

**Zeitschrift:** Bulletin Electrosuisse  
**Herausgeber:** Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik  
**Band:** 94 (2003)  
**Heft:** 18

**Artikel:** Leise Revolution : Dezentralisierung und Brennstoffzellen  
**Autor:** Aschenbrenner, Norbert  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-857586>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 18.03.2025

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

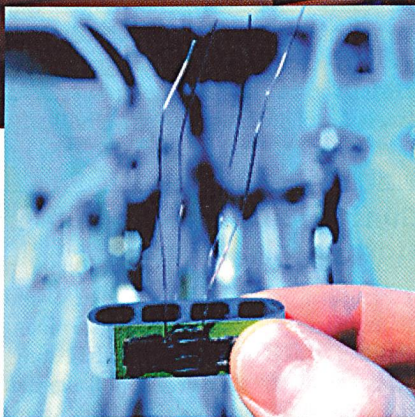
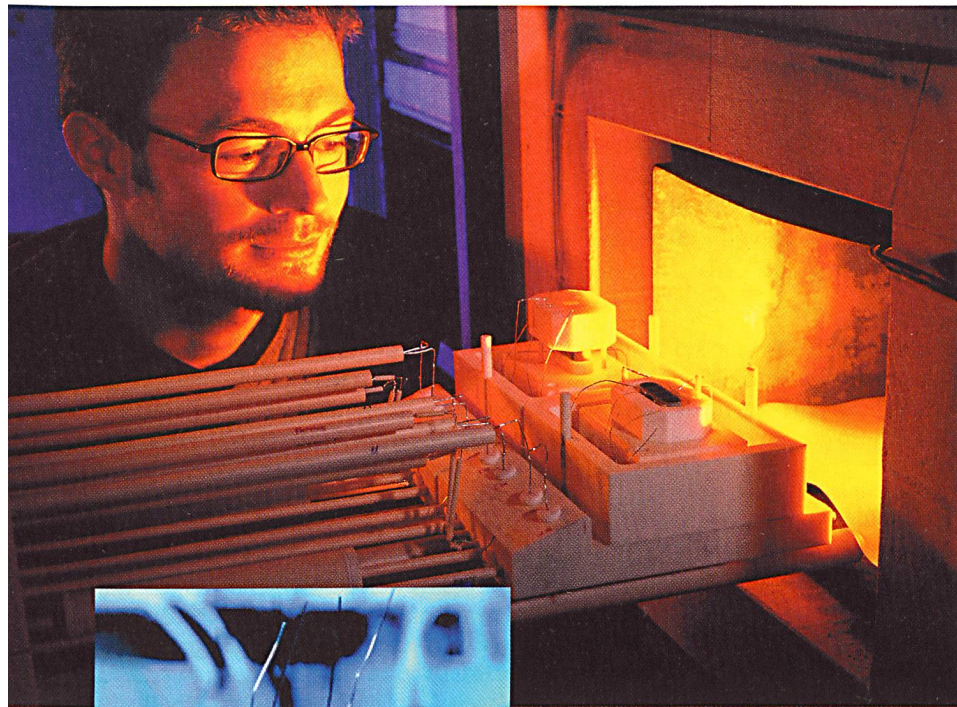
# Leise Revolution: Dezentralisierung und Brennstoffzellen

Unsere Energielandschaft wird sich in den kommenden Jahren drastisch verändern. Die Liberalisierung der Märkte und die Anstrengungen zur Reduzierung der Treibhausgase führen zu einer Dezentralisierung der Stromerzeugung. In diesem Szenario werden Brennstoffzellen eine bedeutende Rolle spielen.

proportional anstiegen. Heute heisst das Schlagwort dagegen wieder «Dezentralisierung». So wirbt etwa der grösste deutsche Stromversorger RWE mit einer Brennstoffzelle aus dem Supermarkt. RWE rechnet damit, dass im Jahr 2015 etwa 10% des Strombedarfs in Deutschland von Brennstoffzellen erzeugt werden. Noch vor 2010 will der Konzern Kleinkraftwerke für Privathaushalte anbieten. Konkurrent E.ON ist etwas vorsichtiger. Das Düsseldorfer Unternehmen geht davon aus, dass in Deutschland bis 2025 etwa 20 TWh pro Jahr mit Brennstoffzellen abgedeckt werden, das sind 4% des Gesamtstrombedarfs, aber 15% des in Haushalten verbrauchten Stroms. Weltweit stehen Unternehmen bereit, dafür Geräte zu liefern: In Nordamerika drängen Firmen wie Ballard Power, Plug Power, H-Power und Fuel Cell Technologies auf den Markt. Siemens baut in Pittsburgh eine Brennstoffzellen-Fabrik. Auch das 1997 gegründete Schweizer Unternehmen Sulzer Hexis setzt auf dezentrale Energieversorgung mit Brennstoffzellen. Und die Heizungsspezialisten von Vaillant arbeiten mit Plug Power an einer Brennstoffzelle zur Strom- und Wärmeerzeugung im Keller. Sie sehen in der Individualisierung einen Megatrend.

Woher kommt der Sinneswandel? «Die politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen haben sich drastisch verändert», sagt Dr. Georg Rosenbauer, Energieexperte im strategischen Marketing von Siemens Corporate Technology. Zum einen wurden die Strommärkte in Europa weitgehend liberalisiert, was die Beziehung zwischen Energieversorger und Kunden auf eine neue Grundlage gestellt hat; zum anderen übt die Politik je nach Staat unterschiedlich hohen Druck aus, um den Ausstoss von Treibhausgasen wie Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) zu reduzieren. Rosenbauer ist davon überzeugt, dass künftig eine bedeutende Menge Primärenergie dezentral erzeugt werden wird – aber dass auch grosse Kraftwerke weiter ihren Platz haben werden.

«Allen ist klar, dass Energie der Schlüssel für eine weitere wirtschaftliche und vor allem nachhaltige Entwicklung ist», ergänzt Dr. Thomas Hamacher, Energieexperte am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching bei München. Daher werde der Energieverbrauch weiter zunehmen. Realistischerweise müssten um 2050 bis zu zehn Milliarden



Siemens-Forscher in Erlangen testen bei hohen Temperaturen die elektrischen Eigenschaften neuer Festoxid-Brennstoffzellen; Detailansicht (unten). Bilder Siemens.

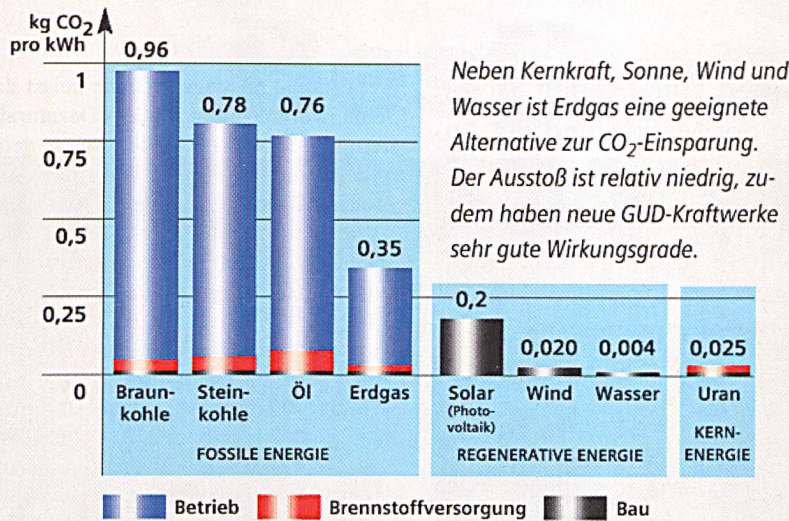
■ Norbert Aschenbrenner

## Dezentralisierung als Megatrend?

Wer wissen will, wie die Energieversorgung von morgen aussieht, muss in die Vergangenheit schauen. Die Elektrifizierung trat ihren Siegeszug nicht mit grossen Kraftwerken an, wie sie heute die Welt überziehen – es waren Generatoren angetrieben von Mühlrädern, Dampfmaschinen und Verbrennungsmotoren. Wer Strom wollte, machte ihn dort, wo er ihn brauchte. Ein Länder überspannendes Netz hat aber Vorteile: Die Lastspitzen gleichen sich aus, und es reicht insgesamt eine kleinere Erzeugungsleistung. Es war daher vernünftig, dass die öffentliche Hand die Aufgabe übernahm und Verbundunternehmen mit flächendeckenden Versorgungsnetzen gründete. Die Kraftwerke wurden immer grösser, weil mit wachsender Leistung die Kosten unter-

Adresse des Autors  
Dr. Norbert Aschenbrenner  
Siemens AG  
Postfach  
80312 München

**Vergleich von Kohlendioxid-Emissionen**



Vergleich von Kohlendioxid-Emissionen.

Menschen mit Elektrizität versorgt werden. Die Investitionen sollten sich aber in verträglichem Rahmen bewegen. Und: «Die Risiken müssen beherrschbar und akzeptiert sein.»

**Energiebedarf wächst weiter**

In ihrem Weltenergieausblick schreibt die Internationale Energieagentur (IEA), dass der Primärenergiebedarf bis 2020 pro Jahr um 2% wachsen wird. Auch der Handel mit Energie wird zunehmen. Hingegen spielen alternative Energien weiter eine untergeordnete Rolle. Der Anteil von Sonne, Wind oder Biomasse an der Primärenergie, der heute weltweit zwei Prozent beträgt, wird bis 2020 auf knapp 3% ansteigen. Fossile Energieträger machen 90% aus, 7% die Kernenergie. «Wir sind derzeit auf dem Höhepunkt der fossilen Ära, und das wird auch noch 20 bis 30 Jahre so bleiben», bilanziert Hamacher.

Mit 3% Wachstum pro Jahr wird der Verbrauch an Erdgas überproportional

zunehmen, schreibt die IEA, eine Behörde der Organisation für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD). Dagegen wird die Energieintensität, also der Energieverbrauch in Relation zur Produktivität, in den OECD-Ländern wie schon seit 1970 jährlich um 1,1% sinken. Darin spiegelt sich die bessere Nutzung der Energieträger.

Dennoch, der Anstieg der Energieproduktion führt nicht zwangsläufig zur Dezentralisierung. Aber die Liberalisierung, die im Gegensatz zu Europa in den USA noch am Anfang steht, erhöht den Wettbewerb um Wirtschaftlichkeit und damit Energieeffizienz. Moderne Gas- und Dampfturbinenkraftwerke erfüllen diese Anforderung; sie sind kostengünstig zu bauen und erreichen knapp 60% Wirkungsgrad, also das Verhältnis der Nutzenergie zur eingesetzten Energiemenge. Die Energieausbeute kann weiter gesteigert werden, wenn die Abwärme direkt in Gebäuden oder Industrieprozessen genutzt wird. Der Gesamtwirkungsgrad (elektrisch und thermisch) kann auf 80%

steigen. Deutschland fördert die so genannte Kraft-Wärme-Kopplung bis 2010 mit 4,5 Mrd. Euro.

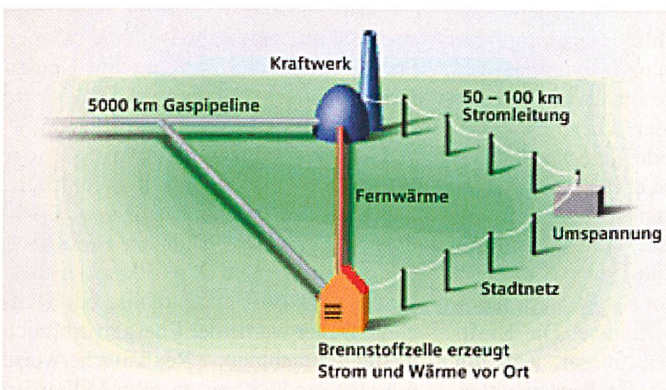
**Wettbewerb zwischen Strom- und Gasnetz**

Der Transport von Wärme über grosse Entfernungen ist aber physikalisch ungünstig und damit teuer. Schon heute verfügen viele Häuser und Siedlungen über einen Anschluss ans Gasnetz. Statt den Strom in einem Grosskraftwerk zu erzeugen und ihn über mehrere hundert Kilometer zu transportieren, kann es wirtschaftlich günstiger sein, ihn dezentral zu erzeugen und zusätzlich die verbrauchsnah anfallende Wärme zu nutzen (Grafik). Dies ist besonders für den europäischen Markt ein bedeutender Treiber für dezentrale Anlagen. Im amerikanischen Markt dürfte der Drang nach einer zuverlässigeren Stromversorgung ein Hebel sein: Die elektrischen Freileitungen sind anfällig; die dezentrale Stromproduktion aus dem unterirdischen Gasnetz ist sicherer. Dies bedeutet auch einen Wettbewerb zwischen dem Strom- und dem Gasnetz. Erdgas hat zudem den Vorteil, dass es speicherbar ist und dadurch Verbrauchsspitzen besser abpuffern kann. Ein weiterer, ökologischer Vorteil der mit Gas befeuerten Kraftwerke: Der Brennstoff stösst pro erzeugter Kilowattstunde nur 350 g CO<sub>2</sub> aus, weniger als halb so viel wie Öl- oder Kohlekraftwerke in die Atmosphäre blasen (siehe Grafik).

**Günstige Bilanz bei Brennstoffzellenkraftwerken**

Für die dezentrale Erzeugung sind kombinierte Gas- und Dampfturbinenkraftwerke (GUD) indes keine Lösung, da sie nicht beliebig verkleinert werden können. Dann verkehrt sich der Kostenvorteil von grossen Einheiten ins Gegenteil. Eine Gasturbine in einem Kraftwerk mit mehreren hundert Megawatt Leistung ist über 10 m lang. Die Investition pro Turbine bleibt relativ hoch, auch wenn die Turbine miniaturisiert würde. Günstiger sieht die Bilanz bei Brennstoffzellenkraftwerken aus. Die Anlagen sind bis in die Membran-Elektroden-Einheiten hinein modular aufgebaut. Damit gilt: Je kleiner die Anlage, desto geringer die Investition.

Vaillant will ab 2004 auch für Privatteile erschwingliche Brennstoffzellen anbieten. «Unsere Hausbrennstoffzelle liefert bis zu 4,6 kW elektrische und in Kombination mit einem herkömmlichen Gas-



Wettbewerb zwischen Strom- und Gasnetz.

brenner bis zu 50 kW thermische Leistung», erklärt Vaillant-Sprecher Stefan Jakubik. Der Gesamtwirkungsgrad liegt über 80%. Derzeit laufen Feldversuche in Deutschland, die später auf andere europäische Länder ausgedehnt werden sollen. Vaillant setzt auf die protonenleitende Brennstoffzelle PEM, das steht für Polymerelektrolytmembran (siehe Grafik).

Grössere Kraftwerke aus Festoxid-Brennstoffzellen (solid oxide fuel cell, SOFC) könnten mit hoher Energieausnutzung Gebäude oder ganze Gemeinden versorgen und Gesamtleistungen im Megawatt-Bereich bringen. Während die PEM-Zellen unter 100 °C mit Wasserstoff arbeiten, der aus Erdgas durch Reformierung gewonnen wird, können die bei fast 1000 °C optimal funktionierenden SOFC-Kraftwerke Erdgas direkt verwenden – durch interne Umwandlung in Wasserstoff. Wegen des Betriebs bei hohen Temperaturen wird die SOFC auch als Hochtemperatur-Brennstoffzelle bezeichnet.

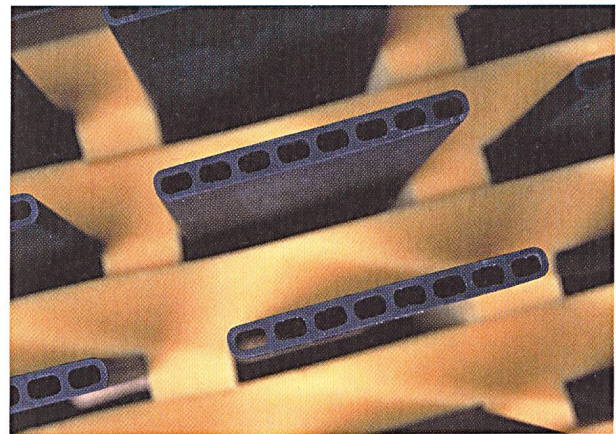
Dabei entsteht als Abfallprodukt neben Wasser auch Kohlendioxid, wegen der hohen Effizienz der Brennstoffzelle allerdings in relativ geringen Mengen. Andere Emissionen wie Stickoxide, Schwefeldioxid oder Russ fallen nicht an. Das grösste Manko aller Brennstoffzellentypen sind die noch sehr hohen Kosten. Bis zu 20 000 US-\$ kostet das Kilowatt elektrische Leistung in heutigen Demonstrationsanlagen. Konkurrenzfähig wären Investitionskosten von 1500 US-\$. An diesem Wert richten sich alle Hersteller aus – auch Siemens.

Siemens ist bei der SOFC-Technik an der Spitze: Eine 110-kW-Anlage von Siemens Power Generation läuft seit mehr als drei Jahren im Dauerbetrieb. Derzeit ist sie bei RWE in Essen am Netz, im Sommer wird sie durch ein 300-kW-Kraftwerk ersetzt. Diese arbeitet mit einer zusätzlichen Mikro-Gasturbine, die vom heissen Abgas angetrieben wird und den elektrischen Wirkungsgrad auf über 55% hebt. In Pittsburgh im US-Staat Pennsylvania baut Siemens derzeit eine Fabrik für Kraftwerke auf Basis der Festoxid-Brennstoffzelle. «Ab 2004 sollen die ersten Anlagen in Serie produziert werden», sagt Dr. Thomas Voigt, Chef der SOFC-Brennstoffzellenaktivitäten von Siemens.

### Markteintritt der Brennstoffzelle in den USA

Der Standort des Werks ist klug gewählt. Nach Ansicht von Georg Rosenbauer wird der Markteintritt der Brenn-

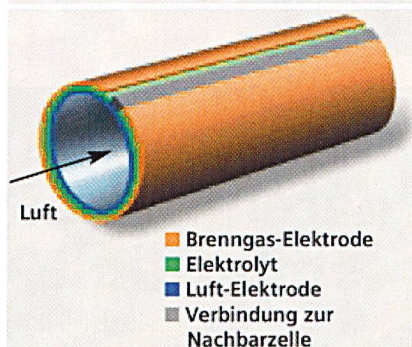
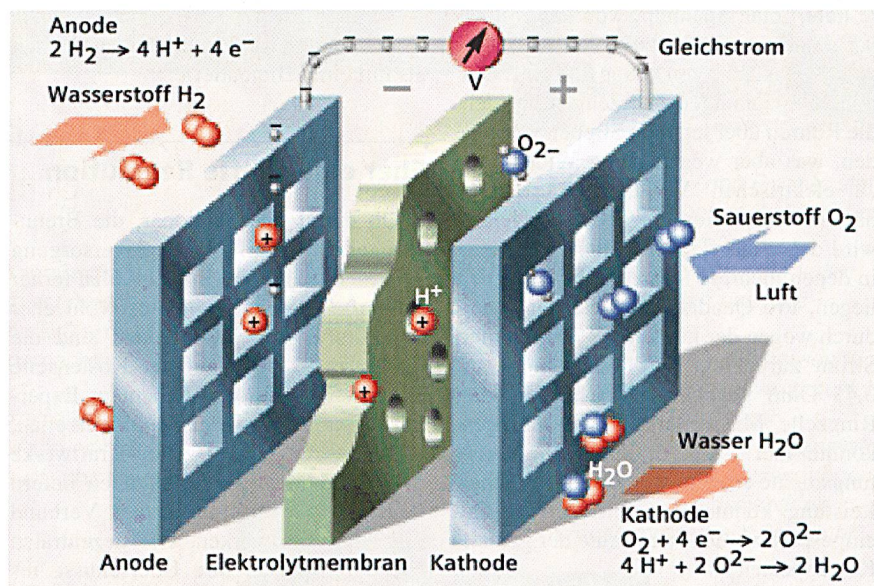
Neues Design von Festoxid-Brennstoffzellen: dreifache Leistungsdichte mit flachem Röhrenverbund



stoffzelle in den USA erfolgen. Das hat landesspezifische Gründe: Anders als in Europa gibt es in den USA keine Überkapazitäten, und das Netz ist wegen der Weitläufigkeit und der hohen Auslastung störungsanfällig. So waren im Winter 1998 nach tagelangem Eisregen mehr als drei Millionen Menschen im Nordosten der USA und Kanada zum Teil wochenlang ohne Strom. Auch ohne Naturkatastrophen sind Stromausfälle keine Seltenheit. Die von einer misslungenen Li-

beralisierung ausgelöste Stromkrise in Kalifornien hat die Lage weiter verschärft. «Bei diesem Leidensdruck werden viele bereit sein, ein paar Dollar mehr für ein Kraftwerk im eigenen Haus auszugeben», sagt Rosenbauer. Ausserdem sind US-Bürger traditionell auf Unabhängigkeit bedacht – das spricht für ein Kraftwerk im Haus oder der nahen Siedlung.

Die ersten Anlagen aus der Siemens-Serienfertigung werden zwischen 4500



Funktionsprinzip der PEM- und der Festoxid-Brennstoffzelle. In Brennstoffzellen läuft eine im Prinzip explosive Reaktion sehr sanft ab: Die Verbindung von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser – kontrol-

liert durch einen Trick: Die Wasserstoff- oder Sauerstoff-Ionen wandern langsam durch eine Membran. Die «übrig bleibenden» Elektronen fließen als Gleichstrom über einen äusseren Leiter. Die Brennstoffzelle wirkt also ähnlich wie eine Batterie. In PEM-Zellen (Polymerelektrolytmembran, oben) geben Wasserstoffatome ihre Elektronen ab, diffundieren durch eine Kunststoffolie und reagieren auf der anderen Seite mit dem Sauerstoff der Luft. In den Festoxid-Zellen (SOFC, links) wandern dagegen Sauerstoff-Ionen. Diese Zellen benötigen zum Betrieb keinen reinen Wasserstoff, sondern können auch mit Erdgas arbeiten, das sich bei der Betriebstemperatur von knapp 1000 °C in Wasserstoff und Kohlenmonoxid zerlegt. Die Temperatur ist auch notwendig, um die Keramik-Membran, ein Yttrium-dotiertes Zirkonoxid, für Sauerstoff-Ionen durchlässig zu machen.

## Brennstoffzellen

und 5000 US-\$ pro Kilowatt Leistung kosten. «Wir denken, dass es Kunden gibt, die auch höhere Preise zu zahlen bereit sind, etwa wenn sie grossen Wert auf Zuverlässigkeit legen», meint Voigt. Ab 2004 soll in Pittsburgh im Durchschnitt ein Brennstoffzellenkraftwerk pro Woche gefertigt werden. Mit wachsender Erfahrung dürften die Kosten sinken. Bis aber spätestens 2008 wettbewerbsfähige Kosten von 1500 US-\$/kW erreicht sein sollen, braucht es noch deutlichere Schritte.

### Neues Design für Brennstoffzellen senkt Materialverbrauch und Kosten

Ein Weg zur Optimierung der Stromausbeute ist ein neues Design der Brennstoffzellen, die nach dem Prinzip der von Siemens erworbenen US-Firma Westinghouse bislang als einseitig geschlossene Röhren gebaut wurde – äusserlich Besenstielen ähnlich (Grafik unten). Bei 950 °C wird in die Röhren Luft geblasen, in manchen Anlagen auch unter Druck, aussen sind sie von Erdgas umströmt. Jede Röhre liefert eine Spannung von etwas über 0,5 V und eine Stromstärke von 160 A bei einer Oberfläche von knapp 850 cm<sup>2</sup>. Um höhere Spannungen zu erzeugen, werden die Röhren über leitende Streben verbunden, was aber wegen deren Widerstand zu elektrischen Verlusten führt. Die nächste Generation der Brennstoffzellen wird daher aus flachen Platten bestehen, in denen mehrere Röhren nebeneinander liegen. Pro Quadratzentimeter sinkt dadurch wegen der kürzeren Wege, die der Strom zurücklegt, der Widerstand auf 0,45 Ohm gegenüber 1 Ohm bei der Ringzelle. Mit weiteren Verbesserungen könnte laut Voigt die dreifache Leistungsdichte erreicht werden. Bei gleicher Leistung könnte also massiv Material eingespart werden, was heute der grösste Kostenposten ist.

Siemens erforscht auch das Potenzial der PEM-Zellen (Grafik). Diese Brennstoffzellen eignen sich vor allem für den mobilen Einsatz – vom Auto bis zur Mini-Brennstoffzelle fürs Handy oder Notebook. Prototypen gibt es bereits in den Siemens-Labors; doch für den mobilen Einsatz sind Kosten, Volumen und Gewicht noch entscheidender als für die stationäre Verwendung. Eine interessante Nische sind PEM-Zellen für U-Boote. Diese Anlagen sind mit etwa acht Tonnen Gewicht die weltweit grössten PEM-Zellen. Im Jahr 2002 nahm die deutsche Bundeswehr das erste U-Boot mit einer Siemens-Brennstoffzelle in Betrieb.



Eine Siemens-Entwicklerin überprüft die neuen extrem flachen Festoxid-Brennstoffzellen.

Auch liegen mehr als zehn Bestellungen aus anderen Ländern vor. Der Vorteil von Brennstoffzellen-Antrieben: Die Boote können wesentlich länger tauchen als mit einer Bleibatterie.

### Eher eine sanfte Revolution

Ob mobil oder stationär, die Brennstoffzelle wird die Energieversorgung verändern – und das in nicht allzu ferner Zukunft. Allerdings wird es wohl eher eine sanfte Revolution, dazu sind die Herausforderungen auf der Kostenseite zu gross. Die Vision von Siemens-Experte Rosenbauer: Hausbrennstoffzellen, kleinere Brennstoffzellen-Kraftwerke und regenerative Energiequellen liefern künftig Strom im intelligenten Verbund mit Grosskraftwerken. Die dezentralen Erzeuger speisen ihre Überschüsse ins

Netz ein, was ein ausgeklügeltes Management erfordert. Viele kleine Brennstoffzellen, zu einem virtuellen Kraftwerk zusammengeschaltet, bieten für den Netzbetreiber sogar die Möglichkeit, das Netz über eine gezielte Steuerung zu stabilisieren und damit Verluste zu minimieren. Die Mini-Kraftwerke können auch von einer Zentrale aus überwacht und ihre Wartung koordiniert werden, was die Kosten für einen Betreiber senken hilft. Die Stromkonzerne haben daher ihre anfänglichen Vorbehalte gegen die dezentrale Erzeugung längst aufgegeben und spielen jetzt Vorreiter. Künftig könnten sie ihren Kunden Brennstoffzellen vermieten und die Vorteile der Technik selbst ausschöpfen. Daher ist Rosenbauer überzeugt: «Einen Umsturz wird es nicht geben, aber Brennstoffzellen werden die Energielandschaft unumkehrbar verändern».




## Révolution tranquille: décentralisation et piles à combustible

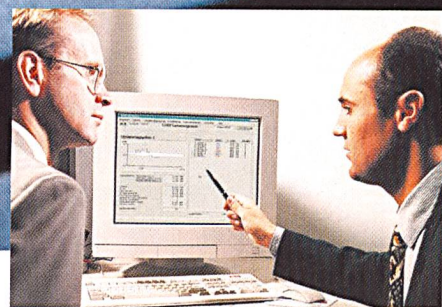
Le paysage de l'énergie se modifiera considérablement au cours des années à venir. La libéralisation des marchés et les efforts consentis pour réduire les gaz à effet de serre mènent à une décentralisation de la production d'électricité. Les piles à combustible y joueront un rôle important.

# Intelligente Rundsteuertechnik. ELSTER – auf uns können Sie zählen.



**ELSTER** 

-  Erfahrung
-  Kompetenz
-  Zuverlässigkeit



## Intelligente Rundsteuertechnik zur optimalen Lastführung

Die Rundsteuerung ist eine bewährte und kostengünstige Technik zur effizienten Tarif- und Laststeuerung von Verbrauchern. Wir haben sie vor etlichen Jahren durch die "verteilte Intelligenz" noch flexibler und wirtschaftlicher gemacht.

Unser Bereich Lastführung blickt mit seinen Spezialisten auf mehr als 40 Jahre Erfahrung zurück. Dabei wurden nicht nur leistungsfähige Produkte entwickelt, sondern auch unzählige Systeme und Anlagen weltweit installiert.

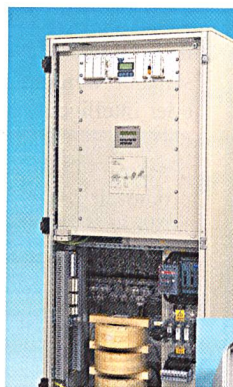
Nutzen Sie dieses Know-How. Wir sind für Sie da.

Elektronische Elektrizitätszähler

Modems zur Zählerfernauslesung

Rundsteuerempfänger

Rundsteueranlagen



- *Leitzentralen – den Prozess stets im Griff, aufbaubar als Einzel- oder Doppelrechner.*
- *Rundsteuersender – für jeden Leistungsbedarf und jede Ankopplungsart.*
- *Ankopplungen – die passende Einspeisung zum jeweiligen Netz.*
- *Rundsteuerempfänger – Standardgeräte und „Spezialisten“ für verschiedene Anwendungen, insbesondere einsetzbar als fernparametrierbare Schaltuhr.*

**Instromet AG**  
**Verkauf ELSTER Messtechnik**  
Postfach 1412 · Gerliswilstrasse 21 · 6021 Emmenbrücke  
Telefon 041 267 96 66 · Fax 041 267 96 64  
messtechnik@ch.elster.com · www.elstermesstechnik.com

A member of the Ruhrgas Industries Group

**ELSTER** 