

# Brennstoffzellen im Einsatz als dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung

Dr. Klaus Heikrodt

Viessmann Werke  
GmbH & Co KG  
drh@viessmann.com

Dr. Christof Wittwer

Fraunhofer ISE  
christof.wittwer@ise.fhg.de

Dr. Joachim Scholta

ZSW  
joachim.scholta@zsw-bw.de

## Einleitung

Die vom Menschen verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen führen offensichtlich zu einer Klimabeeinflussung. Aus diesem Grund hat die Bundesregierung beschlossen, diese Emissionen bis 2005 um 25% gegenüber dem Stand von 1990 zu reduzieren. Diese Zielsetzung, ist ohne maßgebliche Mitwirkung der Hausenergietechnik nicht zu erreichen. Im Vergleich zu anderen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen weist nach Voruntersuchungen die erdgasbetriebene Niedertemperatur-Brennstoffzelle das größte Potenzial auf, dezentral und im kleinem Leistungsbereich mit hohem elektrischen Wirkungsgrad, die elektrische Energieversorgung im Haushalt zu unterstützen und die Wärmeerzeugung mit äußerst niedrigen Schadgasemissionen zu übernehmen.

Die Viessmann Werke arbeiten seit 2000 an der Entwicklung einer Brennstoffzellenanlage, im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wissenschaft und Arbeit (BMWA) geförderten Verbundvorhabens [1]. Die Schwerpunkte der Entwicklungsarbeiten bei Viessmann liegen in der Entwicklung des Gaserzeugungssystems, des Brennstoffzellenstacks und der Senkung der bisher hohen Systemkosten, sowie der Steigerung von Lebensdauer und Zuverlässigkeit. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die Entwicklung mehrerer Laborgeräte durchgeführt. Derzeit laufen Lebensdaueruntersuchungen an Komponenten und Gesamtanlagen mit Blick auf erste Anwendungsversuche in 2005.

## Versorgung von Ein- und Zweifamilienhäusern

Im Jahr 2000 umfasste die Wohnbevölkerung in Deutschland 82,2 Mio. Menschen, die in einem Bestand von 38,4 Mio. Wohnung lebten. Die Gebäudestruktur weist in 2001 10,24 Mio. Einfamilienhäuser, 3,37 Mio. Zweifamilienhäuser und 1,97 Mio. Mehrfamilienhäuser auf [2]. Anlagenanzahl und Energieverbrauch machen den Markt der Ein- und Zweifamilienhäuser sowohl im Bestand als auch im Neubau interessant, er ist aber hinsichtlich der Anforderungen sehr schwierig. Abb. 1 zeigt das Anlagenschema einer Brennstoffzellen-Hausenergieversorgungsanlage.

Die Brennstoffzelle muss nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten ausgelegt und betrieben werden. Die Wirtschaftlichkeit von Brennstoffzellenanlagen wird durch das Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz und die ökologische Steuerreform unterstützt [3,4]. Danach erhalten Betreiber von KWK-Anlagen mit einer elektrischen Leistung unter 2000 kW und einem Jahresnutzungsgrad der Anlage über 60% eine Befreiung von der Öko-Mineralölsteuer von 0,366 Ct/kWh (H<sub>0</sub>)<sup>1</sup> bei Erdgas und zusätzlich bei einem Jahres- bzw. Monatsnutzungsgrad von mindestens 70% auch von der bisherigen Mineralölsteuer von 0,184 Ct/kWh (H<sub>0</sub>) bei Erdgas. Aus Abb. 2 [4] lässt sich auch der ökologische Nutzen einer KWK-Anlage erkennen. Im Vergleich zur Stromerzeugung aus Kohlekraftwerken und Wärmeerzeugung mit einem Heizöl-Kessel kann mit einer KWK-Anlage 36% Primärenergie und 58% CO<sub>2</sub> eingespart werden.

Der jährliche Stromverbrauch von Einfamilienhäusern ist abhängig von verschiedenen Faktoren wie Personenzahl im Haushalt, Art und Fläche und elektrischer Ausstattung.

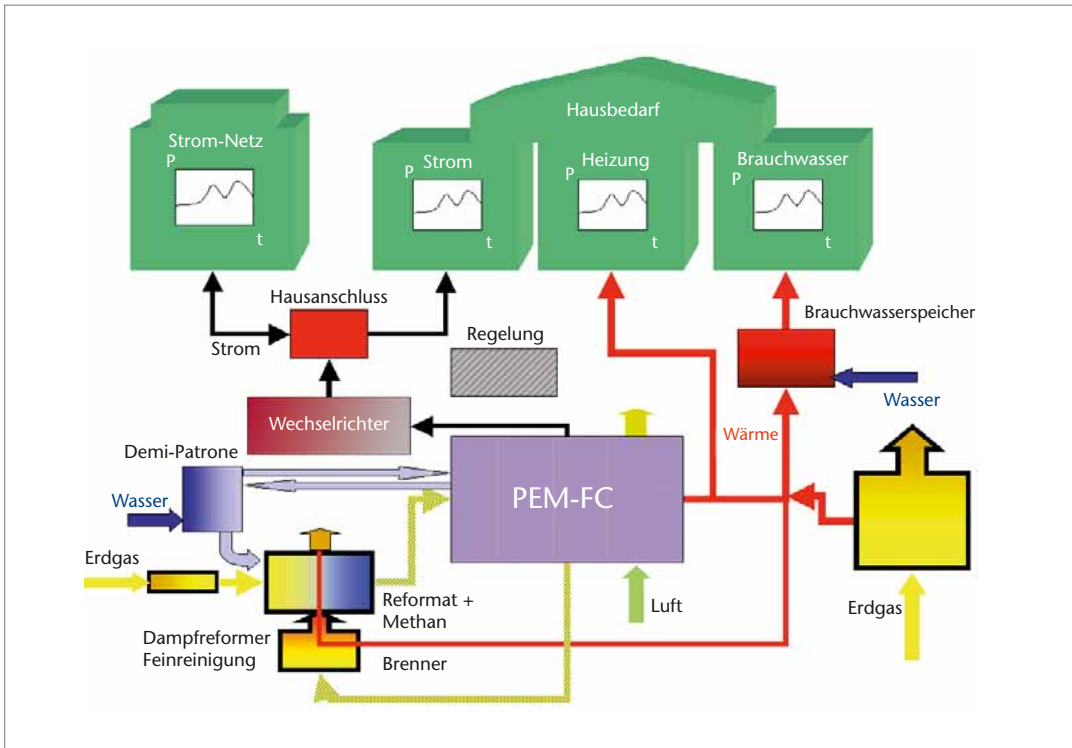


Abbildung 1  
Anlagenschema  
einer Brennstoffzellen-  
Hausenergieversor-  
gungsanlage

Der Warmwasserbedarf wird in einer VDI-Richtlinie [5] behandelt; näheres zum Strom- und Wärmebedarf kann in einer Broschüre über erdgasbetriebene Brennstoffzellen-Hausanlagen [1] nachgelesen werden. Aus diesen Überlegungen resultiert die Auslegung der Brennstoffzellenanlage. Die elektrische Nettoleistung wurde mit 2 kW festgelegt, woraus sich eine thermische Leistung von 5 kW ergibt.

Die elektrische Leistung ist mit 2 kW für ein Einfamilienhaus eher hoch veranschlagt, der gute Teillastwirkungsgrad der Brennstoffzellen und eine Modulation von 1:5 sprechen für diese Auslegung. Die Auslegungsdaten sind in Abb. 3 zusammengefasst.

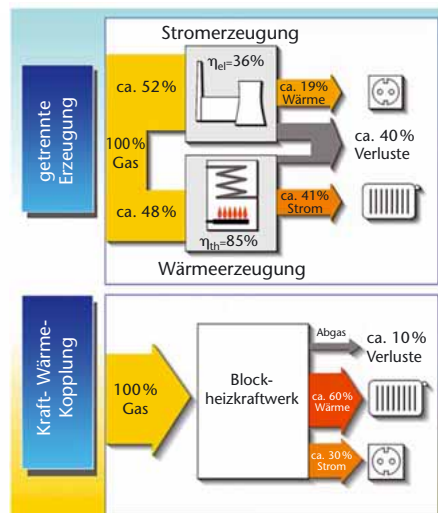
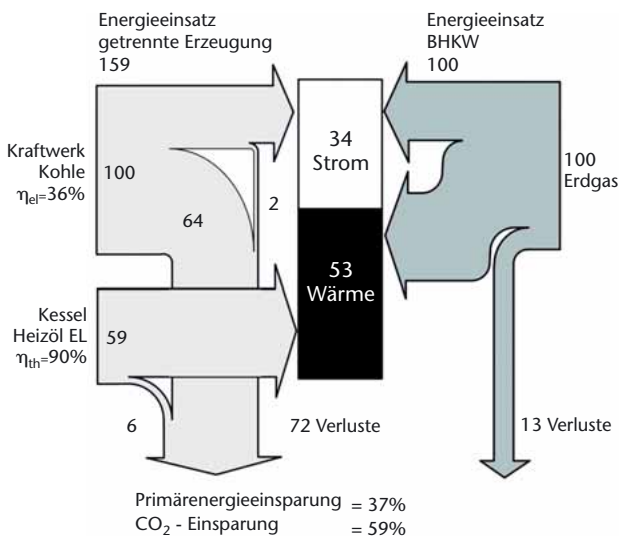


Abbildung 2  
Getrennte  
Energieerzeugung  
im Vergleich zur  
Kraft-Wärme-Kopplung

Abbildung 3  
Auslegungsdaten  
einer Brennstoff-  
zellen-Hausanlage



**Erzeugung von elektrischer Energie und Wärme zur Hausheizung und Trinkwassererwärmung in Ein- und Mehrfamilienhäusern**

**Brennstoffzelle**

<b>PEMFC</b>	2 kW <sub>el</sub> Netto
Modulationsgrad	1:5
Druck	Normaldruck
Kathode	Betrieb mit unbefeuchteter Luft
CO-Toleranz	< 20 ppm Betrieb ohne air bleed
Auslegungsspannung	> 650 mV bei 0,6 A/cm <sup>2</sup>
Wasserstoffumsatz	> 80%
Luftumsatz	> 60%

**Gesamtanlage**

Heizmitteltemperaturen	bis 75 °C
Ges. Wirkungsgrad	> 90% Niedertemperatur-Heizkreis
Elektr. Wirkungsgrad	> 32%
Lebensdauer	> 40.000 h
Geringer Wartungsaufwand	
Kaltstartzeit (20 °C)	< 15 min
Thermische Leistung	3-5 kW
Gewicht	120 kg
Abmaße	60 * 70 * 100 (cm)
Wärmespitzenabdeckung	Zusatzgerät

## Stand der Entwicklung am Beispiel der SOFA 3-Anlage

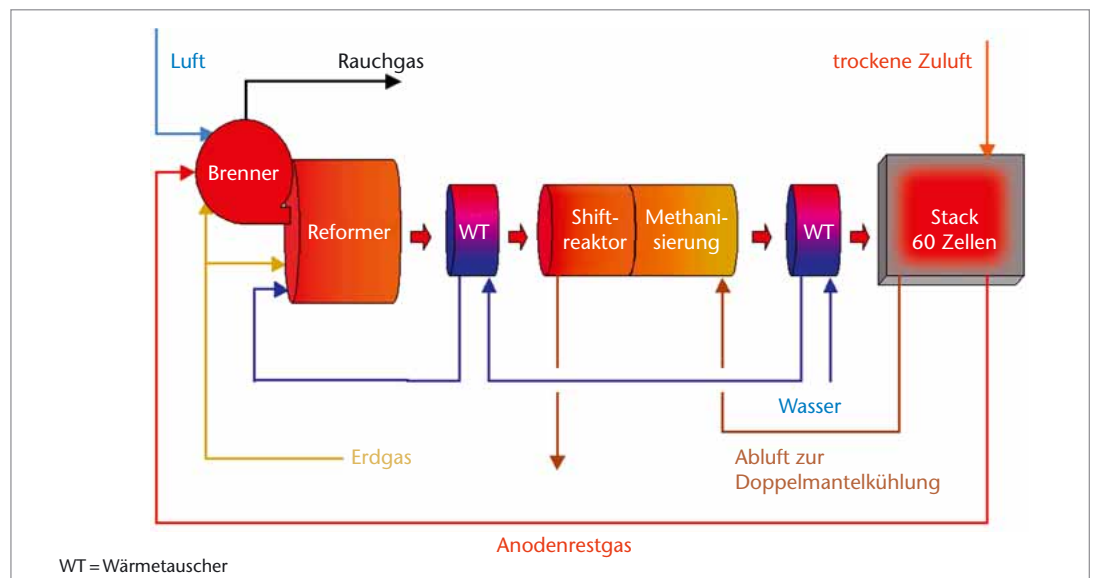
### Gaserzeugung

Für die Gaserzeugung wurde aus energetischen und Gasqualitätsgründen das Konzept der Dampfreformierung gewählt. Nach der Reformierung erfolgt eine zweistufige Gasreinigung, in der das verbleibende Kohlenmonoxid (CO) in einer sogenannten chemischen Shiftreaktion zu CO<sub>2</sub> beziehungsweise zu CH<sub>4</sub> (Methan)

umgewandelt wird. Dieses Konzept ermöglicht den Verzicht auf zwischengeschaltete Wärmetauscher in der Gasreinigung. Die in der SOFA 3-Anlage realisierte Gaserzeugung ist in *Abb. 4* wiedergegeben.

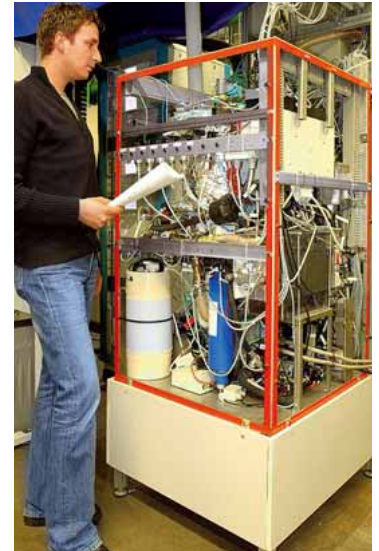
Die Entwicklungsschritte sind in *Abb. 5* dargestellt. Der erste Prototyp SOFA 1 ist mit einer Gaserzeugung bestehend aus Reformer, Hochtemperatur-Shift, Niedertemperatur-Shift, selektive Oxidation und zwei umluftbefeuchteten Brennstoffzellen-Stapeln ausgeführt.

Abbildung 4  
Gaserzeugung in der  
SOFA 3-Anlage



Der dritte Prototyp SOFA 3 hat eine Gaserzeugung nach *Abb. 4* und einen Stack mit unbefeuchteter Kathode. Größe und apparativer Aufwand sind wie in *Abb. 5* zu sehen durch diese Maßnahmen entschieden reduziert worden.

Im Zuge der angestrebten Lebensdauer von 40.000 h wurden Untersuchungen zum Einfluss von Schadgasen auf die Brennstoffzellen-Leistung durchgeführt. Hierbei ergab sich eine relative Unempfindlichkeit der Zelle auf Belastungen mit Ethylen, andererseits eine sehr hohe Empfindlichkeit auf Schwefelwasserstoff, welcher vollständig aus dem Anodengas entfernt werden muss. Dieses erfolgt über eine in die Gasaufbereitung integrierte Entschwefelungseinheit.



### Brennstoffzellen-Stapel

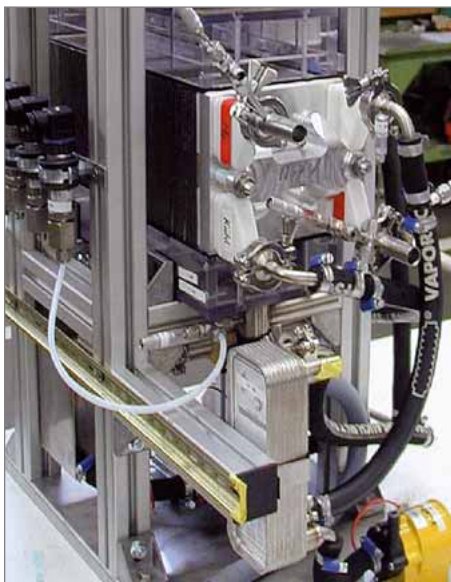
Die Brennstoffzellen-Stapelentwicklung führte von den zwei Stapeln – in der technischen Umgangssprache als Stacks bezeichnet – mit Umluftbefeuchtung und 140 Zellen auf einen Stack mit 60 Zellen, der ohne zusätzliche Kathodenbefeuchtung betrieben werden kann.

Beide Prototypen lieferten 2 kW elektrische Leistung. Der Luftumsatz an der Kathodenseite wurde deutlich erhöht, um den Wasseraustrag mit der Abluft zu reduzieren. Die technischen Daten und die Ausführung des Stacks im Prototyp SOFA 3 sind in *Abb. 6* dargestellt.

### Gesamtsystem

Das Gesamtsystem Prototyp SOFA 3 ist in *Abb. 5* dargestellt. Das Gerät kann mit gängigem Erdgas betrieben werden, eine Entschwefelung ist im Gehäuse untergebracht. Die elektrische Bruttoleistung beträgt 2,2 kW Gleichstrom, das entspricht einer Nettoleistung von 2,0 kW Wechselstrom. Der elektrische Wirkungsgrad ist mit 28% noch nicht im Zielgebiet, eine Verbesserung ergibt sich aber schon mit der zunehmenden Güte der elektrischen Komponenten des Gesamtsystems (wie zum Beispiel Wechselrichter, elektrische Pumpen und Ventile).

*Abbildung 5  
Größenvergleich der  
Prototypen SOFA 1  
und SOFA 3*



DC-Leistung	2,2 kW (650 mV mittlere Zellspannung) 60 Zellen (39 V Nennspannung) Zellfläche 140 cm <sup>2</sup> (Stromdichte 400 mA/cm <sup>2</sup> )
Nennleistungsdichte	0,27 W/cm <sup>2</sup>
Stacktemperatur	70 °C
Kühlung	Wasserkühlung
H <sub>2</sub> -Umsatz	> 70% bei Dampfpreformat (H <sub>2</sub> -Gehalt ca. 75%)
Luftumsatz	> 50 %
Druckverluste	Anode < 10 mbar Kathode < 10 mbar

*Abbildung 6  
Technische Daten  
des Stacks im  
Prototyp SOFA 3*

Versorgungsobjekt	Saniertes Einfamilienhaus (5 Personen)
Beheizte Fläche	180 m <sup>2</sup>
Spezifischer Raumwärmebedarf	78 kWh/m <sup>2</sup> a
Warmwasserverbrauch	2600 kWh/a
Stromverbrauch	5500 kWh/a
Brennstoffzellen-BHKW	2 kW PEM
Elektrischer Wirkungsgrad	29,5%
Thermischer Wirkungsgrad	50,5%
Wärmespeicher	Schichtspeicher mit integriertem Gasbrenner
Volumen	750 l
Leistung Gasbrenner	10 kW
<b>Elektrisches Netz:</b>	
Wirkungsgrad des Stromerzeugungsmixes	39,1%
Strompreis (inkl. MWST)	15,31 Cent/kWh
Einspeisevergütung	8 Cent/kWh
<b>Gasnetz:</b>	
Gaspreis (inkl. MWST)	4,41 Cent/kWh

*Tabelle 1  
Randbedingungen  
für die Simulations-  
studie aus Abb. 7,  
prognostizierte Werte  
für das Jahr 2010  
(siehe [8]).*

Heizwassertemperaturen von 35 °C bis 75 °C sind möglich. Die Abgasemissionen sind durch Einsatz konventioneller Brennertechnik besser als der Grenzwert für den „Blauen Engel“ und die Schallemissionen vergleichbar konventioneller Gasheiztechnik. Die Kaltstartzeit (Start der Anlage bei einer Systemtemperatur von 20 °C bis zum Beginn der Erzeugung von elektrischer Energie) beträgt knapp 30 min, die Warmstartzeit nach 1 h Anlagenstop ca. 15 min. Die Maße des Gesamtsystems des Prototyps SOFA 3 betragen 80 x 80 x 105 cm. Die Anlage wiegt 150 kg.

## Betriebsführungskonzepte

Für die Energieversorgung eines Gebäudes auf Basis eines Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerks (BHKW) in Kombination mit einem Wärmespeicher und einem Zusatz-Wärmeerzeuger wird ein Regelungskonzept benötigt, das einerseits die Versorgungssicherheit gewährleistet und andererseits die Anlagenkomponenten vor unzulässigen Betriebszuständen schützt. Die dazu notwendige Regelungshierarchie besteht aus vier Ebenen [6]. Im Folgenden wird die oberste Ebene dieses Konzeptes, die sogenannte Betriebsführung, erläutert. Neben den Betriebsführungsarten „stromgeführt“ und „wärmegeführt“ werden zwei optimierte Regelstrategien unter-

sucht, die einerseits die Betriebskosten und andererseits den Primärenergiebedarf minimieren.

### 1. Stromgeführter Betrieb

Abhängig von dem Speicherzustand und den Lastgrenzen (Teillastgrenze und Nennbetriebspunkt) des BHKW folgt die Anlage dem aktuellen Strombedarf des Gebäudes.

### 2. Wärmegeführter Betrieb

Bei Wärmebedarf wird das Brennstoffzellen-BHKW zugeschaltet und erst nach Überschreiten des vorgegebenen Solltemperaturbereichs wieder abgeschaltet.

### 3. Betriebskosten-optimierte Regelstrategie

Auf Basis von Lastprognosen wird der Arbeitspunkt des Brennstoffzellen-BHKWs ermittelt, der für ein definiertes Zeitintervall die geringsten Betriebskosten verursacht. Berücksichtigt sind dabei die Energiebezugskosten, die Einspeisevergütung und die spezifischen Wartungskosten.

### 4. Primärenergie-optimierte Regelstrategie

Auf Basis von Lastprognosen wird derjenige Arbeitspunkt des Brennstoffzellen-BHKWs ermittelt, der für ein definiertes Zeitintervall den geringsten Primärenergiebedarf aufweist. Berücksichtigt werden dabei der Erdgasbedarf des Brennstoffzellen-BHKWs, der Erdgasbedarf des Gasbrenners, der Strombezug (gewichtet mit dem Wirkungsgrad des Strommixes) und die primärenergetische Gutschrift für die ins Netz eingespeiste elektrische Energie (ebenfalls gewichtet mit dem Wirkungsgrad des Strommixes). Zur energetischen und wirtschaftlichen Bewertung von Energieversorgungskonzepten sind Untersuchungen im Jahresverlauf erforderlich, die anhand von Simulationsstudien sehr effizient durchgeführt werden können. Die dazu notwendige Modellbildung wird in [6 und 7] näher beschrieben.

In *Tab. 1* sind die Randbedingungen für die vorgestellte Simulationsstudie aus *Abb. 7* zusammengefasst.

In *Abb. 7* sind die Simulationsergebnisse für ein Energieversorgungssystem auf Basis eines Brennstoffzellen-BHKWs mit einer elektrischen Leistung von 2 kW, eingesetzt in einem sanierten Einfamilienhaus, dargestellt.

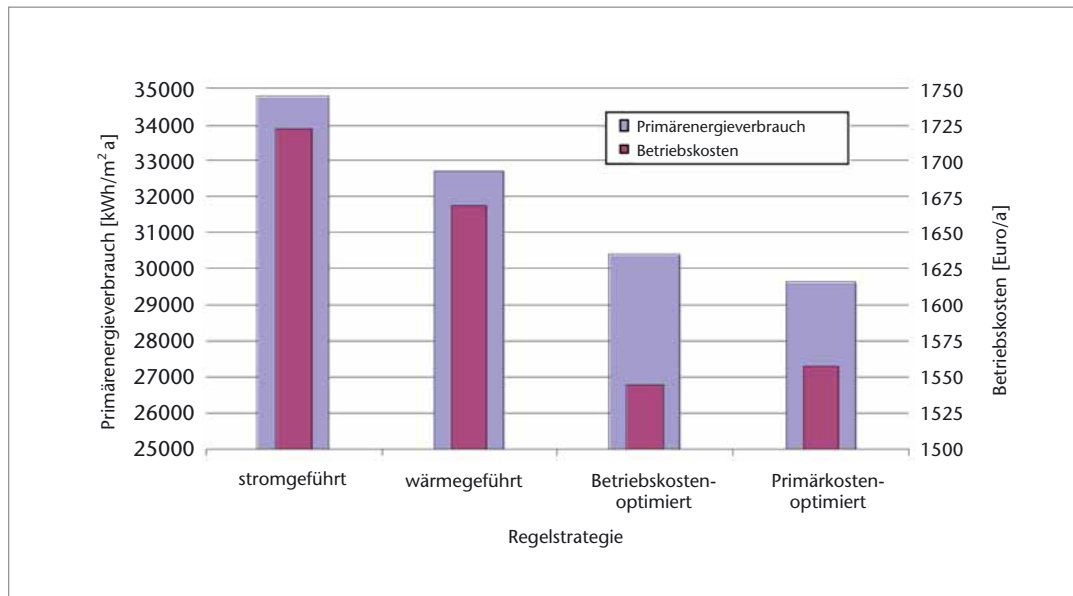


Abbildung 7  
Vergleich verschiedener Regelstrategien für ein Brennstoffzellen-BHKW auf PEM-Basis, hinsichtlich Primärenergieverbrauch und Betriebskosten [6]

Nähere Angaben zu den verwendeten Algorithmen sind in [6] zu finden.

Es wird ein deutlicher Einfluss der Betriebsführungsstrategie auf die Primärenergie und die Betriebskosten erkennbar. Die primärenergieoptimierte Regelung ermöglicht ein Einsparungspotenzial von ca. 20% bei relativ geringen Betriebskosten.

## Zusammenfassung und Ausblick

Die Schwerpunkte der weiteren Brennstoffzellenentwicklung sind sicherlich in der Entwicklung der Gasaufbereitung und des Stacks zu sehen, wobei für die Peripheriekomponenten auch nur wenige fertige Serienlösungen vorhanden sind. Im Verlauf des Projektes sind hinsichtlich Funktionalität, Wirkungsgrad, Kompaktheit und Reduktion der Bauteile große Fortschritte erzielt worden. Die Dauerhaltbarkeit ist bei weitem noch nicht abgesichert und das Kostenziel insbesondere der Brennstoffzellen längst nicht erreicht.

Das Brennstoffzellen-Heizgerät ist im Sinne eines Serienproduktes ein nur wenig erprobtes Gerät. Die reversiblen und irreversiblen Einflüsse auf die Funktion und die Dauerhaltbarkeit sind wenig bekannt, insbesondere das Degradieren der Katalysatoren stellt ein großes Problem dar. Für den stationären Einsatz sind Lebensdauerforderungen von 40.000 h für das Ein- und Zweifamilienhaus und bis zu 80.000 h für das Mehrfamilienhaus zu erfüllen. Realtime-Tests würden sich über Jahre hinziehen, beschleunigte- und Schnellalterungs-Tests für Komponenten und Gesamtsysteme sind noch nicht bekannt und werden erst entwickelt. Auf eine breite Wissensbasis kann leider nicht zurückgegriffen werden, so dass neben der Weiterentwicklung zum Serienprodukt noch umfangreiche Grundlagenuntersuchungen betrieben werden müssen.

## Literatur

- [1] Heikrodt, K., Britz, P.: Erdgasbetriebene PEMFC-Hausenergieversorgungsanlage - innovativer Beitrag zur Emissions- und Energiereduktion, Fortschrittsbericht VDI Reihe 6 Nr. 516, Düsseldorf 2004
- [2] Statistisches Bundesamt 2001
- [3] ASUE: KWK-Gesetz 2002, Kaiserslautern
- [4] ASUE: „Die ökologische Steuerreform“ Vorteil für Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen Stand 1.1.2003, Kaiserslautern
- [5] VDI Richtlinie 2067, Blatt 12: Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen, Düsseldorf 1988
- [6] Vetter, M: Modellbildung und Regelstrategien für erdgasbetriebene Brennstoffzellen-BHKWs auf PEM-Basis. Dissertation am Fraunhofer ISE, Universität Karlsruhe (TH), 2004.
- [7] Wittwer, C: CoSim Simulation von Regelungssystemen in aktiven solarthermischen Anlagen, Dissertation am Fraunhofer ISE, Universität Karlsruhe (TH), 1999.
- [8] Umweltauswirkungen, Rahmenbedingungen und Marktpotenziale des dezentralen Einsatzes stationärer Brennstoffzellen. Abschlussbericht des Forschungsprojektes FKZ 0327550, gefördert vom BMU (Zukunftsinvestitionsprogramm), 2003.
- [9] DIN V 4701-10 2001. Deutsches Institut für Normung e.V.: Energetische Bewertung von heiz- und raumluftechnischen Anlagen, Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung, Berlin, 2001.