

# Funktionskeramik für die Energie- und Umwelttechnik

Autor(en): **Harbach, Frederich / Schumann, Bernd / Rohr, Franz-Josef**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **81 (1990)**

Heft 15

PDF erstellt am: **27.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-903139>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Funktionskeramik für die Energie- und Umwelttechnik

Friedrich Harbach, Bernd Schumann, Franz-Josef Rohr

**Hochleistungskeramik mit speziellen physikalischen oder chemischen Eigenschaften, die sogenannte Funktionskeramik, ist aus vielen Bereichen der Elektrotechnik nicht mehr wegzudenken. Insbesondere die «leitenden Keramiken» gewinnen zunehmend an Bedeutung für neuartige Lösungen in der Energie- und Umweltverfahrenstechnik: Sie sind das Herzstück von Sensorsystemen, Brennstoffzellen, Speicherbatterien und thermoelektrischen Wandlern.**

**Les céramiques de haute performance avec des propriétés physiques et chimiques spéciales, les céramiques fonctionnelles, sont devenues indispensables dans bien de domaines de l'électrotechnique. En particulier les «céramiques conductrices» gagnent de plus en plus en importance pour résoudre des problèmes de la technique de l'énergie et de l'environnement. Elles représentent le cœur des capteurs et sondes électrochimiques, des piles à combustible, des batteries de stockage et des convertisseurs thermo-électriques.**

## Adresse der Autoren:

Dr. Friedrich Harbach, Dr. Bernd Schumann,  
Dr. Franz-Josef Rohr,  
Konzernforschungszentrum Heidelberg,  
Asea Brown Boveri AG, D-6900 Heidelberg 1

Viele keramische Bauteile haben entscheidend zum Fortschritt und zum Stand der allgemeinen Elektrotechnik wie der Energietechnik beigetragen. Den meisten Lesern vertraut sind Ferrite, Piezokeramiken, Keramik Kondensatoren, Substrate für elektronische Schaltungen usw. Diese Beispiele bilden den Kern der sogenannten *Funktionskeramiken*, d.h. solcher Keramiken, bei denen weniger die mechanischen und Hochtemperatureigenschaften (wie bei den «Strukturkeramiken»), sondern andere physikalische oder chemische Eigenschaften eine herausragende Rolle spielen.

## Etablierte und neue Funktionskeramiken

### Eingrenzung der Themas

Viele Funktionskeramiken haben heute ihren festen Platz in der Energie- und Umwelttechnik. Bei den *Keramiken für die Energietechnik* denkt der Leser wohl zuerst an die Grossisolatoren von Überlandleitungen oder Freiland-Schaltanlagen, die vor allem in manchen Ballungsgebieten allgegenwärtig sind, oder an Varistoren für den Netz- und Verbraucherschutz. Bei den *Keramiken für die Umwelttechnik* sind keramische Brennerrohre, keramische Katalysatoren oder keramische Heissgas- und Staubfilter heute kennzeichnend für fortgeschrittene, saubere Motor-, Feuerungs- und Kraftwerkstechnik, wenn auch weit weniger augenfällig.

Diese «etablierten» Funktionskeramiken sollen aber nicht Thema dieses Artikels sein, sondern diejenigen funktionskeramischen Werkstoffe, die im Konzernforschungszentrum Heidelberg von Asea Brown Boveri heute im Vordergrund des Interesses stehen – Funktionskeramiken für neuartige Lö-

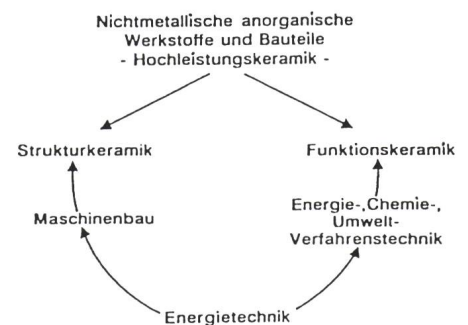


Bild 1 Keramiken für die Energietechnik

sungen zur Energie- und Umweltverfahrenstechnik (Bild 1). Im Vordergrund stehende Werkstoffe sind die Ionenleiter stabilisiertes Zirkondioxid und stabilisiertes Natriumpolyaluminat (Natrium-Beta-Aluminiumoxid), die elektronenleitenden Seltenerd-Perowskite und verwandte Verbindungen, aber auch das elektrisch nichtleitende, aber gut wärmeleitende keramische «Arbeitspferd» Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Als Anwendungen dieser Werkstoffe in neuartigen Systemen der Energie- und Umwelttechnik sollen in einer kurzen Zusammenschau die ABB-Lambda-Sonden für Feuerungsanlagen [1], die ABB-Hochenergiebatterie [2], die oxidkeramische Brennstoffzelle und der Alkalimetall-Thermoelektrische Converter vorgestellt werden [3]. Die Hochtemperatur-Supraleiter, an deren Entwicklung ABB ebenfalls führend beteiligt ist, gehören an sich auch in diesen Rahmen. Sie werden jedoch in anderem Zusammenhang gesondert dargestellt [4] und sollen daher hier nicht weiter behandelt werden. Auch auf einzelne Anwendungen des  $\text{Al}_2\text{O}_3$  soll hier nicht näher eingegangen werden. Am Beispiel des Standardwerkstoffes  $\text{Al}_2\text{O}_3$  soll dagegen am Schluss kurz auf Konzepte für Werkstoffverbesserungen hingewiesen werden.



## Was sind Festelektrolyte?

Im Zentrum der folgenden Anwendungen leitender keramischer Bauteile stehen damit die *Ionenleiter*. Der Begriff Ionenleiter und seine Bedeutung dürfte einigen Lesern sicher weit weniger vertraut sein als beispielsweise die Begriffe metallischer Leiter, Halbleiter und selbst Supraleiter. Ionenleiter, insbesondere die hier gemeinten Schnellen Ionenleiter, auch Festelektrolyte, Festkörperelektrolyte oder Superionenleiter genannt, leiten – wie der Name schon sagt – Ionen, und zwar normalerweise nur eine spezifische Ionenart. Sie leiten praktisch keine Elektronen; ihre Elektronenleitfähigkeit ist um viele Zehnerpotenzen schlechter als ihre Ionenleitfähigkeit. Letztere kann Werte zwischen  $0,1 (\Omega\text{cm})^{-1}$  und  $1 (\Omega\text{cm})^{-1}$  erreichen; sie liegt damit im Bereich der Leitfähigkeit flüssiger Elektrolyte oder geschmolzener Ionenkristalle. Ionenleiter sind gasdicht. Genausowenig wie Elektronen lassen sie nicht-ionisierte Teilchen durch. Auch wenn sie oft als Membranen beschrieben werden, sind sie doch keine Membranen von der Art, wie sie bei der Gas-, Flüssigkeits- oder Staubtrennung üblich sind.

Wie funktioniert dann aber die schnelle Ionenleitung in einem festen Körper? Superionenleiter gehören zu den Ionenkristallen; sie sind aus verschiedenartigen Ionen aufgebaut. Die beweglichen Ionen in einem Superionenleiter sind Teil seiner Struktur. Im Gegensatz zu einem normalen Ionenkristall (zum Beispiel Steinsalz, Natriumchlorid), der erst im geschmolzenen Zustand eine erhebliche Ionenleitfähigkeit aufweist, können in einem Superionenleiter Ionen einer Art mehr Plätze im Kristall einnehmen, als ih-

nen eigentlich zustehen, und diese mit nur geringem Energieaufwand wechseln. Durch Stabilisierungszusätze lässt sich die Zahl dieser Plätze noch erhöhen oder der Energieaufwand, der zum Platzwechsel erforderlich ist, weiter verringern. Die derartig leicht beweglichen Ionen wirken dadurch in vieler Hinsicht so, als bildeten sie ein flüssiges Teilgitter innerhalb der festen Reststruktur.

## Anwendungsbeispiele und ihre spezifischen «funktionskeramischen» Anforderungen

### Sauerstoffsonden

In Heidelberg wurde bereits in den siebziger Jahren begonnen, die schnelle Ionenleitung für neuartige Systeme der Energie- und Umwelttechnik auszunutzen; zunächst für *Sauerstoffsonden*, deren Herzstück ein *dichtes Keramikrohr aus sauerstoffionenleitendem Zirkondioxid* ist (Bild 2). Bekanntestes Beispiel dieser Art Sauerstoffsonden ist die Lambda-Sonde zur Einstellung des Luft-Brennstoff-Verhältnisses in Kraftfahrzeugen. Die üblichen Spannungssonden (auch potentiometrische Sonden oder Nernst-Sonden genannt) liefern ein Spannungssignal, das besonders hoch ist (steile Spannungsänderung), wenn der Lambda-Wert gleich 1 ist, d.h. bei stöchiometrischem Luft-Brennstoff-Verhältnis. Für die Regelung grösserer Feuerungsanlagen reicht dieses Verhalten jedoch nicht aus. Dort muss zur Sicherung des hohen Wirkungsgrades und der Schadstoffarmut ein sehr genauer Sauerstoffwert über grössere Bereiche von

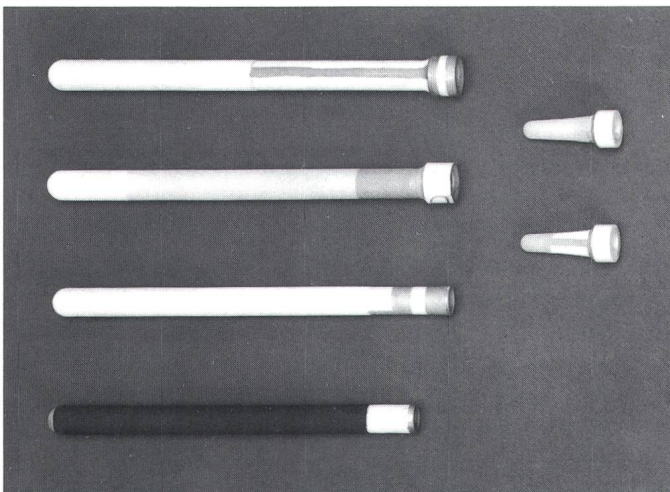
Lambda, z.B. bei Lambda gleich 1,2, eingestellt werden können.

Bei ABB wurde daher die *Stromsonde (amperometrische Lambda-Sonde)* entwickelt. Mit dieser Sonde wird der gesamte Sauerstoffgehalt eines aus dem Rauchgas einer Feuerungsanlage abgezweigten konstanten Messgasstromes elektrochemisch entfernt und gemessen. Dazu strömt das Messgas an der Aussenfläche eines Zirkondioxidrohrs entlang; das Rohr selbst ist aussen und innen mit elektronenleitenden porösen Elektroden (aus Platin oder Seltenerd-Perowskiten) beschichtet. Zwischen diesen Elektroden und damit über der Festelektrolytkeramik wird von aussen eine Spannung angelegt. Dies bewirkt, dass die Sauerstoffmoleküle an der Aussen Elektrode gespalten, die entstehenden Sauerstoffatome unter Aufnahme von Elektronen ionisiert und die Sauerstoffionen durch die Festelektrolytkeramik zur Innenelektrode transportiert werden. Die dafür benötigten Elektronen stammen aus der Entladung der an der Innenelektrode ankommenden Sauerstoffionen; für ein aus dem Messgasstrom ionisiertes Sauerstoffatom wird gleichzeitig an der Innenelektrode ein Ion entladen und aus je 2 neutralen Atomen wieder ein Sauerstoffmolekül gebildet.

Um einen konstanten Messgasstrom sicherzustellen, wird das Messgas durch eine kritische Düse abgesaugt. Bei Betriebsbedingungen (z.B. Messgasstrom 0,5 l/h; Sondenspannung ungefähr 1 V) liefert der als elektrochemische Sauerstoffpumpe arbeitende Sensor einen elektrischen Sondenstrom von 0...400 mA bei Sauerstoffkonzentrationen von 0...21%. Das Signal ist der Sauerstoffkonzentration direkt proportional.

Die Vorteile der Methode gegenüber dem potentiometrischen Verfahren sind die Temperaturunabhängigkeit und Linearität des Messsignals im Arbeitsbereich der Sonde von 800...1000 °C und 0...21% O<sub>2</sub>, das starke Stromsignal, die einfache Eichung und die Selbsttestfähigkeit mit Luft als Eich- und Kontrollgas. Die Sonde erreicht in Feuerungen, Müll- und Chemieabfallverbrennungsanlagen Lebensdauern von mehr als zwei Jahren bei kontinuierlichem Betrieb.

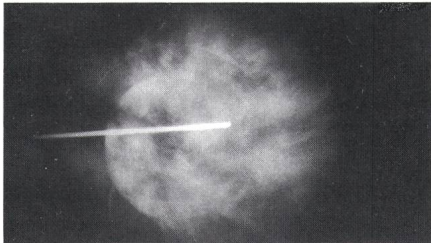
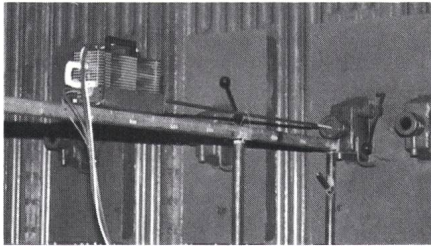
In einer Modifikation kann man dieser Sonde eine elektrochemische Sauerstoffpumpe ähnlicher Bauart, aber entgegengesetzter Pumprichtung vorschalten, die das Messgas vorher mit Sauerstoff bekannter Dosis anrei-



**Bild 2**  
Zirkondioxid-Röhren mit und ohne Elektroden-schichten

Prototypen aus der ABB-Entwicklung zu verschiedenen Lambda-Sonden





**Bild 3** Verbrennungskontrolle an einem Erprobungskessel mit einer Sauerstoffmangelsonde ( $\lambda < 1$ )

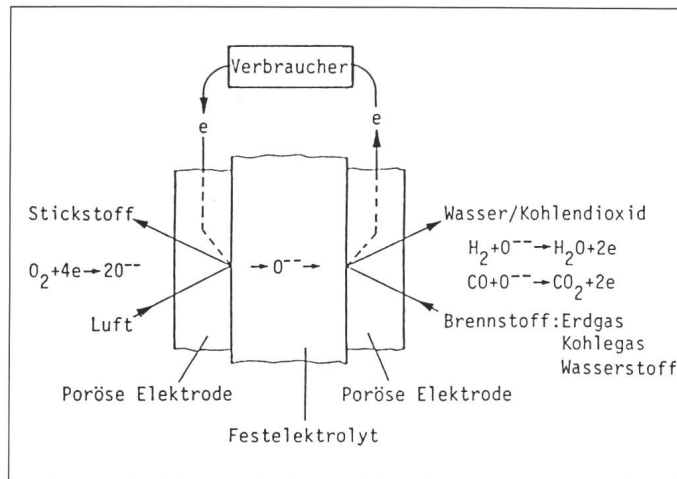
chert. So ist man in der Lage, auch den Sauerstoffbedarf eines reduzierenden Gases (*Sonde für Sauerstoffbedarf oder Brennstoffüberschuss*) zu bestimmen, wie es in Keramikbrennöfen, bei chemischen Prozessen und in Low-NO<sub>x</sub>-Brennern mit in der ersten Stufe reduzierender Stufenverbrennung notwendig ist (Bild 3).

In allen Fällen muss für ein zuverlässig funktionierendes Gesamtsystem die Zirkondioxid-Keramik gute Thermoschockbeständigkeit aufweisen; sie muss auch in aggressiver Atmosphäre erosions- und korrosionsfest sein – bei einer Sondenbetriebstemperatur von 800...1000 °C. Langzeitstabile Verbunde zwischen Elektrodenschicht und Festelektrolytkeramik sind insbesondere bei der vorgeschalteten Sauerstoffpumpe der Sonde für Sauerstoffbedarf erforderlich; hier wird ausserdem eine zuverlässig dichte Trennung zwischen Aussen- und Innenraum benötigt.

### Oxidkeramische Brennstoffzelle

Die *Oxidkeramische Brennstoffzelle*, nach der englischen Bezeichnung Solid Oxide Fuel Cell meist kurz SOFC genannt, ist eng verwandt mit den Sauerstoffsonden, sozusagen die leistungsstarke grosse Schwester.

Keramische Brennstoffzellen sind elektrochemische Stromquellen, in denen die chemische Energie gasförmiger Brennstoffe wie Wasserstoff, Erdgas oder vergaste Kohle bei Temperaturen von 800...1000 °C mit hohem Wirkungsgrad und schadstoffarm direkt in elektrische Energie umgewandelt wird. Diese Energiedirektum-



**Bild 4** Funktionsprinzip der oxidkeramischen Brennstoffzelle

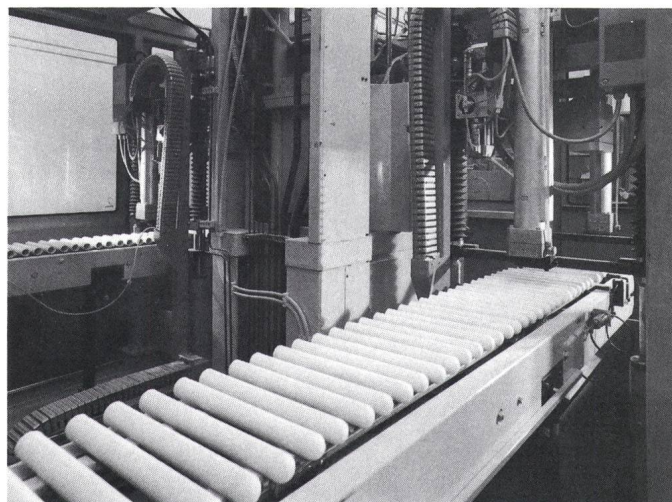
wandlung wird dadurch ermöglicht, dass Brenngas und Luft durch einen gasdichten sauerstoffionenleitenden Festelektrolyten aus Zirkonoxid getrennt sind und die Oxidation des Brennstoffs nicht durch molekularen Sauerstoff, sondern durch negativ geladene Sauerstoffionen erfolgt (Bild 4). Diese werden an der elektronenleitenden porösen Luftelektrode (Kathode aus Perowskit-Mischoxid) gebildet und gelangen durch die ionenleitende Zirkonoxid-Membran zur porösen Brennstoffelektrode (Anode aus Nickel/Zirkonoxid). Dort reagieren sie mit dem Brenngas zu Wasser und/oder Kohlendioxid und geben die dabei freiwerdenden Elektronen über die Brennstoffelektrode und den im äusseren Stromkreis befindlichen elektrischen Verbraucher an die Luftelektrode zurück. Die je Einzelzelle erzeugte elektrische Spannung beträgt rund 1V.

Die bei hohen Temperaturen arbeitenden keramischen Brennstoffzellen haben gegenüber anderen Brennstoff-

zellen-Typen, z.B. solchen mit alkalischen oder phosphorsäuren flüssigen Elektrolyten den Vorteil, dass nicht nur Wasserstoff, sondern auch Kohlenmonoxid oder C- und CO-haltige Brenngase elektrochemisch umgesetzt werden können. Eine externe Reformierung ist nicht erforderlich.

Ausgehend von früheren grundlegenden Arbeiten bei ABB auf dem Gebiet der Festelektrolyt- und Elektroden-Entwicklung und von der Serienschaltung kleiner Laborzellen, steht heute die Verfahrensentwicklung zur kostengünstigen Massenfertigung von technisch einsetzbaren grösseren Einheiten im Vordergrund. So werden neue Brennstoffzellenkonzepte entwickelt, die speziell diesem Gesichtspunkt Rechnung tragen.

In den nächsten Jahren ist zunächst die Entwicklung und Fertigung erdgasbetriebener Einheiten im Leistungsbereich 25 kW bis 1 MW geplant, die dezentral zur Erzeugung von Strom und Wärme (Kraft-Wärme-



**Bild 5** Serienfertigung von Beta-Aluminiumoxid-Rohren

Herstellung des Grünkörpers durch isostatisches Pressen von Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Pulver



Kopplung) eingesetzt werden können. Langfristig ist die Entwicklung von grösseren Anlagen bis 100 MW geplant mit Erdgas oder vergaster Kohle als Brennstoff. Neben modular aufgebauten Brennstoffzellen-Anlagen, in Ballungsgebieten werden auch Kombinationen aus Brennstoffzellen, Gasturbinen und Dampfturbinen in Betracht gezogen.

In einer Brennstoffzelle kommen, verglichen mit den Sauerstoffsonden, als zusätzliche Anforderungen an die Zirkondioxid-Keramik noch hinzu: hohe mechanische Festigkeit und dauerhafte Dichtigkeit über grosse Flächen auch bei Wandstärken weit unter 1 mm und sehr gute Ionenleitfähigkeit für den Durchtritt der Sauerstoffionen bei hoher örtlicher Homogenität.

### Natrium-Schwefel-Batterie

Bei den folgenden beiden Anwendungsbeispielen funktionskeramischer Werkstoffe stellt jeweils ein *dichtes keramisches Rohr aus Beta-Aluminiumoxid* das Herzstück dar. Diese Rohre sind normalerweise grösser als die Zirkondioxidröhrchen, die in Bild 2 gezeigt sind. Sie werden üblicherweise aber nach dem gleichen Verfahren hergestellt: Ein rieselfähiges Pulver wird in eine Form gefüllt und durch isostatisches Pressen zum sogenannten Grünkörper verdichtet (Bild 5); dieser noch poröse Grünkörper wird anschliessend in einem Brennofen bei Temperaturen um 1600 °C dicht gebrannt.

Anders als Zirkondioxid aber leitet Beta-Aluminiumoxid nicht Sauerstoffionen, sondern Natriumionen. In den einzelnen Zellen einer *Natrium-Schwefel-Batterie* (Bild 6) wandern diese Natriumionen beim Entladen vom Natriumraum durch das Keramikrohr in den Schwefelraum und reagieren dort zu Natriumpolysulfid. Die Elektroden, die sie im Natriumraum abgegeben haben, sind dabei gleichzeitig über den aussen angeschlossenen Verbraucher geflossen, haben dort die gewünschte elektrische Arbeit verrichtet und stossen als dritter Reaktionspartner im Schwefelraum bei der Bildung des Natriumpolysulfids wieder hinzu. Beim Laden läuft dieser Vorgang in genau umgekehrter Reihenfolge wieder ab, nur dass der äussere Verbraucher durch eine äussere Stromquelle (das Ladegerät) zu ersetzen ist. Während sich der Natriumraum beim Entladen allmählich geleert hat, füllt er sich beim Laden wieder mit Natrium. Besondere Vorzüge der NaS-Hochenergiebatterie gegenüber anderen Batteriesystemen sind insbesondere: hohe Energiedichte, Wartungsfreiheit, stabile Entladekennlinie.

Von einer NaS-Hochenergiebatterie wird aber nicht nur eine hohe Energiedichte erwartet; für ihren Einsatz in Elektroautos, Netzstützpunkten oder als Spitzenstromspeicher werden Langzeitstabilität bei möglichst vielen Entlade-/Ladezyklen und eine jeweils den unterschiedlichen Einsatzbedingungen entsprechende zusätzliche Funktionalität gefordert: mal zusätzlich eine hohe Leistungsdichte, mal viele Temperaturzyklen, dann geringe Wärmeverluste im Stillstand usw.

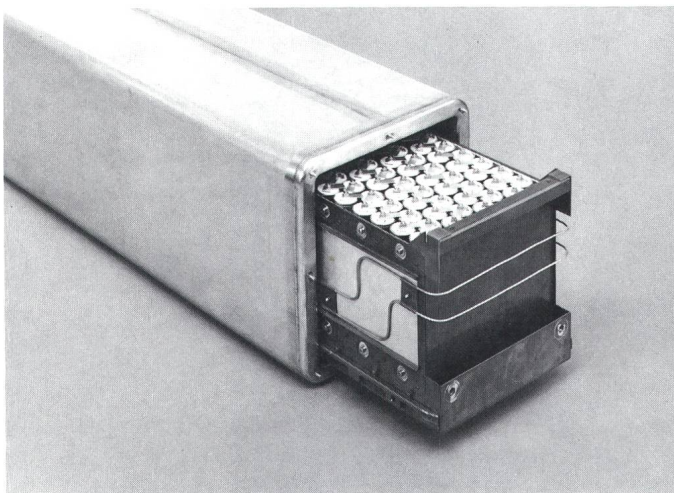
In der Natrium-Schwefel-Batterie zeigt die Beta-Aluminiumoxid-Keramik eindrucksvoll, warum die Funktionskeramiken zu den Hochleistungskeramiken zu zählen sind. Die Beta-Aluminiumoxid-Keramik muss nicht

nur eine gute Ionenleitfähigkeit (diesmal selektiv für Natriumionen) aufweisen; sondern sie muss ausserdem unter Erschütterungen mechanisch stabil bleiben und bei wechselnder Zusammensetzung und Konsistenz der angrenzenden Reaktanden und auch bei Temperaturänderung eine dauerhaft dichte Trennwand zwischen sich dauernd verändernden Reaktandenräumen darstellen. Diese Forderung betrifft nicht nur das Keramikrohr allein, sondern natürlich auch den Verbund der Keramik mit der Gesamtzelle; da dieser Flansch ausserdem die Reaktandenräume elektrisch voneinander isolieren muss, handelt es sich in der Tat um einen anspruchsvollen Keramik-Keramik-Metall-Verbund. Nur so kann ein zuverlässiger Betrieb der Einzelzellen und damit einer ganzen Batterie gewährleistet werden.

### Alkalimetall-Thermoelektrischer Converter

Die jüngste unter den hier zu nennenden ABB-Entwicklungen ist der *Alkalimetall-Thermoelektrische Converter* oder AMTEC (Bild 7). Vom elektrochemischen Prinzip her ist der Amtec eine Natriumkonzentrationszelle; thermodynamisch gesehen, ist es eine Wärmekraftmaschine. Ein keramischer Separator aus Beta-Aluminiumoxid – das gleiche Bauteil, das auch in der ABB-Hochenergiebatterie eingesetzt wird – trennt im Amtec zwei Natriumreservoirs. Die beiden Natriumreservoirs befinden sich auf unterschiedlicher Temperatur: der Heissnatriumraum auf 800...1000 °C, der Kaltnatriumraum auf 200...300 °C. Der Temperaturunterschied ist verknüpft mit einem Unterschied in den zugehörigen Natriumpartialdampfdrücken; der zugehörige Dampfdruckgradient ruft wiederum eine elektrische Spannung (in einer Einzelzelle etwa 1 V) hervor. Wird eine äussere Last angeschlossen, können Natriumionen vom Druckraum (ungefähr 3 bar bei 1000 °C) durch die Festelektrolytkeramik zum Niederdruckraum ( $10^{-5}$  bar bei 300 °C) fließen, während der Arbeit leistende Elektronenstrom durch den Verbraucher fliesst.

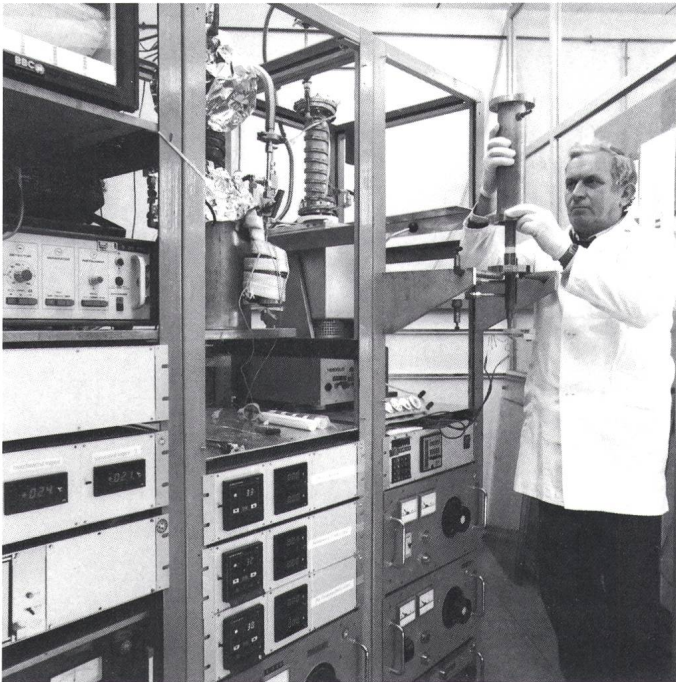
Trennung und Rekombination von Ionen und Elektronen erfolgen in Elektroden auf beiden Seiten der Festelektrolyt-Membran. Die Elektrode auf der Druckseite ist dabei das Natrium selbst; auf der Niederdruckseite wird dagegen eine gesonderte poröse Metallelektrode benötigt. Das Natri-



**Bild 6**  
Die ABB-Hochenergiebatterie

Natrium-Schwefel-Antriebsbatterie für Elektrofahrzeuge





**Bild 7**  
Versuchsstand mit  
Amtec-Laborzellen

Leistungsdichten erlauben: etwa  $1 \text{ A/cm}^2$  oder  $1 \text{ W/cm}^2$  wird angestrebt. Wie bei der Hochenergiebatterie muss der ionenleitende Separator dauerhaft dicht mit dem Restsystem verbunden sein – mit einer Verbindungstechnik, die für  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  geeignet ist.

## Hohe Werkstoff- und Bauteilanforderungen

### Typisch für die Energie- und Umwelttechnik sind hohe Werkstoff- und Bauteilanforderungen

Alle dargestellten Anwendungen leitender Keramik stellen damit hohe Anforderungen an den Werkstoff und die Werkstofftechnik. Bei allen Unterschieden lassen sich dabei drei miteinander verknüpfte Grundanforderungen feststellen:

- Die physikalische oder chemische Funktion muss optimal erfüllt werden. Bei Hochenergiebatterie und Amtec, aber auch bei der Brennstoffzelle, muss eine möglichst hohe Ionenleitfähigkeit gegeben sein. Die entsprechende Optimierung erfordert eine genaue Kenntnis der festkörperphysikalischen und kristallographischen Zusammenhänge.
- Der Werkstoff muss homogen sein (Bild 8). Mangelhafte Homogenität kann zu lokal schwankender Leitfähigkeit und damit zu störenden lokalen Stromdichteveränderungen führen (kritisch bei Brennstoffzelle, NaS-Batterie und Amtec); sie erhöht die Gefahr erosiven oder korrosiven Angriffs (kritisch bei den Sensoren, bei Brennstoffzelle oder NaS-Batterie); sie schränkt Thermoschockbeständigkeit und mechanische Festigkeit ein (mehr oder weniger bei allen Anwendungen).
- Die Verbindung des keramischen Bauteils mit den angrenzenden Systemteilen muss unter meist aggressiven Umgebungsbedingungen langfristig zuverlässig hergestellt werden. Hierzu sind Werkstoffeigenschaften, festkörperchemische Prozesse und Herstellungsprozesse gründlich zu kennen und sicher zu beherrschen – ganz gleich, ob es sich um schichtartige Verbindungen handelt (zwischen Festelektrolytkeramik und Elektroden bei Lambda-Sonden oder Amtec; zwischen Festelektrolytkeramik, Elektroden, Ver-

um wird über eine elektromagnetische Pumpe zurückgeführt.

Dieser neuartige Wandler funktioniert unabhängig von der Art der Wärmezufuhr. Die Wärme kann durch Konzentration der Sonnenstrahlung eingebracht werden, sie kann ebenso gut durch Brenner für jegliche Art von Brennstoff (fest, flüssig oder gasförmig) erzeugt werden. Der Amtec ist gedacht als Herzstück von Amtec-Solaranlagen für die netzunabhängige

Energieversorgung abgelegener Verbraucher in sonnenreichen Gegenden; für brennerbetriebene dezentrale Stromversorgungsanlagen (Kraft-Wärme-Kopplung in Blockheizkraftwerken o.ä.); als motorunabhängiges Generatoraggregat in LKWs oder Bussen; langfristig auch als Vorstufe in öl- und kohlegefeuerten Kraftwerken.

Wie bei Hochenergiebatterie und Brennstoffzelle muss die Festelektrolytkeramik im Amtec hohe Strom- und



**Bild 8** Fortgeschrittenes homogenes Gefüge einer Aluminiumoxid-Keramik

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ -Proben  
links gesintert bei  $1400 \text{ }^\circ\text{C}$  während 2 h; Dichte  $\rho = 96\%$   
rechts gesintert bei  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$  während 30 min; Dichte  $\rho = 99\%$

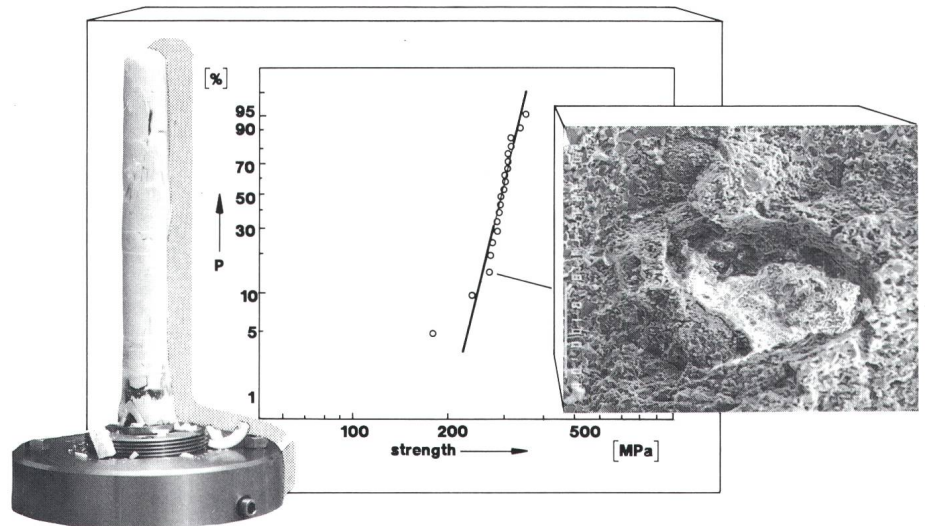


bindungsschicht und Substrat bei der Brennstoffzelle) oder um eher linienförmige Verbindungen (zwischen Separator-Keramik und Restsystem in Batterie, Sonden und Amtec).

- Neben diesen funktionellen und technischen Anforderungen sind auch wirtschaftliche Gesichtspunkte zu berücksichtigen: Jeder Werkstoff, jedes Bauteil muss bei hoher Qualität preisgünstig herzustellen sein: preisgünstige Rohstoffe, Herstellungsprozesse und bauteilbezogene Weiterverarbeitung müssen niedrige Systemkosten ermöglichen.

## Schlussbemerkung

Durch die intensive Beschäftigung mit diesen Aufgabengebieten bei der Entwicklung der vorgestellten Systeme hat das Konzernforschungszentrum Heidelberg ein grosses Know-how aufgebaut. Dieses Know-how führte u.a. zu einer konsequenten Überwachung aller Teilschritte bis hin zur Fehlersuche und -charakterisierung am fertigen Bauteil (Bild 9). Die Erfahrung im Einsatz keramischer Werkstoffe und Bauteile wurde zusätzlich durch ein grundlegendes Entwicklungsprogramm erweitert, in dem Methoden und Verfahren entwickelt wurden, um mechanische und funktionelle Zuverlässigkeit keramischer Bauteile noch weiter zu erhöhen [5]. Das Konzept des «direkten Weges» einer modernen Keramikherstellung, der von der kolloidchemischen Pulveraufbereitung über nasse Formgebung bis zur angepassten Brenntechnik führt, wurde zunächst an dem Modellwerkstoff Aluminiumoxid und den Grundformen Platte und Rohr erprobt. Die Formgebung aus feinen und zusätzlich engfraktionierten Suspensionen führt dabei ohne jede Nachbehandlung direkt zu glatten bis hochglänzenden Oberflächen (Bild 10). Zurzeit werden diese am Beispiel des Aluminiumoxids gewonnenen zusätzlichen Erfahrungen und Methoden auch auf die anderen in diesem Artikel vorgestellten Werkstoffe übertragen. Das gesamte



**Bild 9** Qualitätssicherung bei Keramikanwendungen

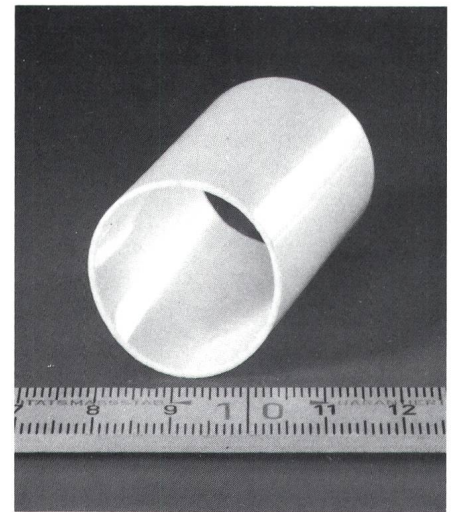
Bei der Entwicklung optimierter Herstellverfahren für zuverlässige Funktionskeramik sind unter einsatznahen Bedingungen Schwachpunkte des Produktes zu finden, zu analysieren und ihre Ursache zu identifizieren, um sie vermeiden zu können.

<i>P</i>	Bruchwahrscheinlichkeit
<i>strength</i>	Bruchfestigkeit
links	unter Druck bis zum Platzen geprüftes Rohr, zur Bestimmung der Kurve <i>P(strength)</i>
rechts	mikroskopische Aufnahme der Bruchausgangsstelle

hier nur teilweise vorgestellte Keramik-Know-how von ABB – nicht nur zur Nutzung leitender Keramik, sondern auch zur Keramikherstellung, zur Prüf- und Verbindungstechnik – wird selbstverständlich auch über den Rahmen dieses Artikels hinaus nutzbringend bei allen Fragen des Keramikeinsatzes angewandt.

## Literatur

- [1] F. J. Rohr und H. Weber: Feuerungsregelung mit Sauerstoffsonden. ABB-Druckschrift Nr. D ZAO 1173 86 D. Baden, Asea Brown Boveri, 1986.
- [2] C. H. Dustmann und J. Angelis: Neues Kraftpaket für umweltfreundliche Elektroautos. ABB-Technik – (1988) 2, S. 9...14.
- [3] Forschungsbroschüre des ABB-Konzernforschungszentrums Heidelberg. ABB-Druckschrift D CRH 1052 89. Heidelberg, ABB-Corporate Research, 1989.
- [4] H. R. Zeller: Elektrotechnische Anwendungen der Supraleitung. Bu!l. SEV/VSE 81 (1990) 15, S. 20...22.
- [5] F. Harbach: Zukunftsweisende Verfahren für die Aufbereitung und Formgebung von Hochleistungskeramik. ABB-Technik – (1990) 4, S. 17...22.



**Bild 10** Zukunftsweisendes Verfahren zur Herstellung von Hochleistungskeramik

Ein gebranntes Aluminiumoxid-Rohr mit glatter und glänzender Oberfläche, das durch elektrophoretische Abscheidung aus einer feinen, stabilen Suspension hergestellt wurde.

Elektrophorese: Transport der suspendierten und durch Zusätze mit Oberflächenladungen belegten Teilchen in einem elektrischen Feld