

Brennstoffzellen – der lange Weg vom Dauertest zur Marktreife

H. Kabisch, Berlin

Brennstoffzellen gelten im Leistungsbereich ab 1 W bis zum Großkraftwerk als Stromquellen der Zukunft. Den Beginn machen z. Z. vorkommerziell gefertigte Brennstoffzellen aus den USA und Kanada, die sich auch in Deutschland im Dauerbetrieb bewähren müssen. Wie Test- und Demonstrationsobjekte deutscher Hersteller sind sie eine unverzichtbare Vorstufe beim Übergang auf die marktreife Hochtechnologie. Den Schwerpunkt bildet die stationäre Energieversorgung, mit der bereits im letzten Jahrzehnt erste Betriebserfahrungen gesammelt wurden. Der mobile Bereich wird hier ausgeklammert [1].

thermischen Systeme wie das Blockheizkraftwerk (BHKW) arbeiten mit besonders niedrigen elektrischen Wirkungsgraden, weil die Energie mehrfach gewandelt werden muss (Bild 1) [2]. Selbst kleine BZ erreichen bzw. übertreffen Wirkungsgrade von modernen Großkraftwerken. Auch der modulare Aufbau der BZ spricht für die neue Stromquelle. Im Gegensatz zu rotierenden Generatoren ermöglicht sie das problemlose Anpassen an die Verbraucher vom Kleinspannungs- bis in den Niederspannungsbereich. Erst dadurch wird sie Laptops, Straßenfahrzeuge, Wohnungen, Häuser, Gebäudekomplexe, ja ganze Regionen mit Strom versorgen können [3][4].

Hoher Wirkungsgrad für jeden Leistungsbereich

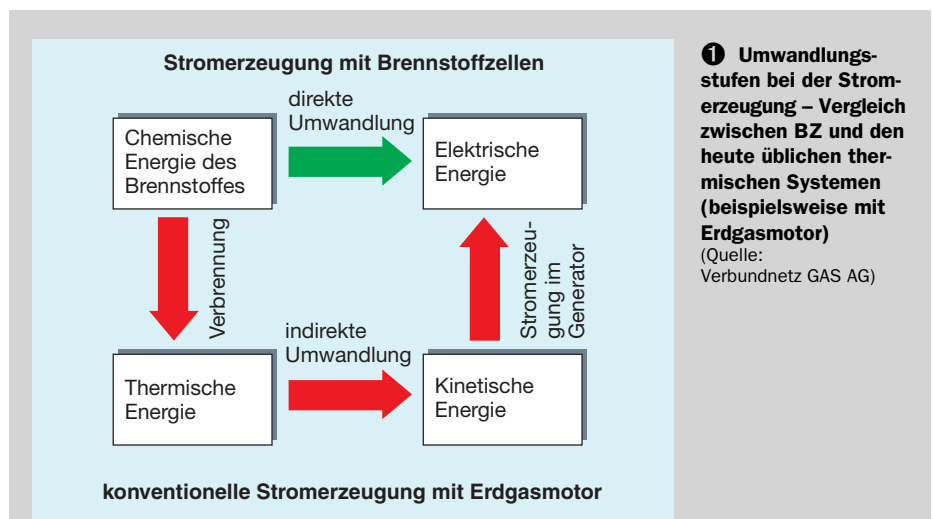
Tafel 1 zeigt die unterschiedliche Typen von Brennstoffzellen (BZ, englisch: Fuel Cell FC). Auf die letzten vier Varianten konzentriert sich gegenwärtig die weltweite Produktentwicklung. Allen gemeinsam ist die Fähigkeit, die im Wasserstoff (H₂) gespeicherte Energie mit Sauerstoff (O₂) in einer einzigen Stufe in Strom umzuwandeln (Bild 1). Das geschieht mit einem beispielhaft günstigen, elektrischen Wirkungsgrad, der thermischen Systemen mit Verbrennungsmotoren, Gas- oder Dampfturbinen physikalisch bedingt verschlossen bleibt. Diese Überlegenheit betrifft

sowohl Spitzenwerte als auch den Teillastbereich und macht die BZ u. a. für die verbrauchernahe Energieversorgung von Wohngebäuden interessant. Die derzeit dort eingesetzten, leistungsschwächeren

Gebäudeintegrierte Brennstoffzellen-BHKW

Die BZ liefert wie alle thermischen Stromerzeuger gleichfalls Abwärme. Das Ver-

Autor
Dipl.-Ing. Helmut Kabisch ist als freier Fachjournalist in Berlin tätig.



Tafel 1: BZ-Systeme, ihre Hauptanwendungen und ihre voraussichtliche Verfügbarkeit

Brennstoffzellen-System	Elektrolyt	Ladungsträger	Betriebstemperatur [°C]	Einsatzgebiete	Verfügbarkeit
Alkalische BZ	Kalilauge	OH ⁻	< 100		
Phosphorsaure BZ PAFC	Phosphorsäure	H ⁺	170 - 220	BHKW	kommerziell verfügbar bis 200 kW (1. Generation)
Protonenaustausch-BZ PEMFC PEFC	Polymermembran	H ⁺	60 - 80 ²⁾	BHKW (HG), transportable Geräte Straßenfahrzeuge	BHKW schrittweise ab 2002; 250 kW-BHKW und Straßenfahrzeuge danach
Karbonatschmelzen-BZ MCFC	Karbonatschmelze	CO ₃ ²⁻	ca. 650	BHKW, KW, HyKW	kommerzielle Serie (etwa 300 kW) ab 2002
Oxidkeramische BZ SOFC	Keramik-Festelektrolyt	O ₂ ⁻	850 - 1000	BHKW, KW	ab 2001 1kW-BHKW, ab 2008 BHKW für 0,25 -10 MW, Groß-KW nach 2010

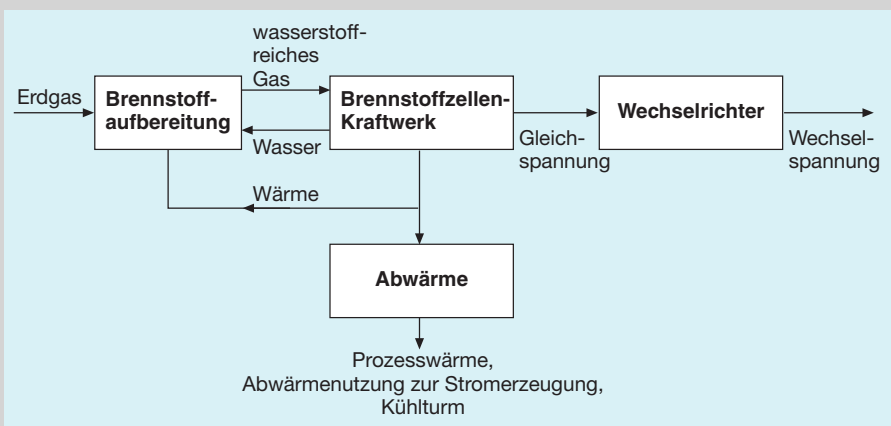
- BHKW (HG) Blockheizkraftwerk als Teil eines Heizgerätes
- KW Kraftwerk ohne bzw. mit geringer Abwärmenutzung
- HyKW Hybrid-BZ-Kraftwerk mit integrierter, stromerzeugender/n Turbine/n

²⁾ Temperaturen bis 130 °C für eine Variante dieses Typs, der sich noch in Entwicklung befindet und reformerlos betrieben werden soll.

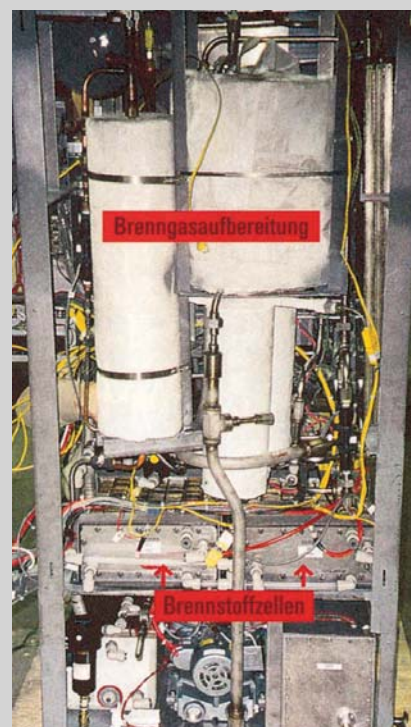
hältnis von nutzbarer elektrischer Leistung zu nutzbarer thermischer Leistung – die Stromkennzahl – wird gegenüber dem konventionellen BHKW von typisch 0,3 bis 0,5 auf 0,8 bis 1 gesteigert. Damit verbunden ist eine variable Stromkennzahl, die die betrieblichen Einsatzmöglichkeiten sowie Laufzeit und Wirtschaftlichkeit verbessert [2]. Insgesamt verliert dadurch die bekannte Kraft-Wärme-Kopplung mit geringer Stromkennzahl, wie sie bei Gegendruckdampfturbinen, einfachen Gasturbinen und kleineren Motoren vorliegt, nach Ansicht der Spezialisten an Bedeutung. Gefragt sind die kostengünstigeren Systeme mit BZ, die unabhängig von der installierten Leistung mit hervorragendem Wirkungsgrad und hohem Gesamtnutzungsgrad der eingesetzten Primärenergie Strom liefern.

Das BZ-BHKW kommt mit seinem bedeutend höheren Stromertrag auch der Tendenz zur Verringerung des erforderlichen Wärmebedarfs durch den künftigen Niedrighausstandard, den Einsatz von Solarkollektoren u. a. entgegen. Diese Energiequelle schließt aber keinesfalls die solare Stromerzeugung aus. Dennoch wird das BZ-BHKW im oder am Haus in den nächsten Jahren Heizungs- und Warmwasseraufbereitungsanlagen anderer Art eher ergänzen. Aus wirtschaftlichen Gründen findet es seinen Platz vorzugsweise im Dauerbetrieb, um den Grundbedarf an Wärmeenergie zu decken. Das als Brennstoff für BZ-BHKW in der Regel eingesetzte Erdgas muss vor der Umwandlung in Strom in einem dreistufigen Prozess aufbereitet werden. Die im Niedertemperaturbereich arbeitenden

PAFC und PEMFC (Tafel 1) benötigen deshalb bis auf weiteres einen „Reformer“ plus Reinigungsstufe, während die beiden Hochtemperaturzellen die Reformierung in die BZ verlagern (Bild 2). Die ersten marktreifen BZ-BHKW erzeugen nur eine geringe elektrische Leistung und sollen in Wohnungen und kleineren Mehrfamilienhäusern zum Einsatz kommen. Das in Bild 3 gezeigte Beispiel befindet sich in vielen Prototypen im Langzeittest. Ein Novum ist die dazugehörige Batterie, die die verfügbare Leistung für etwa eine Stunde auf 5 kW erhöht, gleichzeitig auch die Notstromversorgung bei Störungen übernimmt. Die in Deutschland von der Hamburg Gas Consult GmbH (HGC) entwickelte Hausenergiezentrale (HEZ) wurde erstmalig 1999 in Machern bei Leipzig erprobt.



2 Grobschema eines erdgasversorgten BZ-BHKW



3 Hausenergiezentrale (HEZ) mit US-amerikanischer BZ für 3 kW elektrische netto (0,5 kW selbstgedeckte Verluste) Wärmeleistung: 8 kW bei 60 °C Vorlauftemperatur
Abmessungen: 76 x 71 x 162 cm³
Gewicht: 350 kg
angestrebter Preis: 12.000,- bis 15.000,- DM

(Quelle: HGC)



4 BZ-Heizgerät von Vaillant, vorgestellt im BZ-Innovationspark Berlin-Treptow

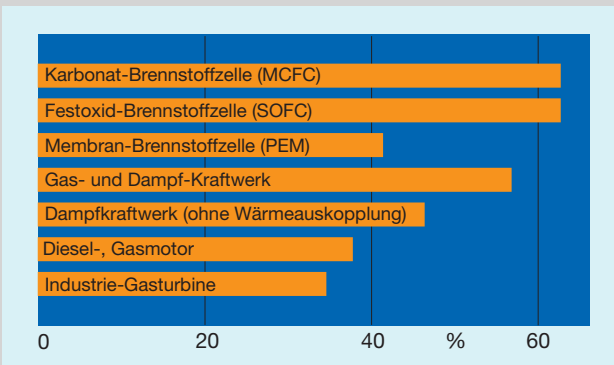


5 Die bisher einzige Hochtemperatur-BZ für den Hausbedarf ist Teil einer Hausenergieanlage mit integriertem Warmwasserspeicher

(Quelle: Sulzer Hexis)



⑥ Während das Innere des neuen 250 kW-PEMFC-BHKW der Bewag im verschlossenen Container unsichtbar bleibt, können die Einzelteile des Vorläufers mit einer 200 kW-PAFC im BZ-Innovationspark¹⁾ in Ruhe betrachtet werden.



⑦ Vergleich der elektrischen Wirkungsgrade der heute üblichen thermischen Systeme

(Quelle: Bewag)



⑧ Modell der 100 kW elektrisch leistenden Versuchsanlage von Siemens-Westinghouse mit der SOFC-BZ. Alles Wichtige darüber ist ebenfalls im BZ-Innovationspark Berlin-Treptow¹⁾ zu erfahren.



⑨ Demonstrationsprojekt einer 280 kW elektrisch leistenden Hochtemperatur-MCFC-Anlage, die Strom und Prozessdampf in die Netze der Universität Bielefeld einspeist. Charakteristisch ist der große Kessel, der alle „heißen Teile“ aufnimmt. Ergebnisse: Verfügbarkeit 75 %, el. Wirkungsgrad 47 %, Gesamtwirkungsgrad 77 % (Quelle: MTU)

Inzwischen gingen weitere solcher Einrichtungen in Hamburg und Ludwigshafen in den Dauerbetrieb. Nach Auswertung der Erfahrungen wird ab 2001 eine vervollkommnete HEZ in Kleinserie gefertigt und erprobt. Ziel ist die Aufnahme der Serienfertigung Ende 2002 – möglichst in Europa [4].

Auch das 4,5 kW elektrisch und 7 kW thermisch leistende Heizgerät von Vaillant (Bild ④), das ohne Batteriespeicher arbeitet, erreichte die Testphase. Bis 2002 werden die ersten 50 Geräte langzeitgeprüft und eine erste Variante für Mehrfamilienhäuser auf den Markt gebracht. Kleinere Varianten für Einfamilienhäuser werden folgen [4][5].

Wesentlich leistungsschwächer ist das in Bild ⑤ vorgestellte Gerät, das im Unterschied zu den vorgenannten mit einer Hochtemperatur-BZ arbeitet. Der Testbetrieb erster Muster begann 1997 in der Schweiz. Weitere Prototypen arbeiten erfolgreich seit 1998 bei verschiedenen europäischen EVU. Nach Ende der Dauererprobungen mit einer Vorserie in 2001 beginnt die Markteinführung, die planmäßig 2003 abgeschlossen sein wird.

Europas erstes PEMFC-BHKW für 250 kW steht in Berlin

Alternativ zu den genannten Klein-BZ-BHKW entwickelte die kanadische Ballard mit der französischen Alstom ein BHKW, das künftig ganze Gebäudekomplexe mit Energie beliefern soll [6]. Seine Containerbauform eignet sich für die Freiluftaufstellung in unmittelbarer Gebäudenähe. Wegen der eingesetzten PEMFC-Technologie soll die Anlage (Bild ⑥) gegenüber einer PAFC-BZ, dem Vorläufer, leistungsfähiger sein und wirtschaftlich mit Klein-BZ-BHKW konkurrieren können. Die erste ihrer Art in Europa steht zusammen mit dem genannten Vorläufer im BZ-Innovationspark der Berliner Bewag¹⁾. Sie ist damit Teil einer umfassenden Schau für jedermann, aber gleichzeitig mehrjähriges Testobjekt für fünf europäische EVU. Wie weitere Referenzanlagen dieses Typs in Europa verbraucht sie als Primärenergie Erdgas und zu Vergleichszwecken kurzzeitig H₂. Nach etwa einjähriger Beobachtungsphase wird die BZ mit dem Niederspannungs- und dem

1) Berliner/innen und Berlinbesucher/innen können kostenlos im Innovationspark des Energieversorgers Bewag (Treptow, Eichenstr. 4EEcke Puschkinallee, www.innovation-brennstoffzelle.de) Wissenswertes zum Themenkreis „Energiewirtschaft – Wasserstoff – Brennstoffzelle“ erfahren. Dazu ein ausführlicher Bericht auf den Seiten 1084 und 1085.

Fernwärmenetz im Dauerbetrieb gekoppelt. Die kommerzielle Einführung beginnt 2003. Ein Jahr später soll in Dresden bei der Fa. Alstom die Serienproduktion für Europa anlaufen.

Langzeittest mit dem PAFC-System

Solche ergebnisorientierten Langzeittests werden durch Betriebserfahrungen gestützt, die im Vorfeld vor allem mit dem PAFC-System gesammelt wurden. Sie ersetzen zwar nicht den Qualitätsnachweis für die bei Neuentwicklungen bevorzugten anderen BZ-Technologien nach Tafel 1. Um die Risiken einer weltweit am Anfang stehenden Hochtechnologie zu mindern, wurde aus Zeitgründen der Umgang mit BZ vor Ort erlernt. Erfahrungen bei der Planung, dem Betrieb, Wartung, Service etc. konnten gesammelt werden.

Nicht weniger wichtig war der prinzipielle Nachweis technischer Eigenschaften, die gravierend die Wirtschaftlichkeit beeinflussen. Dazu gehören vor allem der Wirkungsgrad, eine Lebensdauer von mindestens 40 000 Stunden und die Langzeit Konstanz der leistungsbestimmenden Parameter.

Gleichzeitig zeigten die Tests Entwicklungsreserven auf, mit denen künftig die BZ-Technologie noch verbessert werden kann. Unter anderem gilt das für ein in der Nähe von Tokio errichtetes 11 MW-BHKW, das von 1991 bis 1997 betrieben wurde. Das Ergebnis zeigte deutlich, dass mit modular aufgebauten BZ-Anlagen auch Großkraftwerke über den 100 MW-Bereich hinaus technisch möglich sind.

Seit Anfang des vergangenen Jahrzehnts sind in den USA PAFC-BHKW aus einer Kleinserienfertigung verfügbar. Etwa 200 dieser anschlussfertigen 200 kW-Anlage in Containerbauweise der Typen PC 25, A und C (verkleinerter und verbesserter Typ), wurden bisher verkauft. Ein Dutzend davon testeten deutsche EVU u. a. in Verwaltungsgebäuden, Hallen bzw. Freibädern.

Von besonderer Bedeutung ist eine in Hamburg-Bahrenfeld von der HEW installierte Anlage. Sie ist Deutschlands größte und in Europa die erste BZ-BHKW-Anlage der Typen A und C, die die Energieversorgung realitätsnah langfristig für ein Wohngebiet erprobt. Während das erste, 1995 errichtete BHKW Erdgas benutzt, verbrennt das zweite seit Sommer 1997 industriell erzeugten Wasserstoff (H_2).

Neben betriebstechnischen Erfahrungen wird die Akzeptanz des vielfach als besonders gefährlich geltenden, aber

zukunftsträchtigen Brennstoff H_2 im Wohnumfeld ermittelt [7].

Beide BHKW sind Teil einer Wärmeversorgung für 680 Wohnungen. Ihre thermische Leistung deckt im Sommer den Wärmebedarf der Wohnhäuser. Das Überangebot speichert ein 10 m^3 -Wassertank, um bei Lastspitzen aus dem Speicher abgezogen zu werden. Im Winter erhöht die Abwärme der BHKW die Rücklauftemperatur im Wärmenetz.

Alle bisherigen Ergebnisse bezeichnet die ausführende Consulectra als positiv. Die nachgewiesene Verfügbarkeit liegt deutlich über 70 %.

Ein weiteres Erprobungsprojekt im Malteserkrankenhaus in Kamenz verfolgt zusätzlich das Ziel, das Zusammenwirken von BZ-BHKW mit anderen innovativen Komponenten zu testen. Die Anlage ist so konzipiert, dass BHKW und eine wärmegetriebene Adsorptions-Kältemaschine im Grundlastbereich arbeiten. Die BZ übernimmt im Inselbetrieb zusätzlich die Notstromversorgung. Diese Betriebsweise begründet übrigens in den USA den zu erwartenden BZ-Boom. Die Wärmeenergie wird bei dieser Ausführung aus wirtschaftlichen Gründen und der Umwelt zuliebe von Solarkollektoren und vom BHKW gedeckt. Reichen sie nicht aus, liefern zusätzlich die Gasbrenner Wärme und die stromgetriebene Kompressionsmaschine Kälte. Bei Bewährung dieses Konzepts könnte es längerfristig auch ein Vorbild für Wohn- und Bürogebäude werden.

Im Gegensatz zu allen anderen in Europa betriebenen PAFC-BHKW nutzt das im Mai dieses Jahres in Köln-Rodenkirchen in Betrieb genommene nicht Erd-, sondern Klärgas zur Stromerzeugung. Diese besonders umweltfreundliche Technologie kennt in den USA zwei Vorläufer. Diese neue Form der Gasaufbereitung wird künftig in modifizierter Form auch für PEMFC-BHKW benutzt.

Hochtemperaturzellen für große Leistungen

Das Einsatzgebiet von Hochtemperaturzellen (vgl. ep 10/2000, LuK, S. 12 – 14) befindet sich oberhalb der bisher angegebenen Leistungsgrenze von 250 kW. Bild 7 zeigt, dass ihr elektrischer Wirkungsgrad die Grenzwerte der derzeit modernsten thermischen Kraftwerkssysteme überschreitet. Wird die Abwärme zwischen 400 und 700 °C zusätzlich zum Antrieb von Generatoren genutzt, können in diesen Hybridanlagen sogar 65-70 % der eingesetzten Primärenergie in Elektroenergie umgewandelt werden. Dennoch

ist gegenwärtig nicht erkennbar, wann diese Technik in den Leistungsbereich von Großkraftwerken vordringt. Das gilt insbesondere für die SOFC-Technologie, die die Größenordnung von einigen MW erst langfristig erreichen wird.

Nach Inbetriebnahme einer ersten 100 kW-Anlage besteht jetzt das Ziel, bis 2001 eine 320 kW-SOFC-Hybridanlage zu fertigen (Bild 8). Schon ein Jahr später steht eine Leistungserhöhung auf 1 MW auf der Tagesordnung.

Kürzere Fristen verspricht die MCFC-Technologie. Nach Inbetriebnahme einer ersten, 1999 in Bielefeld installierten 280 kW-BZ-Anlage will die Friedrichshafener MTU fünf weitere der in Bild 9, gezeigten „Hot-Module“ bis 2001 errichten. Bereits ein Jahr später schließt sich nach Willen der MTU eine erste „vorkommerzielle“ Klein-Serie an. Ziel ist zunächst der Leistungsbereich zwischen 250-400 kW. Die Markteinführung ist für 2005 vorgesehen.

Schlussbemerkung

Letztlich sind alle Termine von der Erfüllung der ehrgeizigen Kostenziele abhängig. Den Vergleichsmaßstab bilden dabei Kosten und Gebrauchswerte konventioneller BHKW und Stromerzeuger. Eine vorübergehende Subventionierung durch Hersteller, EVU und/oder aus dem Staatssäckel ist bis zur rationellen Serienfertigung wohl kaum zu umgehen. Mittelfristig wird sich die BZ-Technologie bestimmen durchsetzen und ein innovatives Geschäftsfeld auch für das Handwerk bilden.

Literatur

- [1] Sieberth, W.: Elektrische Straßenfahrzeuge. Elektropraktiker, Berlin 54(2000)9, S.732
- [2] Kabisch, H.: Blockheizkraftwerke unterstützen umweltfreundlich die Versorgung mit Strom und Wärme. Elektropraktiker, Berlin 53(1999)3, S.228-232
- [3] Kabisch, H.: Messebericht Hannover, Teil Energie- und Umwelttechnik. Elektropraktiker, Berlin 52(1998)7, S.667-671
- [4] Kabisch, H.: Tagungsbericht Brennstoffzellen für Stromversorgung und Straßenfahrzeuge. Elektropraktiker, Berlin 54(2000)1, S.10-12
- [5] Kabisch, H.: Brennstoffzellen für dezentrale Energieversorgung. Elektropraktiker, Berlin 54(2000)1, LuK S.11-13
- [6] Kabisch, H.: Brennstoffzellen-BHKW für den Endverbraucher. Elektropraktiker, Berlin 54(2000)5, S.439
- [7] Krause, J.: Wasserstoff – umweltfreundliche Energie der Zukunft. Elektropraktiker, Berlin 53(1999)7, LuK S.1-3