

# Effizienzsteigerung mit Brennstoffzellen

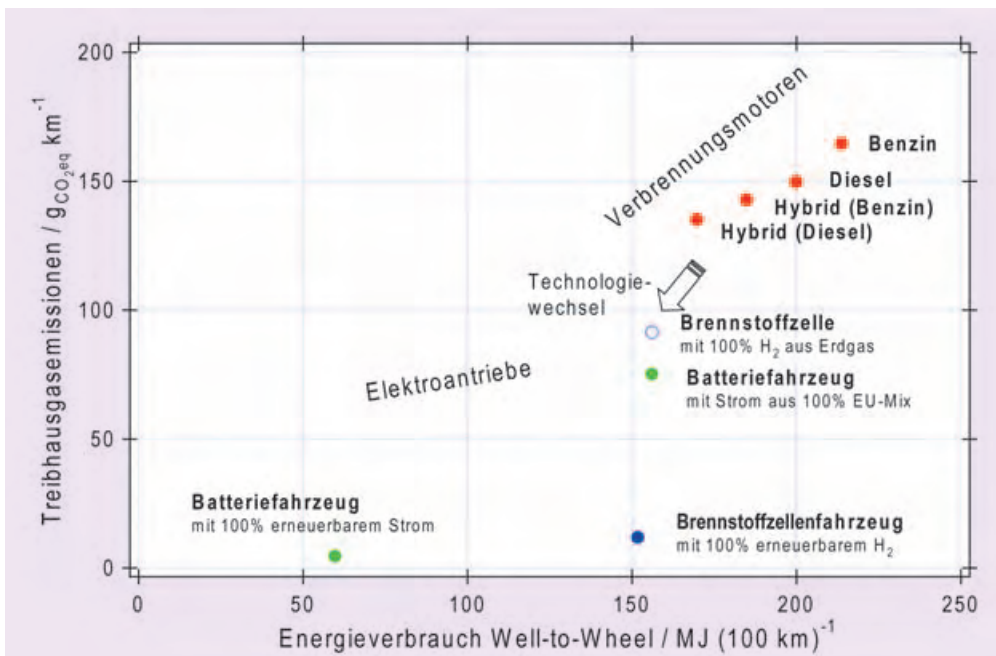
## Elektrochemische Energiewandlung und -speicherung



Seit einigen Jahren spüren wir alle verstärkt, dass die Ressource Energie knapper wird und die Auswirkungen des menschlichen Energieverbrauchs immer stärkeren Einfluss auf unser Leben haben. Die Veränderung des Klimas, aber auch das Verschwinden der natürlichen und unbelasteten Areale, zwingen die stark wachsende menschliche Gemeinschaft, nach neuen Energiewandlungslösungen zu suchen. Da unsere technisierte Welt auf die Verfügbarkeit von Energie angewiesen ist, wird die Suche nach energieeffizienteren Technologien und die Entwicklung neuer, von fossilen Energieträgern unabhängiger, Technologien immer dringender. Schon der berühmte Chemiker Wilhelm Ostwald hatte um 1900 die Vision („kein Rauch, kein Ruß“), die umweltschädlichen Verbrennungsprozesse durch die direkte elektrochemische Energiewandlung mittels Brennstoffzellen zu ersetzen.

Die technologische Umsetzung gelang damals nicht, weil die geeignete Material- und Werkstoffbasis nicht vorhanden war. Während Batterien schon lange in den Massenmärkten präsent sind, nähern sich Brennstoffzellen erst in der heutigen Zeit der breiten Markteinführung. Die hohen Kosten, die sich teilweise auf die teuren Materialien zurückführen lassen, sind

noch ein Hindernis für eine umweltfreundlichere Energiewandlung mittels Brennstoffzellen. Es ist daher entscheidend für den Erfolg dieser Technologie, dass innovative Zellenkonzepte und optimierte Prozesse für hohe Leistungsfähigkeit der Brennstoffzellen gefunden werden, um damit den Materialeinsatz zu reduzieren.



Vergleichende Gesamtenergiebilanz für PKWs – Well-to-Wheel-Analyse auf Basis von Eucar / Concawe „Well-to-Wheels Report 2004“

01

## 1. Elektrischer Antrieb

Laut IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) ist der Verkehr für etwa zwölf Prozent der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich, die von über 900 Millionen Fahrzeugen auf den Straßen der Welt stammen. Experten gehen davon aus, dass sich diese Zahl in weniger als 30 Jahren verdoppeln wird. Für die weltweite Entwicklung spielt das Automobil – ob Pkw oder Nutzfahrzeug – eine enorm wichtige Rolle. Es gibt mittlerweile einen breiten Konsens, dass der Antriebsstrang für Automobile in der Zukunft elektrisch sein wird. Batteriefahrzeuge wären bezüglich des Energieverbrauchs grundsätzlich die effizienteste Lösung. Jedoch zeigen Be-

wertungen der Technologie und des Infrastrukturaufwands für Strom und Wasserstoff aus der Automobilindustrie (z. B. von Daimler), dass Wasserstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen bereits mittelfristig, sicherlich aber langfristig, exzellente Perspektiven hat. Der Kostenaufwand für den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur wird ähnlich wie der für den Aufbau einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur gesehen. Diese Bewertung berücksichtigt dabei technische Parameter (wie z. B. Energiedichten und Wirkungsgrade), Umweltaspekte, Infrastrukturaspekte (Stromnetz und Wasserstoffinfrastruktur) sowie die Anforderungen der Kunden an die Fahrleistungen der Fahrzeuge. (01) zeigt eine Bewertung von Well-to-Wheel-Studien

## SUMMARY

Electrochemical energy conversion and storage are key technologies for an environmentally friendly energy supply and for securing a future individual mobility. However, to realize this potential an extension of renewable energies is of paramount importance. The development and research activities for future technology improvements are described shortly. Hybrid power plants combining high-temperature fuel cells with gas turbines promise very high electrical efficiency for distributed energy supply and cogeneration of power and heat. The development of a control strategy and the qualification of SOFC at elevated pressures is a prerequisite for the operation of the plant being researched at DLR and the University of Stuttgart. In addition, compact cell concepts based on cassette arrangement are being developed. The reliable and durable operation of fuel cells requires diagnostic methods which are a further priority topic. Segmented bipolar plates have been developed to provide a detailed view into the distribution of current densities and temperatures. The civil aircraft application requires a multifunctional approach where all by-products of fuel cells are used, namely the electrical energy, the reaction water generated for cabin use and the exhaust gases for inerting purposes of the jet fuel tank. First demonstrators have been developed and are being tested. One important testing platform realized in 2009 is the motor glider Antares DLR-H2, the first piloted aircraft capable of starting with only fuel cell power. The research also comprises the characterization of elementary processes like the conductivity of fuel cell membranes on the nanometer scale. Different membranes have been successfully investigated and their understanding is being used for improvements.

von drei europäischen Forschungsinstitutionen Conca (Forschungsinstitut der Ölindustrie), EUCAR (European Council for Automotive R & D) und JRC (Joint Research Center der EU). Die Elektrofahrzeuge auf Basis von Batterie oder Brennstoffzellen besitzen schon das Potenzial einer deutlichen Primärenergieeinsparung selbst wenn der Wasserstoff aus fossilen Quellen oder der Strom aus dem jetzigen EU-Strommix stammt. Das volle Potenzial für Umweltverträglichkeit kann allerdings erst mit der Gewinnung von Wasserstoff oder Strom aus erneuerbaren Quellen (z. B. Wind oder Sonnenenergie) ausgeschöpft werden.

**SOFC** (750 bis 950 °C, Kohlenwasserstoffe/Luft)

- stromerzeugende Heizgeräte
- Kleinkraftwerke
- dezentrale Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung (auch Prozesswärmeerzeugung)
- Bordstromversorgung in Personen-Kraftwagen und Last-Kraftwagen
- Kombi-Kraftwerke mit Brennstoffzelle und Gas- bzw. Dampfturbine (Hybridkraftwerk)

für die **PEFC**

- Batteriesubstitute z. B. für Kommunikationsgeräte
- tragbare Stromerzeuger
- Hausenergieversorgung

### Prinzip Brennstoffzelle

Brennstoffzellensysteme erzeugen elektrische Energie und Nutzwärme unmittelbar aus Brenngasen, während Batterien die elektrische Energie aus ihren Aktivmassen beziehen. Brennstoffzellen können je nach Typ mit Wasserstoff (H<sub>2</sub>) oder Synthesegas aus Kohlenwasserstoffen unter Bildung von Wasser, CO<sub>2</sub> und der Erzeugung von Gleichstrom und Wärme betrieben werden. Wasserstoffreiches Synthesegas kann in so genannten „Fuel-Prozessoren“ (Reformer, partielle Oxidation oder Kombinationen und Gasreinigung) aus heute gebräuchlichen Energieträgern wie z. B. Erdgas/Erdöl, oder aus regenerativen Energieträgern wie z. B. Biomasse erzeugt werden, und schließlich kann reiner Wasserstoff (H<sub>2</sub>), der auch solar erzeugt werden kann, eingesetzt werden.

Wasserstoff oder Synthesegas wird in der eigentlichen Brennstoffzelle jeweils an porösen Gasdiffusionselektroden, die voneinander durch einen Elektrolyten getrennt sind, umgesetzt. Entsprechend der Art des Elektrolyten unterscheidet man alkalische (AFC = Alca-

line Fuel Cell), Polymerelektrolyt (PEFC), phosphorsaure (PAFC = Phosphoric Acid Fuel Cell), Karbonatschmelze (MCFC = Molten Carbonate Fuel Cell) und oxidkeramische Brennstoffzellen (SOFC = Solid Oxide Fuel Cell). Als weitere Variante kommt die Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (DMFC) hinzu, bei der eine wässrige Methanollösung in einer PEFC-ähnlichen Zelle umgesetzt wird.

Die wichtigsten Vorteile der Brennstoffzellentechnik sind:

- Hohe Wirkungsgrade der Elektrizitätserzeugung, die vor allem bei relativ kleinen Anlagen mit Leistungen von wenigen Kilowatt bis mehreren Megawatt diejenigen der konventionellen Energiewandlungstechniken übersteigen können
- Auch bei Teillast hoher Wirkungsgrad
- Geringe Emissionen von NO<sub>x</sub>, CO und CH<sub>4</sub>
- Sauberes Abgas/Abwasser
- Geräuscharm und Vibrationsfreiheit
- Schnelle Dynamik der elektrischen Ausgangsleistung

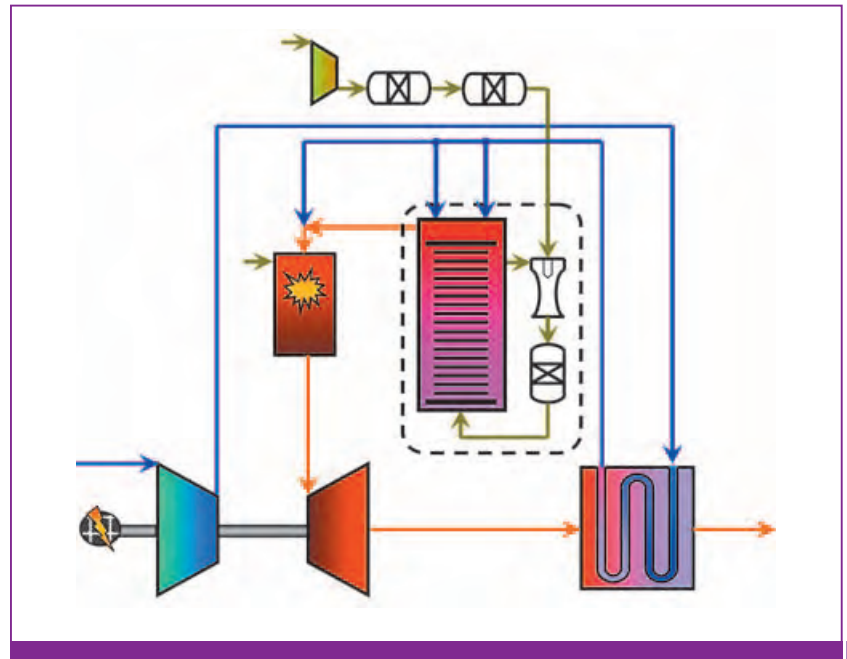
Das DLR entwickelt zwei Brennstoffzellentechnologien: die oxidkeramische Brennstoffzelle in planarer Konfiguration bei 800 °C und die Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle für Temperaturen bis max. 130 °C. Die Anwendungsbereiche dieser Technologien können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- dezentrale Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung
- Bordenergieversorgung von Flugzeugen
- Antrieb von Bussen
- Antrieb von Personen-Kraftwagen
- Unterseeboote, bemannte Raumfahrt

## 2. Hybridkraftwerke

Eine zukunftsweisende und zudem finanzierbare Stromerzeugung unter den aktuellen Rahmenbedingungen erfordert die Entwicklung von hocheffizienten Energietechnologien und Anlagenkonzepten, mit denen der elektrische Wirkungsgrad von fossil befeuerten Kraftwerken erhöht und der Schadstoffausstoß zugleich minimiert werden kann. Ein mögliches Anlagenkonzept, welches diese Forderung erfüllt, ist das Hybridkraftwerk. Hierbei wird eine Gasturbine mit einer Hochtemperaturbrennstoffzelle (SOFC) gekoppelt, was langfristig den höchsten erreichbaren elektrischen Wirkungsgrad bei der Stromproduktion verspricht. Zur Umsetzung eines solchen Kraftwerkes kooperieren die DLR-Institute für Verbrennungstechnik und Technische Thermodynamik sowie das Institut für Luftfahrtantriebe der Universität Stuttgart. Hybridkraftwerke auf Basis Brennstoffzellen ermöglichen ähnliche oder höhere elektrische Wirkungsgrade wie GuD-Kraftwerke (kombinierte Gas- und Dampfkraftkraftwerke) schon bei kleinen dezentralen Anlagen im Bereich von Kilowatt bis Megawatt und erlauben dabei die Nutzung der Wärme.

**(02)** zeigt folgenden Kreislauf: Der Kompressor der Gasturbine verdichtet die Luft auf ungefähr 4 bar, dabei erwärmt sich gleichzeitig die Luft. Diese erwärmte, komprimierte Luft wird dann im Rekupe­rator weiter aufgeheizt und steht dann dem Brennstoffzellensystem als Kathodenluft zur Verfügung. Auf der Brennstoffseite wird das Brenngas ebenfalls auf ca. 4 bar verdichtet. Das Hybridkraftwerk erfordert daher die Qualifizierung von SOFC bei erhöhtem Druck. Hierfür wurde 2009 der in **(03)** gezeigte Teststand in Betrieb genommen, der es ermöglicht, planare SOFC Zellen und Stapel detailliert zu untersuchen. Damit können die Einflüsse des erhöhten Drucks auf die Elektrochemie in den Elektroden genau untersucht werden. Die Analyse der Zellen während des Druckbetriebs mittels Impedanzspektroskopie ermöglicht es, auch die internen Modelle exakt zu validieren. Damit können in Zusammenhang mit den Modellen der Systemkomponenten genaue Vorhersagen für den Betrieb des SOFC Systems im Kraftwerksverbund getroffen werden. Die Gasanalyse am Ein- und Ausgang der Zellen erlaubt darüber



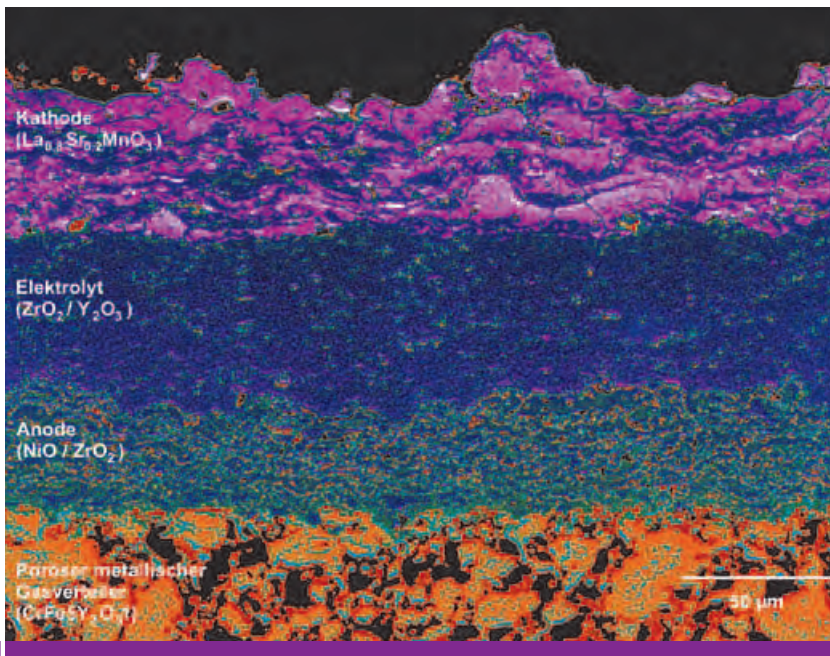
Schema der Hybrid-Kraftwerk-Konfiguration

hinaus, Aussagen über den Betriebszustand der Zellen zu treffen und liefert weitere Validierungsdaten für Zell- und Systemmodelle. Der Teststand verfügt über eine sehr exakte Druckregelung mit der die Druckdifferenzen zwischen den Reaktionsräumen sowie zwischen Zelle und Umgebung auf bis zu 10 mbar genau geregelt werden können. Mit dieser genauen Druckregelung ist es möglich, SOFC bei Drücken von bis zu 8 bar zu betreiben. Mit diesem Teststand sind auch die Rahmenbedingungen geschaffen, Stacks bei Bedingungen zu betreiben, wie sie später im Kraftwerk auch auftreten werden, wie Druckschwankungen und Lastwechsel.

Zeitgleich wird am Institut für Verbrennungstechnik das Gasturbinensubsystem detailliert untersucht. Der Fokus der Forschung liegt hier auf dem Verhalten der Gasturbine bei höheren Druckverlusten im System, die im Kraftwerk von der Brennstoffzellenseite ausgelöst werden, sowie auf dem Zusammenspiel der Brennkammer und der Turbine mit dem Abgas der Brennstoffzelle. Hierfür wurde eine Turbec Gasturbine vom Typ T100 installiert und instrumentiert und mit einem SOFC Simulator gekoppelt. Damit ist der Forschungsverbund in der Lage, alle Komponenten des Systems genau zu untersuchen und zu verstehen, wo sich Probleme im Kraftwerk ergeben können.



Neuer Prüfstand für druckaufgeladenen Betrieb von Hochtemperaturbrennstoffzellen



04

Querschnitt einer DLR metallgestützten SOFC-Zelle

### 3. Festelektrolyt-Brennstoffzelle (SOFC)

Die planare Festelektrolyt-Brennstoffzelle (SOFC) des DLR-Stuttgart sieht dünn-schichtige Elektrolyt- und Elektroden-schichten vor, die mit Hilfe des Plasmaspritzverfahrens auf porösen metallischen Trägersubstraten aufgebaut werden. Diese Tragfunktion wird durch eine poröse metallische Struktur auf der Anodenseite (die negative Elektrode) ausgeübt, die gleichzeitig für eine gleichförmige Brenngaszuführung zu sorgen hat. Die Gesamtdicke der Membran-Elektrodeneinheit (MEA) beträgt dabei lediglich circa 100–150 µm. Diese Dünnschichtbauweise ermöglicht eine Verringerung der Verluste in der Zelle, ein Absenken der Betriebstemperatur auf 650–750 °C und weist auch Vorteile bei Thermo- und Redoxzyklisierung der Zelle auf.

Auf Grund der hohen thermischen Belastungen, die sowohl bei der Zellherstellung als auch während des Zellbetriebs auftreten, werden an das metallische Träger-substrat hohe Anforderungen gestellt. Als rein metallische SOFC-Komponente muss es neben einem porösen gasdurchlässigen Gefüge für die anodenseitige Brenngasversorgung eine hohe elektrische Leitfähigkeit, eine an den Elektrolyten angepasste thermische Ausdehnung und vor allem eine adäquate chemische Stabilität in feuchten, kohlenstoffhaltigen Brenngasatmosphären aufweisen.



05

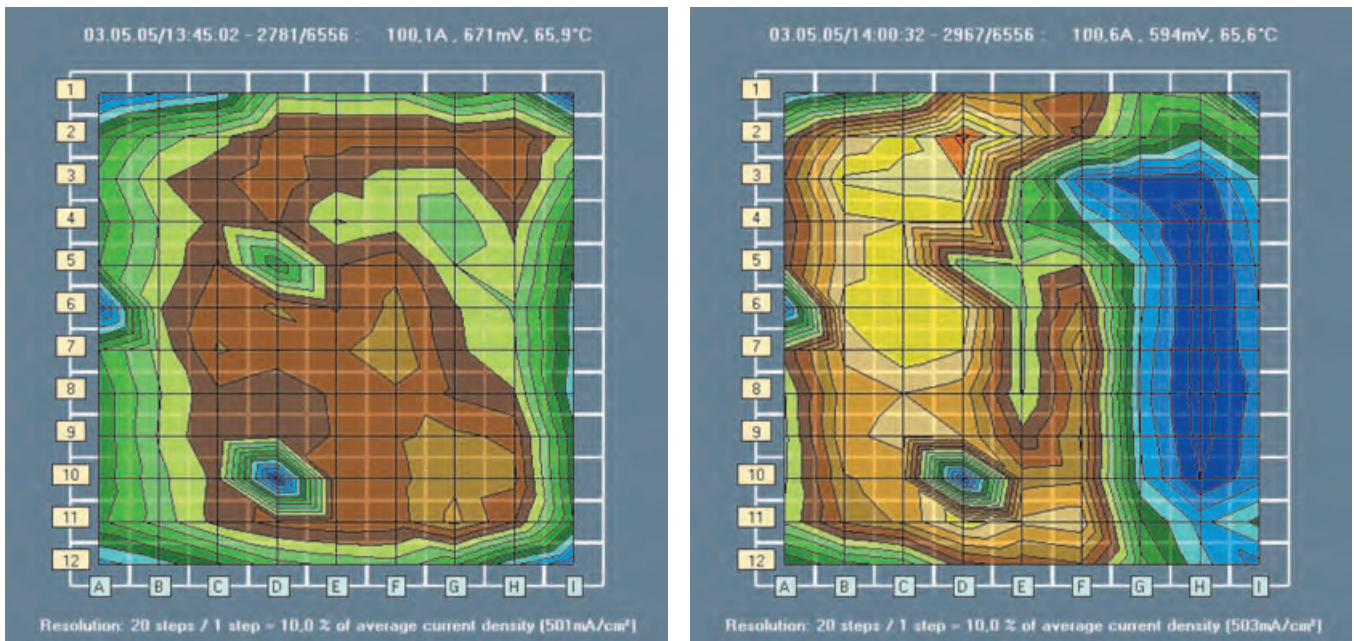
Kassetten-Design für Oxidkeramische Brennstoffzellen

Die nach dem DLR-Spritzkonzept hergestellten plasmagespritzten Zellen zeigen ein hohes Potenzial für stabilen Betrieb bei zyklischer Betriebsweise. Sowohl während der Durchführung von thermischen Zyklen (schnelle Aufheizung bzw. Abkühlung) als auch durch chemische Oxidation und anschließende Reduktion der Elektroden wird nur eine geringe Degradation beobachtet. Während des stationären Langzeitbetriebs von Zellen wird eine Degradation von etwa ein bis zwei Prozent pro 1000 Stunden festgestellt.

Die Arbeiten konzentrieren sich dabei auch auf die Integration der Zellen in den so genannten Kassettenverbund. Eine Kasette besteht aus einer Unter- und Ober-schale, in die die Zelle mittels Löt- oder Schweißprozessen integriert wird. Um die durch den mobilen Betrieb aufgezwungenen Randbedingungen, wie z. B. Einbaulage, verfügbarer Raum, geringe Aufheizzeiten, mechanische Belastbarkeit und Kostenziele darstellen zu können, bedarf es der Weiterentwicklung des Kassetten-designs. Das Ziel ist ein industrialisierbarer MSC-Stackbau mit optimierter Prozessfolge und ggf. Ersatz vorhandener Füge- und Kontaktierkonzepte.

### 4. Hochtemperatur-PEFC-Brennstoffzellen

Für die Markteinführung von Brennstoffzellenfahrzeugen und stationären Systemen ist eine Erhöhung der Betriebstemperatur der Brennstoffzelle aus System-sicht sehr vorteilhaft. Das DLR entwickelt dazu sogenannte „Hochtemperatur“-PEFC-Brennstoffzellen für einen Betriebstemperaturbereich von –30 °C bis 130 °C. Die Minimaltemperatur ist beim Kaltstart im Winter gefordert, während die Maximaltemperaturen im Sommer bei hohen Temperaturen und hohen Lasten auftreten, wie beispielsweise bei einer starken Steigung der Strasse. Die Vorteile eines erweiterten Temperaturbereiches sind dabei eine reduzierte Kühlerfläche und reduzierte Hilfsenergie-Leistung für Kühlerlüfter des Fahrzeugs, ein vereinfachtes Kaltstartmanagement und eine Vereinfachung des Systemaufbaus. Diese Aspekte können insgesamt zu einer deutlichen Reduktion der Systemkosten beitragen. Die technologischen Herausforderungen für die Erweiterung der Betriebstemperaturen liegen in der Verringerung der



06

Wasser-Kondensatempfindlichkeit und Selbststartfähigkeit bei Raumtemperatur, der Erhöhung der Dauerhaltbarkeit der Membran (des Protonenleiters). Dazu kommt die Entwicklung von Brennstoffzellensystemen, die in der Lage sind, Hochtemperatur-PEFC Brennstoffzellen im automobilen Fahrzyklus oder in der stationären Anwendung mit hohem Wirkungsgrad und ausreichender Dynamik stabil zu betreiben. Hierzu ist die Entwicklung neuartiger Systeme und Betriebsstrategien, die die erforderlichen Betriebsbedingungen für den Hochtemperatur-Brennstoffstapel erfüllen, erforderlich. Zellen konnten bereits mit Temperaturen bis 130 °C mit niedriger relativer Feuchte der Gase betrieben werden.

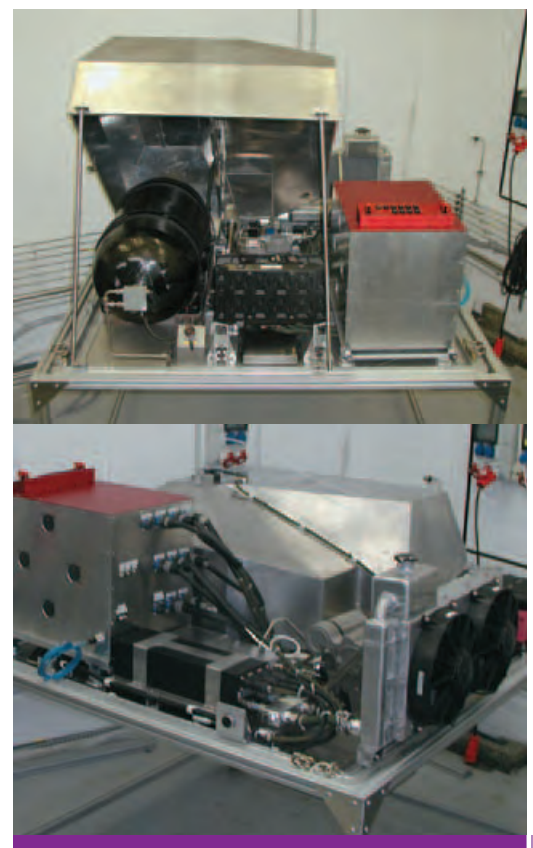
Um ein Brennstoffzellensystem optimal und zuverlässig unter extremen Temperaturen betreiben zu können ist es notwendig, dass eine geeignete Steuerung und Sensorik zur Verfügung steht. Für diese Aufgaben hat das DLR „segmentierte Messzellen“ (die Platten, die die Zellen verbinden, sind dabei in viele Segmente unterteilt und können unabhängig voneinander vermessen werden) zur Messung von lokalen Strömen entwickelt. Mit dieser Messzelle lässt sich auch lokal die Temperaturverteilung bestimmen und zusätzlich können noch andere wichtige Daten (wie der Wechselstromwiderstand der Zellen) aufgenommen werden. Aus diesen ortsaufgelösten Messungen können dann Schadensfrüherkennungen und Alterungs-

vorgänge ermittelt werden. Um die Schäden gering zu halten, ist es außerordentlich wichtig, die Schadensursache zu kennen und zu verstehen und eine vorzeitige Schädigung (Degradation) der Brennstoffzelle zu verhindern. (06) zeigt beispielhaft eine homogene, d.h. gleichmäßige, und eine ungleichmäßige Verteilung der Stromdichte über die aktive Fläche des Brennstoffzellen-Stapels. Eine gleichmäßige Verteilung ist dabei immer vorteilhaft. Das gleiche Prinzip wurde erstmalig vom DLR auch auf die oxidkeramische Hochtemperaturbrennstoffzelle angewandt und auf die lokale Bestimmung der Gaszusammensetzung erweitert.

## 5. Brennstoffzellen für die Luftfahrt

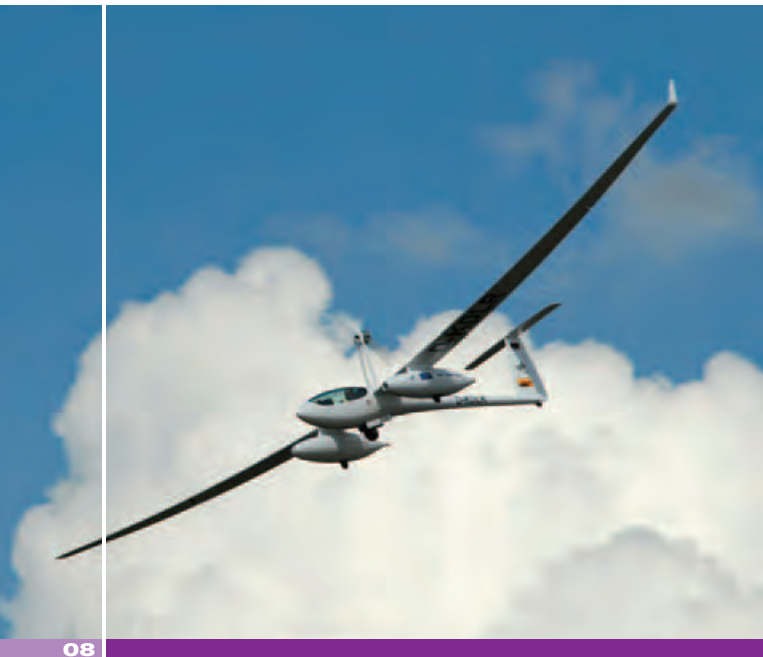
Auf dem Gebiet der Polymer-Brennstoffzelle ist das DLR führend für Systeme in der Luftfahrt. Hier dient die Brennstoffzelle als so genannte Auxiliary Power Unit, die Bordstrom zur Verfügung stellt, um die

*Stromdichteverteilung einer Polymer-Brennstoffzelle in technischer Größe (220 Quadratzentimeter) mit DLR segmentierten Sensorplatten: Links ist eine homogene Stromdichteverteilung; rechts eine inhomogene Stromdichteverteilung zu sehen.*



07

*Multifunktionales Brennstoffzellensystem für die Luftfahrt*



08

Testplattform Antares DLR-H2 im Flug

Triebwerke zu starten und die elektrische Versorgung am Boden zu gewährleisten. Dabei reicht allerdings die elektrische Energiebereitstellung aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht aus und es wird ein System benötigt und entwickelt, das alle Pro-

dukte und Vorteile der Brennstoffzelle ausnutzt. Das Produktwasser, das bei der elektrochemischen Reaktion entsteht, kann für die Kabinensysteme (z. B. Toiletten und Klimaanlage) verwendet werden und verringert die beim Start mitzunehmende Wassermenge. Auch das Kathoden-Abgas kann genutzt werden: Die Abgasluft ist sauerstoffabgereichert und damit ideal, um die Entflammbarkeit des Kerosingemisches im Tank herabzusetzen (Kerosininertisierung). Die Vermeidung einer möglichen Entflammbarkeit ist eine neue Flugsicherheitsrichtlinie. Um diese Vorteile zu nutzen, wird ein maßgeschneidertes System benötigt, an dem das DLR bereits arbeitet. Die elektrische Energie wird zusätzlich sowohl für den Betrieb der Klimaanlage wie auch für die Steuerung des Flugzeugs im Notfall bei Verlust aller

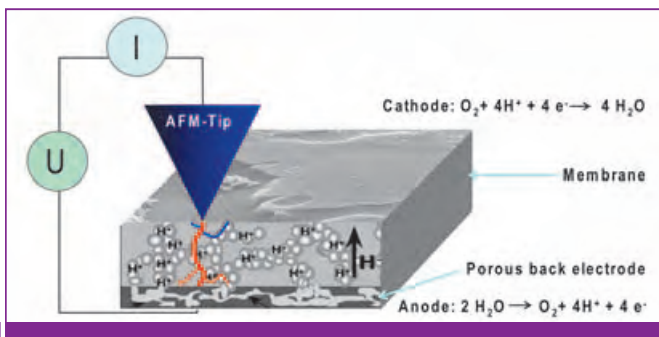
Triebwerke benötigt. Außerdem wird die Möglichkeit untersucht, einen emissionslosen Antrieb mittels Bugrad am Flughafen für den Betrieb am Boden einzusetzen. Diese Multifunktionalitätsanforderungen sind für die Luftfahrtanwendung entscheidend und rangie-

ren in ihrer Bedeutung vor der reinen Effizienz.

Als kostengünstige Test-Plattform wurde vom DLR 2009 das erste bemannte und ausschließlich mit Brennstoffzellen angetriebene Flugzeug Antares DLR-H2 entwickelt (08). Als Wasserstoff angetriebenes Flugzeug ist es völlig CO<sub>2</sub>-frei und wesentlich geräuschärmer als andere vergleichbare Flugzeuge. Die Antares DLR-H2 ist eine Kooperation des Instituts für Technische Thermodynamik mit den Projektpartnern Lange Aviation (Motorsegler), BASF Fuel Cells und Serenergy (Dänemark) und basiert auf dem kommerziellen Motorsegler Antares 20E. Um sowohl die Brennstoffzelle als auch den zum Betrieb der Brennstoffzelle notwendigen Wasserstoff an Bord zu bringen, wurden zwei zusätzliche Außenlastbehälter unter den extra verstärkten Flügeln angebracht. Da diese abnehmbaren und flexibel austauschbaren Container jeweils bis zu 100 kg zusätzliches Gewicht mit sich bringen, musste eine aeroelastische Neuauslegung der Flügel vorgenommen werden, damit die Stabilität des Flugzeugs nicht beeinträchtigt wird. Durch Optimierungsarbeiten des DLR-Instituts für Aeroelastik kann nun bei einer Geschwindigkeit von bis zu 300 km/h ein flatterfreier Flug des Antares DLR-H2 gewährleistet werden. Der gegenwärtige Antrieb erlaubt eine Höchstgeschwindigkeit von ca. 170 km/h. Vor kurzem konnte ein Höhenrekord des Antares mit einer Höhe über 2520 m über dem Boden realisiert werden.

## 6. Elementare Prozesse

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Verbesserung und Untersuchung der Komponenten auf kleinster Skala, auf der die elementaren Prozesse stattfinden. So kann die ionische Leitfähigkeit der Membran von Brennstoffzellen durch eine neu entwickelte Messmethode auf einer Länge von nur wenigen Millardstel Meter abgebildet werden. Dazu benutzt man ein sogenanntes Rasterkraftmikroskop, das mit einer leitfähigen platinbeschichteten fein zulaufenden Messspitze ausgerüstet ist. Das Messprinzip ist in (09) dargestellt: zur Messung wird eine nur einseitig mit einer Elektrode beschichtete Elektrolyt-Membran verwendet. Die Elektrode besteht aus einer Mischung von Platinkatalysatorpartikeln und die Membran liegt zur



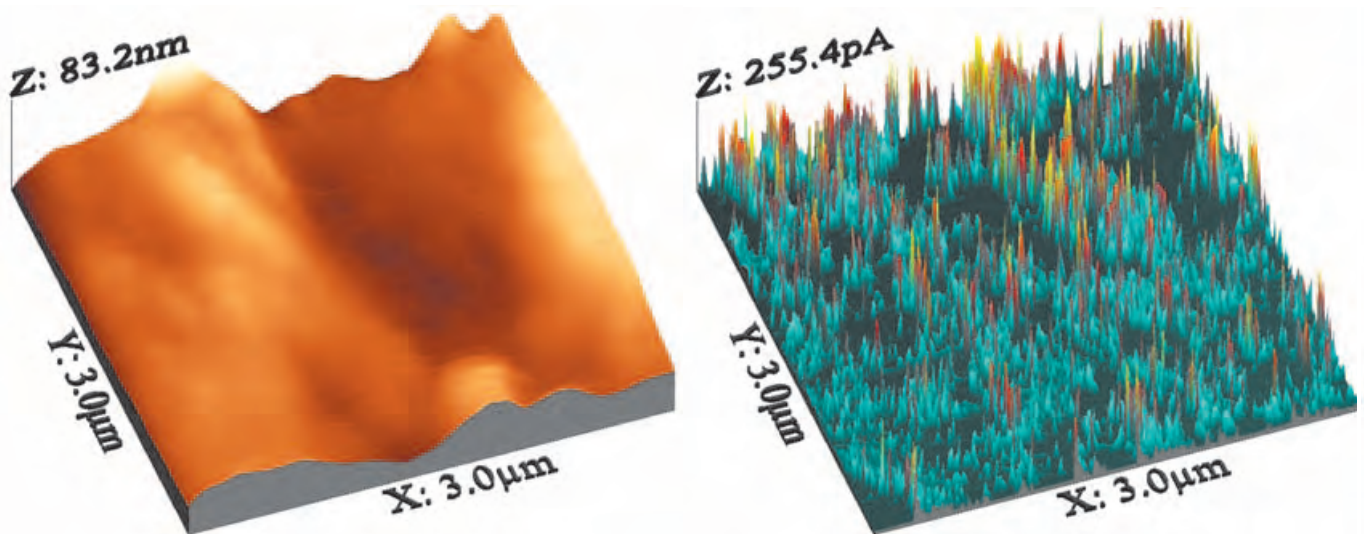
09

Prinzipbild eines Rasterkraftmikroskops zur Untersuchung der mikroskopischen Leitfähigkeit von Polymermembranen

am Boden einzusetzen. Diese Multifunktionalitätsanforderungen sind für die Luftfahrtanwendung entscheidend und rangie-

## ZUSAMMENFASSUNG

Elektrochemische Energiewandlung und -speicherung sind Schlüsseltechnologien für eine effiziente, klimaverträgliche Energiebereitstellung, insbesondere für die Sicherstellung einer zukünftigen individuellen Mobilität. Die Ausschöpfung des Effizienzpotentials ist von der breiten Anwendung Erneuerbarer Energien abhängig. Für die breite Markteinführung sind weitere Forschungs- und Entwicklungsfortschritte bei Brennstoffzellen und Batterietechnologien notwendig, die hier kurz beschrieben werden. Ein Hybridkraftwerk mittels Kopplung von Hochtemperaturbrennstoffzelle (SOFC) mit Gasturbine ermöglicht sehr hohe elektrische Wirkungsgrade von dezentralen kleinen Anlagen und erlaubt eine Wärmenutzung. Neue Regelungskonzepte und der druckaufgeladene Betrieb von SOFC werden am DLR und der Universität Stuttgart erforscht. Neue Stapel und Zellkonzepte für einen besonders kompakten Kassettenaufbau von SOFC werden erprobt. Dazu werden auch diagnostische Methoden, wie segmentierte Sensorplatten, benötigt, um den zuverlässigen Betrieb und die Dauerhaltbarkeit der Zellen zu gewährleisten. Eine besondere Anwendung von Brennstoffzellen ist die zivile Luftfahrt, die die Nutzung von mehreren Produkten der Brennstoffzelle wie der elektrischen Energie als APU-Ersatz, dem Reaktionswasser für Kabinenanwendungen sowie dem Abgas für Inertisierungszwecke verlangt. Erste Demonstratoren für diese Anwendungen wurden am DLR realisiert. Als Testplattform wurde die Antares DLR-H2 im Jahr 2009 vorgestellt, das erste bemannte und ausschließlich mit Brennstoffzellen angetriebene Flugzeug. Schließlich ist auch das Verständnis der Komponenten auf kleinster Skala, auf der die elementaren Prozesse stattfinden notwendig. Hier arbeiten das DLR, die Universität Stuttgart und die Hochschule Esslingen an der Charakterisierung von Membranen auf der Nanometer Skala, um auf dieser Basis das makroskopische Verhalten zu verstehen und zu verbessern.



Kontaktierung auf einem Platinblech auf. Auf der unbeschichteten oberen Membranseite dient die Spitze als „Nanoelektrode“ (1 Nanometer = 0,000000001 Meter). Beim Anlegen einer genügend großen Spannung fließen die Ionen durch die Polymer-Elektrolyt-Membran zur anderen Seite. Dieser Strom durch die Membran kann nur fließen, wenn eine Ionen leitende Verbindung zur anderen Membranseite existiert. Dort ist zunächst keine Elektrode vorhanden, an der die Protonen wieder reagieren können. Erst wenn die Spitze als Elektrode diesen Bereich kontaktiert, kann die Leitfähigkeit gemessen und abgebildet werden. Eine solche Reaktion kann nur dann stattfinden, wenn sich die Spitze auf einem wasserliebenden ionenleitfähigen Bereich der Oberfläche befindet. Die Abbildung zeigt rechts die ionische Leitfähigkeit und links die Topographie des gleichen Oberflächenbereichs.

Die Eigenschaften der Nafionmembran hängen von der Luftfeuchtigkeit ab. Bei 48 Prozent Luftfeuchtigkeit sieht die Stromverteilung sehr inhomogen aus, es gibt sehr große Bereiche, in denen kein Strom fließt und andere Bereiche, in denen eine Vielzahl von kleinen und auch größeren leitfähigen Flächen zu erkennen ist. Diese leitfähigen Bereiche oder Kanäle sind Stellen, an denen das Ionen (Protonen) leitfähige Netzwerk an die Membranoberfläche tritt und eine Protonenleitung durch die Membran stattfinden kann. Somit kann man mit dieser Methode auch auf kleinster Größenskala die Gleichmäßigkeit des Stromes in der Brennstoffzelle verbessern.

Viele der Arbeiten finden in Kooperationen mit Partnern aus Industrie und Forschung statt. Bei der Entwicklung der SOFC werden die Beiträge unserer Partner – Plansee SE, Sulzer Metco und ElringKlinger –

*Vergleich der simultan aufgenommenen Oberflächentopografie (linke Seite) und der Stromverteilung auf einer Nafion 112-Membran: Es ist keine Korrelation zwischen Stromverteilung und Struktur feststellbar.*



## DER AUTOR

## PROF. DR. K. ANDREAS FRIEDRICH



ist Leiter der Abteilung Elektrochemische Energietechnik im Institut für Technische Thermodynamik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) und Professor für Brennstoffzellentechnik an der Universität Stuttgart. Er hat Physik an der Wolfgang-Goethe Universität Frankfurt studiert. Seine Dissertation beinhaltete eine Arbeit zur „Nichtlinearen Optik an Elektrodenoberflächen“ an der Freien Universität Berlin unter der wissenschaftlichen Leitung des Nobelpreisträgers Prof. Gerhard Ertl. Nach einer Tätigkeit als Postdoc in den USA und Tätigkeiten am Forschungszentrum Jülich, der Technischen Universität München und dem ZSW in Ulm erhielt er den Ruf nach Stuttgart. Die Arbeitsgebiete von Prof. Friedrich sind die Entwicklung von Polymer-Brennstoffzellen und Festkeramik Brennstoffzellen. Die Ziele der Entwicklung beinhalten die Erhöhung der Leistungsdichte, Verlängerung der Standzeiten, Reduktion der Material- und Herstellungskosten, Identifikation der Degradationsmechanismen und deren Minderung und fortschrittliche, hocheffiziente Systemintegration. Die Abteilung umfasst ca. 50 Personen und ein Schwerpunkt der systemtechnischen Arbeiten ist seit einigen Jahren die zivile Luftfahrtanwendung. Für diese Arbeiten hat das DLR zusammen mit Airbus 2008 einen f-cell award erhalten. 2009 wurde ihm von der DECHEMA die Fischer-Medaille für herausragende wissenschaftliche Arbeiten verliehen.

**Kontakt**

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz-Gemeinschaft  
 Institut für Technische Thermodynamik  
 Abteilung Elektrochemische Energietechnik  
 Pfaffenwaldring 38–40  
 70569 Stuttgart  
 Tel. 0711/686-2278  
 Fax 0711/686-21278  
 E-Mail: andreas.friedrich@dlr.de  
 Internet: www.DLR.de

anerkannt, die die Entwicklung z. B. der Substrate, Zellen und Kassetten vorantreiben. Die mikroskopische Messung der Leitfähigkeit mit dem Rasterelektronenmikroskop ist eine Zusammenarbeit mit der Hochschule Esslingen (Prof. Dr. Renate Hiesgen) und der Universität Stuttgart (Dipl. Chem. Elena Aleksandrova und Prof. Dr. Emil Roduner).

- K. Andreas Friedrich

**Literatur**

- K. A. Friedrich, „Brennstoffzellen“ BWK 61 (2009) Nr. 4, S. 141–147
- P. Schumann, C. Graf, J. Kallo, K.A. Friedrich, „Architecture Analysis, Modelling and Simulation of PEM Fuel Cell Systems for Aircraft Applications“ in Proceedings of H2Expo International Conference and Trade Fair on Hydrogen and Fuel Cell Technologies 2008, Hamburg Messe und Congress, Hamburg, October. 22.–23., 2008
- F. Leucht, K. Andreas Friedrich, T. Haar, „Balance of Plant Modelling in the Hybrid Power Plant Project“ in Proceedings of H2Expo International Conference and Trade Fair on Hydrogen and Fuel Cell Technologies 2008, Hamburg Messe und Congress, Hamburg, October 22.–23, 2008
- P. Treffinger, O. Thalau, K.A. Friedrich „Entwicklungstendenzen von Brennstoffzellensystemen für die Anwendung im Automobil“ in VDI-Berichte 2036 Brennstoffzelle, VDI-Tagung Braunschweig, 27.–28.5.2008, p.85
- P. Metzger, H. Müller-Steinhagen, G. Schiller, K.A. Friedrich, „SOFC Characteristics along the Flow Path“, Solid State Ionics, 177 (2006), 2045
- M. Lang, T. Weckesser, C. Auer, P. Jentsch, A. C. Friedrich, and C. Westner, „SOFC Stacks for Mobile Applications“ ECS Transactions 25 (2) (2009) 97–104
- K. A. Friedrich, J. Kallo, J. Schirmer, G. Schmitz, „Fuel Cell Systems for Aircraft Application“ ECS Transactions 25 (1) (2009) 193–202
- R. Hiesgen, E. Aleksandrova, G. Meichsner, I. Wehl, E. Roduner and K.A. Friedrich, „High-resolution imaging of ion conductivity of Nafion® membranes with electrochemical atomic force microscopy“ Electrochimica Acta 55 (2009) 423
- E. Aleksandrova, R. Hiesgen, K.A. Friedrich and E. Roduner, „Electrochemical atomic force microscopy study of proton conductivity in a Nafion membrane“ Phys. Chem. Chem. Phys., 9 (2007), 2735.