

<b>Zeitschrift:</b>	Tec21
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
<b>Band:</b>	127 (2001)
<b>Heft:</b>	10: Kunsthaus Vaduz
<b>Artikel:</b>	Zukunftsenergie Brennstoffzelle: Energieversorgung von Gebäuden: Brennstoffzellen als Option
<b>Autor:</b>	Langer, Heinz
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-80131">https://doi.org/10.5169/seals-80131</a>

### **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**

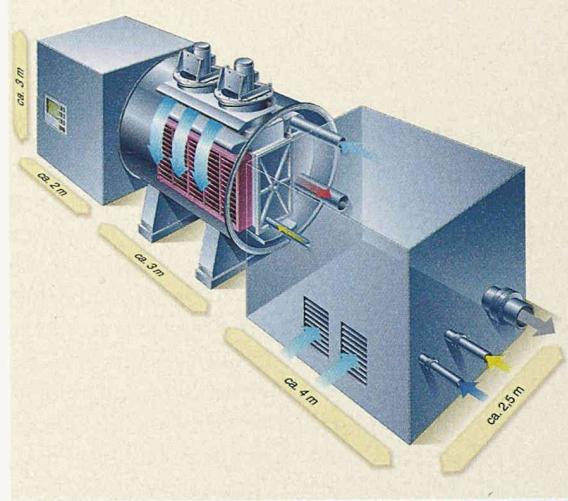
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées 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:** 21.02.2026

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



1  
Künftige Gesamtanlage des Hot Module

# Zukunftsenergie Brennstoffzelle

Energieversorgung von Gebäuden: Brennstoffzellen als Option?

**Technische Entwicklungen können sogar die Erwartung von Fachleuten überrollen: Noch auf der Fachtagung «Zukunftsenergie Brennstoffzelle» des renommierten deutschen Forschungsverbunds Sonnenenergie im Jahre 1998 sah man in ihr nur ein Technikfeld der Zukunft. Doch inzwischen bereiten verschiedene Unternehmen die Serienproduktion von Brennstoffzellen für die Energieversorgung von Gebäuden vor. Wie ist dies zu werten?**

Geniale Dinge sind einfach. Auch die Brennstoffzelle. Denn sie ist nichts weiter als die Umkehr der Elektrolyse. Wasserstoff und Sauerstoff reagieren, von einer für positiv geladene Wasserstoffprotonen durchlässigen Wand (Elektrolyt) getrennt, in kontrollierter Weise miteinander. Katalytische Oberflächen der Anode lösen Elektronen aus dem Wasserstoffmolekül. Diese Elektronen gelangen über einen Leiter auf die andere Seite der Zelle und ionisieren – wieder unter dem Einfluss katalytischer Schichten – die Sauerstoffmoleküle. Durch deren Reaktion mit den Wasserstoffprotonen entsteht reines Wasser. Energetisch nutzbare Produkte der Reaktion sind die Reaktionswärme und der im Leiter fliessende Gleichstrom.

Probleme bei der Wasserstoffbetankung und die Auswahl geeigneter, langlebiger und preiswerter Membranmaterialien führten zu recht verschiedenartigen Konzepten für die Brennstoffzelle (Bild 2). Die verschiedenen Zellentypen arbeiten mit unterschiedlichen Elektrolyten, die wiederum differente Arbeitstemperaturen, Betriebsweisen und schliesslich sogar verschiedene

ne Ausgangsprodukte als Zellen-Brennstoff erfordern. Kommerziell erhältlich war seit 1992 die Phosphorsaure Brennstoffzelle PAFC von ONSI, die bei einer Betriebstemperatur von 180 °C Wasserstoff als Energiequelle umsetzt. Mit vorgesetztem Aggregat verarbeitet sie außerdem Erdgas. Sehr erfolgreich – wenn auch unter speziellen Bedingungen – wird die Alkalische Brennstoffzelle AFC für Raumfahrtprojekte und bei U-Booten angewandt. Sie gilt wegen ihrer hohen Kosten als dem kommerziellen Bereich nicht zugänglich. Für den Bereich der Kommunal- und Wohnungswirtschaft scheinen jedoch die Polymerelektrolyt-Membranbrennstoffzelle PEM und die bei höherer Temperatur arbeitende Schmelzcarbonat-Brennstoffzelle MCFC interessant zu werden. Denn die beiden Firmen MTU Friedrichshafen und Vaillant wollen ihre Entwicklungen innerhalb der nächsten zwei bis vier Jahre als Serienprodukte auf dem europäischen Markt anbieten.

## MCFC-Module

Wer heute in Europa von Schmelzcarbonat- oder Hochtemperatur-Carbonat-Brennstoffzellen spricht, meint den Hot Module (HM) der Motoren- und Turbinen Union Friedrichshafen MTU. Was angesichts dramatisch steigender Öl- und Gaspreise modern und tagesgemäß klingt, wurde in einer europäischen Gruppierung, der deutsch-dänischen Arbeitsgemeinschaft MCFC-Entwicklung schon vor 1990 angedacht. Damals legten bedeutende europäische Energieunternehmen, zu denen u.a. die DaimlerChrysler MTU, die Ruhrgas AG und die RWE Energie AG gehören, als Mitglieder der ARGE MCFC ein Zehnjahresprogramm zur Kommerzialisierung der Carbonat-Brennstoffzelle auf.

Die bisherige Brennstoffzellen-Technik wies hauptsächlich in der komplexen Anlagenperipherie erhebliche

Mängel auf. Sie bestand aus Kompressoren, Gebläse, Rohrleitungen, mehreren Gashauben zur Lenkung der Gasströme sowie einem Pre-Reformer, der zur Spaltung höherer Kohlenwasserstoffe des Brenngases in ein wasserstoffreiches Gemisch benötigt wurde. Der als Stack bezeichnete Brennstoffzellenstapel bereitete den Entwicklungsingenieuren dagegen keine zentralen Probleme. Im HM sind die oben genannten Mängel beseitigt. Hier wurde die Kraftwerkskonstruktion radikal vereinfacht und in drei verbleibende Baublöcke überführt: dessen Kernstück mit dem Zellblock, das gewöhnlich selbst als HM bezeichnet wird, die Gasaufbereitungsanlage und einen Elektroschrank.

Das Kernstück – eine liegende Stahltonne von etwa drei Meter Länge – besitzt statt der bisher üblichen vier Gashauben nur noch eine. Der Stack mit seinen 300 gestapelten Schmelzcarbonat-Brennstoffzellen liegt auf seiner Kante auf und dichtet sich durch sein Eigengewicht selbst ab. Zwei Rohrleitungen führen das mit Wasserdampf angereicherte Brenngas und die Zuluft ins Gehäuse; ein drittes Rohr leitet die Abluft hinaus. In der Tonne zirkuliert, von zwei Ventilatoren an der Oberseite des Behälters angetrieben, bei 650 °C das Gasgemisch. Diese Arbeitstemperatur erfordert keine teuren Edelmetallkatalysatoren für die in den Zellen ablaufenden elektrochemischen Reaktionen, weil für den Aufbau des Zellstapels und den Behälter noch herkömmliche Metallwerkstoffe verwendbar sind.

In der Vergangenheit begrenzte die heisse, hochkorrosive Elektrolyt-Salzschmelze im Zellinneren erheblich die Lebensdauer der Brennstoffzellen. Heute ist dies nach Firmenaussagen kein Thema mehr. Werkstoff- und Korrosionsexperten aus der Daimler-Forschung und anderen Institutionen schraubten die Lebensdauer der Brennstoffzellen inzwischen auf 20 000 Betriebsstunden hinauf. Für die Serienreife liegt das Ziel bei 40 000 Stunden. Nach dem vorliegenden Zeitplan soll die Serienfertigung bis 2004 aufgebaut sein.

So einfach wie der HM ist auch der Zellblock aufgebaut. Jede der etwa 1kW leistenden Zellen ist mit einem Sandwich vergleichbar. Die beiden Elektroden (Anode und Kathode) umschließen eine Trägerfolie, die mit

Lithium-Kalium-Karbonat als Elektrolyt gefüllt ist. Wasserstoff und Luft überstreichen drucklos mit niedriger Strömungsgeschwindigkeit die Elektroden. Die Elektronen werden von den Karbonat-Ionen ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) zusammen mit einem Sauerstoff-Atom an der Anode abgegeben. Letzteres vereinigt sich mit dem Wasserstoff zu Wasser, während das verbleibende  $\text{CO}_2$  zur Kathode zurückgeführt wird, wo es mit dem Sauerstoff der vorbeiströmenden Luft erneut ein Karbonat-Ion bildet. Der für den Anlagenbetrieb erforderliche Wasserstoff wird vom Brenngas an einem internen Katalysator abgespalten. Die entsprechend als interne Reformierung bezeichnete Reaktion verbraucht Abwärme aus der Brennstoffzelle und trägt dadurch zur Kühlung der Zellen bei. Die vorgeschaltete Gasaufbereitungsanlage entschwefelt und befeuchtet das Brenngas, für das neben Erdgas auch Rest- beziehungsweise Biogas geeignet ist. Selbst flüssige Brennstoffe wie leichtes Heizöl könnten genutzt werden, wenn eine geeignete Aufbereitung zwischengeschaltet ist. Der Elektroschrank steuert die Anlage und wandelt den Gleichstrom aus den Brennstoffzellen in Wechselstrom um.

### Brennstoffzellen-Heizgeräte und virtuelle Kraftwerke

Gemeinsam mit dem amerikanischen Partner Plug Power entwickelt der Gerätehersteller für Wohnwärme und Warmwasser, Vaillant, ein Brennstoffzellen-Heizgerät (BZH), das auf dem europäischen Markt serienmäßig für die individuelle HauswärmeverSORGUNG angeboten werden soll. Die Liste der an Plug Power beteiligten, überwiegend global agierenden Firmen unterstreicht den Wert, den man in den USA der Brennstoffzellenentwicklung beimisst.

Das BZH verwendet die bei 90 °C arbeitende PEM für den Zellenstapel (Stack). Das Heizgerät wird mit Wasserstoff versorgt, den ein für die Gasreinigung und Reformierung zuständiger Fuel Processor aus Erdgas bereitstellt. Vor dem Eintritt in den Reformer müssen auch hier schwefelhaltige Bestandteile des Erdgases abgeschieden werden, damit die Katalysatoren im Fuel Processor und im Cell Stack keinen Schaden erleiden.

Bezeichnung	Kurzform	Elektrolyt	Betriebs-temperatur [°C]	Betriebsweise	Brennstoff	Einsatzgebiet
Alkalische BZ	AFC	Kalilauge	80		Wasserstoff	Raumfahrt
Polymerelektrolyt Membran-BZ	PEMFC	Festpolymer	70 – 80	< 250 kW diskontinuierlich 10 – 120 % $P_N$	Wasserstoff Methanol	Kleinkraftwerke Fahrzeugantrieb
Phosphorsaure BZ	PAFC	Phosphorsäure	180	50 – 600 kW Dauerbetrieb 50 – 100 % $P_N$	Wasserstoff Erdgas	Heizkraftwerke
Schmelzcarbonat-BZ	MCFC	Lithium- und Kaliumcarbonat	650	200 – 500 kW Dauerbetrieb 100 % $P_N$	Erdgas Kohlegas Biogas	Kraftwerke Heizkraftwerke
Festoxid-BZ	SOFC	Keramik (Zirkonoxid)	900	2 – 100 kW Dauerbetrieb 100 % $P_N$	Erdgas Kohlegas Biogas	Kraftwerke Heizkraftwerke
Direkt-Methanol-BZ	DMFC	Zellverbund-strukturen	70 – 80		Methanol	Fahrzeugantriebe Kleinanwendungen

Entwicklungsprobleme bereiten vor allem der Prozessor und die Systemgestaltung. Weitere Fragen betreffen die kostengünstige Fertigung und die Lebensdauer unter Praxisbedingungen.

Bisher werden alle wesentlichen Fragen theoretisch an Digitalmodellen abgeklärt und zu einem möglichst späten Zeitpunkt in die Hardware umgesetzt. Verschleiss, Korrosion und Wirkungsgraddegression potenzieller Komponenten werden parallel dazu in isolierten Tests geprüft. Das als Europa-BZH bezeichnete Brennstoffzellen-Heizgerät ist auf Abwärmenutzung und hohen Wirkungsgrad ausgerichtet. Dabei ist die Abwärmeauskopplung mit hydraulischer Ankopplung an alle heute üblichen Systeme als integrierter Bestandteil konzipiert.

Neben der individuellen Hauswärmeversorgung ist gemeinsam mit einem grossen deutschen Energieversorgungsunternehmen die Vernetzung der Europa-BZH zu virtuellen Kraftwerken angedacht. Die dezentral angeordneten Geräte werden in diesem Fall zentral nach regionalen Erfordernissen gesteuert. Auf diese Weise können die Leitungsverluste verringert und die Kraftwerksleistung besser an die jeweiligen Bedürfnisse angepasst werden.

### Systemkosten im Vergleich

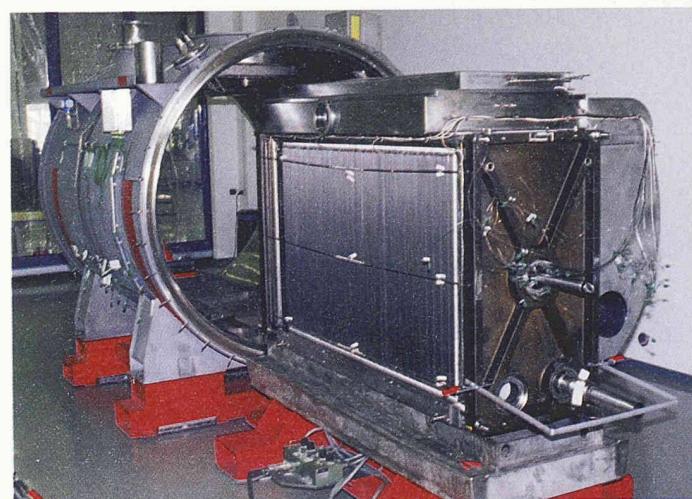
Die im HM von MTU eingebrochenen Erneuerungen bringen gerade in der Kostenfrage einen entscheidenden Fortschritt. Eine grosse Zahl von einfach aufgebauten Einzelzellen aus gleichartigen Wiederholungsteilen, die durch Zuganker zusammengehalten werden und im HM einfach zu montieren sind, ergeben eine im Betrieb sehr robust arbeitende Einheit. Kostete bisher ein Kilowatt installierter Leistung aus der Brennstoffzelle etwa 15 000–20 000 DM und damit ein Mehrfaches dessen, was bei einem herkömmlichen Blockheizkraftwerk mit Gasmotor anfällt, so kann nach Einführung der Serienfertigung mit einem Preis von etwa 2300 DM pro Kilowatt installierter Leistung gerechnet werden. Entscheidend für diese Entwicklung war die Erkenntnis, dass zwei Drittel der Kosten auf die bisherige, komplizierte Anlagenperipherie entfallen. Mit der vereinfachten Peripherie werden deren Zielkosten bereits bei einem Produktionsvolumen von ungefähr 10 MW pro Jahr erreicht. Die Zielkosten für die Zellkomponenten können dagegen erst bei einem Produktionsvolumen von 40–50 MW/a erreicht werden. Deshalb konzentriert die ARGE MCFC ihre Anstrengungen gegenwärtig auf die rasche Senkung der Zellkosten durch weitere technologische Massnahmen.

Um eine preiswerte Massenproduktion zu erreichen, setzte Vaillant mit der PEM auf das Brennstoffzellenprinzip, das auch in der Automobilindustrie in riesigen Stückzahlen verwendet werden soll. Trotzdem ist den Produzenten klar, dass die wettbewerbsfähige Wirtschaftlichkeitsgrenze für dieses Produkt von 3000 DM/kW<sub>el</sub> eine kumulierte Produktionsmenge von ungefähr 100 000 Einheiten voraussetzt. Aus diesem Grunde wird die ab 2002 geplante Serienproduktion zunächst über dem vom Markt als wirtschaftlich akzeptierten Preisniveau erzeugt.



3

Eine seit Mitte 1999 mit Erdgas betriebene Hot-Module-Pilotanlage in Bielefeld liefert wertvolle Erfahrungen für die geplante Serienfertigung



4

Das Hot Module wird montiert

### Zum Nachschlagen

Die Brennstoffzelle ist die Umkehrung der Hydrolyse. Sie liefert durch die katalytische Vereinigung von Wasserstoff und Sauerstoff auf direktem Wege elektrischen Strom. Der Wirkungsgrad für diesen Vorgang kann theoretisch bis zu 70% betragen. Aus dem Rest der eingesetzten Energie entsteht Wärme, die in verschiedener Weise genutzt werden kann. Jede einzelne Zelle liefert eine Gleichspannung von etwa 1 Volt. Für höhere Spannungen und Leistungen schaltet man Brennstoffzellen-Stapel, sog. Stacks zusammen. Die aus Anode, Kathode und Elektrolyt bestehenden Brennstoffzellen werden nach dem Material des Elektrolyten und ihrer Betriebstemperatur unterschieden. Brennstoffzellentypen (PN: optimaler Arbeitspunkt auf der Kennlinie). Bild 2 und Literatur.

## Die Systemvorteile für die Gebäudeversorgung

Der modulare Aufbau des MTU-Brennstoffzellen-Kraftwerks ermöglicht es dem Hersteller, industriell vorgefertigte 300 kW-Einheiten zu produzieren, die mit maximal 9 m Länge und 2,50 m Breite in jeden Übersee-Container oder auf die Fläche eines Tiefladers passen. Sie sind voll funktionsfähig und werden beim Anwender nur noch an die Brennstoffversorgung und die Nutzketten für Strom und Wärme angeschlossen. Neben den kurzen Montagezeiten ist die schnelle Regelbarkeit im vollautomatischen Betrieb vorteilhaft und kennzeichnend.

Mit dem kompakten HM-System lassen sich in der Energieversorgung von Gebäuden die unterschiedlichsten Aufgaben lösen, da es nach Bedarf zusammenge stellt werden kann. Das ermöglicht eine dezentrale Energieversorgung, bei der insbesondere die thermischen Leistungsverluste keine Rolle spielen. Anwendungsbeispiele sind demnächst in Krankenhäusern, in der Pharma-, Kosmetik- und Getränkeindustrie, im holzverarbeitenden Gewerbe und in der Lebensmittelverarbeitung zu erwarten. Gewerbliche Grossbauten, Rechenzentren und sensible Fertigungsbereiche werden diese Aggregate ebenfalls vorteilhaft nutzen. Heissdampf für die hocheffiziente Absorptionskühlung und zum Sterilisieren, Wasserdampf zum Pasteurisieren oder zur Klimatisierung, Dampf zum Trocknen, Härten oder Verleimen: all das gehört genau so zu diesen sinnvollen Anwendungsgebieten wie eine unterbrechungsfreie Stromversorgung.

Der effiziente Stromerzeuger ist für die Kraft-Wärme-kopplung geeignet, sicher im Betrieb, günstig im Unterhalt, flexibel bei der Wahl von Brennstoffen und ökologisch vorbildlich. Beim Bau bzw. im Produktionsverfahren werden keine umweltgefährdenden Materialien verwendet, und am Ende der Lebensdauer können die Zellblöcke problemlos recycelt werden. Achtzig Prozent des Zellmaterials sind wiederverwendbar. Die HM erzeugen einen sehr konstanten Wechselstrom. Das System kann daher vorteilhaft in Produktionsbereichen wie der elektronischen Industrie eingesetzt werden, wo hohe Ansprüche an die Qualität des Stroms zu stellen sind. Falls nur Strom benötigt wird, kann man auch die Abwärme über eine Dampfturbine als Elektroenergie nutzen. Dadurch wird ein elektrischer Wirkungsgrad von 65% erreicht. Die neuesten Gas- und Dampfkraftwerke erreichen erst im gigantischen 1000 MW-Bereich Wirkungsgrade von etwa 58%, von denen noch die erheblichen Verteilungsverluste abzuziehen sind.

Das Europa-BZH produziert in seiner ersten Ausführungsvariante eine elektrische Leistung von maximal 4,6 kW und liefert zusätzlich etwa 7 kW Wärme. Die Leistungsparameter sind zwischen 20–100% regelbar. Mit dem BZH ist ein Zusatzheizgerät verbunden, das zusätzlich bis zu 50 kW modulierbare thermische Leistung bietet.

Für eine dreiköpfige Familie geht das Vaillant-Konzept von einem durchschnittlichen Elektroenergieverbrauch von 3500 kWh pro Jahr aus. Untersuchungen ergaben, dass neben der erforderlichen Durchschnittsdauerlei-

stung von 0,4 kW mit 36-Sekunden-Spitzen bis 3 kW und einem Nachtverbrauch von 0,1 kW zu rechnen ist. In Mehrfamilienhäusern gleichen sich die Spitzenwerte deutlich aus. Sie betragen bei einem 10-Familienhaus nur noch 10 kW. Außerdem ist mit einem Nachtverbrauch von nur 0,4 kW zu rechnen. Vaillant empfiehlt einen wärmegeführten Betrieb des Brennstoffzellen-Heizgeräts, der bei vernünftiger Anpassung der elektrischen und thermischen Leistungsparameter an die Bedarfssituation wirtschaftlicher als ein stromgeführter Betrieb sei. Betreibt man dagegen in Strombedarfsspitzenzeiten das BZH mit Vollast, so kann der Privatbetreiber wertvollen Spitzenstrom ins Netz liefern. Er benötigt dann aber für den ökonomischen Betrieb einen Wärmespeicher, um die überschüssige Wärme aufzufangen.

## Schlussbemerkungen

Brennstoffzellen haben für die Energieversorgung von Gebäuden viele Vorteile, die sie in naher Zukunft zum Konkurrenten der konventionellen Kraftwerkstechnologie und vorübergehend auch zu der Energieerzeugung aus den verschiedenen erneuerbaren Energien werden lassen. Zu diesen Vorteilen gehört der hohe Gesamtwirkungsgrad von mehr als 95% bei praktisch emissionsfreiem sowie vibrations- und geräuschlosem Betrieb ohne bewegte Teile. Wesentlich ist die kontinuierliche Energiewandlung, die mit den unerschöpflichen, erneuerbaren Energien nur über Verbundsysteme erreicht wird.

Die Begrenztheit der Brennstoffzelle beruht auf den Problemen der Wasserstoffbereitstellung, die aus Machbarkeitsgründen für Jahrzehnte auf die endlichen Energiequellen Erdgas, Erdöl oder andere Kohlenwasserstoffe zurückgreifen muss. Gegenüber der konventionellen Kraftwerkstechnik benötigt die Brennstoffzelle allerdings deutlich weniger Primärenergie. Obwohl in beiden Fällen bis zur Serienfertigung noch ein wenig Zeit ist, sollte man sich gerade in dezentral strukturierten Regionen rechtzeitig mit der Brennstoffzelle auseinandersetzen. Dabei dürften die HM von MTU nach Ansicht des Autors insbesondere im gewerblichen Bereich Vorteile haben, während die Brennstoffzellen-Heizgeräte der Fa. Vaillant mehr auf die Versorgung von Wohngebieten zielen.

---

Heinz Langer, Dr., Platnerstrasse 9A,  
D-041155 Leipzig

## Literatur

- 1 StromBasiswissen Nr. 131. Informationszentrale der Elektrizitätswirtschaft e. V. Frankfurt
- 2 Ludwig Jörissen, Jürgen Garche et al.: Brennstoffzellen in der Kraft Wärme-Kopplung – eine Energieoption für die Zukunft? Forschungsverbund Sonnenenergie, Themen 98/99, S. 86–93

## Bilder

MTU Friedrichshafen