

Brennstoffzellen für die stationäre Versorgung

H. Kabisch, Berlin

Die Brennstoffzelle ist ein Multitalent. Sie liefert künftig Energie für portable Elektrogeräte, Fahrzeuge, Industrie oder Wohnungen. Ende dieses Jahrzehnts dürften auch die ersten in Deutschland entworfenen und gefertigten Geräte für die stationäre Strom- und Wärmeversorgung die Marktreife erreichen. Der massenweise Einsatz kommt vermutlich wesentlich später.

1 Spitzenwerte für den elektrischen Wirkungsgrad

Die Erhöhung der Brennstoffausnutzung mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ist im Bereich der stationären Energieversorgung gegenwärtig eine der wichtigsten Aufgaben, um die Sicherheit der Stromversorgung zu erhöhen und gleichzeitig die Klima gefährdenden CO₂-Emissionen zu reduzieren. Nach wie vor ist die gleichzeitige Erzeugung von elektrischer und thermischer Energie mittels KWK effektiver als eine getrennte. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der dezentralen Energieerzeugung in gebäude- und industrienahen Regionen, die auf diesem Weg verbrauchernah mit Energie versorgt werden [1, 2, 3].

Träger dieser KWK ist zu großen Anteilen das motorisch angetriebene Blockheizkraftwerk (BHKW), dessen elektrische Leistung von einigen kW bis über die MW-Grenze reicht. Sein elektrischer Wirkungsgrad wird durch die mehrfache Umwandlung in mechanische, thermische und elektrische Energie reduziert. Die dabei entstehenden Verluste lassen sich mit einer Brennstoffzelle (BZ) vermeiden. Verbunden damit erhöhen sich die elektrischen Wirkungsgrade auf Werte, die unter anderem vom erreichten Stand der Brennstoffzellen-Technologie abhängen und die von konventionellen Kraftwerken nicht erreicht werden. Im Gegensatz zu anderen Stromerzeugern ist auch der Wirkungsgrad bei Teillast in weiten Bereichen annähernd konstant. Bereits bei halber Volllast erreicht er etwa sein Maximum.

Neben ihrem hohen Wirkungsgradpotential verfügt die Brennstoffzelle über große Chancen, um im Laufe der Zeit die CO₂-Emission weiter zu reduzieren. Aus diesen Gründen wird die BZ auch als Schlüsseltechnologie für die stationäre Energieversorgung bezeichnet.

2 Eine Umwandlungsstufe genügt

Grundsätzlich ist jede BZ ein einstufiger elektrochemischer Energiewandler, der ähnlich wie eine aufgeladene Batterie chemisch gebundene Energie bei Bedarf in Form von Gleichstrom liefert. Um Elektroenergie von der BZ zu erhalten, benötigt sie kontinuierlich Wasserstoff (H₂), ein häufig verallgemeinert als Brennstoff bezeichneter Energieträger. Durch Zufuhr von Sauerstoff (ausreichend ist vielfach der Sauerstoffanteil in der Luft) reagiert H₂ unter Abgabe von elektrischer und thermischer Energie zu Wasser (H₂O). Es handelt sich nicht um einen Verbrennungsprozess, sodass bei dieser Umwandlung keine Schadstoffe entstehen.

Nicht alle BZ haben den gleichen Aufbau und damit gleiche Eigenschaften. Ihr wichtigstes Unterscheidungsmerkmal ist der verwendete Elektrolyt. Insgesamt gibt es fünf unterschiedliche Elektrolyten, die den BZ-Typ bestimmen. Dieser Elektrolyt ist eine Schicht, die H₂ und Sauerstoff (O) voneinander trennt und damit eine Explosion verhindert. Gleichzeitig sorgt diese Trennschicht dafür, dass die durch die Zonenwanderung zwischen den Elektroden aufgebaute Gleichspannung erhalten bleibt und über den äußeren Stromkreis genutzt werden kann. Ein weiteres Merkmal ist die Betriebstemperatur, die in Hoch- und Niedertemperatur unterteilt wird.

In Deutschland konzentriert sich die Entwicklung für die stationäre Energieversorgung im Wesentlichen auf drei unterschiedliche BZ-Typen. Dazu gehört an erster Stelle die

- **Niedertemperatur-BZ PEMFC (Polymer-elektrolyt-BZ).**

Hinzu kommen **Hochtemperaturzellen** vom

- Typ **MCFC (Schmelzkarbonat-BZ)** und vom

- Typ **SOFC (Festoxyd-BZ).**

Alle drei Typen sind Gegenstand einer jahrzehntelangen Forschung und Entwicklung. Schwerpunkt ist gegenwärtig der Test schrittweise verbesserter Prototypen oder Vorserienmuster.

3 Erdgas als H₂-Brücke

Nicht ganz frei von Problemen ist die Beschaffung und der Transport des zum BZ-Betrieb erforderlichen Energieträgers H₂. Er kommt in der Natur nur in Form von chemischen Verbindungen vor und wird bisher von der Industrie wenig umweltfreundlich aus fossilen Energieträgern wie Kohle und Erdgas für eigene Zwecke hergestellt. Für den BZ-Betrieb wird die Möglichkeit genutzt, Erdgas unmittelbar in der Anlage aufzubereiten. Das erfordert, neben einer Reinigung das Erdgas zu reformieren. Dabei wird sein chemischer Verbund gelöst und ein H₂-reiches Prozessgas erzeugt. Erdgas wird damit eine Brücke zur Versorgung über das bestehende Erdgasnetz, das bis in die Gebäude reicht und damit die Voraussetzung für einen massenweisen BZ-Einsatz schafft.

Handelt es sich um eine Hochtemperatur-BZ, erfolgt die Reformierung in einem gemeinsamen Gehäuse mit der BZ. Werden Niedertemperatur-BZ mit Erdgas betrieben, wird der dezentrale Reformierungsprozess in einem gesonderten Reformier vollzogen. Im erstgenannten Fall spricht man von einer internen Reformierung, deren Aufwand an Energie und Apparaturen kleiner ist. Damit verbunden ist der Wirkungsgrad einer Hochtemperatur-BZ größer als der einer Niedertemperatur-BZ mit einem gesonderten, auf Hilfsenergie angewiesenen externen Reformier. Diese Unterschiede gelten nicht nur für Erdgas. Sie bestehen auch, wenn mit spezifischen Aufbereitungsanlagen Bio-, Gruben-, Deponie- oder Klärgas oder Treibstoffe wie Benzin als H₂-Quelle genutzt werden.

4 Gebäudeintegrierte BZ

Die Entwicklung gebäudeintegrierbarer KWK begann schon vor etwa drei Jahrzehnten mit elektrischen Leistungen bis zu 10 kW. Inzwischen gibt es einzelne Hersteller, die seit mehreren Jahren gasmotorisch angetriebene BHKW mit einer Leistung von 5 kW oder weniger anbieten. An erster Stelle rangiert Senertec mit insgesamt mehr als 6000 verkauften Anlagen. Parallel dazu haben sechs Hersteller, darunter auch Produzenten aus der Heizungsbranche sowie Partner aus den USA und Kanada mit der Entwicklung von BZ-Heizgeräten in Deutschland begonnen. Das grundlegende Ziel ist, den Grundlastbedarf von Ein-, Zwei- und kleineren Mehrfamilienhäusern sowie im Gewerbe mit BZ und meistens auch mit Zusatzbrenner abzudecken. Die Erweiterung der Anlage um einen konventionellen Heizkessel wird ebenso eingeräumt. Zusätzliche Warmwasser- und Pufferspeicher runden die Systeme ab. Bis auf die Schweizer Sulzer Hexis setzen alle Entwickler auf PEMFC-BZ mit

Autor

Dipl.-Ing. Helmut Kabisch ist freier Fachjournalist, Berlin



❶ Geöffneter zentraler Stahlkessel mit BZ, eine der drei Baugruppen der HotModule.

einer elektrischen Leistung zwischen 1 und 4,6 kW.

Besonders erwähnenswert ist das Konzept von Viessmann, dessen Kern eine BZ mit einer elektrischen Leistung von 2 kW und einer thermischen Leistung von 5 kW ist. Sie entstand mit Unterstützung des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung in Ulm und ist die einzige BZ unter den sechs Herstellern, die in Deutschland produziert wird. Gemäß der Viessmann-Prognose erreicht das BZ-Heizgerät ab 2010 die Marktreife. Mitbewerber European fuel cells will dieses Ziel sogar erst ab 2012 erreichen. Spitzenreiter sind nach dieser Prognose aus der zweiten Hälfte des Vorjahres RWE/Buderus, Sulzer Hexis und Vaillant. Ihre Prognose lautet „ab 2008“. Besonders wichtige Ziele sind eine hohe Lebensdauer, die Senkung der Kosten und Wirkungsgrade, die je nach Hersteller zwischen 30 und 35 % liegen [4].

Bestandteil der BZ-Heizgeräte ist eine umfangreiche Elektronik. Sie beginnt beim Wechselrichter, der die Gleichspannung der BZ in eine nach Spannungshöhe, Frequenz und Phasenlage netzkonforme Spannung umformt. Integriert ist ferner ein Energiemanager zur Koordinierung der verschiedenen Systemkomponenten für Strom und Wärme (einschließlich Speicher).

Damit wird es möglich, das KWK-System wärme- oder stromgeführt zu betreiben (Orientierung nach Strom- oder Wärmebedarf). Darüber hinaus ist es auch möglich, unter Nutzung eines Kommunikationssystems alle BZ eines Netzbereiches, die ihre „Hausaufgaben“ erledigt haben, zeitweise in die regionale Stromversorgung einzubeziehen. Damit wird eine Betriebsart erreicht, die aus einer größeren Anzahl von vorübergehend „arbeitslosen“ KWK-Systemen ein „virtuelles Kraftwerk“ machen, das der regionale Netzbetreiber als leistungsstarken Stromerzeuger einsetzen kann. Einsatzmöglichkeiten ergeben sich bei der Realisierung eines Lastmanagements oder wenn Regelenergie gefordert wird. Vorausgesetzt ist aber, dass die erzeugte Wärme gespeichert werden kann.

Für das erste mit 31 BZ-Heizgeräten realisierte virtuelle Kraftwerk begann bereits im Januar 2004 die Erprobung. Dabei verzichteten die Betreiber aus Kostengründen allerdings auf eine bidirektionale Steuerung. Sie nutzten eine unidirektionale Funkrundsteuerung, so dass Rückmeldungen der BZ-Anlagen zur Leitwarte unmöglich wurden. Ein Bericht über Ergebnisse und Schlussfolgerungen liegt noch nicht vor. In jedem Fall ist aber mit weiteren Tests zu rechnen.

5 Höhere BZ-Leistung mit höheren Betriebstemperaturen

Nach wenig erfolgreichen Versuchen, PEMFC-BHKW der 250-kW-Klasse zu entwickeln, setzt die deutsche Industrie seit mehr als einem Jahrzehnt verstärkt auf Hochtemperaturzellen. Vorteilhaft sind dabei die vereinfachte Reformierung und der höhere elektrische Wirkungsgrad. Inzwischen steht die erste 250-kW-BZ vom Typ MCFC kurz vor der Marktreife. Entwicklungsträger ist die in Ottobrunn bei München und in Friedrichshafen ansässige MTU CEF Solutions – ein Unternehmen der Daimler-Chrysler AG (Bild ❶). Der elektrische Wirkungsgrad der als HotModule bezeichneten Strom- und Wärmelieferanten beträgt knapp 50 %. Inzwischen wurden nahezu 20 Feldversuchsanlagen erprobt. Zwei dieser Geräte wurden in den USA (Automobilindustrie, Energieversorgung) getestet. Zum Kundenkreis gehören auch Betreiber aus Asien und Europa. In Deutschland gibt es Testanlagen in Industriebetrieben, Krankenhäusern und Wohngebieten. So wird u. a. in Krefeld-Fisdeln (NRW) die Wärmeversorgung im Winter für bis zu 40 und im Sommer für bis zu 300 Wohneinheiten übernommen. Der erzeugte Strom wird in das öffentliche Netz der Stadtwerke Krefeld eingespeist.

Zu den Testobjekten gehören auch HotModule, die nicht nur aus dem Erdgasnetz versorgt werden. Auch Kohle-, Bio-, Deponie-, Klär- und Grubengase sowie diverse Industriegase wurden getestet. Schwerpunkt ist dabei die Auswahl des Gasaufbereitungssystems.

Parallel zu den Langzeiterprobungen werden weiterhin Testergebnisse in das Konzept eingearbeitet sowie Kosten durch den Übergang auf eine rationelle Fertigung und durch Materialeinsparung reduziert. Maßstab sind gasmotorische Anlagen, die mit Preisen von weniger als 1000 Euro pro kW Leistung die Ziellinie bestimmen. 2006 ist das Jahr, in dem zur Kleinserienfertigung übergegangen werden soll.

Darüber hinaus hat das Unternehmen auch weiter gehende Ziele, so die Steigerung der Energiedichte der BZ und die Verlängerung ihrer Lebensdauer (zurzeit etwa fünf Jahre). Damit verbunden ist die Erhöhung der Stromausbeute einer einzelnen Zelle von 0,7 auf 1 kW. Schließlich denkt das Management darüber nach, ob und wann andere Leistungsbereiche erschlossen werden können. Dazu gehört auch die Kombination der HotModule mit nachgeschaltetem Turbogenerator (siehe „SOFC“).

6 Methanol für die stationäre Stromversorgung

Methanol als Energieträger für BZ ist nicht neu. Vor allem die Fahrzeugindustrie verfolgt diesen Weg, weil ein flüssiger Kraftstoff wie Benzin und Diesel angeboten wird, der sich in der vorhandenen Infrastruktur einfach lagern, transportieren und tanken lässt. Dieser Vorteil gegenüber H_2 könnte möglicherweise Methanol zu dem Kraftstoff für den Straßenverkehr der Zukunft machen. Aus Sicht eines Energiekonzerns wie Vattenfall/Bewag könnte Methanol neben Erdgas ein Energieträger für BZ sein, der die Sicherheit der Stromversorgung erhöht. Um das testen zu können, wurde Ende September 2004 im Berliner BZ-Park ein HotModule in Betrieb genommen, das beide Brennstoffe nutzt [5].

Die installierte BZ-Anlage entspricht weitgehend der Standardausführung von MTU. Zusätzlich ist zwischen der Brennstoffaufbereitung und der BZ eine „spezielle Vorreformierung“

rungsstufe“ eingefügt. Außerdem wurde die Brennstoffaufbereitung für Erdgas um eine Aufbereitung für Methanol ergänzt. In beiden Fällen wird der Brennstoff im Gehäuse der BZ reformiert. Zur Sicherstellung eines flexiblen Betriebes ist zu allen Zeiten ein reiner Erdgas- oder ein Methanolbetrieb möglich. Bei Bedarf lassen sich alle gewünschten Mischungsverhältnisse realisieren. Damit ist dieses HotModul im Notfall vom Erdgas unabhängig, und die Netzstromversorgung wird nicht gestört.

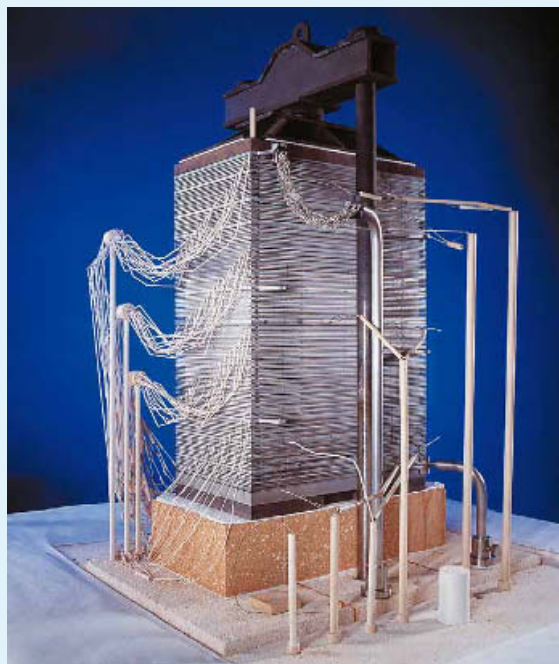
Mit dem Demonstrationsprojekt soll aber auch nachgewiesen werden, dass sich aus organischen Abfällen und Biomasse der beschriebenen Art gewonnenes Methanol in der MCFC-BZ effizient für die Energieversorgung nutzen lässt. Das benötigte Methanol wird aus dem Abfallverwertungszentrum Schwarze Pumpe bezogen. Dort besteht eine entsprechende Vergasungsanlage, die die Gewinnung des Energieträgers sicherstellt.

Gegenwärtig wird auch Methanol für industrielle Zwecke aus Erdgas oder Kohle gewonnen. Damit belastet dieser Energieträger im erheblichen Umfang die Atmosphäre mit dem Treibhausgas CO_2 . Wird alternativ vergaste Biomasse oder Abfallbiomasse (Biomüll und behandelte Abfallhölzer) zur Methanolerzeugung genutzt, dann verschlechtert sich die ökologische Bilanz lediglich um einen Anteil, den die dabei verwendete Hilfsenergie verursacht.

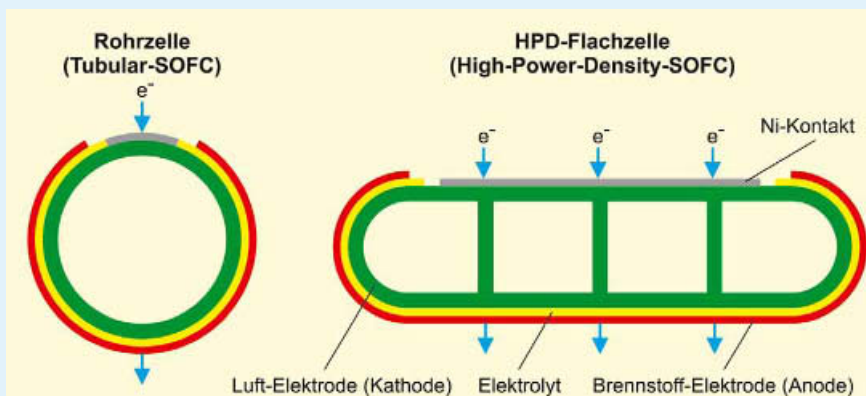
7 Neue Konzepte mit Temperaturen bis 1 000 °C

Während die MCFC-BZ bei Temperaturen um 600 °C arbeiten, steigt die Betriebstemperatur in SOFC-BZ bis auf 1 000 °C. Das bedeutet eine erhebliche Mehrbelastung des Materials und den Übergang auf neue Technologien. Denn noch sind – wie das von Sulzer Hexis entwickelte 1-kW-Hausenergiesystem mit SOFC-BZ zeigt – auch diese Betriebstemperaturen zu beherrschen. Die unlängst in Berlin durchgeführte Jahrestagung des Forschungsverbundes für Sonnenenergie (FVS) zeigte, dass die SOFC-Technologie gute Chancen hat, auch im mittleren und obersten Leistungsbe- reich Fuß zu fassen [6]. Dabei verfolgen die Forscher unterschiedliche konstruktive und technologische Konzepte. Entwicklungsträger sind dabei Siemens, das deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Köln (DLR), das Forschungszentrum Jülich (FZJ) und als wohl jüngster Partner das Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Sinterwerkstoffe (IKTS) in Dresden.

So gelang es dem IKTS, mit neuen Materialien und Technologien im Bereich der Hochleistungskeramik BZ zu entwickeln, deren prognostizierte Lebensdauer 40 000 Stunden beträgt. Damit rückt die Kommerzialisierung derartiger Systeme in greifbare Nähe – so der Leiter des Instituts. Die Wissenschaftler des



② Planare SOFC für eine Betriebstemperatur von 760 °C mit einer spezifischen Membran-Elektroden-Anordnung (MEA) auf dem Versuchsstand (60 MEAs; 13 kW_{el})



③ Schematische Darstellung der HPD-Flachzelle (rechts) im Vergleich zur Rohrzelle (links)

Forschungszentrums Jülich verfolgen ein planares BZ-Konzept, das dem Systemaufbau der PEMFC-BZ ähnelt. Es werden mehrere plattenförmige BZ übereinander gestapelt. Wichtigste Forschungsschwerpunkte sind dabei die Entwicklung und Optimierung geeigneter Elektroden-, Elektrolyt- und Kontaktwerkstoffe sowie die Verarbeitung von Pasten, Suspensionen usw. zu Bauteilen und Schichten. Realisiert wurde ein Stapel aus 60 einzelnen BZ, der mit einer Ausgangsleistung von 13 kW mit H_2 und Sauerstoff der Luft betrieben wurde und „ein sehr gutes Ergebnis lieferte“ (Bild ②). Dabei liegt die Betriebstemperatur von 760 °C um 100 °C niedriger als bisher. Das wirkt sich günstig auf Kosten und Lebensdauer der verwendeten Materialien aus. Nach Einschätzung der Forscher könnte die Technologie eine gute Basis für die Entwicklung von SOFC-Systemen kleiner und mittlerer Leistung z. B. für den Hausbereich bilden.

Andere Forschungsaufgaben haben das Ziel, auf Basis der von IKTS geschaffenen Grundlagen ein bis zu 5 kW_{el} leistendes SOFC-System zu entwickeln. Basis sind BZ-Stacks, die im Fahrzeugbereich als Batterieersatz und

gleichfalls in der Hausenergietechnik eingesetzt werden. Zusammen mit den FVS-Instituten in Jülich und Freiburg (Breisgau) besteht die Aufgabe, auch für das Umfeld der BZ Systemelemente zu schaffen, die aufgrund der größeren Stückzahlen ebenfalls in Deutschland gefertigt werden. Ein solches Konzept ist sicher zu begrüßen, weil der beschleunigte Einsatz der BZ auf beiden Gebieten Kosten senkt und Arbeitsplätze schafft. Als ein Ergebnis dieses Konzepts wurde zur diesjährigen Industriemesse in Hannover der erste langzeitstabile SOFC-Stack mit einer elektrischen Leistung von 1 kW vorgestellt.

8 Höchste Leistungen mit neuem Konzept

Allerdings gibt es im obersten Leistungsbe- reich noch keine produktionsreife Lösung, die gleichzeitig wirtschaftlich vertretbar ist. Von vornherein scheiden planare BZ-Systeme wie in Bild ② gezeigt aus, da sie im obersten Leistungsbereich technologisch nicht beherrschbar sind. Erst mit Bildung von Siemens West-

inghouse Power Corporation (SWPC) entstand als Alternative das so genannte Rohrkonzept. Seine Basis sind gebündelte, Kathoden gestützte Rohrzellen mit einer Länge von 1,8 m und 22 mm Durchmesser. Mehr als 1000 dieser Rohrzellen sind für eine 125-kW_{el}-BZ erforderlich. Mit diesem Konzept gelang es in den USA, Holland und Deutschland, mehrere Stromerzeuger mit Betriebstemperaturen von 1000 °C zu realisieren. Durch die Kombination mit Mikrogasturbinen wurde eine elektrische Leistung von bis zu 300 kW realisiert. Leider scheiterte ein 1-MW-Projekt, da weltweit keine geeignete Mikrogasturbine lieferbar war.

Trotz der nachweisbar guten Eigenschaften der von Siemens entwickelten SOFC-BZ fehlt auf dem Weg bis zur Marktreife noch eine beträchtliche Kostensenkung. Um sie zu erreichen, hat Siemens zusammen mit zwei Instituten nach neuen Wegen gesucht, um die Leistungsdichte der einzelnen Zellen, Fertigungsverfahren, Wirkungsgrad und Standzeiten zu verbessern. Im Ergebnis der Forschungsarbeiten entstand aus dem Rohrkonzept eine Wabenstrukturfläche – eine rohrähnliche Geometrie mit eingezogenen Stegen. Bild 3 zeigt die Unterschiede zwischen Rohrzellen (Tubular-SOFC) und der neuen, HPD (High Power Density)-SOFC. Die

Wabenstruktur bringt eine deutliche Verkürzung der Stromwege und damit Leistungssteigerungen. Das Aufbringen der Funktionsschichten erforderte weiter entwickelte oder zu adaptierende Verfahren. Daran waren neben Siemens auch das Forschungszentrum in Jülich, das deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt und wiederum das IKTS beteiligt [6].

Dennoch sind allein mit diesem Stand nicht alle Probleme geklärt, die vor der Installation von BZ im MW-Bereich noch gelöst werden müssen. An erster Stelle stehen aus Sicht der Forscher der noch unbefriedigende Entwicklungsstand und die hohen Fertigungskosten. Das bedeutet insbesondere die Optimierung des Produktionsprozesses und ein Konzept zur Behandlung des in der BZ nicht vollständig umgesetzten Brenngases und der Abwärme. Unverzichtbar sind ebenso die Weiterentwicklung der Mikrogasturbine zur Erhöhung des Wirkungsgrades und der Brenngasaufbereitung (Reinigung, Reformierung und Nachverbrennung). Insgesamt zielt SWPC auf elektrische Wirkungsgrade bis zu 70 %. Die derzeitige Spitze für konventionelle Stromerzeuger erreichen GuD-Kraftwerke mit etwa 60 %.

Auf dem Weg zum leistungsstarken BZ-Kraft-

werk haben Japan und die USA schon vor einiger Zeit die MW-Grenze erheblich überschritten. Vielleicht wird Deutschland in einigen Jahren von Holland überrascht. Dort wird zurzeit untersucht, ob in den nächsten Jahren das größte BZ-Kraftwerk der Welt mit einer Leistung von 200 MW gebaut werden kann. Die Zeit wird zeigen, ob Siemens rechtzeitig der Durchbruch gelingt.

Literatur

- [1] Bundesumweltministerium: Erneuerbare Energien – Innovationen für die Zukunft. 5. Auflage Mai 2004. Kostenlose Informationsschrift, 128 Seiten.
- [2] Kabisch, H.: Energiemix und neue Versorgungsstrukturen. Elektropraktiker Berlin 59 (2005) 4, S. 248–253.
- [3] Bild der Wissenschaft plus: „Die Power-Generation“. Sonderpublikation in Zusammenarbeit mit der „Initiative Brennstoffzelle“. Kostenlose Lieferung unter Leserservice Bild der Wissenschaft, Postfach 106012, 70049 Stuttgart.
- [4] Bine Informationsdienst: Projektinfo 06/04 „Hausenergiesysteme mit Brennstoffzellen“. Herausgeber Fachinformationszentrum Karlsruhe.
- [5] Kabisch, H.: Licht und Schatten bei der Brennstoffzelle. Elektropraktiker Berlin 58 (2004) 12, S. 940.
- [6] Forschungsverbund Sonnenenergie (FVS): Jahresbericht 2004 zu den Themen Brennstoffzelle und Wasserstoff. Kostenloser Tagungsband.