

## Einsatzbedingungen und Marktchancen von Brennstoffzellen als Klein-BHKW

U. Bünger (L-B-Systemtechnik, Daimlerstraße 15, D-85521 Ottobrunn, buenger@lbst.de)

"Effiziente und umweltfreundliche Strom- und Wärmeerzeugung mit Brennstoffzellen"

Friedrichshafen, 20.-21. Juli 2000

### 1. Rahmenbedingungen – Marktanforderungsprofil und Brennstoffzelleneigenschaften

Um das Thema dieses Beitrags einzugrenzen, ist zunächst eine der systemanalytischen Praxis erwachsene begriffliche Einteilung in unterschiedliche Leistungsklassen sinnvoll:

- Mikro-Brennstoffzellen            10 – 500 W<sub>el</sub>
- Mini-Brennstoffzellen            500 W<sub>el</sub> – 30 kW<sub>el</sub>
- Midi-Brennstoffzellen            30 – 250 kW<sub>el</sub>
- Große Brennstoffzellen            > 250 kW<sub>el</sub>

Im folgenden wird insbesondere von den Mini- bzw. Midi-Brennstoffzellen die Rede sein. In den USA besteht das Interesse an Stationärbrennstoffzellen insbesondere in der Produktion von "Power" also der nicht wärmegekoppelten Stromerzeugung, hier werden folgende Einsatzfelder gesehen [Moore, 97]:

- Stromerzeugung ohne Wärmenutzung ("premium power")
- netzferne Spitzenlastversorgung ("distributed peak power")
- ausfallsichere Stromversorgung (USV) ("critical load")  
(z.B. Krankenhäuser, Rechenzentren im liberalisierten Strommarkt)
- spezifische Qualitätsanforderungen ("specific power quality")

Im Gegensatz dazu werden Brennstoffzellen in Europa insbesondere zum Einsatz in der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) entwickelt. Um ihre Bedeutung für dieses Marktsegment würdigen zu können, lohnt sich zunächst eine Zusammenfassung des aktuellen Fortschritts in der konventionellen, d.h. Motor-BHKW-Technik [TAB, 99]:

- Kostenreduktion bei Nahwärmenetzen (Netztopologie, Nutzung gemeinsamer Schächte, preisgünstigere Rohrmaterialien),
- weitgehende Ausschöpfung der Kostenreduktionspotentiale bei Motor-BHKW,
- Trend zum Einsatz von Aggregaten kleiner Leistung zur Minderung der Investitionsrisiken,
- Entwicklung kleiner Aggregateleistungen (5 kW<sub>el</sub>) für hohe Laufzeiten und
- Entwicklung modulierbarer Aggregate kleinster Leistung [Ecopower, 99].

Desweiteren sind aktuelle energiewirtschaftliche Veränderungen der Liberalisierung von Strom- und zunehmend auch Gasmarkt zu berücksichtigen als auch die öffentliche Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung. Folgende Entwicklungen sind von besonderer Bedeutung:

- für den Industrie- aber auch für den Tarifkunden drastische Strompreissenkungen,
- freier Netzzugang durch Stromerzeuger aber Netzbetreiber-gesellschaft physikalisch noch (?) nicht entkoppelt,

## Einsatzbedingungen und Marktchancen von Brennstoffzellen als Klein-BHKW

---

- freie Wahl des Stromlieferanten,
- einheitlicher, ungestaffelter, d.h. unzonierter Briefmarkentarif für die Netztransportkosten durch Verbändevereinbarung,
- geringfügige Preissenkungen auch beim Erdgas (Entkopplung vom Heizölpreis, jedoch insgesamt unklarere Auswirkungen der Liberalisierung),
- keine feste Bindung zwischen Erdgas- und Strompreis,
- starke Unsicherheit bzgl. Beschaffungen in großen KWK-Anlagen aus Angst vor "stranded investments", Trend zum Einsatz von BHKW kleiner Blockgröße,
- Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung gewinnt in Nischen an Interesse,
- allgemeiner Trend zum Energiedienstleistungsgeschäft verstärkt sich,
- Konzentrationsprozeß innerhalb der Stromwirtschaft und Strom- und Gasunternehmen,
- politische Zukunft der Ökosteuer viel diskutiert und
- Förderung der Klein-KWK<sup>1</sup>.

Zusätzlich für die Gebäudeenergieversorgung trifft die Brennstoffzelle auf ein Einsatzfeld, das durch

- bestehende Baustandards,
- fest gefügte konservative Handwerksstrukturen,
- eine eingeführte Heizsystemtechnik,
- akzeptierte Sicherheitsstandards und Regelwerke und
- Benutzergewohnheiten

geprägt ist.

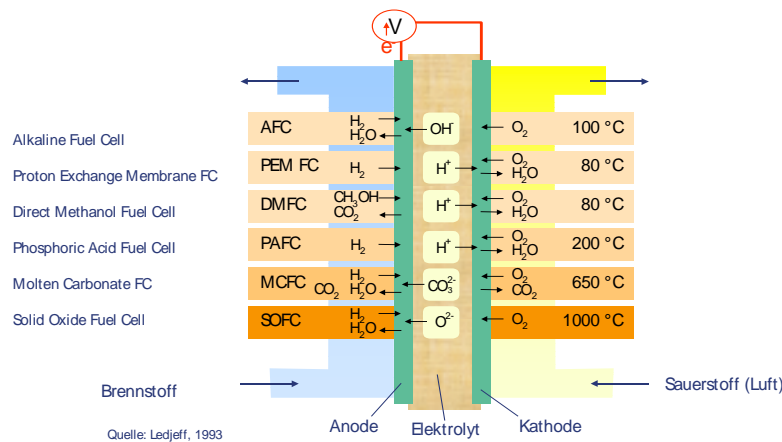
Auf der anderen Seite gibt die Brennstoffzellen-Anlagentechnik den Einsatzrahmen vor. Brennstoffzellen lassen sich durch charakteristische Merkmale, im wesentlichen durch die Wahl des Elektrolyten und die Betriebstemperatur in verschiedene Typen unterscheiden. Abb. 1 zeigt die Hauptmerkmale und veranschaulicht die elektrolytische Wasserstoffumsetzung.

---

<sup>1</sup> Heute trifft eine Mehrfachförderung kleiner KWK-Anlagen zu:

- a) für KWK-Anlagen bis 2 MW<sub>el</sub> und Monatsnutzungsgrad > 70%: Erlaß der Erdgassteuer und der Stromsteuer für eigenerzeugten Strom, der selber genutzt wird,
- b) Verbändevereinbarung: Bonus von 8 Pfg./kWh<sub>el</sub> Einspeisevergütung für die Nichtnutzung der Hochspannungsebene bei der Durchleitung.

Abbildung 1 Charakteristische Merkmale verschiedener Brennstoffzellentypen



Um die Bedeutung der Brennstoffzellentechnologie für den Einsatz in der KWK ermessen zu können, wurde eine Liste der wichtigsten Eigenschaften aus dieser Perspektive zusammengestellt:

- Stromerzeugung durch die direkte elektrochemische Energiewandlung nicht beschränkt durch Carnot-Faktor (im Gegensatz zur konventionellen Stromerzeugung im Wärmekraftwerk: chemische Energie  $\Rightarrow$  thermische Energie  $\Rightarrow$  kinetische Energie  $\Rightarrow$  elektrische Energie),
- Oberflächenorientierter ersetzt volumenorientierten Prozeß (materialintensiv, geringere thermische Dynamik),
- Hoher elektrischer Wirkungsgrad (z.B. 40 - 45% mit Wasserstoff und 25 - 35% mit Kohlenwasserstoffen):
  - steigend bei Teillast (ca. 40% mit Erdgas),
  - steigerbar durch Kopplung mit thermischen Energiewandlern (z.B. bis 70%),
  - auch bei kleinen Nennleistungen höchste Effizienz im  $H_2$ -Betrieb und
  - reduziert durch Reformierungswirkungsgrad für konventionelle Kraft-/Brennstoffe (z.B. um 20%),
- Kaum mechanischer Verschleiß, da wenig bewegte Komponenten,
- Absolute Schadstofffreiheit (im mobilen und stationären Einsatz Vermeidung von Immissionen),
- Niedrige Geräuschemissionen (niedrigere Geräusche als herkömmliche Brenner),
- Hohe Brennstoff- bzw. Kraftstoff-Flexibilität (z.T. in Verbindung mit geeigneten Reformern) und damit Übergang auf erneuerbaren Wasserstoff sinnvoll möglich und
- Z.T. hohe Kostenreduktionspotentiale.

Zusätzlich gilt für PEM-Brennstoffzellen:

- Hohe Modularität:
  - Von klein bis groß (1  $W_{el}$  bis 1  $MW_{el}$ ),
  - Beliebige Abstufungen,
  - Basistechnologie immer gleich und
  - Grundparameter immer gleich.

Aus den besonderen Eigenschaften der PEM-Brennstoffzelle ergibt sich über die Grundeigenschaften aller Brennstoffzellen, die viele Produktinnovationen erlaubt, hinaus das revolutionäre Potential der Systeminnovation.

### 2. Einsatzfelder und Versorgungsstrukturen

Zusätzlich zur KWK gibt es zahlreiche stationäre Anwendungen, die in Tab. 1 zusammengefaßt sind. Der Einsatz der PEM-Brennstoffzellen in diesen Anwendungsfeldern werden ebenfalls über das erschließbare Stückzahlenpotenzial einen Einfluß auf die künftige Wirtschaftlichkeit von Brennstoffzellen in der Hausenergieversorgung haben. Dieses gilt jedoch auch für den mobilen Einsatz von PEM-Brennstoffzellen, deren synergetische Effekte durch Kopplung mit der stationären Erzeugung von Wärme und Kraft bisher nur in Ansätzen erkannt sind.

**Tabelle 1 Mögliche stationäre Brennstoffzellenanwendungen**

- |   |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Hocheffiziente dezentrale KWK für Niedertemperaturwärme (Hausenergieversorgung) und Hochtemperaturwärme (Prozeßwärme) von 1 kW<sub>el</sub> bis 10 MW<sub>el</sub></li><li>• Dezentrale Lieferung hochqualitativen Stroms<ul style="list-style-type: none"><li>– In Netzen mit stark verteilten Erzeugungskapazitäten oder</li><li>– Für spezielle Anwendungen (Rechenzentren)</li></ul></li><li>• Notstromversorgung</li><li>• Versorgung tragbarer Kleingeräte mit Strom (Batterieersatz)</li><li>• Autarke Versorgung entlegener Gebiete mit Strom und Wärme aus Solarenergie mit Wasserstoff (reversible Brennstoffzelle)</li></ul> |
|---|

Obwohl die Brennstoffzelle eine "Wasserstoff-Technologie" ist, ermöglicht ihre Modularität und Flexibilität bei gleichzeitig niedrigen Kosten den Aufbau neuer Energieversorgungsstrukturen bereits mit den heutigen Brenn- bzw. Kraftstoffen. Abb. 3 stellt 4 Versorgungsmodelle vor, die sich durch die Zentralität/Dezentralität unterscheiden. Von diesen sind die Modelle I und III bei der Siedlungsversorgung mit Erdgas von besonderem Interesse. Sie zeichnen sich durch eine direkte Kopplung von Brennstoffaufbereitung in sog. Reformern und Brennstoffzelle aus.

### Abbildung 3 Modelle stationärer Energieversorgungsstrukturen mit Brennstoffzellen

**Fehler! Keine gültige Verknüpfung.**

BA – Brennstoffaufbereitung, BZ – Brennstoffzelle, TS – Tankstelle, WT – Wärmetauscher, EL – Elektrolyseur, H<sub>2</sub>-Wasserstoff-Speicherbehälter

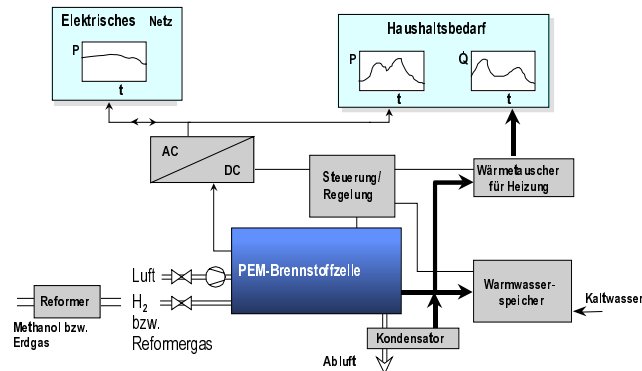
Zwei Auswahlkriterien sind dabei von besonderer Bedeutung:

- **wärmeseitige Kopplung:** autotherme Reformer zur in-situ Erzeugung von Wasserstoff z.B. aus Erdgas erzeugen Überschusswärme, die bei getrennter Aufstellung wie im Modell II entweder ein eigenes Nahwärmenetz zusätzlich zum Wasserstoffnetz erfordern würde oder zur Abgabe der Reformer-Abwärme an die Umgebung führen müßte (in einzelnen Fällen ist auch die Wärmenutzung durch Installation des zentralen Reformers in der Nähe eines Verbrauchers, z.B. eines Gewerbebetriebs, denkbar)
- **Betrieb des Spitzenlastkessels mit Erdgas:** die Auslegung von Brennstoffzellen-BHKW wird immer eine zusätzliche Wärmequelle (Spitzenlastkessel) erfordern. Würde diese mit Wasserstoff betrieben, der im zentralen Reformer (Modell II) mit einem Wirkungsgrad von z.B. 80% aus Erdgas erzeugt würde, würde sich das negativ auf CO<sub>2</sub>-Emissionen und Wirtschaftlichkeit auswirken.

Für die weitere Zukunft sind auch zentrale Versorgungsstrukturen direkt mit Wasserstoff denkbar [Zittel, 94].

Ein besonders großes Einsatzpotential weisen die kleinen Brennstoffzellen zur Hausenergieversorgung auf. Die Hauptkomponenten solcher Aggregate mit Niedertemperatur-PEM-Brennstoffzellen für die Hausenergieversorgung zeigt Abb. 2.

Abbildung 2 Komponenten eines PEM-Hausenergieversorgungs-BHKW [Kraus, 97]



### 3. Folgen der dezentralen Energiewandlung - Neue Strukturen und Betriebs-/Betreibermodelle

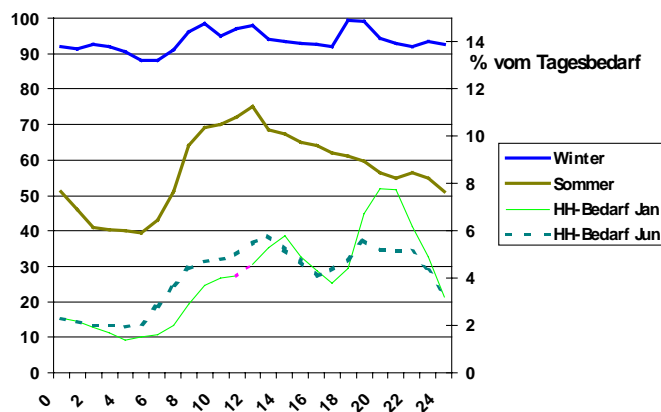
Bei der Hausenergieversorgung wird zwischen Haus- und der Siedlungsversorgung unterschieden. Da die Versorgungsfälle von den Haushalten auf den Kleinverbrauch übertragbar sind, hat die Brennstoffzelle das Potential, eingefahrene Versorgungsinfrastrukturen aufzubrechen, was z.B. auch die Vertriebswege betrifft. Desweiteren ist es bei einem Blick in die weitere Zukunft denkbar, daß auch Fahrzeuge ähnlich wie bei der Verwendung von Erdgas von derselben Versorgungsinfrastruktur mit betankt werden könne. Sogar der Einsatz einzelner Brennstoffzellenzellstapel als Heizkörperersatz ist denkbar, was die heute übliche Wasserverteilung durch eine Luftheizung ersetzen würde [Bünger, 97].

Da die Installation kleiner BHKW mit höheren Investitionen verbunden ist, könnten sich Brennstoffzellen in der Haus- oder Siedlungsenergieversorgung beim allgemeinen Trend zum Dienstleistungsgeschäft auch von einem professionellen fachfremden Serviceunternehmen betreiben lassen. Entgegen der derzeitig weitverbreiteten Meinung ist dieses Geschäft durch geeignete Verträge (standardisierter Vertrag und Planung, Integration in die Baufinanzierung) und Partner (Baussparkassen, Versicherungen, Bauträger) auch auf die typische Tarifkundenversorgung, z.B. auf die Versorgung von Einfamilienhäusern) übertragbar.

Das Stromlastprofil eines Versorgungsgebietes und der mittlere Lastgang eines individuellen Haushaltes lassen sich weitgehend zur Deckung bringen. Sie zeichnen sich durch eine steile Morgenspitze und einen im Winter im Betrag noch höheren Abendsattel aus (siehe Abb. 4). Desweiteren decken sich Strom- und Warmwasserbedarf eines individuellen Haushaltes bezüglich Verlauf und Betrag. Da die Warmwasserbereitung von der eigentlichen Last durch Warmwasserspeicher entkoppelt ist, sind zwei im Ansatz grundlegend unterschiedliche Betriebsweisen denkbar:

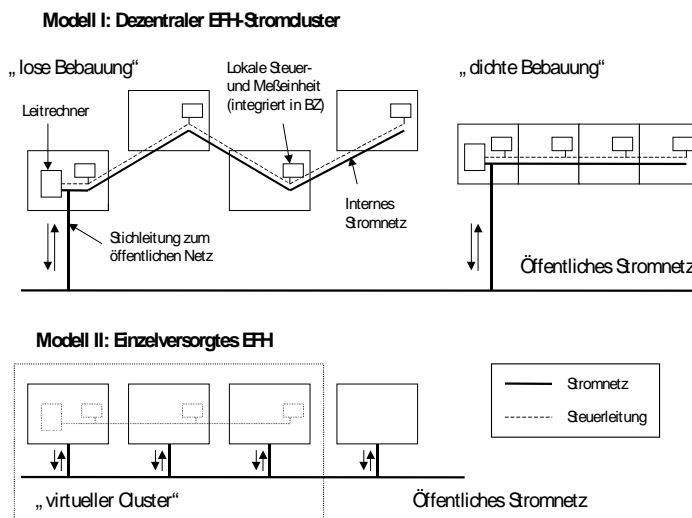
- **Dezentrale Stromsubstitution** (der Objekteigenbedarf wird mit hoher Deckungsrate befriedigt) und
- **Dezentrale Stromerzeugung** (unabhängig vom Bedarf des individuellen Objekts wird gezielt (z.B. als Reserve für den Netzbetreiber oder verkaufbar an der Strombörse) zur Netzeinspeisung erzeugt).

Abbildung 4 Stromtagesprofil im Versorgungsnetz der Bayernwerk AG und einer NEH-Siedlung [IWU, 97]



Die extremen Stromlastspitzen im Einfamilienhaus beeinträchtigen die Wirtschaftlichkeit des Brennstoffzellen-BHKW-Einsatzes durch sehr niedrige Laufzeiten. Durch Bündelung von Lastgängen können diese Spitzen bereits ab etwa 10 Haushalten nivelliert werden [Ritter, 97]. Diese "Clusterung" von Haushalten kann über ein eigenes Stromnetz oder das öffentliche Netz erfolgen (siehe Abb. 5). Hier spielen die künftigen Netzbenutzungsgebühren und die Stellung der KWK in der politischen Debatte (Einspeisevergütung, Quotenregelung) eine entscheidende Rolle.

Abbildung 5 Alternativen der Stromnetzclusterung von Einfamilienhaushalten [TAB, 99]



### 4. Einsatzpotenziale

Die Wirtschaftlichkeit von Brennstoffzellen-BHKW wird von der Stromproduktion dominiert. Da im allgemeinen die Brennstoffzelle nur wenig zur Raumwärmeerzeugung beitragen wird, wird der Spitzenlastkessel genau so groß dimensioniert wie der konventionelle Heizkessel. Wird das Brennstoffzellen-BHKW jedoch größer ausgelegt (z.B. zur dezentralen Stromproduktion, d.h. mit lokalem Stromüberschuß), so reduzieren sich die erlaubten Grenzkosten und die Wirtschaftlichkeit ist nicht maximal, jedoch noch immer wettbewerbsfähig mit der konventionellen Heiztechnik.

Die Zielkosten der Brennstoffzellensystem-Entwickler betragen etwa 1.500 – 2.000 DM/kW<sub>el</sub> für das Siedlungs-BHKW und <4.000 DM DM/kW<sub>el</sub> für das Hausversorgungs-BHKW. In den USA und in Japan werden für kleine PEM-Brennstoffzellen-BHKW auch deutlich niedrigere Systemkosten von 1.000 U.S. \$/kW<sub>el</sub> genannt, die jedoch wegen der unterschiedlichen Zielstellung (siehe Kap. 1) nicht direkt vergleichbar sind.

Detaillierte Parameterstudien zeigen, daß die Kostenanforderungen des Einsatzes sich sowohl für den privaten Betreiber im Einfamilienhaus als auch für den Dienstleister abhängig vom Betriebsfall mit den Entwicklungs-Zielkosten der Entwickler decken können [TAB, 99]. In größeren Versorgungsobjekten kann sogar eine deutlich höhere Wirtschaftlichkeit erreicht werden als mit heutigen Erdgas-, Öl- oder Fernwärmeheizungen.

Da heute nicht absehbar ist, ob Additive in gewöhnlichem Heizöl seinen Einsatz in Reformern behindern, sind die Marktchancen von mit Heizöl betriebenen Brennstoffzellen-BHKW noch unklar. Mit Methanol als Brennstoff werden unter Berücksichtigung der derzeitigen Marktpreise die Kostenziele nicht erreichbar sein. Darüberhinaus beansprucht Methanol gegenüber Heizöl das doppelte Lagervolumen. Es ist eher unwahrscheinlich, daß das Regelwerk die Lagerung größerer Mengen Methanol in privaten Kellerräumen zuläßt.

Die größte Unsicherheit bezüglich Betriebsverhalten und Erreichbarkeit der Kostenziele liegt in der Brennstoffaufbereitungstechnik. Desweiteren wächst die Ungenauigkeit von Kostenaussagen auf Grund von Skalierungseffekten mit zunehmender Miniaturisierung der untersuchten Systeme. Bei kleinen Brennstoffzellen-BHKW trägt auch die schlechte Datenlage über das dynamische Verhalten zur Beurteilbarkeit der Entwicklungsziele bei. Diese Erkenntnis steht gegen die allgemeine Wahrnehmung, daß sich kleine Brennstoffzellen-BHKW eher kommerzialisieren lassen als größerer Systeme.

Sehr früh hat sich die amerikanische Gruppierung SFCCG mit den Einsatzpotentialen der Brennstoffzellen-Technik für die dezentrale Hausenergieversorgung befaßt. Eine Absatzprognose vom April 1997 enthält Tab. 2. Die Pläne dieser Gruppe erscheinen nach aktuellen Informationen durchaus realistisch.

Eine weitere interessante Zahl liefert ein U.S. Hersteller kleiner Brennstoffzellen, der schätzt, daß USA-weit ein Markt von etwa 4% aller Haushalte für den Einsatz kleiner PEM-Brennstoffzellensysteme ausschließlich zur Stromproduktion besteht (geprägt durch niedrige Erdgas- aber hohe Strompreise).

**Tabelle 2 Prognose der jährlichen Absatzzahlen kleiner PEM-Brennstoffzellen-BHKW [SFCCG, 97]**

Jahr	Hausenergieversorgung 2,5 kW <sub>el</sub>	Gewerbe 10 kW <sub>el</sub>	Gewerbe 20 kW <sub>el</sub>
1998	12		
1999	160 (Feldversuche)	2	
2000	60	8	10
2001	2.200	32	46
2002	10.000	130	200
2003	44.000	640	900
2004	176.000	2.650	3.900
2005	440.000	10.000	16.000
Summe	672.972	13.462	21.056

Für Deutschland bzw. Europa geht Vaillant von einem Absatzvolumen von ca. 100.000 Brennstoffzellen-BHKW pro Jahr in 2010 aus. Bei einer Markteinführung ab 2003 würden dann nach einer Hochlaufkurve (2003: 800 und Verdopplung der Jahresproduktion pro Jahr bis 2010) in 2010 bereits 200.000 Stück alleine vom Hersteller Vaillant installiert sein. Da die Zahl der Einsatzfälle auf Versorgungsobjekte mit zentraler Raumwärme- und Warmwasserbereitung beschränkt ist, erscheinen die Annahmen von Vaillant auf Basis der Untersuchung in [TAB, 99] realistisch.

In einer kürzlich veröffentlichten Pressemitteilung wird die Firma RWE zitiert, daß *"der mit Brennstoffzellen-BHKW dezentral erzeugte Strom mittelfristig bis zu 14% des bisherigen RWE-Stromabsatzes ersetzen kann. Das ist mit knapp 25 Mill. kWh jährlich nahezu die Strommenge, die RWE derzeit in den konzerneigenen Atommeilern erzeugt."* Mit zumindest einem Teil der diesen Überlegungen zugrunde gelegten Brennstoffzellen sind jedoch kleine Hochtemperaturbrennstoffzellen (SOFC) mit gekoppelter Gasturbine gemeint, die das Stückzahlensynergiepotential weniger stark nutzen können.

Der Markt für Heizungssysteme in Deutschland beträgt 1 Mio Geräte/Jahr bei etwa 35 Mio. Haushalten und 15 Mio. Wohngebäuden. In 10 Jahren werden etwa die Hälfte des gesamten deutschen Wohnungsbestandes mit zentraler Heizung und Warmwasserversorgung ausgestattet sein. Eine Potentialabschätzung zeigt, daß nahezu 100% dieses Bestandes mit Brennstoffzellen-BHKW versorgt werden könnten.

Eine Vorhersage für das Brennstoffzellen-Einsatzpotential im Gewerbe ist weitaus schwieriger, da die Einsatzrandbedingungen heterogener und weniger leicht zu schematisieren sind. Es läßt sich das bisher auf Basis mittelgroßer Motor-BHKW abgeschätzte Einsatzpotential von 6 – 7% des deutschen Strombedarfs einerseits für Systeme > 100 kW<sub>el</sub> verringern, dafür aber durch die Verfügbarkeit kleinster Brennstoffzellen-BHKW in der Leistungsklasse von 5 – 30 kW<sub>el</sub> vergrößern.

Darüberhinaus ist zu berücksichtigen, daß Brennstoffzellen-BHKW sich durch eine hohe Stromkennzahl auszeichnen und damit das Stromerzeugungspotential bei gleicher Wärmeleistung steigern könnte.

### 5. Entwicklungsstand - Status und Risiken

Die noch junge Brennstoffzellenentwicklung hat seit Anfang der 90er Jahre einen sehr großen Schub nach vorne gemacht. Antrieb war das Interesse der Automobilindustrie an einem emissionsarmen, hocheffizienten alternativen Antrieb zu günstigen Kosten. In Folge dessen begann sich in Deutschland auch das Interesse der Heizungsanlagenhersteller an dieser Technologie zu regen, da die Gewinnmargen aus dem bestehenden Geschäft mit konventionellen Heizungssystemen unter der Öffnung des europäischen Marktes leiden und sich mit der neuen Technologie nicht nur neue Absatzmärkte schaffen sondern auch neue Versorgungsmodelle ("Komfortdienstleistung") entwickeln lassen.

Die entwicklungsseitigen Anforderungen an die stationären Systeme liegen bezüglich der Kosten um einen Faktor 10 – 20 unter dem des automobilen Einsatzes, so daß die Kommerzialisierbarkeit der stationären Aggregate bereits früher erwartet wird. In 2002 wollen amerikanische und deutsche (vermutlich auch japanische) Unternehmen mit der Erprobung kleiner Brennstoffzellen-BHKW unter realen Bedingungen in ersten großen Feldtests beginnen. An eine Kommerzialisierung ist dann ab 2003 bzw. 2004 gedacht.

Obwohl sich die meisten Komponenten- und Systementwickler weltweit zur Zeit auf die Niedertemperatur-Brennstoffzellentechnologie (PEMFC) konzentrieren, ist aus technologischen Gründen bei Erreichbarkeit gemäßigter Betriebstemperaturen von 600 – 700°C nicht auszuschließen, daß auch Hochtemperatur-Brennstoffzellen (SOFC) die Einsatzanforderungen der KWK bezüglich Kaltstartverhalten, Lastdynamik, Lebensdauer und Kosten bei gleichzeitig deutlich einfacher Brenngasaufbereitungstechnik erfüllen. Der besondere Vorteil dieser Systeme liegt auch in der Erreichbarkeit hoher elektrischer Wirkungsgrade durch die Kopplung mit kleinen Gasturbinen, die ebenfalls demnächst für sehr geringe spezifische Investitionskosten am Markt verfügbar sein werden. Für den direkten Wasserstoffeinsatz sind jedoch PEMFC wegen der insgesamt niedrigeren Kosten besser geeignet.

Große Brennstoffzellen-BHKW-Aggregate auf Basis der PAFC-Technik (200 kW<sub>el</sub>) befinden sich bereits seit einigen Jahren erfolgreich im Praxiseinsatz, einzig an der Kostenreduktion auf ein wettbewerbsfähiges Niveau mangelt es noch. Erste PEM-Brennstoffzellen-BHKW höherer Nennleistung (250 kW<sub>el</sub>) wurden und werden zur Zeit zu Feldtestzwecken installiert, darunter ein erstes System ab Dezember 1999 bei der BEWAG in Berlin.

Auf Grund der erwarteten Kostenreduktionspotentiale als Folge der Synergieeffekte mit der automobilen Entwicklung wird ein Erreichen eines wettbewerbsfähigen Kostenniveaus im selben Zeitraum erwartet wie für die anderen Anwendungen. Dadurch dürfte sich eine Synchronisierung der PEM-Brennstoffzellen-Serienreife für den mobilen und stationären Einsatz ergeben.

Der Einführungszeitraum und das Einsatzpotential stationärer Brennstoffzellen zur KWK hängt jedoch von einer Reihe von Unsicherheitsfaktoren ab, von denen einige im Folgenden genannt sind:

- Verhältnis von Strom- zu Gaspreis (je kleiner, desto ungünstiger für den BZ-Einsatz)
- Stellung der KWK in der politischen Debatte (Begünstigung z.B. durch Quoten, Einspeisevergütung, oder Ökosteuern verbessert das Einsatzpotential)
- Erfüllbarkeit der technischen und ökonomischen Entwicklungsziele für kleine Erdgasreformer
- Marktakzeptanz (ein Konsens der Hersteller z.B. könnte durch Investitionsbündelung in einer beschleunigten Einführung resultieren)
- Verlauf des Liberalisierungsprozesses (schnelle Klarheit über künftige Energiemarktstrukturen begünstigt die Einschätzung der Chancen dezentraler KWK)
- Kommerzialisierungserfolge der Brennstoffzellentechnik im Fahrzeug (hohe Stückzahlen und Technologieentwicklungsbemühungen senken spezifische Systemkosten)
- Erreichbarkeit technologischer Entwicklungsziele und Kostenreduktionspotentiale bei der SOFC-Hochtemperaturtechnologie

### Literatur

- [Bünger, 97] Bünger, U.: The residential application of fuel cells in Europe. Tagung des International Fuel Cells Group, Brüssel, 4. Dezember 1997.
- [Ecopower, 99] Neues Mini-BHKW-Angebot. VDI-nachrichten, 15. August 1999.
- [Moore, 97] Moore, T.: Market potential high for fuel cells. EPRI Journal, Mai 1997.
- [IWU, 97] Loga, T.; Müller, C.; Menje, H.; Institut für Wohnen und Umwelt (IWU), Darmstadt: Die "Niedrigenergiehaussiedlung Distelweg" in Niedernhausen – Ergebnisse des Meßprogramms; 1. Auflage, Juli 1997.
- [Kraus, 97] Kraus, E.: Einsatz und Betreibermodelle kleiner stationärer Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerke im Versorgungsgebiet der Stadtwerke München. Diplomarbeit FH München, April 1997.
- [Ritter, 97] Ritter, C.: Einsatzmöglichkeiten der Brennstoffzellentechnologie zur autarken Energieversorgung privater Haushalte, Diplomarbeit, Universität Gesamthochschule Paderborn, April 1997.
- [SFCCG, 97] Market opportunity notice (MON) for market-derived residential fuel cell systems, Issued by Small-scale Fuel Cell Group (SFCCG, Inc.), April 1997.
- [TAB, 99] TAB-Projekt „Einsatzpotentiale von Brennstoffzellen“, Studie durch die DLR, FhG-ISE, FZJ und LBST, wird in 2000 veröffentlicht. Teilstudie: Berthold, O.; Bünger, U.; Niebauer, P.; Schindler, J.; Schurig, V.; Weindorf, W.: Analyse von Einsatzmöglichkeiten und Rahmenbedingungen von Brennstoffzellensystemen in Haushalten und im Kleinverbrauch in Deutschland und Berlin. Studie im Auftrag des Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag, der BEWAG und GASAG, L-B-Systemtechnik September 1999.
- [Zittel, 94] Zittel, W.; Bünger, U.: Durchführbarkeitsstudie für einen räumlich begrenzten Wasserstoffeinsatz im Versorgungsgebiet der Stadtwerke München. ASEW Fachtagung, Bremen 1994.