

# Produktentwicklung Festelektrolyt-Brennstoffzellen (SOFC)

von Klaus Hassmann

## Überblick

1998 übernahm die Siemens AG (SAG) die SOFC (Solid Oxid Fuel Cell)-Röhrentechnologie von Westinghouse und wird sich in Zukunft für die dezentrale Energieerzeugung auch auf diese Technik konzentrieren. Die Ergebnisse einer ersten großtechnischen Demonstrationsanlage stimmen zuversichtlich, dass alle technischen und umweltrelevanten Auslegungsmerkmale erfüllt werden können. In den nächsten 3-5 Jahren werden zusätzliche Anlagen gebaut, die die Betriebszuverlässigkeit nachweisen sollen. Begleitend läuft ein Forschungs- und Entwicklungs(FuE)-Programm, das die Kosten auf das für die Marktdurchdringung erforderliche Niveau zu senken hilft.

In 1998 Siemens AG (SAG) took over the tubular SOFC technology from former Westinghouse and decided to focus on this technology for the emerging distributed power market. The results of a first full scale 100 kW demonstration project indicate that the tubular SOFC technology has an excellent potential to technically and environmentally fulfill the design goals. The lessons to be learned over the next 3-5 years with additional demonstration plants are expected to confirm the reliability of this technology. An accompanying R&D program is under execution in order to reduce the costs to a level sufficiently low level for market introduction.

Die SOFC gehört zu den so genannten Hochtemperatur-Brennstoffzellen. Ihr Herzstück, die ausschließlich aus Keramik aufgebauten Zellen, werden bei Temperaturen bis zu 1.000 °C mit Erdgas als Brennstoff und Luft betrieben.

## 1. Zellen

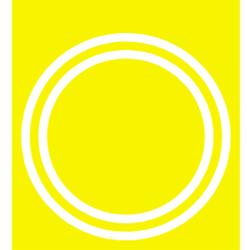
Naturgemäß stehen die Zellen selbst als Herzstück jeglicher Brennstoffzellen-Technologie von Entwicklungsbeginn an, bei der SOFC-Röhrentechnik seit Mitte der 70er Jahre, bis heute im Mittelpunkt der Forschungsarbeiten. Schon frühzeitig wurde von Westinghouse die Rohrgeometrie festgelegt und entschieden, nach einem Umweg mit einer elektrisch neutralen Trägerstruktur die Lufterlektrode an der Rohrrinnenseite als tragendes Bauteil auszubilden und Elektrolyt sowie die Brennstoffelektrode in nicht tragender Dünnschichttechnik aufzubringen.

In den zurückliegenden mehr als 20 Jahren ist es gelungen, die elektrischen und elektrochemischen Materialeigenschaften von Einzelzellen so zu optimieren, dass im Labor über 70.000 Betriebsstunden eine Alterung von kleiner 0,5 % / 1.000 h nachgewiesen werden konnte. Darauf aufbauend wurde eine erste Generation von Zellen und Bündel entwickelt mit einer aktiven Länge von 50 cm und einem Außendurchmesser von 16 mm. Diese zeigten in Feldtests mit über 13.000 Betriebsstunden in 25 kW-Einheiten ein so gutes Verhalten, dass in der ersten Hälfte der 90er Jahre die Entwicklung der kommerziellen Zellengeneration mit 150 cm Länge und 22 mm Außendurchmesser in Angriff genommen werden konnte. Diese Zellen wurden in einer ersten 100 kW-Demonstrationsanlage eingesetzt und haben sich dort sehr bewährt.

Es ist keineswegs so, dass damit die Entwicklung der Zellen abgeschlossen wäre. In Zukunft wird es darum gehen, die Leistungsdichte der Röhrenzelle weiter zu verbessern und die sehr restriktiven Anforderungen an die Zelle, zum Beispiel, was die Reinheit der eingesetzten Materialien betrifft, aufzuweichen. Als Langfristziel muss auch eine neue, aus der Röhre abgeleitete Geometrie entwickelt werden, die als eine nächste Zellengeneration im Vergleich zur klassischen Röhre deutlich geringere Verluste und eine höhere Leistungsdichte aufweist. Die durch obige Maßnahmen verbesserte Röhrentechnologie soll dann die klassische Röhrenzelle ablösen.

## 2. Modul

Die Einzelzellen werden zu Bündeln mit jeweils 24 Zellen verschaltet, wobei 8 Zellen elektrisch in Reihe und jeweils 3 Reihen parallel verschaltet sind. Der Stromfluss zwischen den Zellen wird über einen Nickelfilz geführt. Nach heutiger Auslegung werden vier solcher Bündel geometrisch in Reihe und 12 parallel angeordnet, wobei elektrisch alle Bündel in Reihe geschaltet sind. Dies ergibt insgesamt 1.152 Zellen, welche in einem sogenannten Untermodul zusammengefasst sind. Nach Bedarf kann die gewünschte Leistungsgröße einer SOFC-Anlage durch Vervielfachung solcher Untermodule realisiert werden. Nach heuti-

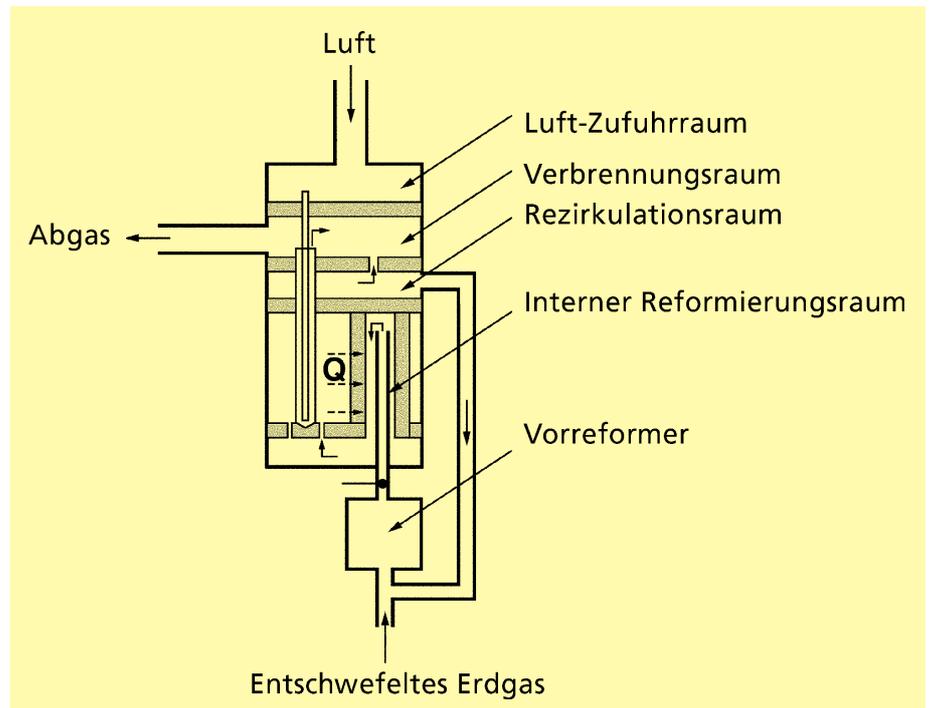


gem Entwicklungsstand braucht man für die Erzeugung von 1 kW Gleichstrom bei Umgebungsdruck 8-9 Einzelzellen. Bei höherem Druck und sonst gleichen Randbedingungen sinkt die Diffusionspolarisation, was zu einer höheren elektrischen Ausbeute führt. Bei 3 bar werden für ebenfalls 1 kW Leistung nur 6-7 Einzelzellen, also ungefähr 20-25 % weniger als bei der atmosphärischen Variante, benötigt. **Abbildung 1** zeigt ein Teilsegment eines Untermoduls.

Der Modul selbst besteht aus mehr als nur elektrisch verschalteten Untermodulen. In ihm wird das Erdgas zwischen den Bündelreihen angeordneten Strömungskanälen zugeführt, dort reformiert und anschließend zu den Zellen geleitet. Ein Teil des noch nicht umgesetzten Brennstoffs wird nach Austritt aus dem Reaktionsraum dem frischen Brennstoff zugemischt, das heißt im Kreislauf gefahren. Zirkondioxid ( $ZrO_2$ ) als Elektrolyt ist ein Sauerstoff( $O_2$ )-Ionenleiter, der bei entsprechend höher Temperatur die Umsetzung von Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff ( $H_2$ ) erlaubt, was den Aufwand für die Gasaufbereitung selbst deutlich reduziert. Für die Reformierung wird der aus der elektrochemischen Wandlung entstehende Wasserdampf genutzt, eine externe Dampf-



*Abbildung 1: Teilsegment eines Untermoduls der ersten Produktgeneration*



*Abbildung 2: Strömungsschema SOFC-Modul*

quelle wird nur beim Anfahren benötigt. Durch diese Strömungsführung kann die elektrochemische Brennstoffnutzung in der Anlage auf 85 % gesteigert werden. In einem Verbrennungsraum wird schließlich das Kathoden- mit dem Anoden-Abgas gemischt. Die Verbrennungswärme wird teils zur Deckung des Energiebedarfs für den Erhalt der Temperatur im Modul, teils zur Wärmeauskopplung genutzt.

Die Entscheidung für die Röhrentechnologie von Westinghouse und gegen die SOFC-Plattentechnik wurde auch dadurch mitbestimmt, dass die Röhre ohne Hochtemperatur-Lötstrecken zur Abdichtung der Luft vom Brennstoff auskommt. Dadurch werden unkontrollierte, propagierende Verbrennungsreaktionen von  $H_2$  bzw. CO mit dem Luftsauerstoff durch Leckagen vermieden, die zur Zerstörung der Module führen können. **Abbildung 2** zeigt den Strömungsverlauf im Modul bei der Röhrentechnologie.

### 3. Anlagenperipherie und Schaltungen

Prinzipiell werden zwei unterschiedliche SOFC-Anlagenverschaltungen entwickelt:

- Das klassische Blockheizkraftwerk (BHKW). Diese Schaltung wird in

kommerziellen Anlagen 50 % elektrischen Wirkungsgrad erreichen bei einem Gesamt-Energie-nutzungsgrad von über 85 %. Die hohe SOFC-Betriebstemperatur erlaubt die Erzeugung von höherkaloriger Wärme, auch von Prozesswärme für industrielle Anwendungen.

- Eine Schaltung mit höchstem elektrischen Wirkungsgrad von 60%, der durch die Einbindung einer Gasturbine (GT) erreicht werden kann. Die GT-Leistung dieser Hybridanlage beträgt auf die Kraftwerks-Gesamtleistung bezogen ungefähr 25-30%. In diesem Konzept wird der SOFC-Modul mit einem Gesamtdruck von 3 bar betrieben. Die Luft aus dem GT-Verdichter wird dem SOFC-Modul mit 3 bar zugeführt. Die Strömung Brennstoff/Luft wird – wie in Kapitel 2 beschrieben – geführt. Das Abgas aus dem Modul wird in der Gasturbine auf Umgebungsdruck entspannt und nach Abwärmennutzung über den Kamin in die Umgebung abgeführt. Dieses Konzept hat gegenüber der drucklosen BHKW-Variante nicht nur den Vorteil der zusätzlichen Leistung durch die integrierte Gasturbine, sondern auch den der höheren elektrochemischen

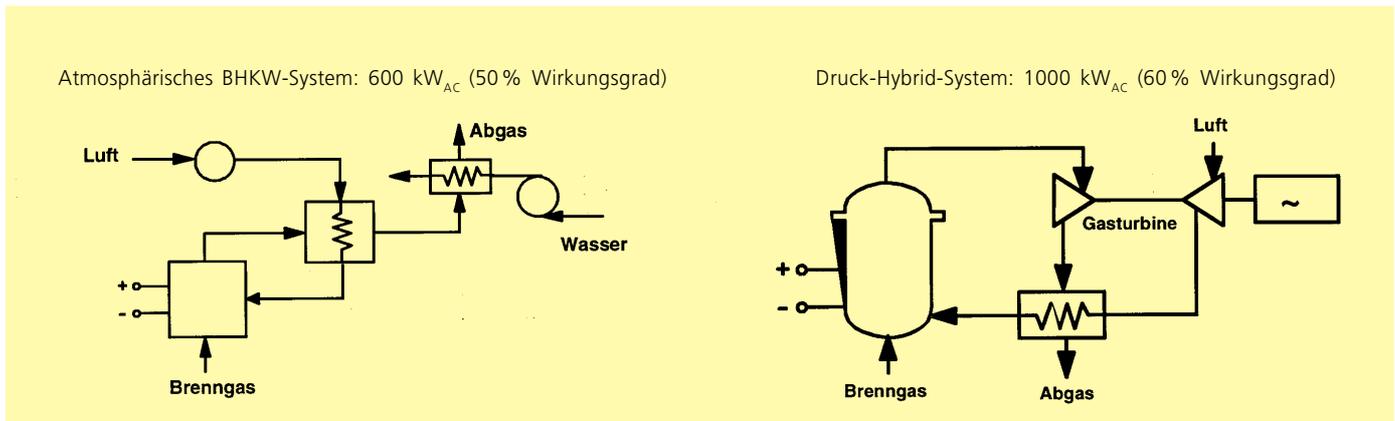
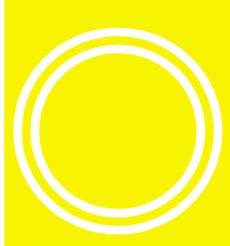


Abbildung 3: SOFC-Kraftwerksschaltungen

Umsetzung um 20-25%, wie bereits in Kapitel 1 erwähnt. Aus Wirtschaftlichkeitsüberlegungen sollen nur auf die SOFC-Randbedingungen angepasste Gasturbinen eingesetzt werden, die auch als Einzelmaschinen auf dem Markt sind.

In **Abbildung 3** sind die beiden Kraftwerks-Schaltungen gegenübergestellt.

Als Alternative für die Hybridanlage unter Druck kann, was den Druck betrifft, auch der SOFC-Modul von der GT-Verdichtereinheit entkoppelt werden. Der Modul würde in dieser Version drucklos betrieben, die Wärme in einem zwischen Modul und GT geschalteten Rekuperator in die verdichtete Luft eingekoppelt und dann in der GT entspannt. Die kritische Komponente in dieser Schaltung ist der „heiße“ Rekuperator, der auf der Modulseite mit 1 bar und auf der GT-Seite mit 3 bar Druck beaufschlagt wird. Dieser SOFC-Typ büßt gegenüber der obigen Hybridvariante 5 Prozentpunkte Wirkungsgrad ein und wird allenfalls als „back up“ für die 60 %-Variante zum Einsatz kommen.

Für größere Kraftwerksleistungen ist auch eine Kombination der SOFC-Brennstoffzelle mit einer Gasturbine mit gekoppeltem Dampfturbinen-Kreislauf denkbar, dem heute in der konventionellen Kraftwerkstechnik üblichem Gas- und Dampf(GuD)-Prozess. Eine solche Schaltung hat das Potenzial, elektrischen Strom mit einem Wirkungsgrad von ca. 70 % zu erzeugen. Solche Kraftwerke werden sich jedoch erst unter der Voraussetzung umsetzen lassen, dass eine Marktdurchdringung der

SOFC-Kraftwerke kleiner Leistung gelingt. Auch müssen die Investitionskosten für den GuD-Teil der SOFC-Anlage großer Leistung über die durch den um 10 %-Punkte höheren Wirkungsgrad erfolgte Brennstoffeinsparung im Vergleich zum konventionellen GuD-Großkraftwerk finanziert werden. Wenn überhaupt, dann wird es solche Anlagen allenfalls langfristig geben.

Generell haben Brennstoffzellen gegenüber ihrer konventionellen Konkurrenz Vorteile, da sie weder Schwefeloxide ( $\text{SO}_x$ ) noch Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) in die Umgebung freisetzen. Aufgrund ihres hohen Wirkungsgrades erzeugt die SOFC auch weniger Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ). Auch ist die Lärmentwicklung der BHKW-Schaltung im Vergleich zu den rotierenden Maschinen deutlich geringer. Dies gilt vermutlich auch für die SOFC-Schaltung mit integrierter Gasturbine.

#### 4. Markterwartung und abgeleitete Leistungsgrößen

Seit Anfang 1999 stehen die Ergebnisse einer Marktstudie für Nordamerika und Europa zur Verfügung, die im Auftrag von Siemens Westinghouse Power Corporation (SWPC) von einer externen Beraterfirma erarbeitet wurden. Darin wurde die Marktdurchdringung von SOFC-Kraftwerken in der dezentralen Energieerzeugung im Leistungsbereich 250 kW bis 10 MW untersucht. Natürlich mussten für die SOFC sowie für die Konkurrenztechnologien, wie für das von großen Blöcken gespeiste elektrische Verbundnetz, für andere dezentrale Technologien und für andere Brennstoffzellentypen sowie auch für den Strom- und Erdgas-

preis Annahmen über wesentliche Kennzahlen und deren Entwicklung über die nächste Zeitperiode getroffen werden. Die Ergebnisse haben demnach die Aussageschärfe von Prognosen generell; sie müssen überprüft werden, sobald sich bei wichtigen Annahmen wesentliche Abweichungen abzeichnen.

Die Ergebnisse für Nordamerika zeigen, dass über einen Zeithorizont von 10 Jahren das Marktpotenzial insgesamt ca. 2.500 MW beträgt. Davon sind mehr als die Hälfte Anlagen im Leistungsbereich 1-3 MW, wobei die Hybrid-Anlagen mit höchstem elektrischem Wirkungsgrad gegenüber dem BHKW-Typ eindeutig dominieren. In Europa ist im Vergleich zu Nordamerika dasselbe Vergabevolumen zu erwarten, jedoch handelt es sich dabei von der Tendenz her um größere Einheitsleistungen mit einem noch deutlicherem Übergewicht für den Hybrid-Typ. Der Gesamtmarkt über 10 Jahre für Anlagen obiger Leistungsgröße beträgt 100.000 MW. Unter den in der Studie getroffenen Randbedingungen wird die SOFC-Marktdurchdringung 5 % betragen, wobei die Ergebnisse auf Änderungen in den spezifischen Investitionskosten von SOFC-Kraftwerken sehr empfindlich reagieren. 10 % Abweichung nach oben oder unten verdoppeln beziehungsweise halbieren den Marktanteil von SOFC-Kraftwerken innerhalb des Gesamtmarkts von 100.000 MW.

Für die erste kommerzielle Anlage des Hybrid-Typs wurde eine Leistungsgröße von 1 MW festgelegt. Dies entspricht bei derselben Modulgröße für den BHKW-Fall 600 kW. Nach erfolg-

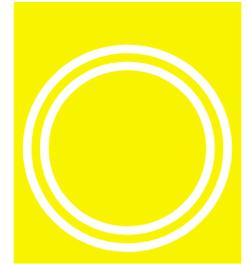


Abbildung 4: Teilsegment eines Untermoduls der ersten Produktgeneration

ter Markteinführung soll das Lieferprogramm nach oben und unten abgerundet werden.

### 5. Demonstrationsprogramm

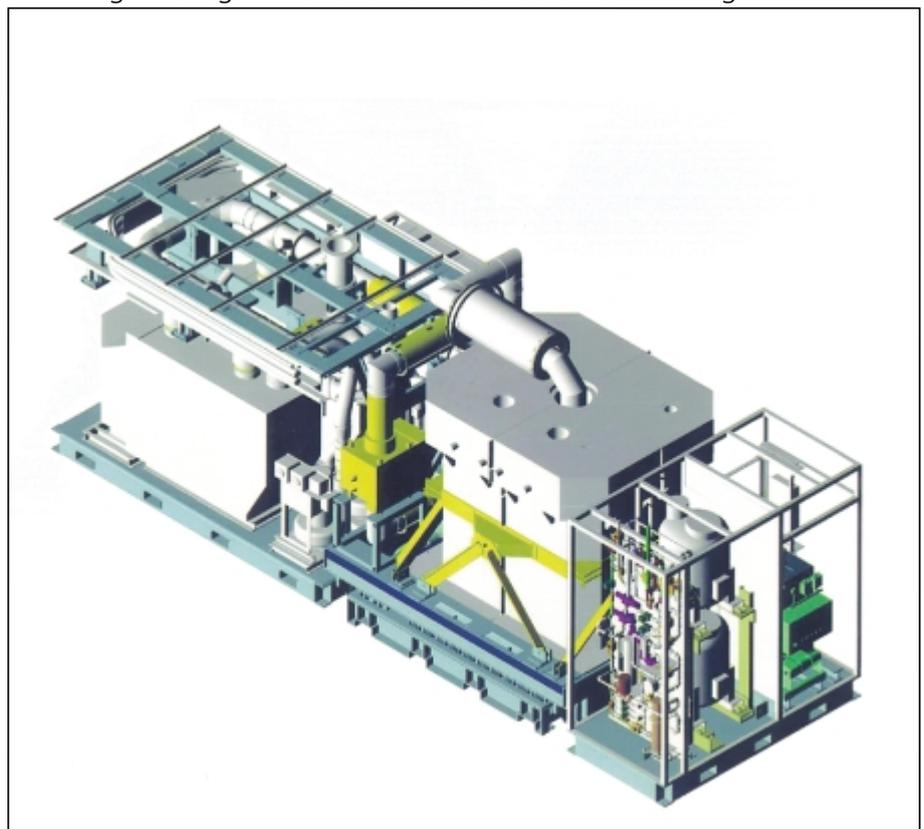
Wie bereits erwähnt, läuft die erste im Auftrag des Holländisch-Dänischen Kundenkonsortiums Energiedistributiv Bedrijven EDB Elsam errichtete 100 kW-Demonstrationsanlage in BHKW-Schaltung seit Anfang 1998 äußerst zufrieden stellend. Natürlich gab es einige wenige Störungen, die Betriebsunterbrechungen verursachten, jedoch nur eine betraf den Modul selbst. Die Ursachen sind erkannt und auch durch Gegenmaßnahmen „für immer“ abgestellt. Bisher wurden mehr als 6.000 Betriebsstunden akkumuliert. Auch die wichtigen Auslegungsziele wie elektrischer Wirkungsgrad, Emissionen und Geräusch wurden erreicht oder sogar übertroffen. Dies ist als Erfolg zu werten, der sich sehen lassen kann. **Abbildung 4** zeigt ein Foto von dieser Anlage. Im Sinne eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses wäre es vermessen zu glauben, dass mit der Betriebserfahrung dieser einen Anlage allein sämtliche Störungsquellen erkannt und ausgeschaltet sind – es wird noch viel zu tun sein. Deshalb ist eines der wesentlichen Ziele vor Markteinführung ein umfangreiches Demonstrationsprogramm, um für die Betriebszuverlässigkeit der ersten kommerziellen SOFC-Serie Erkenntnisse aus möglichst vielen Betriebsstunden

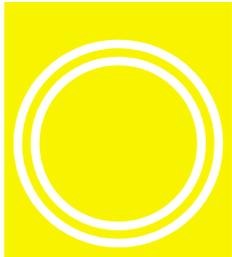
sammeln zu können.

Anfang 2000 wird dem kalifornischen Kunden Edison Technology Solutions (ETS) als nächstes Demonstrationsprojekt eine 220 kW-Hybridanlage mit integrierter Gasturbine geliefert, die im Fuel Cell Center der Universität von Kalifornien, Los Angeles, aufgebaut und be-

trieben werden soll. Diese Schaltung mit einem im Vergleich zum BHKW wesentlich größeren Störungspotenzial ist der nächste wichtige Schritt auf der Lernkurve. Die Anlage wird zur Zeit bei SWPC in Pittsburgh zusammengebaut und getestet. In Nordamerika sollen in den nächsten Jahren einige zusätzliche Demonstrationsanlagen errichtet werden. **Abbildung 5** zeigt ein Foto des Modellaufbaus einer Hybridanlage. Auch in Europa als einem der wichtigsten Märkte für dezentrale Energieerzeugung wird es SOFC-Demonstrationsanlagen geben. So wird, wie in einer Presseveröffentlichung bereits angekündigt, vom Betreiberkonsortium Energie Baden-Württemberg AG (EnBW), Electricité de France (EdF), Gaz de France (GdF) und der Österreichischen Tiroler Wasserkraft AG (TIWAG) unter der Federführung der EnBW gemeinsam mit der SWPC als Vorläufer der kommerziellen SOFC-Anlage die erste 1 MW-Demonstrationsanlage mit integrierter GT realisiert. Dazu ist ein Gemeinschaftsprojekt zwischen der Europäischen Kommission (EC) und dem US-amerikanischen Department of Energy (DOE) geplant. Die in USA anfallenden Projektkosten, im Wesentlichen handelt

Abbildung 5: Teilsegment eines Untermoduls der ersten Produktgeneration





es sich dabei um die Aufwendungen der SWPC, sollen vom DOE und der SWPC, die Kosten in Europa von der EC und dem Betreiberkonsortium übernommen werden. Für den Europäischen Teil wurde Mitte Juni ein Förderantrag in Brüssel eingereicht. Mit dem Projektbeginn ist Anfang 2000 zu rechnen, die Laufzeit beträgt vier Jahre. Mit zeitlichem Vorlauf wird RWE Energie als Federführer eines Konsortiums, dessen Mitglieder noch nicht endgültig feststehen, eine 320-kW-Anlage ebenfalls mit Gasturbine errichten, die als Folgeanlage für die ETS-Anlage in Kalifornien wesentliche zusätzliche Erkenntnisse und Erfahrungen liefern wird.

Im Sinne der Zielsetzung, möglichst viel Betriebserfahrung mit Demonstrationsanlagen zu sammeln, werden in den nächsten 3-5 Jahren auch in Europa noch einige zusätzliche SOFC-Anlagen gebaut werden. Diese Demonstrationsprojekte bieten für die europäische, insbesondere die deutsche mittelständische Zulieferindustrie die Chance, schon frühzeitig mit unterschiedlichsten Lieferungen im „Balance-of-Plant (BoP)“ oder auch für den Modul selbst die Weichen für ein späteres Geschäft im Zusammenhang mit dieser Zukunftstechnologie stellen zu können.

## 6. Begleitendes Entwicklungsprogramm

Höchste Priorität hat neben dem Zugewinn an Betriebserfahrung die Reduktion der Herstellkosten der beiden ausgewählten Schaltungsvarianten, mit denen die Marktdurchdringung in den nächsten 10 Jahren erreicht werden soll. Dazu ist es nötig, im Zusammenspiel mit der Betriebserfahrung aus Demonstrationsanlagen – einen wesentlichen Einfluss wird die Rücknahme von Spezifikationsanforderungen haben, die heute aus-

schließlich auf Betriebssicherheit abzielen und damit deutlich überdimensioniert sein sollten – auch Maßnahmen zu entwickeln und umzusetzen, die zu einer höheren Leistungsdichte der Zellen, zu einer Vereinfachung des Modulaufbaus und auch zu einem einfacheren BoP führen. Darüber hinaus werden im Vergleich zu der heute in Pittsburgh aufgebauten Pilotfertigung mit einem Volumen von 1-2 MW pro Jahr sehr viel billigere Fertigungsprozesse entwickelt. Dies gemeinsam mit den Kostenvorteilen einer kommerziellen, automatisierten Fabrik – die erste Fertigungsstraße soll eine Kapazität von 30-40 MW haben – soll die Herstellkosten von SOFC-Anlagen auf das für eine Marktdurchdringung nötige Niveau bringen helfen. Diesbezüglich ist ein umfangreiches Entwicklungsprogramm in Arbeit, darunter auch Arbeiten in den Siemens-Labors in Erlangen, die in Übertragung von Erkenntnissen aus der Entwicklung des Siemens SOFC-Plattenprojektes auf die Röhre vor allem wesentliche Beiträge zur Erhöhung der Leistungsdichte leisten werden. Dieses Forschungsprojekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi) gefördert.

Shell und SWPC kündigten vor kurzem an, gemeinsam ein SOFC-Konzept zu entwickeln, in dem durch Anpassungen der Strömungsführung im Modul eine Trennung des Anoden- vom Kathodenabgas erreicht werden kann, mit dem Ziel, möglichst reines CO<sub>2</sub> abtrennen und aus der Anlage ausschleusen zu können. Dieses Projekt hat eine Laufzeit von vier Jahren und soll mit einer 100 kW-Demonstration abgeschlossen werden. Shell will diese Technologie zur Stromerzeugung zunächst auf Förderplattformen einführen und das abgetrennte CO<sub>2</sub> in die Lagerstätten zurückpumpen, wo es für immer der Erdatmosphäre entzogen wäre. Es sind jedoch auch andere Anwender in der Diskussion, die neben Strom und

Wärme auch CO<sub>2</sub> benötigen oder das CO<sub>2</sub> an Dritte verkaufen können.

Längerfristig sollte die Abhängigkeit vom Erdgasnetz reduziert werden, die eine Verbreiterung des Geschäfts aufgrund der eingeschränkten Flexibilität vor allem in den Entwicklungsländern behindert. Für eine solche Entwicklung ist eine Zusammenarbeit von Mineralölindustrie und SOFC-Hersteller erforderlich, die Kooperation mit Shell sollte sich auch in dieser Richtung entwickeln lassen. Eine Vision besteht auch darin, die SOFC als eine wesentliche Komponente einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft Biomasse, Strom- und Wärmeerzeugung unter Berücksichtigung der CO<sub>2</sub>-Endlagerung zu entwickeln. Damit wäre der vorläufig letzte Entwicklungsschritt vollzogen und die SOFC würde als Komponente einer die Umwelt entlastenden, regenerativen Energiewirtschaft etabliert.

## 7. Würdigung

Die Entwicklung der SOFC-Röhrentechnologie wäre ohne die Förderung des DOE in dieser Form unmöglich gewesen. Auch die Erprobung und Einführung dieser Technik in Europa ist ohne die Unterstützung des BMWi, der Europäischen Kommission sowie der Betreiber nicht möglich, die sich bereits zu einem Engagement entschlossen haben oder sich dazu noch entschließen werden. Bei der Siemens AG und der SWPC als Hersteller gibt es jedenfalls Konsens darüber, dass an der Entwicklung der SOFC-Röhre für eine spätere Anwendung in der dezentralen Strom- und Wärmeerzeugung festgehalten wird. Die Röhre ist jedoch kein Diktat, sollte es der vor allem in der Leistungsdichte deutlich besseren Plattentechnik gelingen, die noch ausstehenden Nachweise der Funktionsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit zu erbringen.