

Hausenergieversorgung mit Brennstoffzellen

Michael Nast

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Institut für Technische Thermodynamik
Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart
Tel.: 0711/6862-424, e-mail: Michael.Nast@dlr.de

Kurzfassung

Brennstoffzellen-BHKW können in kleineren Leistungseinheiten als Motor-BHKW gebaut werden. Dadurch eignen sich Brennstoffzellen auch für die Beheizung selbst kleinerer Einfamilienhäuser. Zusätzlich arbeiten Brennstoffzellen lautlos und versprechen einen hohen elektrischen Nutzungsgrad. Es sind jedoch noch eine Reihe von technischen und wirtschaftlichen Problemen zu lösen, bis die prinzipiellen technischen und ökologischen Vorteile, welche Brennstoffzellen gegenüber anderen Mini-BHKW haben, sich auch im Alltagsbetrieb bestätigen lassen. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sind in vollem Gange. Dennoch wird es noch längerer Zeit dauern, bis ein mit den Erfolgen der Brennwertkessels vergleichbarer Durchbruch am Heizungsmarkt möglich wird.

1. Vorteile von Brennstoffzellen beim Einsatz in Einfamilienhäusern

Die leitende Idee bei der Entwicklung von BHKW war schon immer, dass die Nutzung von Abwärme bei kleinen Anlagen leichter möglich ist als bei großen Kraftwerken. Bei der Auskopplung aus Großkraftwerken muss die Wärme erstens über große Strecken zum Kunden transportiert und zweitens muss eine große Anzahl von Wärmeverbrauchern im Umkreis des Kraftwerks möglichst noch vor dem Bau des Verteilnetzes als Wärmekunden gewonnen werden. Die dabei auftretenden Probleme sind so groß, dass in den meisten Fällen die Wärme ungenutzt über Kühltürme an die Umgebung abgegeben wird.

Bei BHKWs tritt dieses Problem in weit geringerem Maße auf. Es müssen nur wenige potenzielle Kunden angesprochen werden. Falls Verteilnetze überhaupt notwendig sind, so können sie kurz gehalten werden und es gibt eine sehr große Anzahl möglicher Standorte, von denen jeweils diejenigen ausgewählt werden können, wo die Randbedingungen gerade besonders günstig sind. Je kleiner die BHKW-Leistungseinheiten sind, umso stärker kommen die aufgeführten Vorteile zum Tragen.

Diesen Vorteilen steht als Nachteil gegenüber, dass der elektrische Wirkungsgrad abnimmt, je kleiner die BHKW werden. In den letzten Jahren wurden hier zwar bereits erhebliche Fortschritte erzielt. Dennoch musste man sich bis heute bei den kleinen Anlagen mit Wirkungsgraden von 25% zufrieden geben. Dabei ist die aus diesen BHKW auskoppelbare Wärmeleistung von über 10 kW immer noch zu groß für die Versorgung kleiner Mehrfamilienhäuser oder gar von Einfamilienhäusern¹.

Bei der Entwicklung immer kleinerer Leistungseinheiten kommt Brennstoffzellen ein ganz erhebliches Potenzial zu. Die Stacks von Brennstoffzellen sind aus kleinen Einheiten, den einzelnen Zellen, modular aufgebaut. Sie sind selbst für den Einsatz in Laptops geeignet. Damit kommen sie auch für den Einsatz in Einfamilienhäusern in Frage. Der potenzielle Markt ist daher viel größer als für die herkömmlichen motorischen BHKW, wie Abb. 1 zeigt. Auf Ein- und Zweifamilienhäuser entfällt mehr als 65% des gesamten Wärmebedarfs in Wohngebäuden.

¹ Die Wärmehöchstlast eines aus einem BHKW versorgten Gebäudes sollte bei etwa dem vierfachen der Wärmeleistung des BHKW liegen. Nur dann kann das BHKW die für den wirtschaftlichen Betrieb notwendige Mindestbetriebszeit erreichen.

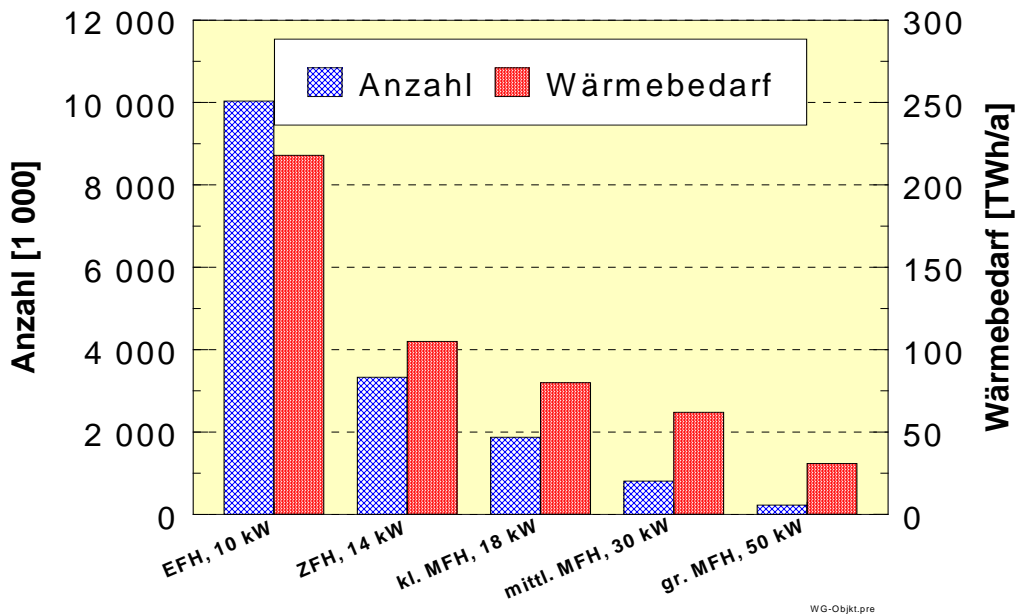
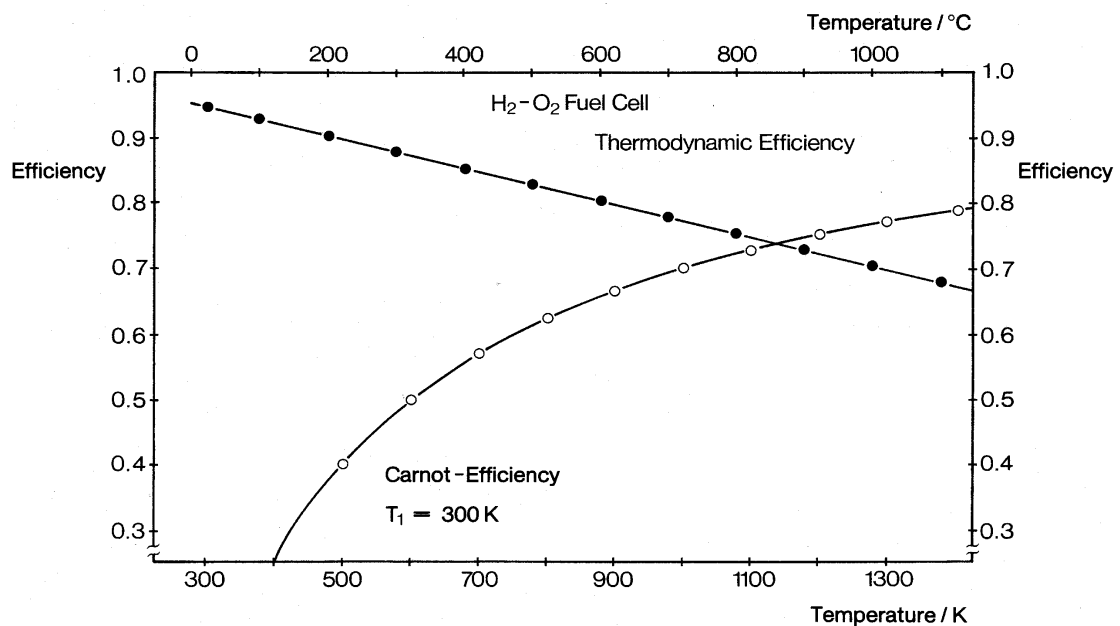


Abbildung 1: Aufteilung des Wärmebedarfs auf unterschiedliche Gebäudetypen.

Weitere Vorteile der Brennstoffzellen-BHKWs sind:

- Ein hoher elektrischer Wirkungsgrad (Abb. 2), welcher schon bei den ersten käuflichen Kleinanlagen bei über 30% liegen soll,
- nahezu lautloser Betrieb,
- ein sehr gutes Teillastverhalten,
- saubere Abgase (keine Bildung von NO_x),
- keine verschleißanfälligen beweglichen Teile,
- ein breites Leistungsspektrum,
- Modularität



Thermodynamic Efficiency of H₂-O₂ Fuel Cell and Heat Engine (Carnot Cycle)

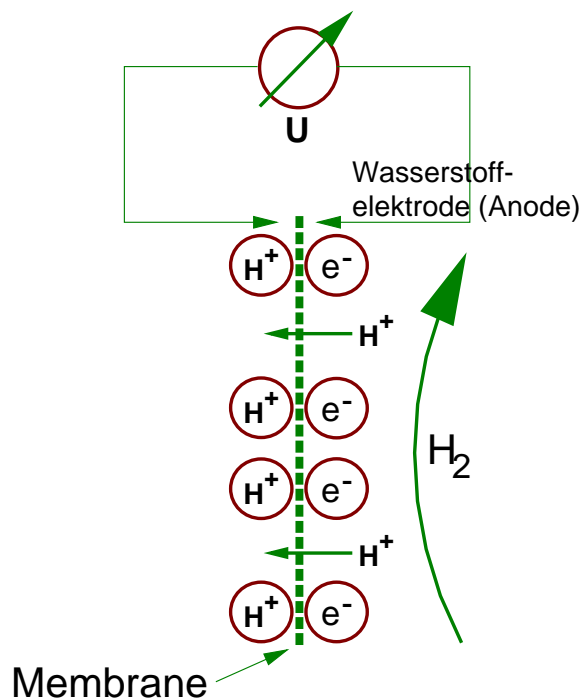
Abbildung 2: Theoretisch erreichbarer Wirkungsgrad von Brennstoffzellen im Vergleich mit dem theoretischen (Carnot-)Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen.

Trotz dieser allgemein anerkannten Vorteile ist der Marktdurchbruch bisher noch nicht gesichert. Es gibt noch eine Reihe technischer Probleme, welche auf kostengünstige Weise gelöst werden müssen. Zu deren Verständnis sind Kenntnisse über die Grundprinzipien einer Brennstoffzelle nützlich.

2. Funktionsprinzipien der Brennstoffzelle

In allen Brennstoffzellen wird aus Wasserstoff und Sauerstoff Wasser gebildet und die Reaktionsenergie direkt zur Stromerzeugung genutzt. Kernstück einer Brennstoffzelle ist ein Elektrolyt (Membran), welcher entweder nur für Wasserstoff- oder nur für Sauerstoffionen durchlässig ist. Das von der Firma Sulzer Hexis vorgestellte Brennstoffzellen-Heizgerät (elektrische Leistung 1 bis 5 kW) verwendet eine Hochtemperatur-Brennstoffzelle (SOFC, 800 bis 1000°C) mit einem Sauerstoffionen leitenden Keramikelektrolyten. Bei der sog. Polymermembran Brennstoffzelle (PEFC, Betriebstemperatur um 80°C), auf welche in Deutschland die Firmen Vaillant und DaimlerChrysler setzen, ist dies eine dünne Plastikfolie, welche nur H^+ -Ionen (Protonen) passieren lässt.

Befindet sich auf der einen Seite dieser Membran ein wasserstoffreiches Gas, so werden in Gegenwart eines Katalysators an der Membranoberfläche (positiv geladene) Wasserstoffionen gebildet, welche durch die Membran diffundieren. Die zu diesen Ionen gehörigen (negativ geladenen) Elektronen e^- bleiben zurück. Durch diese Ladungstrennung entsteht ein elektrisches Feld, welches einer weiteren Diffusion von Wasserstoffionen auf die andere Seite der Membran entgegenwirkt, sodass sich eine bestimmten Spannung zwischen den Elektroden auf beiden Seiten der Membran einstellt (Abb. 3).



BZ-Prinz.pre

Abbildung 3: Wasserstoffionen diffundieren durch die Membran einer PEM-Brennstoffzelle. Es entsteht eine Spannung gegenüber den zurückbleibenden Elektronen.

Das wesentliche Funktionsprinzip der Brennstoffzelle ist damit bereits beschrieben. Alle weiteren Schritte dienen nur dazu, erstens die Spannung auch außerhalb der Zelle **verfügbar** zu machen, zweitens die Spannung zu **erhöhen** und drittens den Prozess zu **intensivieren**, d.h. die Stromdichte zu erhöhen.

1. **Verfügbar** wird die Spannung, indem Elektroden an beiden Seiten der Membran angebracht werden. Die Spannung kann dann mit einfachen Geräten gemessen werden. Sie ist proportional zur Wasserstoffkonzentration. Dieses Prinzip wird in der λ -Sonde von Verbrennungsmotoren mit Katalysator genutzt². Werden die beiden Elektroden leitend miteinander verbunden, so wandern die Elektronen auf die andere Seite der Membran, das elektrische Feld wird geschwächt, der Prozess der H^+ -Diffusion kommt wieder in Gang und hält so lange an, bis kein Brennstoff mehr zur Verfügung steht, oder sich auf beiden Seiten der Membran die gleiche H_2 -Konzentration einstellt.
2. Die Spannung wird stark **erhöht**, wenn auf der anderen Seite der Membran Sauerstoff vorbei geleitet wird. Der Sauerstoff verbindet sich mit den Wasserstoffionen zum Reaktionsprodukt Wasser. Dadurch wird Platz frei für weitere nachfolgende Wasserstoffionen. Die zugehörigen Elektronen bleiben wieder zurück wodurch die Spannung steigt. Die Reaktionsenergie von H_2 und O_2 reicht theoretisch für eine Spannung von 1,23 V aus, in der Praxis werden im unbelasteten Zustand bis zu 1,0 V erreicht. Wird anstelle des Messgerätes z.B. eine Leuchtdiode angebracht, können die Elektronen, welche jetzt auf die andere Seite der Membran fließen, z.B. zu Zwecken der Beleuchtung genutzt werden. Wird durch die Brennstoffzelle Strom erzeugt, so entspricht die Anzahl der den Strom tragenden Elektronen genau der Wasserstoffmenge (Anzahl der H^+ -Ionen), welche durch die Membran diffundieren. Hieraus folgt, dass der Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle genau der Zellspannung proportional ist.
3. Um die Wirkungsprinzipien der Brennstoffzelle in der Praxis effektiv nutzen zu können, sind technische Maßnahmen notwendig, um den Prozess zu **intensivieren**:
 - die Elektroden werden aus porösem Material hergestellt, um sowohl den Reaktionsgasen ungehindert Zutritt zu der Membran zu ermöglichen, als auch das entstehende Wasser abzuführen,
 - in der PEFC werden Katalysatoren wie z.B. Platin eingesetzt, um die chemischen Reaktionen zu beschleunigen,
 - bei den erhöhten Betriebstemperaturen der SOFC sind keine Edelmetallkatalysatoren notwendig: die hohe Temperatur beschleunigt von sich aus die Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff,
 - der elektrische Widerstand der Elektroden und der Elektrolyte wird minimiert, um die (ohmschen) Verluste der Brennstoffzelle zu verringern.

Auf diese Weise wird versucht, gleichzeitig hohe Stromdichten (bezogen auf die Membranfläche), hohe Leistungsdichten (bezogen auf das Stackvolumen) und hohe Wirkungsgrade zu erreichen.

Wichtige Informationen zur Qualität einer Brennstoffzelle liefert der Verlauf ihrer Strom-Spannungskennlinie (Abb. 4). Ergebnisse aus verschiedenen Labors können aber nur dann miteinander verglichen werden, wenn u.a. Angaben zur Konzentration des Wasserstoffs, des Sauerstoffs, des Drucks und der Temperatur gemacht werden. Der Wirkungsgrad von Brennstoffzellen ist der Zellspannung direkt proportional. Der höchste Wirkungsgrad wird in unbelasteten Zellen bei extrem geringen Strömen, also weit unterhalb der für den praktischen Einsatz geforderten Nennleistung erreicht. Mit steigender Belastung nimmt also

² In der λ -Sonde ist die Membran für Sauerstoffionen durchlässig. Auf der einen Seite strömt Luft auf der anderen das Abgas vorbei. Die abgegriffene Spannung ist umso höher, je geringer die Sauerstoffkonzentration im Abgas ist. /Pape 1999 /.

das Verhältnis Strom zu Abwärme bei Brennstoffzellen ab; die Stromkennzahl ist daher bei Brennstoffzellen in einem gewissen Betriebsbereich lastabhängig zu modulieren.

Strom-Spannungskennlinie einer plasmagespritzten SOFC-Zelle auf porösem Metall-Substrat bei verschiedenen Temperaturen

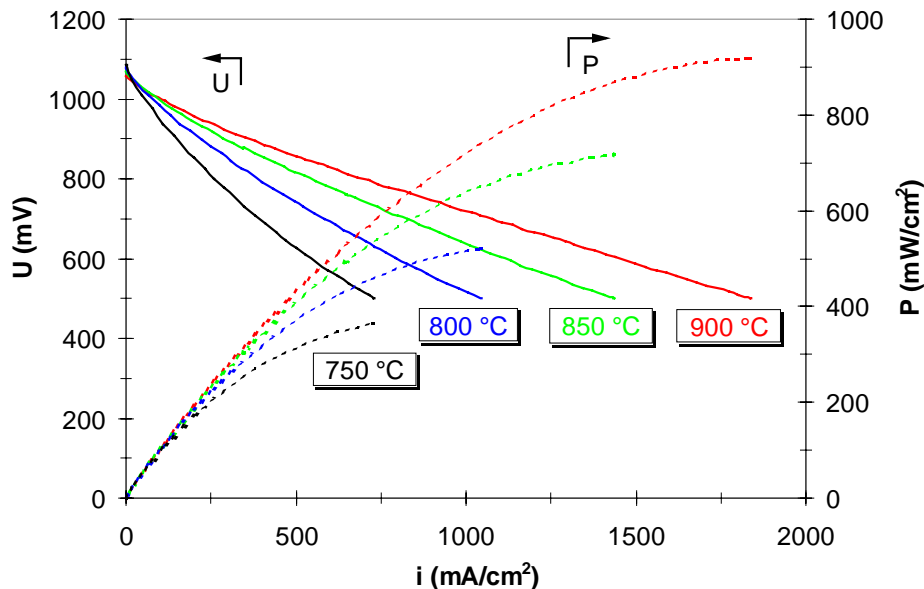


Abbildung 4: Strom-Spannungskennlinie einer Brennstoffzelle.

Die maximale Spannung einer einzelnen Zelle von 1 V ist für technische Anwendungen zu gering. Daher werden mehrere Zellen in Reihe geschaltet und in einem sog. Stack zusammengefasst. Dieser Schritt bringt nichts prinzipiell Neues, erfordert aber erhebliches verfahrenstechnisches Know-how.

Am besten arbeiten Brennstoffzellen mit reinem Wasser- und Sauerstoff. In der Praxis steht aber für die Beheizung von Gebäuden nur Erdgas und der Sauerstoff der Luft zur Verfügung. Das Erdgas muss daher vor seiner Verwendung in der Brennstoffzelle reformiert, d.h. mit Hilfe von Wärme und Wasser in CO_2 und H_2 umgewandelt werden. Der Wirkungsgrad dieses Prozesses liegt in der Praxis bei maximal 80%. Auch aus diesem Grund können die in Abb. 2 dargestellten theoretischen Wirkungsgrade in einem Gesamtsystem nicht erreicht werden.

Bezüglich des Reformierungsprozesses unterscheiden sich die beiden Brennstoffzellentypen, welche für die Versorgung von Einfamilienhäusern in Frage kommen, erheblich. Die Polymermembran-Brennstoffzelle (PEM) arbeitet bei rund 70 °C und benötigt daher eine getrennte Reformierungsstufe, welche sehr sauberes (CO -freies) Brenngas liefern muss. Die Solid-Oxide-Brennstoffzelle (SOFC) arbeitet bei Temperaturen um 900 °C. Bei diesen Temperaturen kann wenigstens ein Teil des Reformierungsprozesses in der Brennstoffzelle selbst erfolgen³. Dies vereinfacht die Prozessführung und verbessert auch den erreichbaren Wirkungsgrad. Andererseits führen die hohen Temperaturen zu Materialproblemen, welche diese Vorteile beim heutigen Stand der Entwicklung wieder relativieren.

3. Problembereiche bei der Entwicklung von Brennstoffzellen

Bei Brennstoffzellen gibt es eine Reihe von Problembereichen, welche sich intensiv auf die aktuelle Forschung auswirken. Gearbeitet wird insbesondere in Richtung auf:

³ Die SOFC kann das für die PEM schädliche CO sogar anstelle von H_2 zur Stromerzeugung nutzen.

- Toleranz gegenüber Verunreinigungen des Brenngases, insbesondere der Katalysatoren sowohl für die interne Reformierung in der SOFC als auch für die Reaktionskinetik der PEM,
- geringeren Einsatz von (teuren) Edelmetallen (PEFC),
- mechanische Zyklfestigkeit der Stacks (SOFC),
- Lösung von Korrosionsproblemen (insbesondere bei SOFC),
- Vermeidung von lokalen Überhitzungen, sog. „hot Spots“ (PEFC), und Beherrschung des Wärmemanagements zur Auskopplung von Nutzwärme.
- ungewolltes Absinken der erforderlichen Betriebstemperatur der SOFC von ca. 900 °C während des Teillastbetriebs,
- Reduktion von Ohmschen und Kontaktwiderständen innerhalb der einzelnen Zellen,
- kostengünstige Fertigungsverfahren für den Stack und dessen Bestandteile.

Auf eine Besonderheit von Brennstoffzellen im Vergleich zu Verbrennungsmaschinen soll hier noch ausdrücklich hingewiesen werden: Da die Reaktionen an der Membran mit abnehmender Wasserstoffkonzentration immer langsamer verlaufen, kann innerhalb des Stacks der im zugeführten Brenngas enthaltene Wasserstoff nicht vollständig verbraucht werden. Im Abgas des Stacks ist daher noch unverbrauchtes Brenngas enthalten⁴. Ein Teil des (kalorienarmen) Abgases kann für den (endothermen) Reformierungsprozess, der Rest nur noch für die Wärmeerzeugung genutzt werden. Wie groß dieser Teil bei den aktuell angekündigten Brennstoffzellen-Heizsystemen sein wird, ist den Veröffentlichungen der einschlägigen Hersteller nicht zu entnehmen. Ziel der Entwicklungen ist es, das eingesetzte

Bei der Interpretation der Graphik muss darauf geachtet werden, dass Heizungssysteme in unterschiedlichem Entwicklungsstand nebeneinander gestellt wurden. Für die Brennstoffzellen-Systeme handelt es sich um Zielwerte, deren Machbarkeit im Labor bereits nachgewiesen wurde. Für die tatsächlichen Werte der aktuell für den Heizungsmarkt produzierten ersten Brennstoffzellen Mini-BHKWs liegen noch keine vollständigen Herstellerangaben vor. Die Zielwerte nach Abb. 5 werden aber sicher noch nicht erreicht. Auch werden sich bei den aktuell in Entwicklung befindlichen Brennstoffzellen-Mini-BHKWs keine wesentlichen Unterschiede im elektrischen Wirkungsgrad zwischen den konkurrierenden Systemen PEM (Vaillant, elektrische Leistung 4,5 kW) und SOFC (Sulzer-Hexis, elektrische Leistung 1 - 3 kW) ergeben. Bei den Stirlings ist die Entwicklung bereits weitere vorangeschritten. Dargestellt sind Messwerte der Vorserie (9 kW) bzw. die eines Prototyps. Bei den Werten des Motor-BHKWs handelt es sich um bereits vielfach bewährte Technik.

Für einen ökologischen Vergleich verschiedener Heizungssysteme ist nicht nur der elektrisch sondern auch der Gesamtwirkungsgrad von Bedeutung. Daher wurde in Abb.5 zum Vergleich auch der rein thermische Wirkungsgrad eines Brennwertkessels dargestellt. Bisher wurde bei der Entwicklung von Brennstoffzellen der Verbesserung des elektrischen Wirkungsgrades die höchste Priorität eingeräumt. Der Auskopplung von Wärme wird in der Zukunft ein höhere Aufmerksamkeit zu Teil werden müssen. Theoretisch können auch Brennstoffzellen ebenso hohe Gesamtwirkungsgrade erzielen wie die Brennwertkessel. Dies ist jedoch nur mit sehr hohem Aufwand möglich, da die (Ab-)Wärme an verschiedenen Stellen anfällt (im Stack, am Reformier, im Wechselrichter, Abb.6). Für Stirling-Mini-BHKW wird dagegen aufgrund ihrer Bauart eine Brennwertnutzung problemlos möglich sein. Bei der ökologischen Bewertung von Brennstoffzellen-BHKW wird zu prüfen sein, ob der gegenüber den Konkurrenzsystemen verbesserte elektrische Wirkungsgrad die Einbußen bei der nutzbaren Wärmemenge rechtfertigt /DLR 2003/.



Abbildung 6: Brennstoffzellen-Heizsystem von Vaillant (PEM). 1: Regler und Kommunikationsschnittstelle, 2: Wechselrichter, 3: Reformier, 4: Membran-Brennstoffzellenstack PEFC, 5: Wärmerückgewinnung.

Abb. 7 zeigt das Teillastverhalten verschiedener KWK-Systeme. Deutlich erkennbar sind der hohe erreichbare elektrische Brutto-Wirkungsgrad der Brennstoffzellen und dessen Abnahme nach Berücksichtigung aller für den Betrieb des Stacks notwendigen Zusatzaggregate. Erkennbar ist auch das im Vergleich zu Verbrennungsmotor oder Gasturbine sehr gute Teillastverhalten.

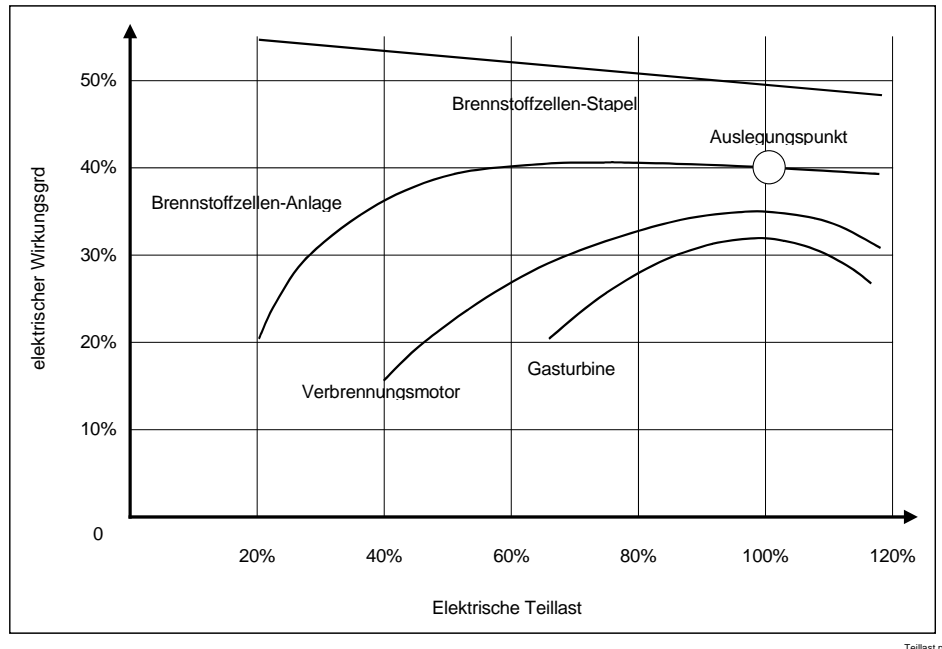


Abbildung 7: Teillastwirkungsgrade verschiedener KWK-Systeme.

5. Wirtschaftlichkeit

Solange die im realen Betrieb erreichbaren technischen Werte von Brennstoffzellen-Heizsystemen nur aus Laborversuchen abgeleitet werden können, sind auch schlüssige Wirtschaftlichkeitsvergleiche und selbst die Bestimmung von anlegbaren Investitionskosten letztendlich nicht möglich. Je besser der elektrische und der Gesamtwirkungsgrad, je geringer die Wartungskosten und je länger die Lebensdauer sind, um so teurer dürfen die Anschaffungskosten des Systems sein. Nach Schätzungen von /Berg 2002/ liegt der anlegbare Preis für das Brennstoffzellen-Heizgerät von Vaillant bei 1 500 Euro je kW_{el} . Der heutige Preis liegt zwar noch weit über diesem Wert, er wird aber mit zunehmender Produktionsmenge sinken. Unter der Annahme, dass bei einer Verdopplung der kumulierten Produktionsmenge der Stückpreis gemäß einer Lernkurve um 25% sinkt, wird der anlegbare Preis erreicht, nachdem 100 000 Anlagen produziert wurden. Bis dahin sind Steuerungsinstrumente wie etwa das EEG für die Markteinführung notwendig.

6. Fazit

Brennstoffzellen sind für den Einsatz als kleine KWK-Anlagen eine sehr vielversprechende Technologie. Die Entwicklung ist aber noch in vollem Gange, sodass noch nicht erkennbar ist, um wie viel sie die bereits weiter entwickelten übrigen Mini-BHKW auf der technischen Seite übertreffen werden, und ob sie wirtschaftlich mit diesen Anlagen konkurrieren können. Die Entwicklung von Brennstoffzellen-BHKW profitiert derzeit sehr stark von der Automobilindustrie, welche große Summen in die Entwicklung von Brennstoffzellen für den Einsatz in Fahrzeugen investiert. Falls dort ein Durchbruch mit Erdgas, Methanol oder Wasserstoff als Kraftstoff gelingt, sollte dies auch bei den geringeren technischen und

insbesondere wirtschaftlichen Anforderungen im Heizungsmarkt möglich sein. Dennoch muss damit gerechnet werden, dass es noch einige Zeit dauern wird, bis die hochgesteckten Erwartungen, die den Brennstoffzellen heute entgegengebracht wird, auch in der Praxis erfüllt werden können. Auch andere, schließlich erfolgreiche Technologien im Heizungsmarkt, wie etwa der Brennwertkessel, brauchten eine lange Zeit, um sich am Markt zu etablieren.

Literatur

/Berg 2002/

J. Berg: „Das Vaillant PEM-Brennstoffzellen- Heizgerät – Technik und Marktchancen“ in Ledjeff-Hey u.a. (Hrsg.) „Brennstoffzellen – Entwicklung, Technologie, Anwendung“, C.F. Müller-Verlag, Heidelberg 2001

/DLR 2003/

„Umweltauswirkungen, Rahmenbedingungen und Marktpotenziale des dezentralen Einsatzes stationärer Brennstoffzellen“. Studie von DLR (Federführung), LEE, WI, ZSW, ifeu; und ISE im Auftrag des BMU. In Vorbereitung.

/Pape 1999/

M. R. Pape: „Die λ -Sonde als Messgerät für das chemische Potenzial“. Staatsexamensarbeit an der Universität Karlsruhe, Nov. 1999.