einer konstanten Überströmung ist an der bestehenden Versuchsanlage nicht möglich, da Schwankungen im Reformerausgangsdruck und Wasserstoffgehalt auftreten. Um ein Unterschreiten des kritischen Überströmungsverhältnisses zu vermeiden, ist die Einstellung einer höheren Reformereistung erforderlich, wie sie sich rechnerisch aus der erforderlichen Überströ-

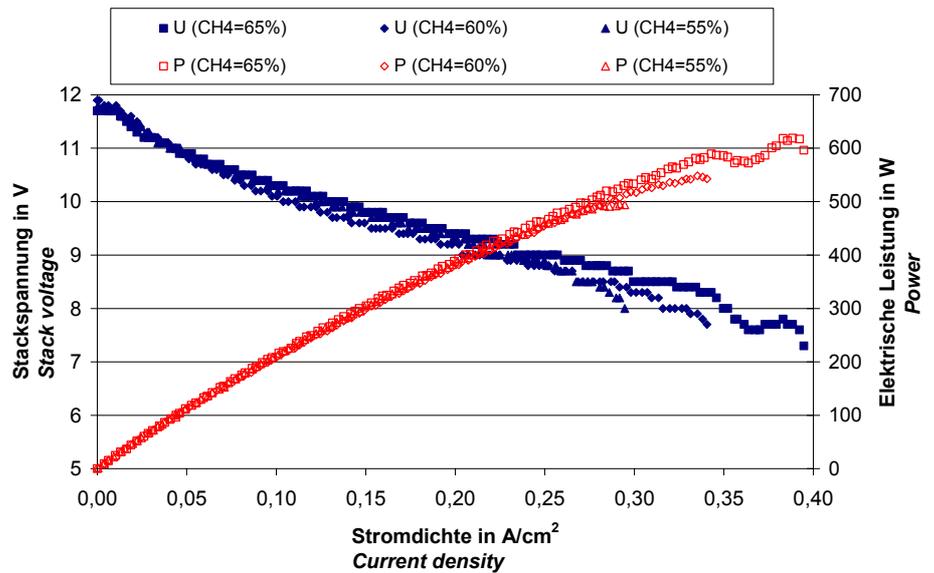


Bild 6: Stromdichte-Spannungs-Kennlinien des Laststacks in Abhängigkeit vom Methananteil des Rohgases

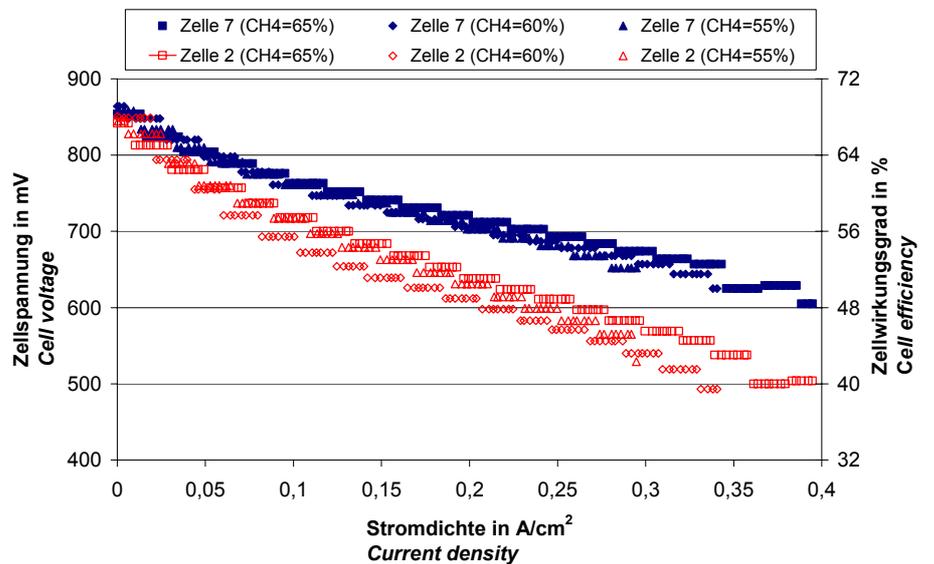


Bild 7: Kennlinienverlauf ausgewählter Einzelzellen

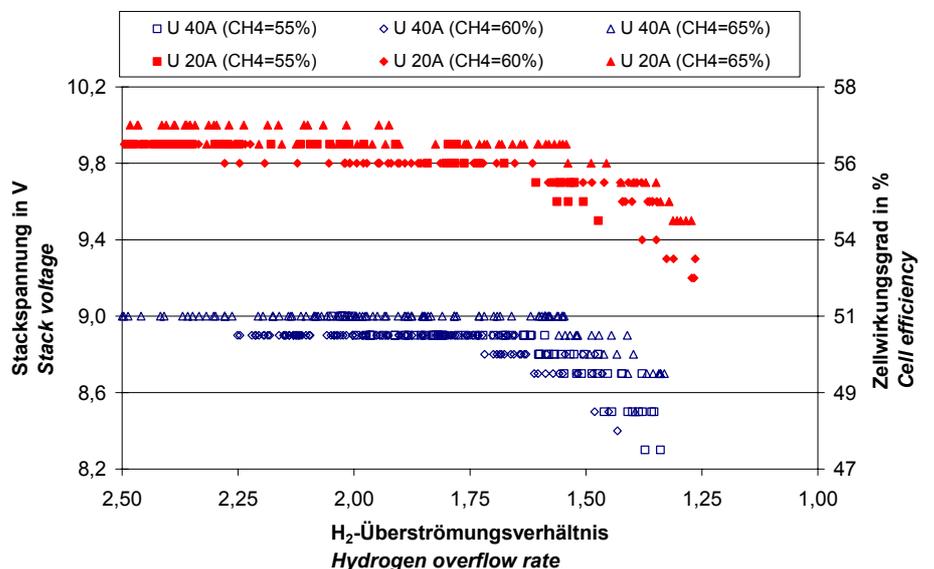


Bild 8: Stackspannung und mittleren Zellwirkungsgrad in Abhängigkeit vom Wasserstoffüberströmungsverhältnis

mung ergibt. Dies senkt den Brennstoffnutzungsgrad und führt damit zu geringeren elektrischen Wirkungsgraden.

Leistungsbilanz

Grundlage für die energetische Analyse eines Brennstoffzellensystems ist die Beschreibung der Energie- und Stoffumsätze. Dazu erfolgt eine Modellbildung, die die Berechnung der erforderlichen Werte aus den gemessenen Volumenanteilen, Volumenströmen und elektrischen Größen gestattet (Bild 10). Die dazu erforderliche Umrechnung von Stoff- in Massenströme erfolgt unter der Annahme idealer Gase und thermodynamischer Standardbedingungen.

Der genutzte Wasserstoffmassenstrom $\dot{m}_{H_2, nutz}$ ergibt sich zu:

$$\dot{m}_{H_2, nutz} = \frac{I_{BZ} \cdot z \cdot M_{H_2}}{2 \cdot F} \quad (8)$$

Die Massenbilanz der Brennstoffzelle liefert unter Einbeziehung der gemessenen Volumenanteile $x_{H_2, Ref}$ und $x_{H_2, An}$ den reformierten Wasserstoffmassenstrom:

$$\dot{m}_{H_2, Ref} = \frac{x_{H_2, Ref} \cdot (1 - x_{H_2, An})}{x_{H_2, Ref} - x_{H_2, An}} \cdot \dot{m}_{H_2, nutz} \quad (9)$$

Die Kenntnis dieses Wertes ermöglicht die Berechnung der Eingangs- und Ausgangsmassenströme $\dot{m}_{CH_4, Ref}$, $\dot{m}_{CH_4, An}$ und $\dot{m}_{H_2, An}$ der energietragenden Gas-komponenten.

Zur energetischen Beurteilung der Versuchsanlage wird eine Leistungsbilanz für verschiedene Betriebspunkte erstellt. Die Versuche ergeben einen maximalen elektrischen Bruttosystemwirkungsgrad η_{Sys} von 11,8 % bei einer Stromdichte von 0,29 A/cm² und einem Brennstoffnutzungsgrad μ_f von 70 %. Im Teillastbereich ergibt sich ein maximaler Wirkungsgrad von $\eta_{Sys} = 10,7$ % bei $\mu_f = 62$ % (Tabelle 7).

Die Ursache für den geringen Gesamtwirkungsgrad 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. Die Versuchsergebnisse

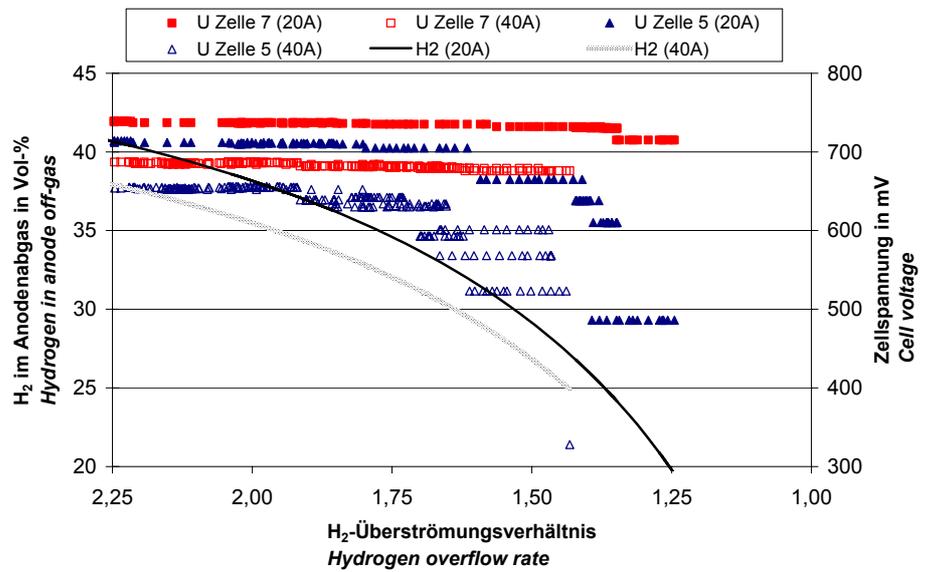


Bild 9: Auswirkung des Wasserstoffüberströmungsverhältnisses auf die Zellspannung ausgewählter Einzelzellen

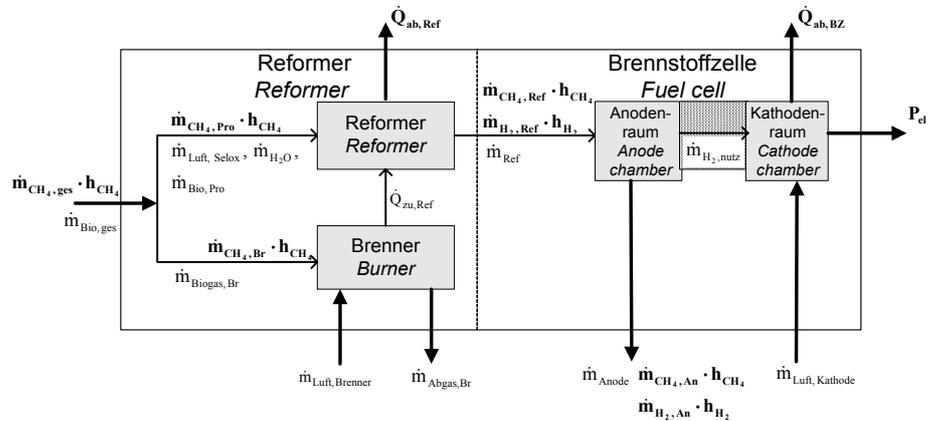


Bild 10: Vereinfachtes Massen- und Energieflussmodell des Biogas-Brennstoffzellensystems

Tabelle 7: Leistungsbilanz der nicht optimierten Versuchsanlage

	Energieträger	Leistung bei Volllast ¹		Leistung bei Teillast ²	
		W	%	W	%
Eingang	Biogas Prozess	2061	52,1	1032	36,7
	Biogas Brenner	1893	47,9	1779	63,3
	<i>Summe</i>	<i>3954</i>	<i>100</i>	<i>2811</i>	<i>100</i>
Ausgang Reformer	H ₂ Reformat	1489	37,7	970	34,5
	CH ₄ Reformat	607	15,4	163	5,8
	Wärme Reformer	1858	47,0	1678	59,7
	<i>Summe</i>	<i>3954</i>	<i>100</i>	<i>2811</i>	<i>100</i>
Ausgang Gesamtsystem	Wärme Reformer	1858	47,0	1678	59,7
	H ₂ Abgas	446	11,3	372	13,2
	CH ₄ Abgas	607	15,4	163	5,8
	Elektrische Leistung	467	11,8	301	10,7
	Wärme Brennstoffzelle	576	14,6	297	10,6
	<i>Summe</i>	<i>3954</i>	<i>100</i>	<i>2811</i>	<i>100</i>

¹ bei 100 % Reformerlast, 60 A und 60 % Methan im Biogas

² bei 50 % Reformerlast, 35 A und 60 % Methan im Biogas

zu den Einzelkomponenten lassen bei optimaler Anpassung der Reformerlast an die Brennstoffzellenleistung im Teil-

lastbereich bessere Wirkungsgrade als bei Volllast erwarten. Der Bedarf an elektrischer Hilfsenergie ist mit 3-5 % der

Nutzleistung zu veranschlagen, im Teil-lastbereich auch darüber [24].

Auf der Grundlage der Versuchsergebnisse und belastbarer Literaturwerte wird eine Abschätzung des erreichbaren Bruttosystemwirkungsgrads η_{sys} für die Verstromung von Biogas mit PEM-Brennstoffzellen vorgenommen. Dabei wird eine Verfahrensführung mit Nutzung des Anodenabgases zur Bereitstellung der Reformierungswärme betrachtet, wie sie an der TU Bergakademie Freiberg entwickelt und erprobt wird [25]. Neben den bereits beschriebenen Wirkungsgraden wird die zur Netzeinspeisung erforderliche Wechselrichtung des produzierten Gleichstromes mit dem Wirkungsgrad $\eta_l = 0,95$ berücksichtigt. Der Modellrechnung liegt die Annahme eines optimierten Systems zugrunde. Verbesserungen, wie sie durch Entwicklungssprünge der noch jungen Brennstoffzellentechnologie – vor allem im Bereich der Membranentwicklung – zu erwarten sind, sind hierbei nicht berücksichtigt (**Tabelle 8**).

Die Berechnungen erfolgen für $\alpha_H = 1,2$ (Variante 2 und 4) und $\alpha_H = 1,4$ (Variante 1 und 3). Dies entspricht einem Brennstoffnutzungsgrad von 71 % bzw. 83 %. Der Reformierwirkungsgrad wird gemäß den Herstellerangaben der Versuchsanlage mit 68 % (Variante 1 und 2) und entsprechend der Literaturoberwertung mit 80 % (Variante 3 und 4) veranschlagt. Die Betriebspunkte werden auf Grundlage der Stromdichte-Spannungskennlinie der Zelle 7 mit $U_z = 670$ mV bei $0,3$ A/cm² und $U_z = 720$ mV bei $0,2$ A/cm² festgelegt (vgl. Bild 7). Unter Annahme eines Methanumsatzes von 97 % erfolgt die Berechnung des elektrischen Bruttosystemwirkungsgrades:

$$\eta_{\text{sys}} = (1,03 + (1 - \mu_f) \cdot \eta_{\text{Ref}}) \cdot \eta_{\text{Ref}} \cdot \mu_f \cdot \frac{U_z}{1,25V} \cdot \eta_l \quad (10)$$

Das Ergebnis ist ein maximaler elektrischer Systemwirkungsgrad von 39-42 % (Variante 4).

Schlussfolgerungen

Die Eignung der PEM-Brennstoffzellentechnologie zur Verstromung von Biogas wird erstmals experimentell nachgewiesen. Messungen an einer 650 W_{el}-

Tabelle 8: Wirkungsgrade eines optimierten Biogas-PEMFC-Systems (Modellrechnung)

	Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4	
Vorgabeparameter								
Wechselrichterwirkungsgrad in %	95	95	95	95	95	95	95	95
Reformerwirkungsgrad in %	68	68	68	68	80	80	80	80
Brennstoffnutzungsgrad in %	71	71	83	83	71	71	83	83
Zellspannung in mV	670	720	670	720	670	720	670	720
Ergebnisse								
Elektrischer Systemwirkungsgrad in %	30	32	33	35	37	39	39	42

Versuchsanlage zeigen Zellwirkungsgrade von ≤ 58 % bei einer Stromdichte von $0,2$ A/cm². Dieser Wert wird jedoch nur von einzelnen Zellen erreicht. Die Zellspannungen weichen erheblich voneinander ab. Die Unterschiede steigen mit zunehmender Leistung und geringerer Wasserstoffüberströmung. Die Gründe werden in einer ungleichmäßigen Durchströmung und Befeuchtung der Zellen vermutet und sind somit als konstruktives Problem des Brennstoffzellenstacks anzusehen.

Als kritische Systemkomponente erweist sich der Dampfreformer mit einem thermischen Wirkungsgrad von nur etwa 38 % und einem Methanumsatz von 75-90 %, der zu einer geringen Wasserstoffausbeute führt.

Der Einfluss des Methangehalts auf die energetische Effizienz des Brennstoffzellensystems ist bei geringen Leistungsdichten, die zur Erzielung eines hohen elektrischen Wirkungsgrades erforderlich sind, gering. Eine Modellbetrachtung auf der Basis der stärksten Einzelzelle ergibt für ein optimiertes System bei Nutzung des Anodenabgases zur Bereitstellung der Reformierungswärme einen maximalen elektrischen Bruttosystemwirkungsgrad von 42 % bei einer Leistungsdichte der Brennstoffzelle von $0,14$ W/cm².

Zusammenfassend kann eingeschätzt werden, dass die Anwendungsreife noch nicht erreicht ist. Für den Einsatz mit Biogas ist die Entwicklung eines effizienten und betriebssicheren Biogasreformers Voraussetzung und eine grundlegende Systemoptimierung erforderlich. Wird dieses Ziel erreicht, bieten Biogas-Blockheizkraftwerke auf Basis von PEM-Brennstoffzellen im Leistungsbe- reich bis 250 kW_{el} wirtschaftlich und energetisch sehr gute Perspektiven.

Weiterführende Untersuchungen erfol-

gen in Zusammenarbeit mit Brennstoffzellen- und Reformerentwicklern. Die Ziele liegen in der Optimierung des Systems, der Bestimmung der zeitlichen Degradation der Komponenten und in der Identifizierung schädigender Begleitstoffe im Biogas, um die entsprechenden Toleranzgrenzen des Reformers und der PEM-Brennstoffzelle zu ermitteln.

Verzeichnis der Abkürzungen

BZ	- Brennstoffzelle
CO-Shift	- Kohlenmonoxidkonvertierung
MCFC	- Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle
MEA	- Membran-Elektroden-Einheit
MFC	- Massenstromregler
PAFC	- Phosphorsäure-Brennstoffzelle
PEMFC	- Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle
Selox	- Selektive Oxidation
SOFC	- Festoxid-Brennstoffzelle
SPS	- Speicherprogrammierbare Steuerung

Formelzeichen

A_z	- Membranfläche	cm ²
F	- Faradaysche Konstante	As/mol
h_i	- Spezifische Enthalpie der Komponente i	J/kg
H_u	- Unterer Heizwert	kJ/mol
i	- Stromdichte	A/cm ²
I_{BZ}	- Stromstärke	A
\dot{m}_i	- Massenstrom der Komponente i	g/h
M_i	- Molgewicht der Komponente i	g/mol
\dot{n}_i	- Stoffstrom der Komponente i	mol/h
\dot{Q}	- Wärmestrom	kJ/h
P_{el}	- Elektrische Leistung	W
x_i	- Volumenanteil der Komponente i	%
u	- Methanumsatzrate	%

U_{BZ}	- Stackspannung	V
U_Z	- Zellspannung	mV
$U_{Z,rev}$	- Thermoneutrale Zellspannung	V
z	- Zahl der Zellen	
$\Delta^r G$	- Freie Reaktionsenthalpie	kJ/mol
α_H	- Wasserstoffüberströmungsverhältnis	
η_{BZ}	- Elektrischer Stackwirkungsgrad	%
η_I	- Wechselrichterwirkungsgrad	%
η_{Ref}	- Thermischer Reformierwirkungsgrad	%
η_{Sys}	- Elektrischer Bruttosystemwirkungsgrad	%
η_Z	- Elektrischer Zellwirkungsgrad	%
μ_f	- Brennstoffnutzungsgrad	

Literatur

- [1] *Weiland, P.*: Stand und Perspektiven der Biogasnutzung und -erzeugung in Deutschland. In: *Energetische Nutzung von Biogas – Stand der Technik und Optimierungspotenzial*, Gülzower Fachgespräche Bd. 15, FNR Gülzow 2001, S. 8-27
- [2] *Grove, W. R.*: On Voltaic Series and the Combination of Gases by Platinum. *Philosophical Magazine* 14, 127, 1839
- [3] *Sandstede, G. u. a.*: History of low temperature fuel cells. In Vielstich et al. (Hrsg.): *Handbook of Fuel Cells – Fundamentals, Technology and Applications*, Volume 1 Wiley USA 2003, S. 145-218
- [4] *Pehnt, M.; Nitsch, J.*: Einsatzfelder und Marktchancen von Brennstoffzellen in der industriellen und öffentlichen Kraft-Wärme-Kopplung. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart 2001
- [5] *Langnickel, U.*: Nutzung biogener Gase in Brennstoffzellen – das Beispiel Köln. In: *Nutzung von Biogas – Stand der Technik und Optimierungspotenzial*, Gülzower Fachgespräche Bd. 15, FNR Gülzow 2001, S. 101-107
- [6] *Ott, M.; Tamm, D.*: Anforderungen beim Einsatz von Biogas in Brennstoffzellen. In: *Workshop „Aufbereitung von Biogas“* 2003, Gülzower Fachgespräche Bd. 21, FNR Gülzow 2003, S. 60-70
- [7] *Schuler, A.*: Sulzer Hexis SOFC System – Möglichkeiten zur Nutzung von Biogas. In: *Biogas-Brennstoffzellen Systeme*, Symposium 15.01.2001 in Steyr Österreich, S. 41-58
- [8] *Scholz, V.*: Stand und Perspektiven der Biogasgewinnung in Brandenburg. In: *Perspektiven der Kraft-Wärme-Kopplung*, Tagung TU Berlin, Berlin 2001, S. 75-87
- [9] *Schmersahl, R.*: Energetische Nutzung von Biogas in Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen (PEMFC). Diplomarbeit an FHTW Berlin und ATB Potsdam, 2004
- [10] *Larminie, J.; Dicks, A.*: *Fuel Cell Systems Explained*. 2nd ed. Wiley USA 2003
- [11] *Klinder, K.*: Ganzheitliche Kostenbeurteilung bei stationären Brennstoffzellenheizgeräten. In: *VDI-Berichte 1752 „Stationäre Brennstoffzellen“*, VDI-Verlag Düsseldorf 2003, S. 117-124
- [12] *Garche, J.; Jörissen, L.*: PEMFC fuel cell systems. In Vielstich et al. (Hrsg.): *Handbook of Fuel Cells – Fundamentals, Technology and Applications*, Volume 4 Wiley USA 2003, S. 1233-1259
- [13] *Huppmann, G.*: Das MTU Direkt-Brennstoffzellen Hot Module (MCFC). In Ledjeff-Hey et al. (Hrsg.): *Brennstoffzellen: Entwicklung, Technologie, Anwendung*, 2. Aufl. C.F. Müller Verlag Heidelberg 2001, S. 169-186
- [14] *Blum, L.; Drenckhahn, W.; Lezuo, A.*: Anlagenkonzeption und Wirtschaftlichkeit von SOFC-Kraftwerken. In Ledjeff-Hey et al. (Hrsg.): *Brennstoffzellen – Entwicklung, Technologie, Anwendung*, 2. Aufl. C.F. Müller Verlag Heidelberg 2001, S. 187-202
- [15] *Krause, H.; Grosser, K.; Gerber, J.*: Kompaktreformer für die Aufbereitung von Erdgas – Stand und Anforderungen. In: *Innovationsforum Brennstoffzellen in dezentralen Energieversorgungsanlagen*, Tagung Riesa 29./30. November 2001, S. 22 – 25
- [16] *Schmitz, S.*: Thermodynamische Analyse eines Brennstoffzellen-Systems zur dezentralen Energieversorgung. *Fortschritt-Berichte VDI Reihe 6 Nr. 475*, VDI-Verlag Düsseldorf 2002
- [17] *Heinzel, A.*: Brennstoffzellen im kleinen Leistungsbereich – portable Anwendungen und Batterieersatz. In Ledjeff-Hey et al. (Hrsg.): *Brennstoffzellen – Entwicklung, Technologie, Anwendung*, 2. Aufl. C.F. Müller Verlag Heidelberg 2001, S. 211-219
- [18] *Koschowitz, M.*: Felderfahrung mit Vailant Brennstoffzellenheizgeräten. In *VDI-Berichte 1752: Stationäre Brennstoffzellen*, VDI-Verlag Düsseldorf 2003, S. 15 – 24
- [19] *Pokojski, M.*: Die erste 250 kW PEM Brennstoffzelle in Europa – erste Betriebserfahrungen. In *VDI-Berichte 1596: Stationäre Brennstoffzellen*, VDI-Verlag Düsseldorf 2001, S. 73-85
- [20] US-Department of Energy: *Fuel Cell Handbook (Fifth Edition)*. EG&G Services USA 2000
- [21] *Beckmann, F.*: Einsatz von Biogas in Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen. In: *Biogas für alle – eine Stadt-Land-Partnerschaft*, Tagung 17.-18. November 2003 Potsdam, S. 72-84
- [22] *Mumme, J.*: Trockenfermentation in einer kleintechnischen Batch-Anlage, Diplomarbeit an der Humboldt-Universität zu Berlin 2002
- [23] *Linke, B.; Schelle, H.; Mumme, J.*: Solid state anaerobic digestion of farmyard manure and plant residues. In: *Proceedings of the International conference "Renewable Energy Sources on the Verge of the XXI Century"*, Warsaw 10 - 11th December 2001, pp 332-335
- [24] *Winkler, W.*: *Brennstoffzellenanlagen*. Springer-Verlag Berlin 2002
- [25] *Walter, G.*: Innovationspotenzial der Brennstoffzellentechnologie in dezentralen Energieanlagen. In: *Innovationsforum Brennstoffzellen in dezentralen Energieversorgungsanlagen*, Tagung Riesa 29.- 30. November 2001, S. 11-13

Danksagung

Für den Bau der Versuchsanlage und für die fachliche Unterstützung gilt den Herren Dr.-Ing. Jürgen Arnold und Dipl.-Ing. Frank Beckmann von der Schalt- und Regeltechnik GmbH Berlin ein besonderer Dank. Den Herren PD Dr. agr. Dipl.-Ing. Bernd Linke und Dipl.-Ing. Jan Mumme vom ATB Potsdam wird für die gute Zusammenarbeit und die Bereitstellung von Biogas gedankt.

Autoren

Dr.-Ing. Volkhard Scholz
 Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB)
 Abteilung Technik der Aufbereitung, Lagerung und Konservierung
 Max-Eyth-Allee 100
 14469 Potsdam-Bornim
 Tel.: +49/(0)331/5699-312
 Fax: +49/(0)331/5699-849
 E-Mail: vscholz@atb-potsdam.de

Dipl.-Ing. (FH) Ralf Schmersahl
 Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB)
 Abteilung Technik der Aufbereitung, Lagerung und Konservierung
 Max-Eyth-Allee 100
 14469 Potsdam-Bornim
 Tel.: +49/(0)331/5699-917
 Fax: +49/(0)331/5699-849
 E-Mail: rschmersahl@atb-potsdam.de