

Übersicht und Einführung zur Technik der Brennstoffzelle und erste Betriebserfahrungen

Prof. Dr. Jürgen Garche, Dr. Ludwig Jörissen
Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg,
Geschäftsbereich Elektrochemische Energiespeicherung und Energiewandlung,
Helmholtzstr. 8, 89081 Ulm,
<http://www.zsw-bw.de>, juergen.garche@zsw-bw.de

1 Einleitung

Die Brennstoffzelle ist ein elektrochemischer Reaktor, der Wasserstoff und Luft durch „indirekte Verbrennung“ in Wasser unter Freisetzung von Energie in Form von elektrischem Strom und Wärme umsetzt.

Die „indirekte Verbrennung“ erfolgt dadurch, daß die Elektronen nicht wie bei der direkten Verbrennung direkt vom Wasserstoff auf den Sauerstoff, sondern über eine elektrische Last übergehen.

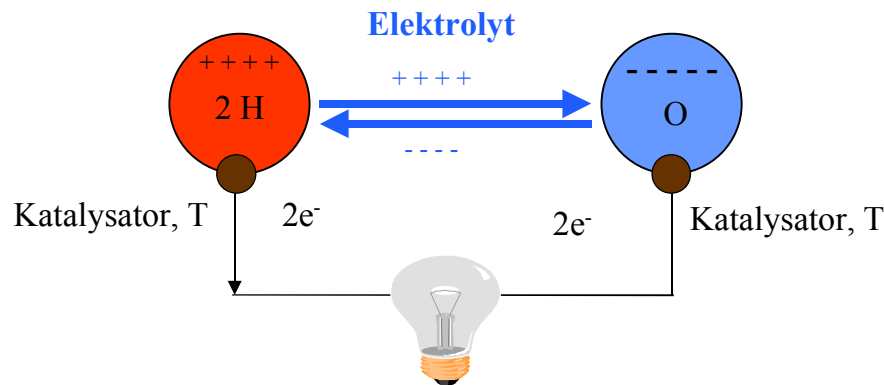


Abb. 1: Arbeitsschema einer Brennstoffzelle

Mit Hilfe von Edelmetallkatalysatoren können dem Wasserstoff Elektronen entnommen und dem Sauerstoff zugeführt werden. Aufgrund der Reaktionsbeschleunigung kann man bei sehr hohen Temperaturen zumindestens auf Edelmetallkatalysatoren verzichten.

Ein weiteres wichtiges Bauteil der Brennstoffzelle ist, wie Abb. 1 zeigt, der Elektrolyt, der den elektrischen Ausgleich der durch die Elektronenverschiebung auftretenden Aufladungen der Reaktanten (Wasserstoff, Sauerstoff) vornimmt. Von den vor allem aus der Batterieentwicklung bekannten Elektrolyten, erfüllen nur wenige die Forderung einer hohen Leitfähigkeit von ca. 1 S cm^{-1} (siehe Abb. 2): Laugen (OH^-) und Säuren (H^+) ab etwa $50 \text{ }^\circ\text{C}$ und Karbonatschmelzen (CO_3^{2-}) sowie Festionenleiter (O^-) bei ca. $500 \text{ }^\circ\text{C}$ bzw. $1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Genau diese Elektrolyte kommen auch in den herkömmlichen Brennstoffzellen zum Einsatz (siehe Tabelle 1).

Die folgende Abb. 3 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Brennstoffzelle am Beispiel der PEMFC.

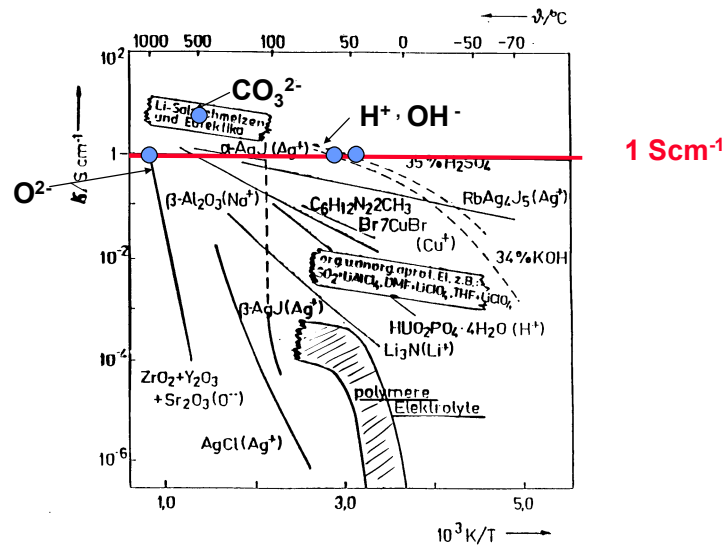


Abb. 2: Spezifische ionische Leitfähigkeit vs. reziproker Temperatur

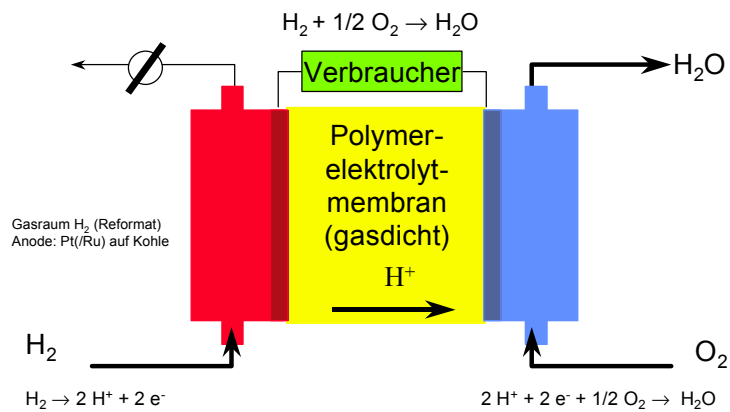


Abb. 3: Prinzipieller Aufbau einer PEMFC

Tabelle 1: Brennstoffzellentypen:

Elektrolyt-typ	Elektrolyt	Bezeichnung	Arbeitstemperatur
Laugen	KOH –Elektrolyt	Alkalische Brennstoffzelle (AFC)	80 °C
Säuren	H ₃ PO ₄ -Elektrolyt	Phosphorsaure Brennstoffzelle (PAFC)	200 °C
	Sulfonsäure im Polymer gebunden	- Polymerelektrolytmembran-BZ (PEMFC) - Direktmethanol-Brennstoffzelle (DMFC)	80 °C
Schmelzen	K ₂ CO ₃ -Li ₂ CO ₃	Schmelzflüssige Karbonat-BZ (MCFC)	600 °C
Fest-Elektrolyt	ZrO ₂ (Y ₂ O ₃)	Festoxidionen-Brennstoffzelle(SOFC)	900 °C

Die Brennstoffzellenanwendungen teilt man in zwei große Gruppen ein, in Anwendungen mit schnellem Lastwechsel und Anwendungen mit langsamen Lastwechsel:

Schnelle Lastwechsel: - Mobile Anwendungen
 - Portable Anwendungen
 - Hausenergieanwendungen

Langsame Lastwechsel: - Blockheizkraftwerke
 - Grundlastkraftwerke.

Für die schnellen Lastwechsel sind besonders die PEM-Brennstoffzellen geeignet, da sie die, mit dem Lastwechsel verbundenen Temperaturschwankungen, in der Regel besser kompensieren können, als die PAFC, MCFC und SOFC, die daher vorwiegend für Anwendungen mit geringem Lastwechsel geeignet sind.

2 Anforderungen an stationäre Brennstoffzellensysteme

Ein Vergleich der elektrischen Wirkungsgrade von Brennstoffzellen mit denen anderer Wandlertechnologien in Abhängigkeit von der Anlagenleistung zeigt **Abb. 4**. Brennstoffzellen können für die Stromerzeugung prinzipiell vom sub-kW bis in den 100 MW-Bereich eingesetzt werden.

Man kann dabei folgende Einsatzfelder prinzipiell unterscheiden sind:

- Hausenergieversorgungssysteme mit einer elektrischen Leistung von bis zu 5 kW.
- Blockheizkraftwerke für die Versorgung von Wohngebieten oder Industrieanlagen mit einer elektrischen Leistung von 50 bis 300 kW
- Kraftwerke im MW-Bereich

Für Leistungen unterhalb 1 MW bieten sich Niedertemperatur- und Hochtemperatursysteme gleichermaßen an. Hochtemperaturtechnologien sind besser für Kraftwerke der MW-Klasse geeignet, die vorwiegend im Dauerbetrieb gefahren werden.

Niedertemperaturbrennstoffzellen sind besonders vorteilhaft für Einsatzfelder, die ein häufiges An- und Abfahren der Brennstoffzelle erfordern bzw. solchen, die schnellen, stark schwankenden Lastprofilen unterworfen sind. Hochtemperaturbrennstoffzellen benötigen längere Anheiz- und Abkühlzeiten und sind daher besonders effizient in Anwendungen mit eher konstantem Lastgang.

Neben der Forderung nach vertretbaren Investitionskosten müssen stationäre Brennstoffzellensysteme vor allem den folgenden Kriterien genügen:

- Langlebigkeit (> 40.000 Betriebsstunden),
- Wartungsarmut
- Schadstoffarmut auch bei Einsatz fossiler Primärenergiequellen,
- hoher Verfügbarkeit
- und hoher Effizienz

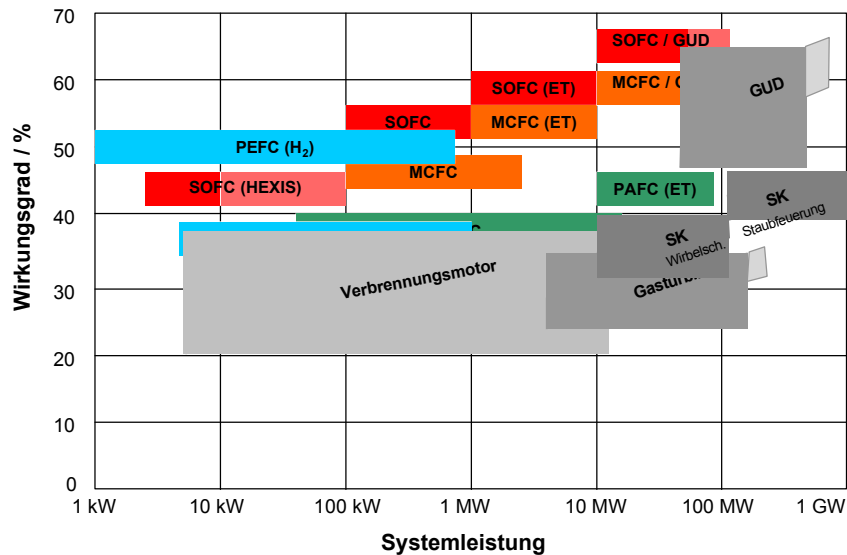


Abb. 4: Vergleich des elektrischen Wirkungsgrades unterschiedlicher Technologien zur Elektrizitätserzeugung

Für Brennstoffzellenanlagen hoher Leistung ist ein hoher elektrischer Wirkungsgrad von besonderer Bedeutung, da eine vollständige Nutzung der Abwärme ähnlich wie bei herkömmlichen Kraftwerken nur schwierig zu bewerkstelligen ist. Aus diesem Grund wird versucht, den Wirkungsgrad von Hochtemperaturbrennstoffzellen durch Einsatz einer oder auch zweier Turbinen, die die heißen Abgase nutzen, zu steigern.

Bei Systemen niedriger Leistung ist eine kombinierte Nutzung von elektrischer Energie und Wärme vorteilhaft. Dies gilt besonders für die dezentrale Energieversorgung von Häusern. Ein wesentlicher Vorteil der dezentralen Energieversorgung mit BZ-Systemen ist der erhöhte Gesamtwirkungsgrad und die damit verbundene Reduktion der CO₂-Emissionen (Abb. 4) einerseits sowie die verringerten bzw. gänzlich vermiedenen Emissionen von Stickoxiden, Schwefeldioxid und Ruß (Abb. 5) andererseits. Gerade in Anbetracht der bekannten Auswirkungen der CO₂-Emissionen auf das Klima (Treibhauseffekt) und gesundheitlicher Folgeschäden durch lokale Schadstoffe bietet sich die Brennstoffzelle als geeignete Technologie an.

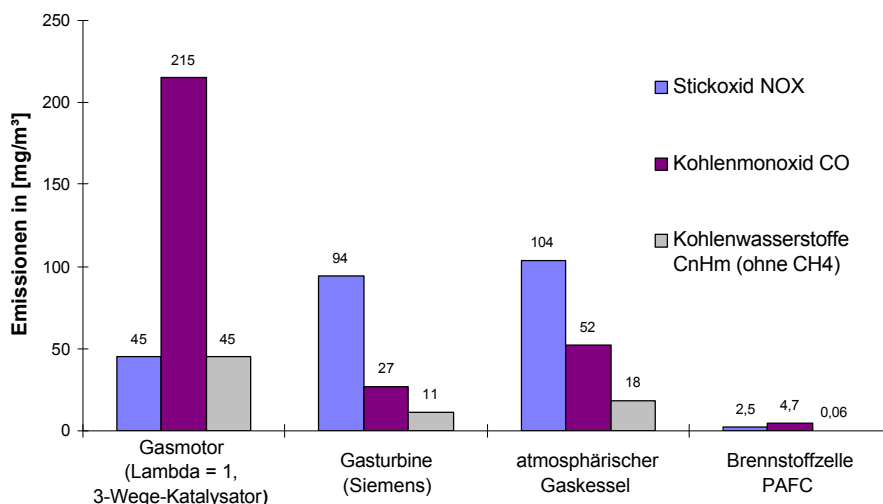


Abb. 5: Emissionen klassischer Luftschadstoffe [1].

Abb. 6 zeigt ein vereinfachtes Energieflußdiagramm der kombinierten Strom- und Wärmeerzeugung mit Brennstoffzellen im Vergleich zur gegenwärtigen Situation.

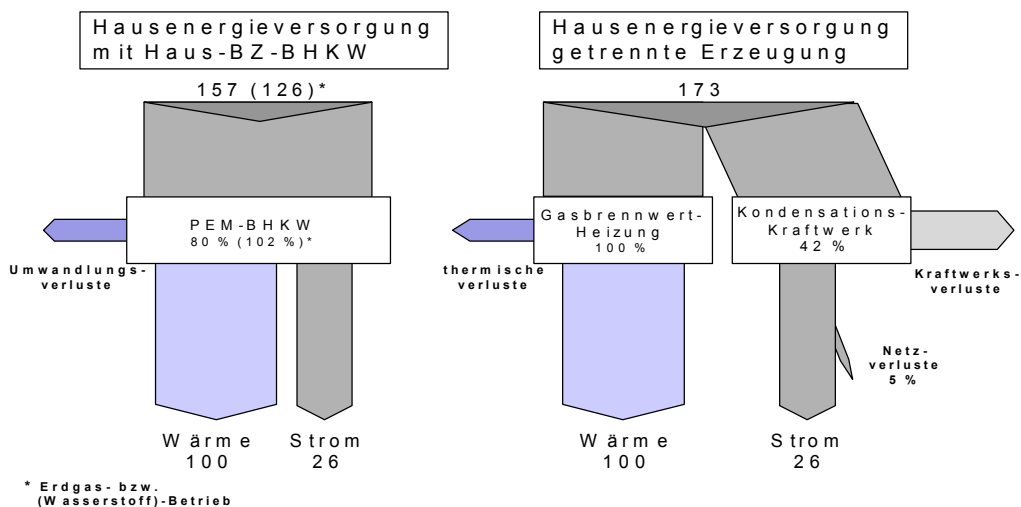


Abb. 6: Vereinfachtes Sankey-Diagramm einer erdgasbasierten Hausenergieversorgung

Der hohe Wirkungsgrad und die Vermeidung von Verlusten bei der Stromverteilung führt zu einer Minimierung des Primärenergieeinsatzes und damit zu einer Verringerung der CO₂-Emissionen.

3 Brennstoffzellen für die Hausenergieversorgung

Prinzipiell ist eine Hausenergieversorgung (Kraft und Wärme) mit Brennstoffzellen bereits heute möglich. Das folgende Bild zeigt solch Konzept schematisch für ein Einfamilienhaus nach der Wärmeschutzverordnung 95.

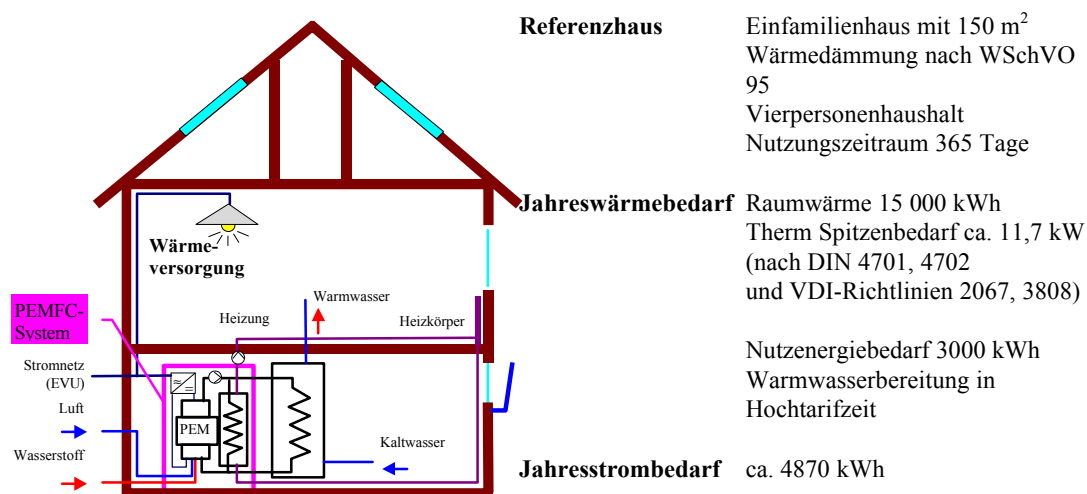


Abb. 7: Hausenergieversorgung mit PEM-Brennstoffzellen [2]

In Deutschland gibt es z.Zt. etwa 32 Mill. Wohnungen, die sich auf 9,2 Mio. Einfamilien-, 3,8 Mio. Zweifamilien- und 2,7 Mio. Mehrfamilienhäuser verteilen. Der Jahresbedarf an Räumwärme wird wesentlich durch den Altbaubestand bestimmt, er beträgt derzeit im Durchschnitt ca. 250 kWh/m²a. Im Neubaubereich begrenzt die Wärmeschutzverordnung den jährlichen Heizenergiebedarf auf 100 kWh/m². Werte bei Niedrigenergiehäusern von ca. 60 kWh/m², bei Ultra-Niedrigenergiehäusern von ca. 30 kWh/m² und bei Null Heizenergiehäuser (Null fossile Energieträger) von ca. 20 kWh/m² sind möglich [3]. Generell kann man daher davon ausgehen, daß zukünftig der spezifische Wärmebedarf von Gebäuden erheblich sinkt, während der spezifische Elektrizitätsbedarf etwa konstant bleiben wird, d.h., Verhältnis von Strom- und Wärmeerzeugung (Stromkennzahl) für Hausenergieversorgungsanlagen muß ansteigen.

Der Einsatz der KWK zur Versorgung von Wohngebäuden erfordert somit in Zukunft Systeme mit hoher Stromkennzahl. Brennstoffzellenkraftwerke erreichen eine Stromkennzahl von 0,8 bis 1, während Motor- bzw. Gasturbinenaggregate typischerweise eine Stromkennzahl von 0,3 bis 0,5 aufweisen.

Problematisch sind jedoch für die KWK die jahreszeitlichen Schwankungen im Wärmebedarf und auch die tageszeitlichen Bedarfsschwankungen im Winter, die in den folgenden Abbildungen gezeigt werden.

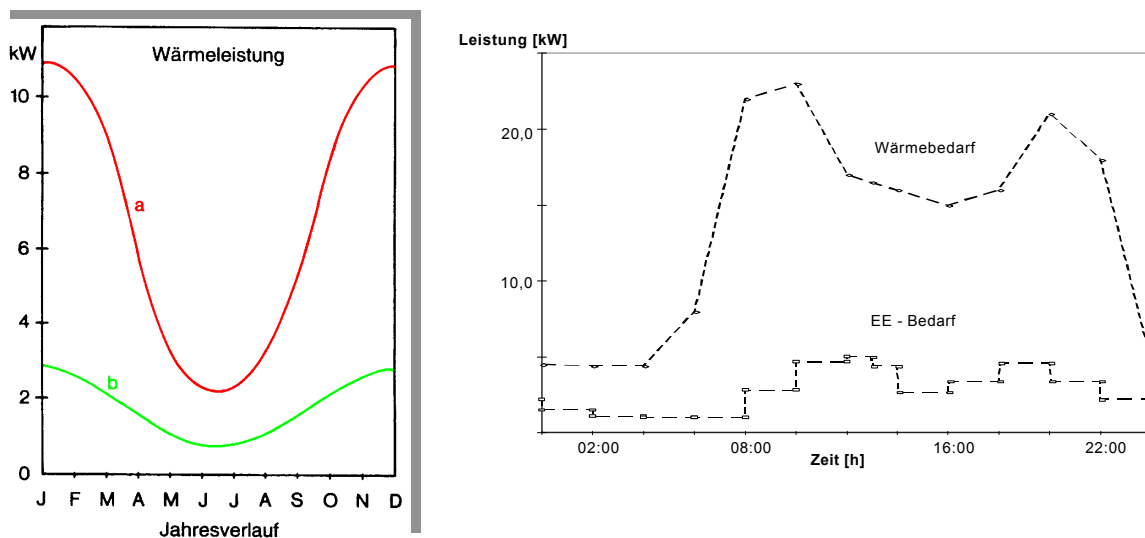


Abb. 8: Wärmebedarf konventionelles (a) und Niedrigenergie(b)-Einfamilienhaus vs. Jahreszeit
 Abb. 9: Wärme- und Elektroenergiebedarf eines Zweifamilienhaus an einem Wintertag

Der Einsatz der KWK zur dezentralen Hausenergieversorgung verlangt Technologien mit folgenden Eigenschaften:

- Kleine Einheiten (1...10 kW_{el})
- Schnelles Anfahren bei Raumtemperatur
- Schneller Lastwechsel
- Hohe Stromkennzahl
- Akzeptables Temperaturniveau für die Wärmenutzung
- Effiziente, thermisch integrierte Brenngasbereitstellung
- Minimale Verluste durch Nebenaggregate
- Niedrige Kosten

Die Wärmeversorgung von Einzelgebäuden erfordert einen sehr variablen Betrieb entsprechend den Bedürfnissen der Benutzer. Diese Aufgabe kann am besten von der PEFC erfüllt werden. Darüber hinaus kann sie in sehr kurzer Zeit von Raumtemperatur starten und auch jederzeit ohne Probleme abgeschaltet werden. Die Betriebstemperatur der PEFC von ca. 70 °C erlaubt den Betrieb eines Niedertemperaturheizsystems, wie es in modernen Anlagen heute fast ausschließlich eingesetzt wird. Die PEFC eignet sich somit besonders zur integrierten Energieversorgung von Einzelhaushalten.

Neben der PEFC wird auch der Einsatz kleiner SOFC zur Gebäudeversorgung speziell von der Firma SULZER untersucht. Dieses Hochtemperatursystem hat den Vorteil der Direktverarbeitung von Erdgas und den Nachteil eines weniger dynamischen Betriebs.

Der günstigste Brennstoff für die Brennstoffzellen ist der Wasserstoff. Da er territorial nicht überall zur Verfügung steht, ist das Erdgas (hauptsächlich CH₄) als chemischer Wasserstoffträger eine Alternative. Es muß jedoch zuvor bei etwa 800 °C in Wasserstoff umgewandelt werden. Die dazu notwendige Gasaufbereitung zeigt die folgende Abbildung.

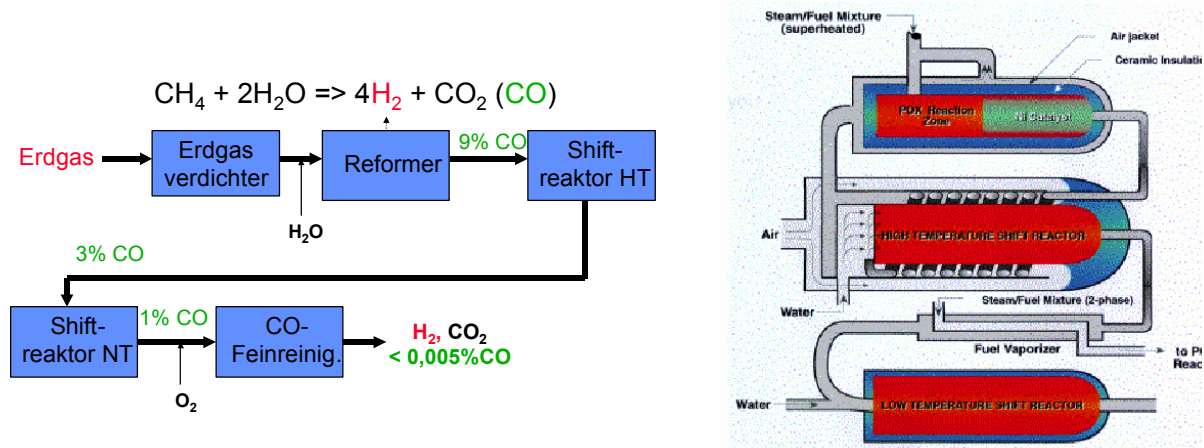


Abb. 10: Erdgasaufarbeitung schematisch

Es werden auch Möglichkeiten diskutiert, diese Gasaufbereitungsanlagen z.B. in einer Siedlung zentral anzuordnen.

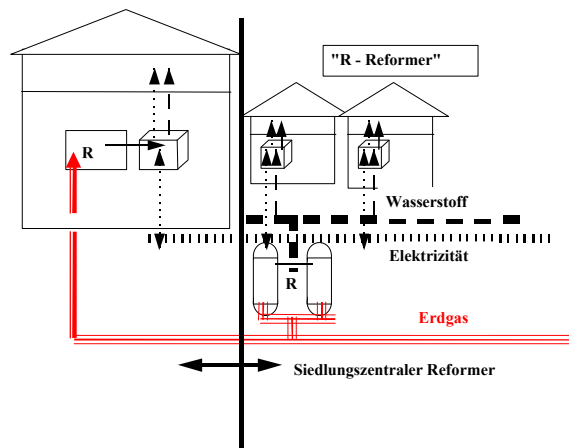


Abb. 11: BZ-Hausenergieanlagen mit zentralem und lokalem Reformier

Die großen Energieversorger versuchen mit der Zusammenschaltung solcher individuellen Anlagen ein virtuelles Kraftwerk aufzubauen, das sie z.B. auch zum Spitzenlastausgleich nutzen können.

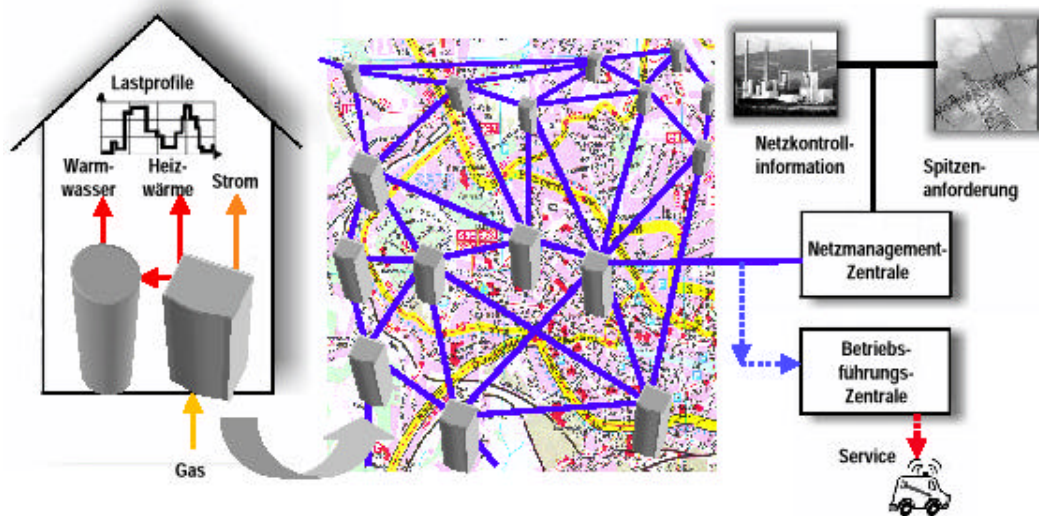


Abb. 12: Schema eines virtuellen Kraftwerks[4]

Aufgrund der vom Markt für die BZ-Hausenergieanlagen akzeptierten Kosten, die bei ca. 1.000 – 1.500 €/kW liegen (Vergleich BZ-PkW: 50 €/kW), wird mit einer Markteinführung etwa um 2005 gerechnet. Die Marktchancen zeigt die folgende Abbildung.

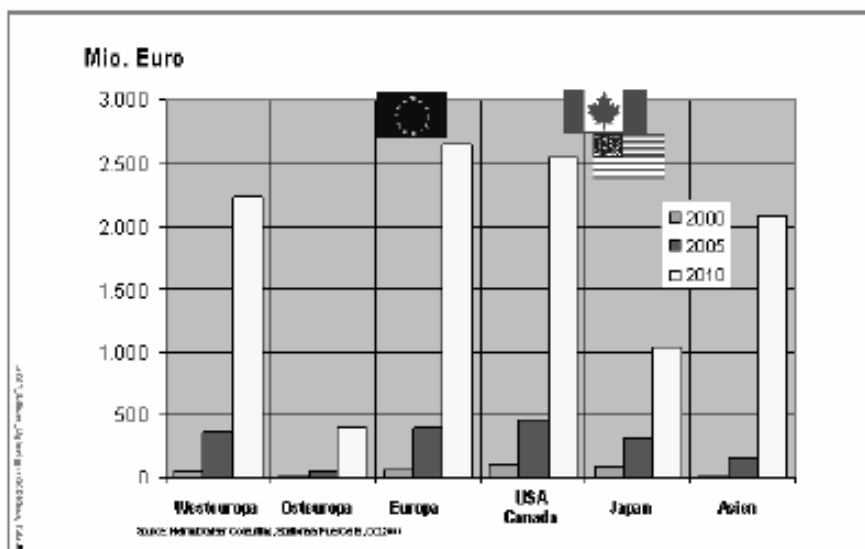


Abb. 13: Geschätzter Markt für Brennstoffzellen-Hausenergieanlagen [4]

4 Erste Betriebserfahrungen

Erste Demoanlagen in Deutschland wurden von industrienahen F&E-Instituten entwickelt.



Abb. 14: Erdgasbetriebene 5 kW PEMFC-Hausenergieanlage an der FH Ulm entwickelt vom ZSW Ulm und dem FhG ISE Freiburg

Kommerziell entwickeln die folgenden Firmen BZ-Anlagen für die Hausenergieversorgung:

Basis PEMFC

- Vaillant in Zusammenarbeit mit Plug Power (USA)
- Hamburger Gasconsult in Zusammenarbeit mit DAIS (USA)
- Viessmann u.a. in Zusammenarbeit mit ISE Freiburg und ZSW Ulm
- Buderus in Zusammenarbeit mit IFC (USA)
- Nuvera (I) eine Firmengründung aus De Nora Fuel Cells (I) und Epyx Corporation (USA)

Basis SOFC

- Sulzer Hexis (CH)
- EBZ Dresden

Vaillant

Vaillant war die erste deutsche Firma, die begann, BZ-Hausenergieversorgungsgeräte zu entwickeln. Zusammen mit dem Lizenzgeber und Entwicklungspartner Plug Power (USA) wurden bis 2001 über 140.000 Stunden (kumuliert) Betriebserfahrung mit Niederdruck-PEM-Systemen gewonnen. Der erstmalige Test mehrerer BZHs in Wohnhäusern erfolgt ab 2001, anschließend soll ein Test mit über 50 Systemen erfolgen, die erstmalig als virtuelles Kraftwerk (siehe auch Abb. 12) zusammengeschlossen werden.

Im Laufe der Entwicklung konnten Baugröße und Gewicht der Anlagen beträchtlich reduziert werden (siehe Abb. 15)



Abb. 15: Größen der Vaillant-Anlage[4]

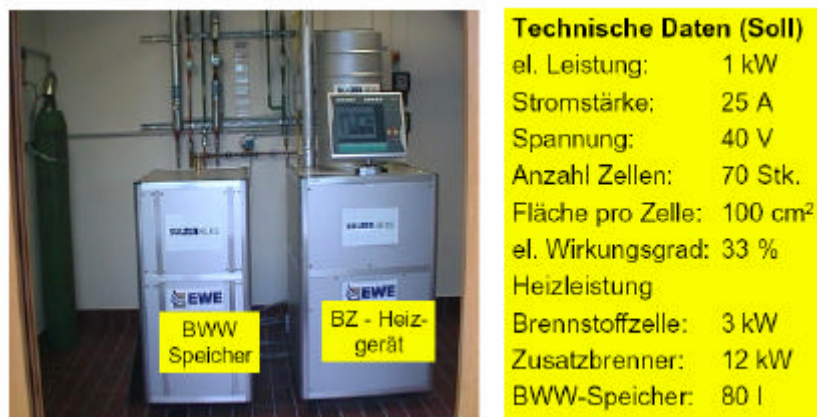
Die Zielgrößen ihrer Entwicklung sind Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Zielgrößen der BZ-Anlage der Firma Vaillant [4]

Technische Daten (Zielwerte)	
● Elektrische Leistung	1 - 4,6 kW _{el} netzparallel
● Thermische Leistung	1,5 - 7 kW _{th} plus ca. 25-50kW _{th}
● Einsatz	Mehrfamilienhaus, Kleingewerbe
● Elektrischer Netz-Wirkungsgrad	> 35 %
● Gesamtwirkungsgrad	> 80 %
● Brennstoff	Erdgas
● Lebensdauer des Systems	15 Jahre, 80.000h
● Wartungsintervall	alle 2 Jahre (Inspektion jedes Jahr)
● Vor- / Rücklauftemperatur max.	70 / 55 °C
● Abgastemperatur max.	75 °C

Sulzer Hexis

Die schweizer Firma Sulzer Hexis hat bereits zu Beginn der 90er Jahre mit der Entwicklung von SOFC-Hausenergieanlagen begonnen und bisher 80 Mill. CHF in dieses Projekt investiert. Ihr Anlagensystem zeigt die folgende Abbildung:



Technische Daten (Soll)	
el. Leistung:	1 kW
Stromstärke:	25 A
Spannung:	40 V
Anzahl Zellen:	70 Stk.
Fläche pro Zelle:	100 cm ²
el. Wirkungsgrad:	33 %
Heizleistung	
Brennstoffzelle:	3 kW
Zusatzbrenner:	12 kW
BWW-Speicher:	80 l

Abb. 16: Zielgröße BZ-Anlage der Firma Sulzer Hexis [5]

Die Zeitschiene ihrer Entwicklung zeigt die folgende Abbildung.

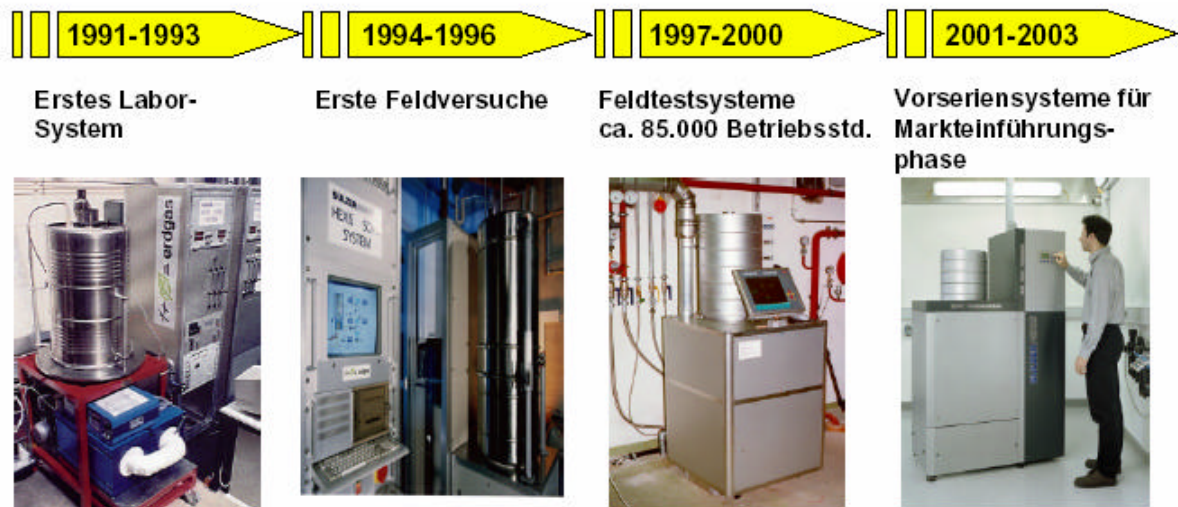


Abb. 17: Entwicklungszeitschiene der Firma Sulzer Hexis [5]

Mit einer Reihe von Feldversuchspartnern, wie Sulzer Infra (CH), EWE Oldenburg, Thyssengas, Tokyo Gas, Gasunie (NL) und Gas de Euskadi (E) wurden bis 10/2001 mehr als 85.000 Betriebsstunden erreicht, was etwa 50.000 kWh entspricht. Die maximale unterbrechungsfreie Laufzeit einer Anlage betrug 8.000 h. Die folgende Abbildung zeigt Tagesgangkurven, die bei Thyssengas aufgenommen wurden. Der elektrische Wirkungsgrad betrug in diesem Fall max. etwa 30 %. Generell konnte man aber 35 % erreichen. Probleme im Feldversuch traten vor allem in der Peripherie auf, wie z.B. durch Überhitzung bei der Elektronik und dem Lüfter, Lastabwurf beim Inverter oder Silikatablagerung bei der Wasseraufbereitung.

Tagesgangkurven Thyssengas, übereinandergelagerte Verläufe:

10.04.2001 von 07.00 Uhr bis 11.04.2001 um 07.00 Uhr
 (2): 23.04.2001 von 07.00 Uhr bis 24.04.2001 um 07.00 Uhr

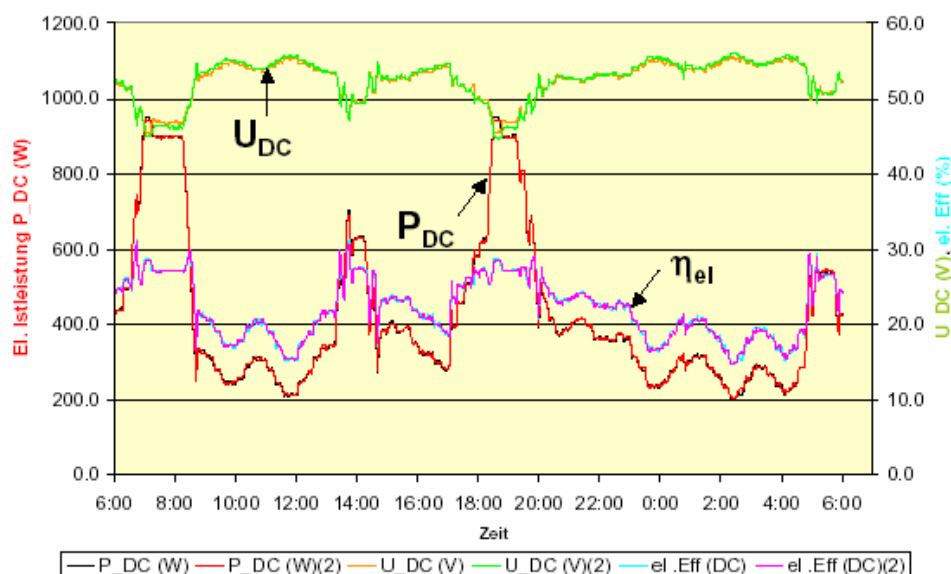


Abb. 18: Tagesgangkurven der Sulzeranlage aufgenommen bei Thyssengas [5]

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die KWK ermöglicht eine Minimierung des Primärenergiebedarfes und schont somit die begrenzten Ressourcen fossiler Energieträger. Auch Brennstoffzellentechnologien sind dafür einsetzbar. Sie weisen im KWK-Einsatz folgende Vorteile auf:

- Hohe, durch Betriebsweise variable Stromkennzahl
- Hoher Wirkungsgrad bei Teillast
- Niedrige Emissionen
- Reduzierte Geräusentwicklung

Der zum Brennstoffzellenbetrieb benötigte Wasserstoff ist aus fossilen und regenerativen Quellen zugänglich. Dies ermöglicht einen graduellen Übergang von fossilen Energieträgern hin zu einer nachhaltigen Energieversorgung mit erneuerbaren Energiequellen.

Zur Zeit bietet sich der Einsatz von Erdgas an, das jedoch für Niedertemperatur-Brennstoffzellen reformiert und gereinigt werden muß. Hochtemperaturbrennstoffzellen sind prinzipiell in der Lage Kohlenwasserstoffe mit geringem Aufwand umzusetzen.

Der Einsatz selbst kleiner Einheiten auf Basis der PEMFC und der SOFC für die integrierte Energieversorgung von Haushalten ist technisch und unter bestimmten Randbedingungen auch wirtschaftlich durchführbar. Die Wirtschaftlichkeit für die Hausenergieversorgung hängt neben den Investitionskosten, bei denen vor allem für die PEM-Brennstoffzelle eine drastische Kostenreduktion erwartet wird, hauptsächlich von den Brennstoff-, Wärme- und Elektrizitätskosten vor Ort ab. Dezentrale Energieversorgungssysteme mit Brennstoffzellen werden in den nächsten Jahren den Weg in den Energiemarkt finden.

6 Literatur

-
- [1] U. Bünger, persönliche Mitteilung
 - [2] T. Moser, Entwicklungsstand und Einsatzmöglichkeiten der PEM- Brennstoffzelle, Tagungsband „Brennstoffzellen im Energiemarkt“, Forum für Zukunftsenergien, Köln, März 1996, S. 107-125
 - [3] BINE Projekt-Info-Service: Fertighäuser mit reduziertem Heizwärmebedarf, Nr. 10/1998
 - [4] K. Klinder, Vortrag Bayern Regenerativ Juni 2001, siehe auch www.vaillant.com
 - [5] H. Raak, 5. Europaforum – Jahrestagung Brennstoffzellen, Düsseldorf 28./29.11.01