Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 86 (1995)

Heft: 4

Artikel: Brennstoffzellen : Rosen mit langen Dornen : lautlose Strom- und Wärmeerzeuger lassen noch etwas auf sich warten

Autor: Weber, Rudolf

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902429

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Immer öfter taucht die «Brennstoffzelle» in den Medien auf: Bei «kalter Verbrennung» von Erdgas und Luft entstünden mit hohem Wirkungsgrad sowie praktisch emissionsfrei und lautlos Strom und Wärme. Das Energiewunder lässt freilich auf sich warten, denn nach zwei Jahrzehnten Forschung und Entwicklung laufen erst wenige Versuchsanlagen. Bei aller Einfachheit des Prinzips steckt nämlich auch hier der Teufel im Detail. Ein Schweizer Projekt soll mit neuen Ideen die technischen Probleme überwinden und zugleich die Kosten senken.

Brennstoffzellen – Rosen mit langen Dornen

Lautlose Strom- und Wärmeerzeuger lassen noch etwas auf sich warten

■ Rudolf Weber

Nach der Energiekrise des Jahres 1973 drang der Begriff Brennstoffzelle erstmals in die Öffentlichkeit. Sie sollte aus solar gewonnenem Wasserstoff dezentral Strom erzeugen. Dann wurde es wieder still um diese Vorrichtung ohne bewegliche Teile. Erst seit Beginn der 90er Jahre häufen sich Meldungen vor allem aus Japan, den USA und Deutschland, die Markteinführung von Brennstoffzellen stehe vor der Tür. Mit Superlativen wird dabei nicht gegeizt: Man fülle Luft und einen Brennstoff – vorzugsweise Erdgas – ein, und erhalte bei einer Brennstoffausnutzung von 90% und mehr Strom sowie Wärme; Abgase seien kaum der Rede wert, Lärm und Vibrationen ausgeschlossen. Die Wundermaschine eigne sich vor allem als Blockheizkraftwerk, zum Beispiel für Krankenhäuser oder Wohnblocks, wo sie herkömmliche Aggregate mit lauten und abgasproduzierenden Gas- oder Dieselmotoren ersetzen könne.

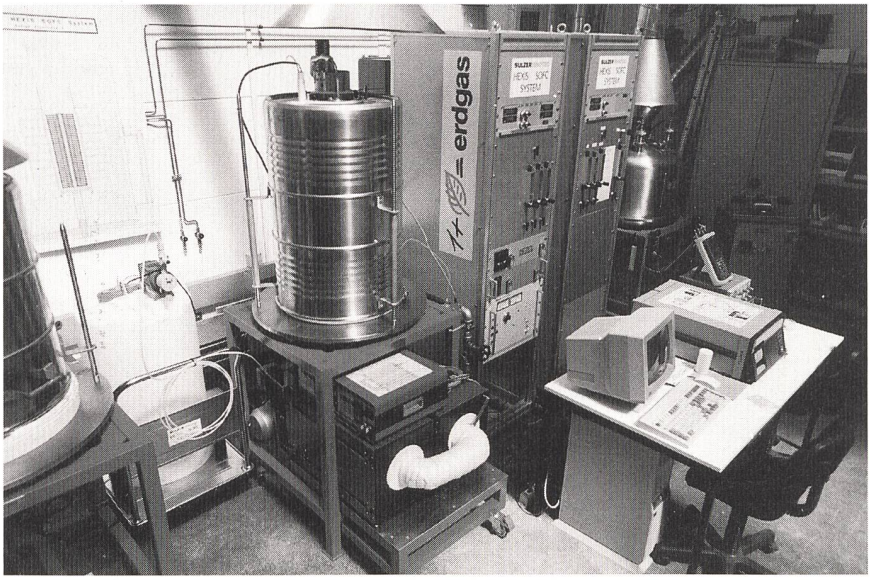


Bild 1 Im HEXIS-Messlabor im schweizerischen Winterthur: Links von der Bildmitte das wärmedämmende Gehäuse, das einen Stapel von 43 Festoxid-Brennstoffzellen enthält. Darunter die Hilfsanlagen: ein Ventilator für die Verbrennungsluft und ein externer Reformer für die Aufspaltung des Erdgases in Kohlenmonoxid und Wasserstoff, den eigentlichen Brennstoff. Rechts die elektronischen Einrichtungen zur Steuerung der Anlage (z. B. des Anfahrens über 8 Stunden) und für die Messungen. (Fotos: Sulzer-Innotec)

Adresse des Autors:
Dr.-Ing. *Rudolf Weber*, Wissenschaftspublizist, Salici di Montaretto, I-19011 Bonassola.

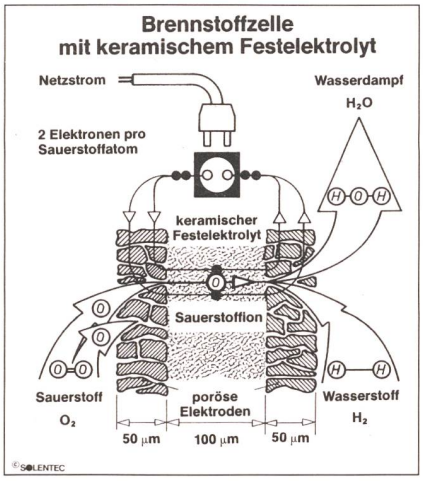


Bild 2 In Festoxid-Brennstoffzellen ist der keramische Festelektrolyt, Zirkonoxid, nur etwa 0,2 mm dick. Er leitet Sauerstoffionen, die an der linken porösen Elektrode je zwei Elektronen aus dem äusseren Stromkreis aufgenommen haben, zur rechten Elektrode. Dort geben sie die Elektronen wieder ab und verbinden sich mit je zwei Wasserstoffatomen zu einem Wassermolekül. Wird als Sauerstoffträger Luft verwendet, entstehen ausserdem geringe Mengen Stickoxide, und dient Erdgas als Brennstoff, bildet sich auch Kohlendioxid. (Grafik Solentec)

Zwischen diesen oft vollmundigen Verheissungen und der Realität auf dem energietechnischen Markt besteht allerdings ein augenfälliger Widerspruch, denn alles, was bis jetzt an Brennstoffzellen in der Praxis läuft, sind eine Handvoll kleine Versuchsanlagen sowie Ankündigungen für ein paar weitere. Und fragt man nach Erfahrungen mit solchen Anlagen, so darf man aus den Antworten auf allerhand Schwierigkeiten schliessen, die sich nicht leicht werden überwinden lassen. Nimmt man zu diesen Problemen noch die Berichte aus der einschlägigen Forschung und Entwicklung hinzu, erhält man einen gemeinsamen Nenner. Die Brennstoffzelle funktioniert, wie es ihr einfaches Prinzip verspricht; aber der Weg zu einer alltagstauglichen, zuverlässigen und preislich mit heutigen Strom- und Wärmeerzeugern konkurrenzfähigen Maschine ist noch immer hürdenreich und voraussichtlich lang.

Einfaches Prinzip

Um die Hürden zu verstehen, mag es sich lohnen, das Prinzip ein wenig näher zu betrachten (s. Kasten). Man spricht bei der Brennstoffzelle auch von «kalter Verbrennung» im Unterschied zur normalen, flammenerzeugenden. Letztere ist eine chemische Reaktion, bei der Brennstoff- und Sauerstoffmoleküle in direktem Kontakt miteinander stehen und Elektronen austauschen. Da jeweils enorm viele Moleküle beteiligt sind und der Austausch in bezug auf den Ort ungeordnet erfolgt, erscheint die Reaktion nach aussen hin elektrisch neutral – nur Wärme wird abgegeben.

In der Brennstoffzelle dagegen hält man Brennstoff und Sauerstoff voneinander getrennt durch ein Medium, das nur ionisierte Moleküle des einen Reaktionspartners durchlässt. Solche Medien nennt man Elektrolyten. Die Reaktion findet nun auf der Seite des anderen Partners an der Oberfläche des Trennmediums statt. Und zwar nur in molekularen Portionen. Denn die Moleküle wandern gewissermassen einzeln durch das Medium herüber, und auf der Reaktionsseite sorgt eine mikroporöse Beschichtung dafür, dass die andere Molekülsorte ebenfalls nur molekülweise an das Trennmedium herantreten kann. Resultat der Portions-Reaktion: ein oder mehrere Moleküle neuer chemischer Verbindungen, hauptsächlich Wasser und Kohlendioxid, dazu Wärme – und freie Elektronen. Und zwar jene Elektronen, die das Wander-Molekül auf der anderen Seite des Trennmediums aufgenommen hatte. Zwischen den beiden Seiten des Trennmediums besteht nun eine elektrische Gleichspannung von etwa 1 Volt. Verbindet man die beiden Seiten mit einem elektrischen Leiter, fliesst Gleichstrom.

Dass die Sache funktioniert, beobachtete der Engländer William Grove schon 1839, aber sie funktionierte mehr schlecht als recht. Generationen von Forschern nach Grove mühten sich, geeignete Kombinationen von Brennstoff, Elektrolyt, mikroporösen Beschichtungen und elektrischen Kontaktierungen zu finden. Insbesondere in den USA wurden die Anstrengungen nach dem Zweiten Weltkrieg verstärkt, weil sich die Militärs vibrationsfreie Stromerzeuger für U-Boote erhofften (und auch erhielten). In Deutschland trieben ab den 50er Jahren zunächst Neugier und Ehrgeiz einige Forscher an.

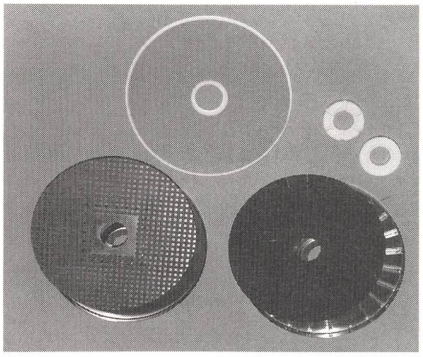


Bild 3 Die Teile einer einzelnen Festoxid-Brennstoffzelle aus dem HEXIS-Projekt: Oben in der Mitte die 0,2 mm starke Elektrolytplatte aus Zirkonoxid, Durchmesser 120 mm; links ein Zellentyp mit keramischem Stromsammler und Wärmetauscherblech; rechts ein Typ mit metallischem Stromsammler, rechts oben Keramikringe zur Abdichtung der Zellenkomponenten im Zentrum. Elektrolytplatte, Elektroden und Abdeckplatten werden zu einer etwa 1 cm dicken Scheibe übereinandergelegt

Fünf Typen

Mit Beginn der 90er Jahre kennt, erforscht und entwickelt man fünf Grundtypen von Brennstoffzellen, die sich durch Elektrolyt und Betriebstemperatur voneinander unterscheiden: Alkalische Zellen ha-

Wirkungsgrad, Technik, Anwendungen

Die Zirkonoxid-Brennstoffzelle, die als Brennstoff Erdgas nutzen kann, wird als zukunftsträchtigste Variante angesehen. Andere Varianten arbeiten mit unterschiedlichen Elektrolyten für bestimmte Ionen und andere Brennstoffe.

Die Aussicht auf hohe Wirkungsgrade der Stromerzeugung (theoretisch bis zu 70%) und die geringen Emissionen (neben Wasser nur wenig Stickoxide) haben in den 80er Jahren weltweit die Entwicklung dieser Varianten angeregt. Der Wirkungsgrad ist um so höher, je grösser die Elektrodenfläche gewählt wird. Alle Varianten erreichen heute ungefähr 50%, welchen Wert man als kostengünstigen Kompromiss ansieht.

Bei allen Varianten ist der Konstruktionsaufwand beträchtlich, insbesondere für die kontinuierliche Zufuhr von Brennstoff und Sauerstoff bzw. Luft sowie für die kontinuierliche Abfuhr des Wassers, das als Reaktionsprodukt entsteht, und der Abwärme. Vor allem bei den Zellen mit höheren Betriebstemperaturen bleiben auch Korrosions- und Dichtungsprobleme zu lösen. Ein wichtiges Entwicklungsziel ist auch die Verbilligung (Investitionskosten je Kilowatt Leistung heute rund 10 000 Franken – gegenüber 2000 bis 3000 bei herkömmlichen Kraftwerken).

Heutige Zellen haben die Gestalt flacher, etwa einen Zentimeter dicker Platten mit Flächen bis zu einem Quadratmeter, die elektrische Leistung beträgt bis zu einigen hundert Watt. Für den Einsatz werden viele Platten zu einem einbaufertigen Modul aufeinandergestapelt. Man denkt an kleinere Kraftwerke, an Kombi-Kraftwerke (mit Nutzung der Abwärme von Zellen höherer Betriebstemperaturen in Kraft-Wärme-Kopplung), aber auch an Elektrofahrzeuge.

ben Kalilauge als Elektrolyt, Betriebstemperatur unter 100 °C; in der phosphorsauren Zelle ist Phosphorsäure, in der ähnlich wirkenden Festpolymer-Zelle ein Kunststoff-Elektrolyt, Betriebstemperatur unter 200 °C; Elektrolyt in der Salzschmelzen- oder Karbonat-Zelle ist geschmolzenes Salz, Betriebstemperatur um 650 °C; und in der zwischen 900 und 1000 °C arbeitenden Festoxid-Brennstoffzelle dient eine feste Keramik als Trennmedium.

Jeder Typ hat im Vergleich zu den anderen Typen Vor- und Nachteile. Beispielsweise arbeiten die alkalische Zelle und die mit Festpolymer nur mit reinem Wasserstoff als Brennstoff und mit reinem Sauerstoff, während man die Verwendbarkeit von Erdgas und Luft anstrebt. Der Phosphorsäure-Typ wiederum scheidet für Anwendungen in Elektrofahrzeugen aus, weil die Säure bei Unfällen gefährlich werden könnte.

Gemeinsame Schwierigkeiten

Gemeinsam ist allen Typen eine ganze Reihe technologischer Schwierigkeiten. Einen Problemkreis bildet die Korrosion an heiklen Bauteilen, verursacht durch aggressive Medien wie Kalilauge und Phosphorsäure oder durch die hohen Temperaturen. Eine zweite Hürde besteht darin, gute elektrische Kontakte zwischen Elektrolyt und Stromabgriffen herzustellen, insbesondere bei keramischen Elektrolyten. Dritter Problemkreis sind die Zuleitungen von Brennstoff und Sauerstoff bzw. Luft sowie die Ableitung der Reaktionsprodukte in die und aus der Batterie, zu der eine Vielzahl von gleichen Zellen zusammengeschaltet wird, um praxisgerechte höhere Spannungen und Leistungen zu erzielen. Der Energiebedarf der Pumpen in Zu- und Ableitungen vermindert natürlich den Wirkungsgrad der Zelle. Und schliesslich kämen alle heute wenigstens bis zur Laborreife gediehenen Brennstoffzellen auch bei Serienherstellung ungleich teurer als herkömmliche Strom- und Wärmeerzeuger.

Die Fachwelt ist im wesentlichen einig darüber, dass die alkalische Brennstoffzelle zwar am weitesten fortgeschritten ist, aber wegen prinzipieller Schwächen – nur geringe Leistung – kaum Zukunft hat. Über die Festpolymer- und Karbonat-Zelle lässt sich noch keine Prognose anstellen, weil beide Typen noch nicht über Laborversuche hinausgekommen sind. Phosphorsäure-Zellen werden zwar schon in der Praxis in Anlagen bis zu 11 Megawatt Leistung erprobt, und in Japan sollen sie ab Mitte der 90er Jahre in Serie produziert werden. Mehr Potential räumen die Fachleute dennoch der Festoxid-Zelle ein, obschon sie ebenfalls noch im Laborstadium steckt.

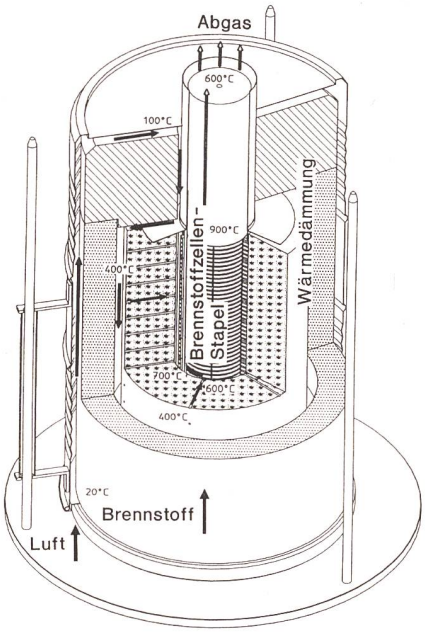
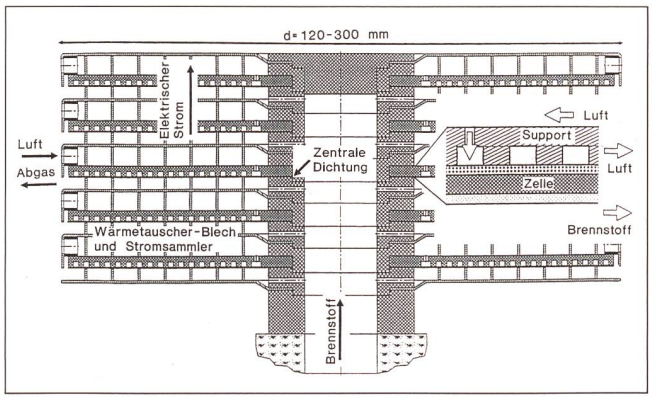


Bild 5 Vereinfachte Zeichnung eines thermisch autarken Systems der 1-Kilowatt-Klasse. Die Luft tritt mit 20 °C am Umfang des Gehäuses ein und erwärmt sich, mehrfach umgelenkt, auf über 900 °C, ehe sie in die eigentlichen Zellen eintritt. Die Abluft wiederum gibt Wärme an die einströmende Luft ab und kühlt sich daher bis zum Austritt aus dem Gehäuse auf rund 600 °C ab.

Bild 4 Längsschnitt durch einen Stapel von fünf Festoxid-Zellen mit metallischen Stromsammlern. Der Zellendurchmesser kann bis zu 30 cm betragen. (Grafiken Sulzer-Innotec)



Prinzip

Brennstoffzellen wird chemische Energie in Form eines Brennstoffs kontinuierlich zugeführt. Dazu sind zwei flächige Elektroden durch einen Elektrolyten getrennt, einen Stoff, der nur Ionen einer bestimmten Art leitet. In der Festoxid-Brennstoffzelle dient als Elektrolyt eine Keramik aus Zirkonoxid, die ausschliesslich Sauerstoffionen durchlässt: Für ihren Betrieb lässt man zur einen Elektrode, der Kathode, Luft strömen. Bei der hohen Betriebstemperatur von 900 bis 1000 °C und infolge der Katalysatorwirkung von Elektrolyt und Elektrode werden die Atome des Luftsauerstoffs ionisiert, das heisst sie nehmen je zwei (elektrisch negative) Elektronen auf. Diese Ionen wandern durch den Elektrolyt zur anderen Elektrode, der Anode. Sie geben die beiden Elektronen an die Anode ab und reagieren chemisch mit Brennstoffatomen. An der Anode besteht nun Elektronenüberschuss, an der Kathode Elektronenmangel, mithin dazwischen eine elektrische Spannung in der Grössenordnung von einem Volt – eine leitende äussere Verbindung lässt Gleichstrom fliessen.

Favorit Festoxid-Zelle

Warum die Festoxid-Zelle favorisiert und daher rund um die Welt mit Nachdruck bearbeitet wird, aber auch welche Hürden bis zur Serienreife noch zu überwinden sind, mag das Beispiel einer Schweizer Entwicklung illustrieren. In der Schweiz arbeiten mehrere Hochschulinstitute und Industriefirmen an Brennstoffzellen mit dem Ziel, als Brennstoff Erdgas zu verwenden. Alle Fäden laufen beim Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW) zusammen. Grösstes und wichtigstes, auch international stark beachtetes Einzelprojekt ist HEXIS, dessen Federführung bei der Firma Sulzer Innotec in Winterthur liegt und das vom BEW, vom Nationalen Energie-Forschungs-Fonds (NEFF) und vom Fonds der Schweizerischen Gasindustrie (FOGA) mitfinanziert wird.

HEXIS baut auf die Festoxid-Zelle, bringt aber neue, teils schon patentierte Ideen ein. Im Mittelpunkt steht die multifunktionale Gestaltung der Einzelzelle mit einer ebenen Festoxid-Keramikscheibe als Kernstück; anderswo verwendet man auch röhrenförmige oder gewellte Keramiken. Während international fast durchwegs jede Zelle einer Batterie mit eigenen Zu- und Ableitungen ausgestattet wird, setzt man in Winterthur auf eine viel einfachere und daher kostengünstigere «integrale» Anbindung, das heisst gemeinsame zentrale Lei-

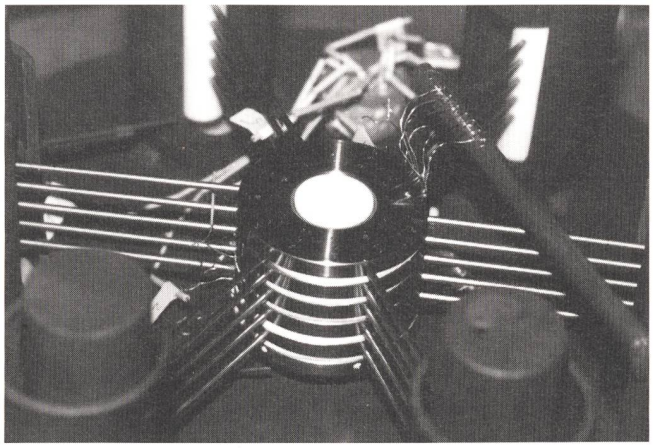


Bild 6 Fünf Festoxid-Stapelelemente von 7 cm Durchmesser für Grundlagenversuche im HEXIS-Labor. Rechts oben elektrische Messleitungen. Die Rohre vorne, rechts und links im Bild dienen als Luftzuführungen, der Brennstoff tritt (im Bild nicht sichtbar) von unten in den Zellenstapel ein.

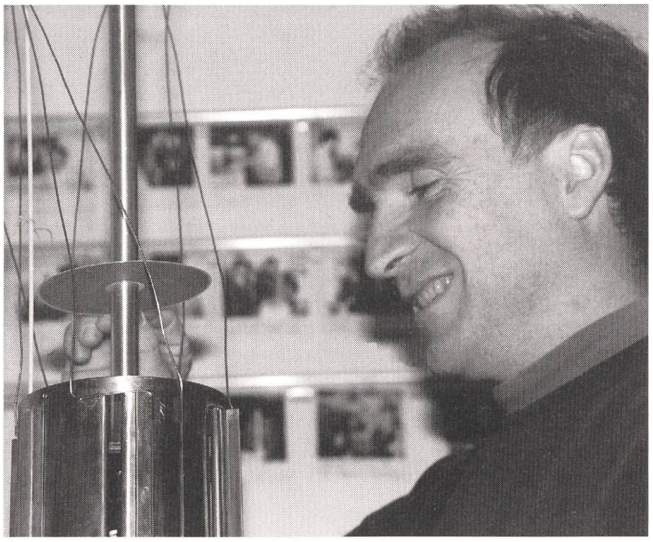


Bild 7 Ein Brennstoffzellenstapel der 1-Kilowatt-Klasse bei der Montage – eine Elektrolyt-Platte aus Zirkonoxid wird soeben eingelegt.

tungen für alle Zellen. Jede Zelle muss dann zugleich mehrere Funktionen übernehmen, nämlich elektrochemisches bzw. stromlieferndes Element, Vorheizung für die einströmende kalte Luft, Kühler für die Keramik (die Betriebstemperatur liegt ja über 900 °C) und Nachbrennraum für die Abgase zu sein.

Die optimale Zellengestaltung wurde von 1991 bis 1993 erarbeitet: eine kreisrunde 0,2 Millimeter starke Platte aus Zirkonoxid als Elektrolyt, auf der Sauerstoffseite eine stromleitende poröse Keramik, auf der Erdgasseite ein stromleitendes poröses Gemisch aus Nickel und Keramik. Luft bzw. Erdgas treten im Zentrum ein und strömen, je auf einer Seite, nach aussen zum Plattenrand, wo sie gemeinsam und zusammen mit den Reaktionsprodukten abgesaugt werden. Zahlreiche Versuche erwiesen die Funktionstüchtigkeit der Einzelzelle und vernachlässigbar geringe Abgasemissionen (sieht man einmal von dem unvermeidlichen Kohlendioxid ab, dessen Ausstoss aber 10% geringer ist als bei einer vergleichbaren Flammenverbrennung von Erdgas). Die mit dem Brennstoff zugeführte Energie wird zu etwa gleichen Teilen in Strom wie Wärme umgewandelt. Je cm^2 Elektrodenfläche erzielt man etwa 0,1 Watt Leistung.

1993 wurde erstmals eine Batterie aus einem Stapel von 43 Zellen in Betrieb genommen. Die damit gemachten Erfahrungen – vor allem Probleme mit mechanischen Spannungen, die ihrerseits von ungleichmässig verteilten hohen Temperaturen herrühren – fliessen nun in die Konstruktion von Einheitsmodulen mit je etwa 15 Kilowatt Leistung ein. Diese sollen dann, so Projektleiter Roland Diethelm, zu Systemen von 50 Kilowatt Leistung zusammengebaut werden. Fernziel sind preislich konkurrenzfähige, in einem kleinen Container anschlussfertig eingebaute Blockheizkraftwerke im Leistungsbereich von 50 bis 200 Kilowatt.

Vorsichtiger Optimismus

Fasst man die Erkenntnisse der Schweizer wie anderer Entwickler-Gruppen zusammen, so erscheint in bezug auf die Zukunft der Brennstoffzelle «vorsichtiger Optimismus» am Platze. Nach wie vor stehen auf dem Weg zum Durchbruch hohe Hürden vor allem werkstofftechnischer Natur. Und selbst dann, wenn diese gemeistert werden sollten, könnten gewisse Eigenschaften der Brennstoffzellen manchen – heute weitum erhofften – Anwendungen hinderlich sein. Beispielsweise benötigt eine Festoxid-Batterie mehrere Stunden, um aus dem kalten Zustand auf Betriebstemperatur gebracht zu werden – für den Einsatz in Elektrofahrzeugen undenkbar.

Immerhin: Nannten die Brennstoffzellen-Forscher vor wenigen Jahren noch das Jahr 2010 für die Serienreife der Festoxid-Zelle, so peilen sie nunmehr aufgrund der jüngsten Fortschritte dieses Datum zehn Jahre früher an. Voraussetzung für das Erreichen dieses Ziels ist freilich, dass Industrie und Staat die nötigen, im Vergleich zu anderen Energieprojekten (wie etwa der Kernfusions-Forschung) bescheidene Mittel bereitstellen. Immer stärker engagiert sich die Erdgasindustrie, während die Elektrizitätswirtschaft vorerst eine beobachtende Position einnimmt.

Les piles à combustible, des roses aux longues épines

Des installations de production d'électricité et de chaleur silencieuses ne sont pas pour demain

Les médias mentionnent de plus en plus souvent la «pile à combustible»: celle-ci est une «combustion vive» de gaz naturel et d'air produisant de manière quasi non polluante et silencieuse de l'électricité et de la chaleur à un rendement élevé. De l'énergie chimique est amenée continuellement sous la forme de combustible aux piles à combustible. Deux électrodes plates sont séparées à cette fin par un électrolyte, un corps qui ne conduit le courant électrique que par le mouvement d'ions dissociés. Le miracle de l'énergie n'est pas pour demain, car seules quelques installations d'essai sont en exploitation après deux décennies de recherche et de développement. Malgré la simplicité du principe, la difficulté réside ici dans le détail. Un projet suisse innovateur devrait permettre à la fois de surmonter les problèmes techniques et de diminuer les frais.