



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

**Bundesamt für Energie BFE**  
Sektion Energieforschung

März 2010

---

# **Forschungsprogramme**

## **Wasserstoff und Brennstoffzellen**

### Synthesebericht 2009 des BFE-Programmleiters

---

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE

CH-3003 Bern

[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Autor:**

Dr. Stefan Oberholzer, Bundesamt für Energie, [stefan.oberholzer@bfe.admin.ch](mailto:stefan.oberholzer@bfe.admin.ch)

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

## Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

In einer nachhaltigen Energiewirtschaft mit einer starken Diversifikation erneuerbarer Primärenergiequellen kommt der Wahl der Energievektoren eine entscheidende Bedeutung zu. Ein intensivierter Einsatz von Elektrizität als Energieträger scheint in vielen Bereichen sinnvoll, allein schon aufgrund der Tatsache, dass etliche erneuerbare Energiequellen direkt Strom produzieren. Gleichzeitig wird dadurch die Problematik von Angebot und Nachfrage elektrischer Energie – insbesondere wenn stochastisch produziert – weiter verschärft. Kurzfristig könnte dies durch einen intelligenten Betrieb der Netze («smart grids») sowie deren Ausbau gelöst werden [1], während längerfristig ein erhöhter Bedarf an Regelleistung und Speicherkapazität besteht [2]. Als chemischer Energieträger besitzt Wasserstoff in Kombination mit Brennstoffzellen als effiziente Energieumwandler ein grosses Potenzial, die notwendigen Kapazitäten für die Zwischenspeicherung erneuerbarer Energien zu gewährleisten.

Ein breiter Konsens besteht im Bereich der individuellen Mobilität betreffend des rein elektrischen Antriebs als effizienteste Lösung. Elektrofahrzeuge mit Batteriespeicher werden in ihren Fahrleistungen (Reichweite, Schnellbetankung) an Grenzen stossen, welche nur durch den Einsatz eines chemischen Treibstoffes – z.B. Wasserstoff in Kombination mit Brennstoffzellen – langfristig überbrückt werden. In diesem Zusammenhang haben verschiedene namhafte Automobilhersteller und Energieunternehmen im Berichtsjahr durch zwei separate *Memoranda of Understanding* zum Ausdruck gebracht, dass (1) im Bereich Elektromobilität weiterhin parallel zwei Entwicklungswege – Batterieelektrisch und Brennstoffzelle – verfolgt werden, und dass (2) der Aufbau einer für eine serienmässige Produktion von Brennstoffzellenfahrzeuge unabdingbare Wasserstofflogistik gemeinsam in Angriff genommen werden soll. Wie schnell sich solche Umsetzungsabsichten schliesslich verwirklichen werden, hängt nicht zuletzt auch vom politischen Willen und den damit verbundenen Förderungsmöglichkeiten der öffentlichen Hand ab.

Parallel zu Umsetzungsbemühungen sind weiterhin grosse Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen notwendig, um Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien wirtschaftlicher werden zu lassen, und so die schrittweise Einführung in den Markt vorzubereiten. Die Herausforderungen bestehen in der Weiterentwicklung effizienter Metho-

den zur Produktion aus erneuerbaren Quellen, der Verteilung und Speicherung von Wasserstoff, sowie der Erhöhung der Zuverlässigkeit und der Kostenreduktion von Brennstoffzellen.

In der Schweiz liegen die Schwerpunkte der Forschungsprogramme *Brennstoffzellen* und *Wasserstoff* in der materialorientierten Grundlagenforschung, in der Systementwicklung, sowie in der Demonstration und Erprobung von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie in Pilotprojekten. Die verschiedenen Aktivitäten der Programme gliedern sich in verschiedene Untergebiete, deren Zielsetzungen sich nach den Vorgaben des *Konzepts der Energieforschung des Bundes 2008–2011* [3, 4] richten.

### Wasserstoff

#### Nachhaltige Wasserstoffproduktion

Die Erforschung neuer Materialien, welche für die photoelektrochemische (PEC) Produktion von Wasserstoff in Frage kommen, bildet hier das zentrale Thema. Dabei wird insbesondere die Weiterentwicklung von nanostrukturierten Photoanoden auf der Basis von Eisenoxid (Hämatit) vorangetrieben.

#### Effiziente Wasserstoffspeicherung

Der Schwerpunkt in diesem Teilbereich bilden komplexe Metallhydride, welche als Festkörper Wasserstoff effizient in ihrem Kristallgefüge speichern können. Im Mittelpunkt stehen verschiedene Boronat-Verbindungen, welche sich durch eine besonders hohe Speicherdichte auszeichnen. Sicherheitsrelevante Fragen im Zusammenhang mit den Desorptionsprodukten und der Oberflächenreaktivität von komplexen Hydriden werden hierbei ebenfalls mitbetrachtet.

### Brennstoffzellen

#### Polymerelektrolytmembran (PEM)-Brennstoffzellen für mobile Anwendungen

Bei PEM-Brennstoffzellen stehen die Reduzierung der Kosten, die Robustheit im Betrieb sowie die Verfügbarkeit der Komponenten im Vordergrund. Die Analyse von diversen Degradationsphänomenen werden durch experimentelle Messungen an Teilkomponenten und ganzen Systemen sowie mittels deren theoretischer Modellierung eingehend untersucht. Die Systemintegration von PEM-Brennstoffzellen und die Anwendung in Nischenmärkten bilden weitere Themen.

## **Feststoffoxid-Brennstoffzellen (SOFC) für stationäre Anwendungen**

Im Bereich der Feststoffoxid-Brennstoffzellen (SOFC) steht die Erhöhung der Lebensdauer für die Anwendung in Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen im Vordergrund. Ähnlich wie im PEM-Brennstoffzellenbereich wird versucht, durch künstliche Alterungsbeschleunigung Degradationsphänomene kostengünstiger und systematischer zu untersuchen. Modellierung und Validierung kommt auch in diesem Bereich eine grosse Bedeutung zu.

## **Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2009**

### **Wasserstoff**

In einer künftigen Energiewirtschaft mit Wasserstoff als relevantem Energieträger werden Fragen der Wasserstoffbereitstellung – (nachhaltige) Produktion, Verteilung und Speicherung – von zentraler Wichtigkeit sein. In der Schweiz sind diverse Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten vorhanden, welche sich insbesondere mit der Wasserstoffherstellung durch erneuerbare Energien sowie der energetisch effizienten und sicheren Speicherung von Wasserstoff in Festkörpern wie auch als synthetische Kohlenwasserstoffe befassen.

### **Nachhaltige Wasserstoff-Produktion**

Jährlich werden weltweit rund  $500 \text{ GNm}^3$  Wasserstoff produziert.<sup>1</sup> Der allergrösste Anteil wird für den industriellen Eigenbedarf der chemischen und Erdöl verarbeitenden Industrie hergestellt und basiert auf der Reformierung von fossilen Energieträgern. Nachhaltig kann Wasserstoff über Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen, der Vergasung von Biomasse, oder durch solarthermische und photoelektrochemische Wasserspaltung produziert werden. In der Schweiz besitzt die alkalische Druckelektrolyse (30 bar) mit Wirkungsgraden von bis zu 80 % eine lange Entwicklungsgeschichte (Zdansky-Lonza-System). Dies ist einerseits auf den hohen Wasserstoffbedarf der chemischen und Material verarbeitenden Industrie (Bsp. Djéva) als auch auf die hohe Verfügbarkeit von Elektrizität aus Wasserkraft zurückzuführen. Heute wird diese Technologie von den Schweizer Firmen AccaGen und IHT Industrie Haute Techno-

Zusätzlich zu wissenschaftlichen und technischen Fokusaktivitäten werden als Ziele verfolgt:

- Gewährung der Kontinuität der wissenschaftlichen Forschung und damit Erhalt und Ausbau des Wissens am Forschungsstandort Schweiz;
- Unterstützung des Technologietransfers durch Forschungsprojekte mit Industriebeteiligung;
- Verstärkte Vernetzung von Schweizer Forschungs- und Entwicklungsprojekten durch Förderung der aktiven Zusammenarbeit in nationalen und internationalen Gremien.

logie erfolgreich vermarktet und weiterentwickelt. In Zusammenarbeit mit der Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) erforscht letztere in einem laufenden KTI-Projekt [5] neue Materialien zur Verbesserung und möglichen Ersatz der in den Elektrolysezellen verwendeten Membranen, um die Effizienz der Elektrolyse sowie die Gasreinheiten weiter steigern zu können. IHT engagiert sich ebenfalls im Rahmen des Wasserstoffprogramms (HIA) der Internationalen Energieagentur (IEA) im spanischen Pilotprojekt IHER [6], wo Elektrizität aus Wind- und Photovoltaik zur Langzeitspeicherung mittels Elektrolyse in Wasserstoff umgewandelt wird (Fig. 1).

Während alkalische (KOH) Elektrolyseure vor allem für höhere Leistungsbereiche (1 MW und mehr) zur Anwendung gelangen, werden für kleinere Leistungen (einige kW) PEM-Elektrolyseure eingesetzt, welche sich wie die PEM-Brennstoffzellen in stetiger Weiterentwicklung befinden. Die Vorteile solcher Systeme liegen im einfacheren Aufbau sowie im guten Regelverhalten, was insbesondere für die Kombination mit Strom aus fluktuierenden Quellen vorteilhaft ist. Im Berichtsjahr startete an der École d'Ingénieurs et d'Architectes de Fribourg (EIA-FR) in Zusammenarbeit mit Michelin recherche et Technique und der Universität Freiburg ein BFE-Projekt [7] zu einem neuartigen Elektrolyseurkonzept, welches die Vorteile von alkalischen und PEM-Elektrolyseuren miteinander vereinigen möchte. Dabei sollen Ausgangsdrücke von 200 bar und mehr möglich sein. Die Kompression von Wasserstoff für die Speicherung in Druckbehältern ist auf Grund des im Vergleich zu anderen Gasen geringen Molekulargewichts relativ

<sup>1</sup> Dieser Energieinhalt entspricht etwa zwei Prozent des primären globalen Energiebedarfs.

energieintensiv.<sup>2</sup> Mit einer solchen Neuentwicklung könnte die Energieeffizienz der Kette Elektrolyse–Druckspeicherung verbessert werden. Die Herausforderung liegt in den mit zunehmendem Druck ansteigenden Fremdgasanteilen (insbesondere Wasserstoff in Sauerstoff) auf Grund der unterschiedlichen Partialdrücke. Die Innovation des Projektes besteht darin, den alkalischen Elektrolyten (KOH) mit einem chemischen Additiv zu ergänzen, wodurch die Trennung zwischen flüssigem Elektrolyten und den Produktgasen auf die Elektrolysezelle eingeschränkt wird. Das chemische Additiv bildet in Kontakt mit dem Elektrolyten ein Hydrogel, welches den Elektrolyten in der Zelle zurückhält und von den Produktgasen trennt, so dass mit höheren Drücken gearbeitet werden kann. Der Elektrolyt wird dabei nicht verbraucht und muss nicht dauernd umgewälzt werden wie in einem konventionellen alkalischen Elektrolyseur. In einer ersten Phase des Projektes wurden verschiedene Additive erprobt, welche die Kaliumhydroxid(KOH)-Ionen immobilisieren sollen. Dabei führen bestimmte Zusatzstoffe zu einer markanten Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit bei höheren Konzentrationen. Es konnten jedoch bereits alternative Materialien identifiziert werden, deren elektrische Leitfähigkeit auch bei höheren Konzentrationen ähnlich gut bleibt wie beim reinen Elektrolyten.

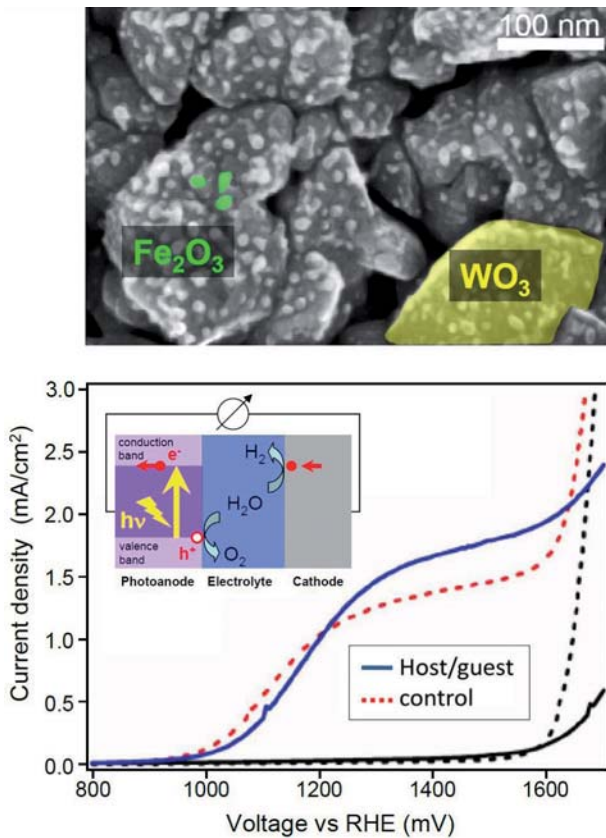
Die photoelektrochemische Wasserspaltung (PEC) als nachhaltige Methode zur Wasserstoffproduktion, mittels der Solarenergie bei Normalbedingungen direkt in Wasserstoff umgewandelt wird, bildet einen zentralen Forschungsschwerpunkt des Wasserstoffprogramms. Im Jahr 2007 wurde mit Unterstützung des BFE hierfür das Kompetenzzentrum *PEChouse* ([pechouse.epfl.ch](http://pechouse.epfl.ch)) an der École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) initiiert [8]. An dieses Projekt angegliedert sind Forschungsaktivitäten an der EMPA Dübendorf [9] und an der Universität Basel. In einer photoelektrochemischen Zelle zur Wasserspaltung (Fig. 2), bestehend aus einer halbleitenden Anode, einer metallischen Kathode und Wasser als Elektrolyten, wird durch Photoabsorption an der Anode der Elektrolyt Wasser zu Sauerstoff oxidiert und an der Kathode zu Wasserstoff reduziert. Von zentraler Bedeutung sind dabei die Wahl des Anodenmaterials sowie die Struktur der Anode. Die Forschung

<sup>2</sup> Verlust von 7 % des Brennwertes bei einer Kompression von 1 auf 200 bar

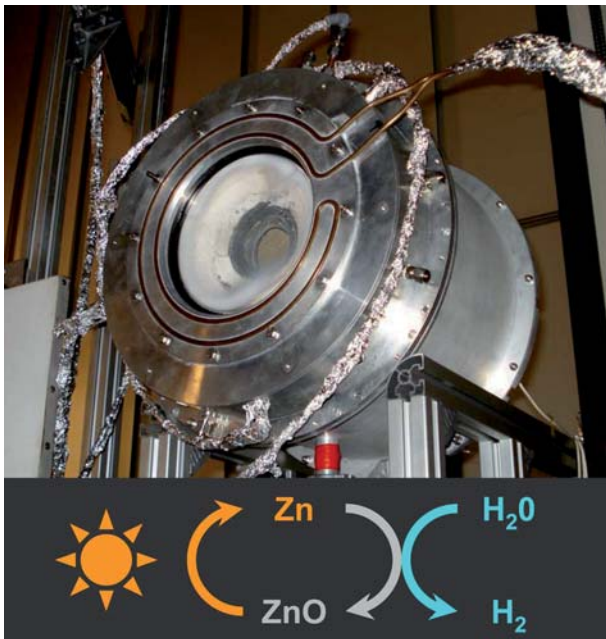


Figur 1: Alkalischer Elektrolyseur (50 kW) der Schweizer Firma IHT im spanischen Pilotprojekt IHER. Die Aktivitäten von IHT bilden einen zentralen Beitrag im Wasserstoff Implementing Agreement der Internationalen Energie Agentur (IEA) [[task24.hidrogenoaraqon.org](http://task24.hidrogenoaraqon.org)].

am PEC-Kompetenzzentrum der EPFL konzentriert sich auf den Halbleiter Hämatit (Eisenoxid  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), welcher sich auf Grund der Grösse der Bandlücke, seiner Korrosionsbeständigkeit, der Umweltverträglichkeit und auch der Kosten als ideales Material für Photoanoden in PEC-Zellen auszeichnet. Im Berichtsjahr konnten an Hämatit-Photoanoden mit Iridiumdioxid als Katalysator die weltweit bisher höchsten Photostromdichten von bis zu  $3 \text{ mA/cm}^2$  bei einer Zellspannung von 1,3 V gemessen werden. Dies entspricht einer Erhöhung der Solar-zu-Wasserstoff-Effizienz (SHE) um 50 %, von 3 % SHE im Jahr 2006 auf 4,5 % SHE im Jahr 2009. Bis zum Projektende 2011 sollen eine Effizienz von 11 % erreicht werden. Der technologische Fortschritt konnte durch die gezielte Optimierung der Herstellungsmethode (atmosphärische chemische Gasphasenabscheidung) nanostrukturierter Hämatit-Filme erreicht werden. Weiter wird in dem Projekt an der Morphologie der Photoanode gearbeitet. Hämatit besitzt eine eher geringe Lichtabsorption und kurze Lochdiffusionslängen im Vergleich zu anderen Halbleitern. Mit Anoden bestehend aus extrem dünnen Hämatitschichten, welche auf einer Trägermatrix aufgebracht werden,



Figur 2: Konzept einer PEC-Photoanode mit 60 nm  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  als photoaktives Material (grün) eingebaut in eine  $\text{WO}_3$ -Trägermatrix (gelb). Der Photostrom wird dadurch um 20 % erhöht im Vergleich zur Anode ohne Trägermatrix [8].



Figur 3: Pilotreaktor zur solarthermischen Gewinnung von Zink zur Wasserstoffproduktion.

können diese Nachteile teilweise kompensiert und dadurch die Effizienz weiter erhöht werden (Fig. 2).

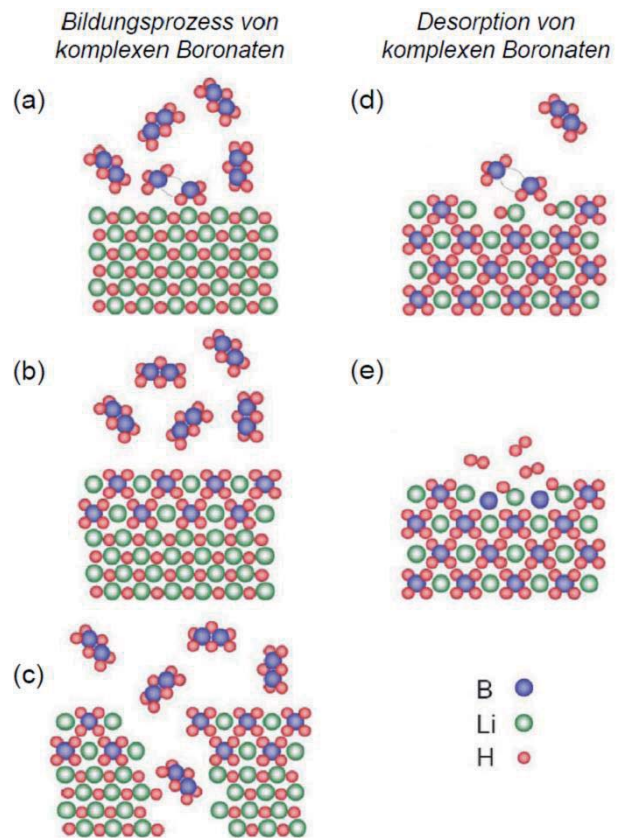
Die PEC-Forschungsarbeiten sind eingebettet in das Projekt *nanoPEC* ([nanopec.epfl.ch](http://nanopec.epfl.ch)) des 7. EU-Forschung Rahmenprogramms unter Leitung der EPFL, woran sich acht europäische Forschungsgruppen beteiligen, darunter auch eine Gruppe der EMPA Dübendorf. Das Projekt startete Anfang 2009 und läuft drei Jahre. Am Projektende soll ein Prototyp mit einer aktiven Fläche von  $100 \text{ cm}^2$  und einer Solar-zu-Wasserstoff-Effizienz von 7 % bereit stehen. Weiter sind die PEC-Aktivitäten Teil des Schweizer Beitrags des Task 26 im HIAders IEA.

Das Labor für Solartechnik des Paul Scherrer Instituts (PSI) arbeitet an thermochemischen Prozessen zur Erzeugung chemischer Energieträger (Wasserstoff) unter Ausnutzung von konzentrierter Solarstrahlung als Energiequelle. In einem vom BFE langfristig unterstützten Projekt [10] wird die thermische Dissoziation von Zinkoxid in einem solaren Reaktor untersucht (Fig. 3). Das dabei entstehende Zink kann in einem zweiten Prozess genutzt werden, um Wasserstoff zu gewinnen. In der aktuellen Projektphase konnte im Berichtsjahr die Optimierung des bestehenden 10-kW-Pilotreaktors erfolgen. Eine der Herausforderung liegt darin, entstehendes Zink genügend schnell abzukühlen (quenching), um eine Re-Oxidation zu verhindern. Es wurden verschiedene Quench-Einheiten getestet und es konnten hohe Zink-Erträge von 60 % gemessen werden. Die Tests wurden mit dem 15-kW-Solarsimulator am PSI durchgeführt. Im zweiten Projektteil wird der Reaktor auf 100 kW aufskaliert. Auf Grund der positiven Erfahrungen mit dem 10-kW-Reaktor starteten hier erste Simulationen und Designstudien. Gebaut wird die aufskalierte Anlage im Jahr 2010. Die anschliessenden Tests erfolgen am Solarofen des CNRS-PROMES-Forschungslabor in Odeillo (Frankreich), mit 1 MW Solarleistung eine der grössten Anlagen dieser Art. Bau und Test des 100-kW-Reaktors sind Teil eines Pilot- und Demonstrationsprojekts des BFE [11]. Diese Arbeiten bilden den Schweizer Beitrag zur Arbeitsgruppe *Hochtemperaturproduktion von Wasserstoff* im HIA der IEA (Task 25).

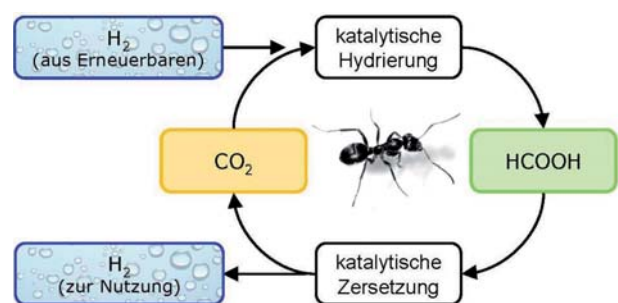
## Wasserstoff-Speicherung

Die effiziente Speicherung von Wasserstoff bildet einen weiteren Schwerpunkt innerhalb des Forschungsprogramms. Es gibt diverse Möglichkeiten, Wasserstoff zu speichern: in flüssiger Form bei kryogenen Temperaturen, als komprimiertes Gas oder eingelagert in Feststoffen und Flüssigkeiten (metallische/komplexe Hydride, Kohlenstoffstrukturen, Flüssigkeiten). Die vom BFE mitunterstützte Forschung konzentriert sich hauptsächlich auf die letztgenannte Art. Die Vorteile liegen in der erhöhten Sicherheit, den geringeren Energieverlusten im Vergleich zur Komprimierung oder Abkühlung auf kryogene Temperaturen sowie in der hohen volumetrischen Dichte. In der Schweiz arbeiten Forschungsgruppen an der EMPA, der EPFL und an der Universität Genf auf diesem Gebiet. In einem vom BFE unterstützten Projekt [12] an der EMPA werden komplexe Metallhydride wie Boronat- ( $\text{LiBH}_4$ ) oder Alanat-Verbindungen ( $\text{NaAlH}_4$ ) untersucht, welche theoretisch das Potenzial besitzen, Wasserstoff mit bis zu 18-Massenprozenten zu speichern. Gegenstand aktueller Untersuchungen sind dabei (1) die Kinetik sowie die energetische Effizienz der Absorptions und Desorptionsmechanismen, (2) die Absorption an der Oberfläche und die Platzierung der Wasserstoffatome innerhalb des Materials sowie (3) die Reversibilität solcher Prozesse. Im Berichtsjahr wurden weiter grosse Fortschritte erzielt im grundlegenden Verständnis dieser Prozesse. So konnte beispielsweise erstmals  $\text{LiBH}_4$  in einer Gas-Feststoffreaktion zwischen  $\text{LiH}$  und Borwasserstoffverbindungen (Boranen) unterhalb des Schmelzpunktes von  $\text{LiBH}_4$  synthetisiert werden (Fig. 4). Dieser neue Syntheseprozess zeigt auf, dass insbesondere die Bildung der B-H-Verbindungen einen kinetisch hemmenden Faktor darstellen. Durch den gezielten Einsatz eines geeigneten Katalysators könnte hier der gesamte Bildungs wie auch Dekompositonsprozess beschleunigt werden. Die Arbeiten sind Teil des Schweizer Beitrags im Task 22 des HIA-IEA.

Alternativ zu metallischen Hydriden hat in den letzten Jahren die Speicherung von Wasserstoff in synthetischen Kohlenwasserstoffen vermehrt Beachtung erfahren. Auf Basis von Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen synthetisch produziertes Methan wird bereits heute direkt ins Erdgasnetz eingespeist und lässt sich somit leicht zwischenspeichern, um beispielsweise für Mobilitätsanwendungen genutzt werden zu können

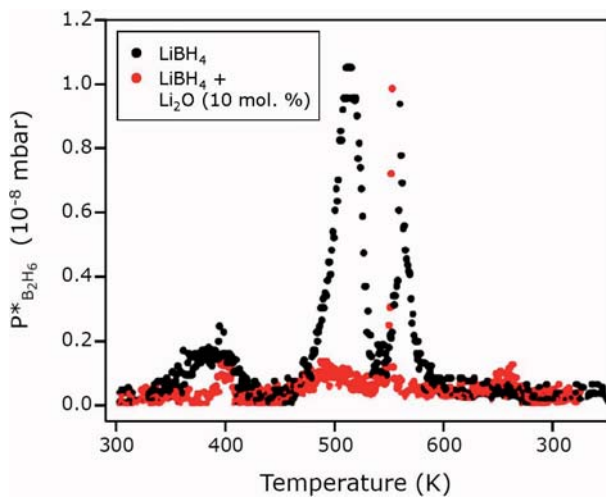


Figur 4: Formierungs (a-c)- und Dekompositions (e-d)-Prozesse von  $\text{LiBH}_4$ -Hydriden: (a) Di-Borane trennen sich auf beim Auftreffen auf die Li-Oberfläche (b). Es bildet sich eine Passivierungsschicht (c), welche aufbricht, sodass Di-Borane weiter in den Li-Kristall eindringen können. (d) Bei der Desorption (Freigabe von  $\text{H}_2$ ) werden Di-Borane zusammen mit  $\text{BH}_3$ -Molekülen emittiert oder (e) Wasserstoff wird direkt abgegeben, wobei die Bor-Atome im Kristall zurückbleiben [12].



Figur 5: Ameisensäure (Formalinsäure,  $\text{HCOOH}$ ) hat das Potenzial, als sicherer und effizienter Wasserstoffspeicher eingesetzt zu werden. Industriell werden weltweit 350'000 Tonnen Ameisensäure pro Jahr produziert, Ameisen selbst erzeugen 1 Million Tonnen.

([www.solar-fuel.com](http://www.solar-fuel.com)). In der Schweiz laufen in diesem Bereich Forschungsarbeiten an der EPFL und an der EMPA. Am Labor für organometallische und medizinische Chemie (LCOM) der EPFL, teilweise



Figur 6: Freisetzung von Diboran für das komplexe Hydrid  $\text{LiBH}_4$ , welches als eines der instabilsten Borhydriden das grösste Anwendungspotenzial besitzt. Die unerwünschte Freisetzung kann durch die Reaktion mit Sauerstoff (rote Punkte) deutlich reduziert werden [14].

in Zusammenarbeit mit der Firma Granit Green Networks, wird die relativ lange unbeachtet gebliebene Wasserstoffspeicherung in Form von Formalinsäure ( $\text{HCOOH}$ ) erforscht [13] (Fig. 5). Formalinsäure kommt verbreitet in der Textil- und Nahrungsmittelindustrie zur Anwendung und wird in industriellem Massstab im Fischer-Tropsch-Verfahren hergestellt. Durch Decarboxylation kann Formalinsäure selektiv mittels Einsatz eines Katalysators bei Zimmertemperatur in  $\text{CO}_2$  und Wasserstoff umgewandelt werden. Als nicht-toxische Substanz, welche bei Raumtemperatur und Normaldruck in flüssiger Form vorliegt, lässt sich diese leicht speichern und transportieren. Die Brennstoffzellentechnologie könnte insbesondere im Mobilitätsbereich von einem einfach handhabbaren flüssigen Treibstoff stark profitieren. Formalinsäure enthält 4,4 Massenprozent Wasserstoff, was einem Energieinhalt von 5,3 MJ/kg entspricht. Dies ist zwar deutlich weniger im Vergleich zu Benzin, ergibt jedoch in etwa identische Speicherdichten wie bei Druck- oder Flüssigwasserstoff (inkl. Tank). Bei einer katalytischen Produktion aus  $\text{CO}_2$  und Wasserstoff (aus erneuerbaren Energiequellen) liesse sich ein  $\text{CO}_2$ -neutraler Kreislauf erreichen. Die Forschungsgruppe an der EPFL arbeitet an Ruthenium( $\text{Ru}$ )-basierten Katalysatoren. In den, in den Jahren 2008 und 2009 veröffentlichten Publikation wurde aufgezeigt, dass durch den Einsatz langzeitstabiler  $\text{Ru}$ -Katalysatoren Wasserstoff aus Formalinsäure mit einer Ausbeute von 90 bis 95 % gewonnen werden kann. Dabei lässt sich die Reaktionsrate so regulieren, dass ein konstanter Aus-

gangsdruck aufrechterhalten wird. Durch Partnerschaften mit verschiedenen Firmen wird parallel zur Forschung intensiv am Technologietransfer gearbeitet. Eine Reihe von Pilotprojekten sind in Planung, in denen diese Technologie in der Praxis getestet werden soll.

### Sicherheitsaspekte von Wasserstoff

Komplexe Metallhydride wie  $\text{LiBH}_4$  sind stark reaktive Materialien und können bei der Anwendung in Wasserstoffspeichersystemen eine potenzielle Gefahrenquelle bilden. In einem BFE-Projekt an der EMPA werden sicherheitsrelevante Aspekte zu Desorptionsprodukten und zur Oberflächenreaktivität untersucht [14]. Als Methoden werden dazu Photoelektronenspektroskopie (ESCA) und Thermodesorptionsspektroskopie (TPD, temperaturlöste Massenspektroskopie) eingesetzt. Nach Abschluss der Aufbauphase wurden im Berichtsjahr durch ESCA-Messungen die Oberflächenreaktivität von alkalischen Borhydriden bei Exposition mit Wasser und Sauerstoff detailliert untersucht. Es wurde festgestellt, dass die Reaktivität mit Wasser allgemein um mehrere Grössenordnungen stärker ist. Mittels TPD-Analysen konnte gezeigt werden, dass die Freisetzung von (toxischem) Diboran durch die Anwesenheit von Sauerstoff stark unterdrückt wird (Fig. 6). Die Rolle des Sauerstoffs ist noch nicht wirklich verstanden, jedoch bilden diese Resultate einen wesentlichen Schritt hin zur Verhinderung der Diboranfreisetzung bei der Wasserstoffdesorption. Das Projekt bildet den Schweizer Beitrag im Task 19 *Hydrogen Safety* des HIA der IEA.

Neben Sicherheitsfragen im Zusammenhang mit Wasserstoffspeicherung in komplexen Hydriden werden in einem KTI-Projekt der Universität Genf kostengünstigere Alternativen für Wasserstoff-Leckdetektoren entwickelt. Die Arbeiten konzentrieren sich dabei auf Wasserstoff-induzierte Metall-Isolatorübergänge in dünnen metallischen Filmen [15].

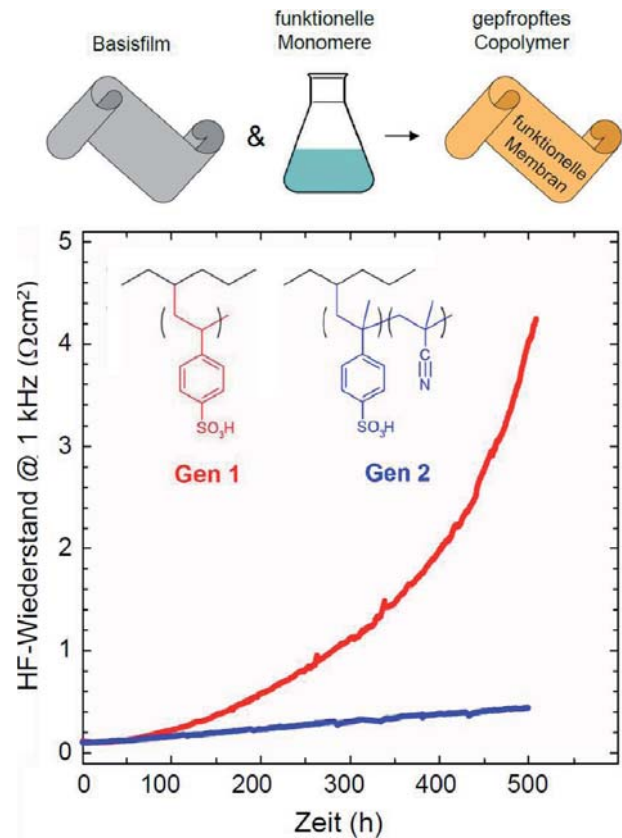
### Polymerelektrolytmembran (PEM)-Brennstoffzellen

PEM-Brennstoffzellensysteme zeichnen sich durch eine kompakte Bauweise und durch eine hohe Leistungsdichte aus. Solche Systeme arbeiten bei moderaten Temperaturen ( $<100\text{ }^\circ\text{C}$ ), lassen sich schnell ein- und ausschalten und zeigen hohe elektrische Wirkungsgrade. Nach wie vor steht die Weiterentwicklung der PEM-Brennstoffzelle für diverse Anwendungen von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen bis zu Fahrzeugantrieben im Vordergrund. Der wirt-

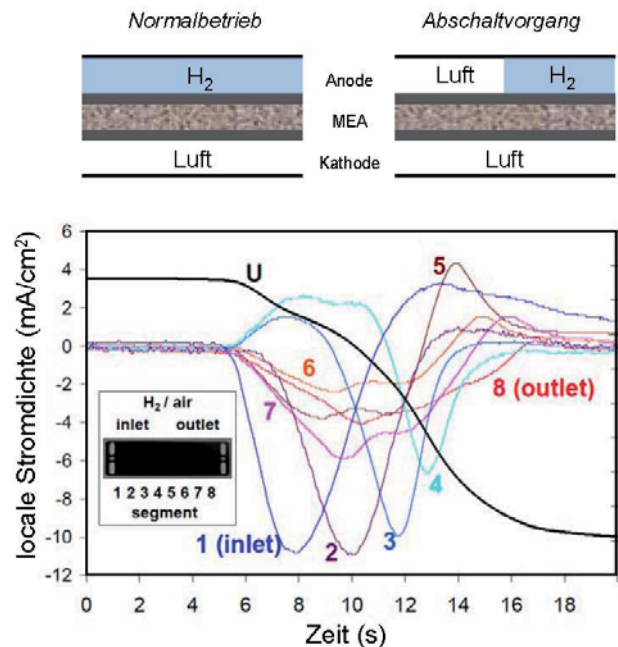
schaftliche Einsatz von PEM-Brennstoffzellensystemen in den kommenden Jahren hängt allerdings stark von der Steigerung der Leistungsdichte und der Lebensdauer ab. Kostengünstigere Herstellungsverfahren für die verschiedenen Komponenten der Zellen, der Elektrodenmaterialien (Katalysatoren) sowie des Brennstoffs (vornehmlich Wasserstoff oder Methanol) und den konsequenten Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur bilden unabdingbare Voraussetzungen für den breiten Einsatz dieser Technologie.

### PEM-Membranen

Am Labor für Elektrochemie des Paul Scherrer Instituts (PSI) werden weltweit anerkannte Grundlagen- und Entwicklungsarbeiten im Bereich PEM-Brennstoffzellen geleistet. Das BFE unterstützt hier ein mehrjähriges Projekt im Bereich der Entwicklung verbesserter Protonen leitender Polymermembranen, welche in PEM-Brennstoffzellen und -Elektrolyseuren als kostengünstigere Alternative zu kommerziellen Produkten Anwendung finden könnten [16]. Typischerweise werden heute in PEM-Brennstoffzellen kommerziell vertriebene Nafion-Membranen mit Kosten von mehr als 500 \$/m<sup>2</sup> eingesetzt, was mindestens eine Größenordnung von dem Wert entfernt ist, welcher einen wirtschaftlichen Einsatz der PEM-Brennstoffzelle ermöglichen würde. Dazu kommt, dass mit heute erhältlichen Materialien die notwendigen Lebenszeiten (> 40'000 h für stationäre und > 6'000 h für Mobilitäts-Anwendungen) nicht erreicht werden, insbesondere nicht unter realen Lastbedingungen. Die am PSI entwickelten Membranen werden über die Methode des Strahlungspropfens von preiswerten Basis-Polymerfilmen hergestellt (Fig. 7). Dabei werden zusätzliche Komponenten (funktionale Monomere) in die Filme eingebaut, um der Membran dadurch die notwendige Funktionalität (Protonenleitfähigkeit etc.) zu verleihen. Im Berichtsjahr wurde eine zweite Generation der «PSI-Membran» entwickelt, bei welcher die Propfkomponente aus sulfoniertem  $\alpha$ -Methylstyrol und Methacrylnitril besteht. Der damit verbundene Entwicklungsfortschritt wird parallel in einem weiteren BFE-Projekt aufgezeigt, welches ebenfalls am PSI durchgeführt wird [17]. Ziel dieser Arbeiten ist die Identifikation von Degradationsmechanismen in strahlengepropften Filmen, wobei chemische und mechanische Alterungsphänomene selektiv betrachtet werden können. Die chemische Alterung kann stark beschleunigt wer-



Figur 7: Beschleunigte chemische Alterung von Membranen in der Brennstoffzelle. Die weniger stark ausgeprägte Zunahme des Hochfrequenz-Widerstandes für die PSI-Membran der Generation 2 ist eine Folge der höheren chemischen Stabilität [17].



Figur 8: Abschaltprozesse in PEM-Zellen, bei denen die Kathode mit Luft geflutet wird, verursachen lokal negative Stromdichten, welche zu Korrosion der Katalysatortragenden Kohlenstoffschicht führen. Die Korrosionsrate, welche durch Messung des CO<sub>2</sub>-Anteils der Kathoden-Abgase bestimmt werden kann, hängt dabei stark von Feuchtigkeit, Temperatur und Zellspannung ab [19].



Figur 9: Integration eines PEM-Brennstoffzellenstapels der Firma CEKA in eine Minibar [19, 20].

den, wenn die Brennstoffzelle unter Leerlaufbedingungen (ohne Strom) betrieben wird. Fig. 8 zeigt einen solchen Test, wo der Hochfrequenzwiderstand für die zweite Generation der «PSI-Membranen» im Vergleich zur ersten nach 500 h Betriebsstunden deutlich langsamer ansteigt. In einer weiteren vom BFE unterstützten Doktorarbeit [18] wird die Degradation von Polymermembranen in-situ in einer unter Last stehenden Brennstoffzelle gemessen. Dazu wird der Anode zusätzlich zum Wasserstoff als Spurgas Helium zugeführt. Die Permeation des Spurgases auf dem Weg zur Kathode kann lokal an verschiedenen Stellen mittels Massenspektrometrie gemessen werden. Die Permeationsrate dient als Indikator für den lokalen Degradationszustand der Membran unter realen Bedingungen.

#### Lastwechselbedingte Degradationsphänomene

In dem vom BFE unterstützten Gemeinschaftsprojekt *go.PEF-CH* [19] mit dem PSI, der Berner Fachhochschule für Technik und Informatik (BFHTI) sowie den Industriepartnern CEKA und MESDEA werden Transientenphänomene in PEM-

Brennstoffzellen auf verschiedenen Zeit- und Längenskalen untersucht. In Mobilitätsanwendungen sollten PEM-Brennstoffzellen mindestens einige zehntausend schnelle Lastwechsel und mehr als tausend Start/Stop-Zyklen überstehen. Im Berichtsjahr wurde die Degradation bedingt durch die Korrosion des Katalysator tragenden Kohlenstoffmaterials eingehend untersucht. Kohlenstoffkorrosion bei Start/Stop-Vorgängen wird durch die gleichzeitige Anwesenheit von Wasserstoff und Luft (Stickstoff) in der Kathode verursacht, was kurzfristig zu negativen Stromdichten führen kann. Basierend auf diesen Untersuchungen wurden belastungsarme Start/Stop-Protokolle entwickelt, welche an einem kurzen IPhoS-Stapel der Firma CEKA getestet wurden. In einem ersten Test während 1'000 Start/Stop-Zyklen wurde ein Leistungsabfall von 10 % beobachtet, wonach die Protokolle weiter optimiert werden sollen. Einige dieser Betriebsstrategien fließen bereits direkt in das IPhoS-E System (500-W-Stapel) der Firma CEKA ein, welcher in einem aktuellen KTI-Projekt [20] in eine Minibar von Elvetino integriert wird (Fig. 9).

In einem zweiten Teil des Projektes werden Transientenphänomene an der Zelle lokal untersucht, in eigens hierfür segmentierten Mikro-Flussfeldern, sowie in modifizierten Stapeln der Firma MESDEA. Degradationsphänomene treten an einer Zelle oder einem Stapel nicht überall gleich stark auf. Daher sind lokal-auflösende Methoden, welche z.B. elektrische Ströme parallel zu den Flussfeldern abbilden können, unabdingbar für ein tieferes Verständnis der zur Degradation führenden Phänomene.

#### Modellierung und Validation

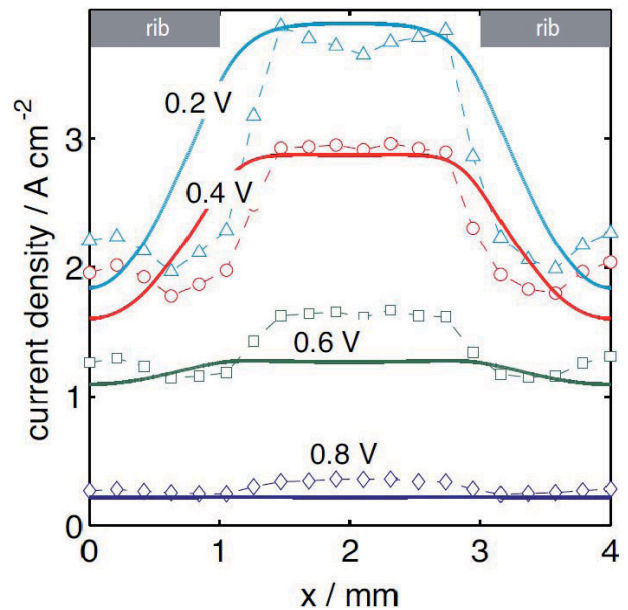
Direkte experimentelle Untersuchungen an Brennstoffzellen sind auf Grund der Abgeschlossenheit des Systems aufwendig. Die Beschreibung mit mathematischen Modellen sowie deren Validierung mit experimentellen Daten ist daher für die Forschung und Entwicklung in diesem Bereich sehr bedeutsam, da damit das Verständnis erhöht und Entwicklungszeiten eingespart werden können. Parallel zum *go.PEF-CH*-Projekt unterstützt das BFE im Projekt *cal.PEF-CH* der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) und des PSI Forschungsarbeiten in diesem Bereich [21]. Im theoretischen Teil des Projektes konnten die numerischen Modelle im Berichtsjahr weiter verfeinert werden, mit denen eine genaue Beschreibung der Wasserverteilung in kommerziell

erhältlichen porösen Gas-Diffusionsschichten möglich ist. Weiter wurde ein 2-dimensionales Modell zur Simulation von Flussfeldern vervollständigt und experimentell validiert (Fig. 10).

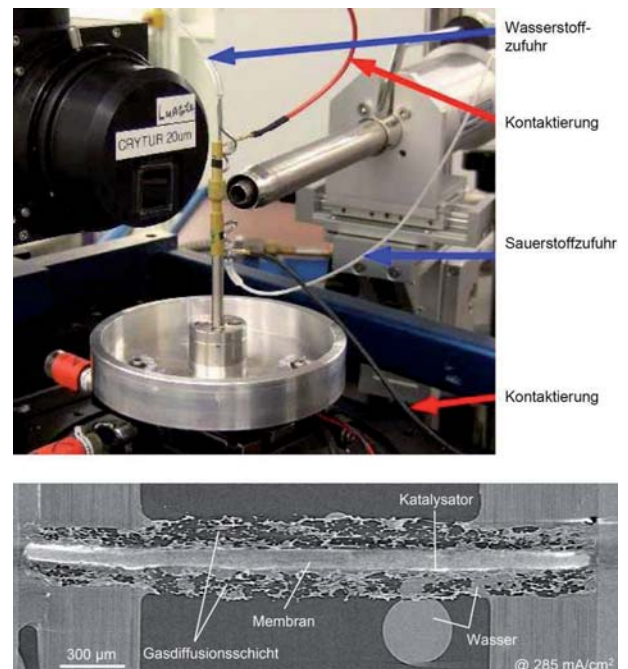
Ergänzend zu theoretischen Modellierungsarbeiten werden am PSI mit verschiedensten Methoden (Impedanzspektroskopie, Zyklische Voltammetrie, Neutronenradiographie, Röntgentomographie etc.) PEM-Brennstoffzellen experimentell untersucht und so Daten zur Validierung der theoretischen Modelle generiert. In einer vom BFE finanzierten Doktorarbeit wird die Röntgen-Mikro-Tomographie zur Untersuchung der Wechselwirkung zwischen flüssigem Wasser und Wasserdampf in den GDL-Materialien weiter entwickelt wird [22]. Diese Arbeiten werden an der Tomcat-Beamline der Schweizer Synchrotronquelle SLS durchgeführt. Im Berichtsjahr konnte zum ersten Mal überhaupt eine laufende PEM-Brennstoffzelle mit Mikrometer-Auflösung abgebildet und der Wassergehalt in den Gas-Diffusionsschichten bestimmt werden (Fig. 11). Die am PSI entwickelte Methode ist weltweit einzigartig und erregte bereits kommerzielles Interesse von Automobilfirmen, welche im Bereich der Brennstoffzellenentwicklung aktiv sind. Gemeinsam mit dem BFE-Forschungsprogramm *Verbrennung* wurde am PSI ein weiteres Projekt lanciert, in welchem ein allgemein anwendbares Tool zur Modellierung von thermochemischen und elektrochemischen Energieumwandlungsprozessen auf Mikro-Scala entwickelt werden soll. Die dabei angewandte Methode basiert auf dem Lattice-Boltzmann(LB)-Verfahren, welches in einer ersten Projektphase durch den Vergleich mit klassischer numerischen Strömungsmechanik (CFD) validiert werden soll. Als Endziel des Projektes soll das LB-Modell auf Gas-Diffusionsschichten in PEM-Brennstoffzellen angewendet und mit experimentellen Daten validiert werden [23].

An der Berner Fachhochschule in Biel (BFH-TI) sind grosse Kompetenzen im Bereich des Tests und der Systemintegration von PEM-Brennstoffzellen vorhanden. Im Jahr 2008 wurde hier der Aufbau eines Teststandes für Brennstoffzellen im Leistungsbereich 100 W bis 1 kW abgeschlossen. In einem kleineren Folgeprojekt wurde im Berichtsjahr dieser Teststand auf den Leistungsbereich 10 bis 100 W erweitert [24].

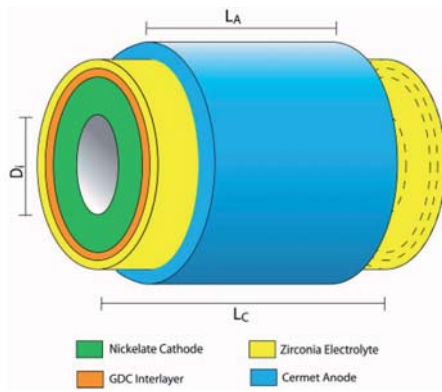
Im Jahr 2008 ging das PSI mit Belenos Clean Power Holding in Biel ein Joint-Venture-Abkommen ein, mit dem Ziel, ein neues Wasserstoff/Sauer-



Figur 10: (oben) Simulierte und experimentell validierte lokale Stromdichteverteilung als Funktion der Zellspannung in einem Brennstoffzellenflussfeld. Die Stromdichte im Bereich der Gaskanäle ist bei niederen Spannungen deutlich höher im Vergleich zu den Stegen (ribs) [21].



Figur 11: Experimenteller Aufbau an der TOMCAT-Beamline am Schweizer Synchrotron SLS des PSI zur in-situ Untersuchung von PEM-Brennstoffzellen mittels Röntgentomographie (oben). xy-Querschnitt der tomographischen Rekonstruktion einer aktiven Einzelzelle (unten) [22].



Figur 12: Schematische Darstellung einer Mikrotubularen SOFC-Brennstoffzelle [28].

stoff-Brennstoffzellensystems für einen Fahrzeugantrieb zu entwickeln. Das Projekt ist Teil des Mobilitätskonzeptes von Belenos, welches auf eine private Energieversorgung für den Individualverkehr abzielt. Im Berichtsjahr startete in diesem Zusammenhang ein von der KTI unterstütztes Projekt [25].

### Feststoffoxid-Brennstoffzellen

Alle Brennstoffzellen sind energetisch attraktive Energiewandler auf Grund ihres hohen Wirkungsgrades. Im Vergleich zu anderen Brennstoffzellentypen zeichnen sich Feststoffoxid-Brennstoffzellen (SOFC) durch die höchsten elektrischen Wirkungsgrade ( $> 60\%$ ), der Möglichkeit, neben reinem Wasserstoff auch Erdgas direkt nutzen zu können, sowie der anfallenden Wärme auf hohem Temperaturniveau aus. SOFCs haben ihr Potenzial vor allem im stationären Wärme-Kraft-Kopplungs(WKK)-Bereich. Weitere Applikationsmöglichkeiten liegen im Bereich der dezentralen Energieumwandlung z.B. als Auxiliary Power Units. Die Hauptherausforderung im Zusammenhang mit der Markteinführung dieser Technologie liegt neben den Kosten nach wie vor in der zurzeit noch zu geringen Lebensdauer. Für den kommerziellen Einsatz in WKK-Systemen sollten SOFC-Stapel eine Mindestlebensdauer von 40'000 Stunden aufweisen. Die Materialdegradation als limitierender Faktor der Lebensdauer von SOFC wird in dem nationalen SOFC-CH [26] sowie im europäischen ERA-Net-Projekt *AccelenT* [27] eingehend untersucht.

Das Projekt SOFC-CH [11], welches von *Swisslectric Research* und dem BFE gemeinsam unterstützt wird, vereint alle Schweizer Hauptakteure aus Forschung und Industrie im Bereich der SOFC

(EPFL, EHTZ, ZHAW, Hexis und HTceramix). Angestrebtes Projektziel ist eine Reduktion der Degradation bis Ende 2010 auf 3 % pro 1000 Betriebsstunden. Dadurch würde die Lebenszeit des Stapels auf rund 20'000 Stunden erhöht, was je nach Betriebsart ein Wechsel des Stapels alle zwei bis vier Jahre bedeuten würde. Die Forschungsarbeiten im Projekt SOFC-CH teilen sich auf in einen rein experimentellen und in einen Modellierungsteil. Im Berichtsjahr konnten in allen Arbeitspaketen gute Fortschritte erzielt werden. So konnte im Kathoden-Projektteil eine direkte Korrelation zwischen der Degradationsrate und der Schichtdicken sowie der keramischen Zusammensetzung der Lanthan-Strontium-Manganoxid-Elektroden aufgezeigt werden. In den Arbeiten, welche sich auf die Redoxstabilität der Anode konzentrieren, wurden mikrostrukturelle Veränderungen im Nickel-Keramik-Netzwerk beobachtet. Die Resultate aus diesem Projekt fließen zwar nicht unmittelbar in die aktuellen Produktverbesserungen der beteiligten Firmen ein, sind jedoch mittelfristig wichtige Erkenntnisse zur Erhöhung der Langzeitstabilität der SOFC-Stapel.

Dasselbe Projektkonsortium arbeitet in dem im Jahr 2008 gestarteten ERA-Net-Projekt *AccelenT* zusammen. Der Schweizer Anteil an diesem europäischen Projekt wird durch das BFE unterstützt. Europäische Partner sind das Forschungszentrum Jülich und das Europäische Zentrum für Energieforschung Eifer (DE), das finnische Forschungszentrum VTT sowie die Industriepartner Plansee (AT) und Kerafol (DE). Ziel dieses Projektes ist es, beschleunigte Testverfahren für SOFC zu entwickeln, um die Degradation effizient studieren zu können. Auf diese Weise können kostspielige Langzeitstudien minimiert werden.

Im Berichtsjahr startete an der EPFL eine vom BFE unterstützte Doktorarbeit [28], welche die Machbarkeit einer Kathoden-getragenen mikrotubularen SOFC-Brennstoffzelle aufzeigen soll, wobei gleichzeitig ein neues Kathodenmaterial entwickelt wird. Planare Konzepte sind heute normalerweise Anoden-getragen und erreichen grosse Leistungsdichten (Fig. 12). Jedoch bestehen hier weiterhin zum Teil Probleme im Bereich der Reoxidation der Anode und der Dichtung der Systeme. Tubulare Systeme sind allgemein einfacher zu dichten und operieren zuverlässiger, besitzen jedoch kleinere Leistungsdichten. Das Konzept der mikrotubularen SOFCs soll Vorteile von tubularen

und planaren Systemen in sich vereinigen. Im Berichtsjahr wurden poröse Kathoden-Röhrchen durch Pressen und Extrusion hergestellt. Die Mikrostruktur der gefertigten Röhrchen wurde eingehend analysiert, um Parameter wie Tortuosität und Porosität zu extrahieren. Erste elektrochemische Messungen an einzelnen Röhrchen wurden bereits durchgeführt.

Die Kleinfirma Fiaxell aus Lausanne, welche Materialien für SOFC-Brennstoffzellen entwickelt, wurde im Berichtsjahr vom BFE mit zwei verschiedenen Projekten unterstützt, wobei die EPFL und die Hexis ebenfalls Projektpartner sind. Im ersten der beiden Projekte wird eine glasfreie kostengünstige Dichtungspaste für SOFC-Stapel entwickelt [29]. Die Dichtung von Hochtemperaturbrennstoffzellen ist allgemein problematisch. Erste Tests an Hexis-Stapel zeigten Erfolg versprechende Ergebnisse. Im zweiten Projekt von Fiaxell werden Anoden-getragene Zellen weiterentwickelt und validiert, welche mindestens zehn Redox-Zyklen unbeschädigt überstehen sollen [30]. Auch hier sind die Resultate viel versprechend.

## Nationale Zusammenarbeit

Die nationale Zusammenarbeit zwischen Projektnehmern wurde auch im Berichtsjahr 2009 weiter gepflegt. In vom BFE unterstützten Projekten bestehen verschiedene Arbeitsnetzwerke zur solaren Wasserstoffproduktion mittels Photoelektrochemie (PEChouse, [pechouse.epfl.ch](http://pechouse.epfl.ch)), zu Polymer-elektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEF-CH) sowie zu Feststoffoxid-Brennstoffzellen: SOF-CH. Das PEChouse-Konsortium organisierte im Berichtsjahr einen «PEC-Industry Day», an welchem die Forschungsarbeiten interessierten Industrievertretern aus dem Technologiebereich *Wasserstoff und Brennstoffzellen* vorgestellt und erste Kontakte für eine weiterführende Zusammenarbeit geknüpft wurden.

## Mikrobielle Brennstoffzelle

Das BFE unterstützte im Berichtsjahr zusammen mit dem Bundesamt für Umwelt eine technische Machbarkeitsstudie an der Fachhochschule in Sion (HES-SO Valais) zur Rückgewinnung von Phosphat aus ausgefaultem Klärschlamm mit Hilfe einer mikrobiellen Brennstoffzelle [31]. Es handelt sich hier nicht um ein wirkliches Energieprojekt im Sinne der effizienten Energieumwandlung, jedoch muss hier zur Remobilisierung des Phosphats von aussen keine elektrische Energie aufgewendet werden. Die produzierten Konzentrationen reichen aus, um zu einem Dünger weiterverarbeitet zu werden.

## Brennstoffzellen für portable Anwendungen

Die aus einem BFE-Projekt entstandene Entwicklung eines PEM-Ministapels für den Leistungsbe- reich um 50 W wird auf privater Basis weitergetrieben (Fumey Fuel Cell Technology, Steffisburg). Ebenfalls auf den Anwendungsbereich der portablen Stromversorgung abzielend läuft an der ETH Zürich weiterhin das CCEM-Projekt ONEBAT, in welchem eine mit Flüssiggas betriebene SOFC-Mikro-Brennstoffzelle im Leistungsbereich um 2,5 Watt entwickelt wird.

Die meisten Schweizer Akteure im Bereich Wasserstoff- und PEM-Brennstoffzellentechnologie – sowohl aus der Forschung als auch aus der Umsetzung – sind in der nationalen Wasserstoffvereinigung Hydropole ([www.hydropole.ch](http://www.hydropole.ch)) organisiert. Hydropole repräsentiert regelmässig die Schweizer Wasserstoff- und PEM-Brennstoffzellen-Aktivitäten weltweit mit eigenen Ständen an wichtigen Konferenzen und Ausstellungen, so etwa an der *Fuel Cell Expo 2009* in Japan und am *World Future Energy Summit* in Abu Dhabi.

Im Berichtsjahr fand in Braunwald bereits zum dritten Mal das Symposium *Hydrogen and Energy* statt, welches sich als Informationsplattform für Themen aus der Grundlagenforschung und der Technologie im Bereich Wasserstoff etabliert hat.

## Internationale Zusammenarbeit

Die Schweiz beteiligt sich am Implementing Agreement (IA) *Advanced Fuel Cells AFC* ([www.ieafuelcell.com](http://www.ieafuelcell.com)) der Internationalen Energie Agentur (IEA). Das Implementing Agreement beinhaltet sechs verschiedene Tasks, welche technologische und anwendungsspezifische Themen in den Bereichen Polymer Fuel Cells (PEFC), Solid Oxide Fuel Cells (SOFC) und Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC) abdecken. Momentan sind 18 Länder an diesem IA beteiligt. Im Berichtsjahr wurde das Implementing Agreement durch das Governing Board der IEA (CERT) für eine weitere Laufzeit von fünf Jahren bewilligt.

Neben der Mitarbeit im Executive Committee des IEA-AFC durch das BFE beteiligt sich die Schweiz aktiv in Task 18 (neu Task 25) *Solid Oxide Fuel Cells* [24], vertreten durch die Firma HTceramix (Yverdon), sowie im Task 19 (neu Task 26) *Fuel Cells for Stationary Applications* [25], vertreten durch *Beratung Renz Consulting* (Basel). Hier leitet die Schweiz den Subtask 1 *Market Outlook*, welcher sich zum Ziel setzt, im Bereich stationäre Anwendungen wichtige Märkte, länderspezifische Bedürfnisse betreffend Produkt- und Seviceedesign, sowie Kostenstrukturen und Business-Konzepte zu analysieren. Im Berichtsjahr wurde hier mit Unterstützung des BFE ein Report publiziert [32].

Das Wasserstoffprogramm (HIA) der IEA ([www.ieahia.org](http://www.ieahia.org)) bildet eine Hauptplattform der internationalen, vorkommerziellen Forschungszusammenarbeit im Bereich Wasserstoff. Die Schweiz beteiligt sich seit 1977 in diesem Implementing Agreement und ist mit entsprechenden Projekten in diversen Tasks aktiv. Anfang 2009 wurde das IA vom CERT ebenfalls für eine weitere Laufperiode bewilligt mit einem entsprechend überarbeiteten *Strategic Plan*. Neben der Vertretung im Executive Committee durch das BFE forschen Schweizer Akteure in den folgenden Tasks: Task 22 *Fundamental and Applied Hydrogen Storage Materials Development*, vertreten durch die EMPA Dübendorf; Task 24 *Wind Energy and Hydrogen Integration*, vertreten durch die Firma IHT; Task 25 *High Temperature Processes for Hydrogen Production*, vertreten durch das PSI; sowie Task 26 *Advanced Materials for Hydrogen Waterphotolysis*, vertreten durch die EPFL und die EMPA.

## Joint Technology Initiative Fuel Cell and Hydrogen (FCH JTI)

Die Anfang 2008 von der EU-Kommission und der Industrie (European Industry Grouping) lancierte *Fuel Cell and Hydrogen Joint Technology Initiative* (FCH JTI, [ec.europa.eu/research/fch](http://ec.europa.eu/research/fch)) hat eine geplante Laufzeit bis Ende 2017. Hauptthemen sind Grossdemonstrationsprojekte im Mobilitätsbereich inklusive Wasserstofflogistik sowie die Entwicklung eines standardisierten europäischen Brennstoffzellenstapels. Auf angewandte Forschung und Demonstration fokussiert sind die Aktivitäten im stationären Bereich. Zudem sollen vorteilhafte Marktbedingungen (Codes and Standards) aufgebaut und etabliert werden.

In der Industriegruppe mit 58 Firmen sind die Schweizer Firmen Hexis und HTceramix (SOFC Power) als Mitglieder dabei. Im *European Research Grouping* (NERGHY, [www.nerghy.eu](http://www.nerghy.eu)) ist die Schweiz durch die EMPA und das PSI vertreten. Über die *States Representatives Group* wird versucht, die Forschungsprogramme der einzelnen Länder einzubinden. Die FCH JTI versucht, die Zusammenarbeit mit einzelnen Regionen und Gemeinden zu verstärken, welche seit 2008 im Netzwerk HyRaMP *Hydrogen Regions and Municipalities Partnership* koordiniert sind ([www.hy-ramp.eu](http://www.hy-ramp.eu)). Aktuell gibt es hier noch keine Schweizer Beteiligung. Allgemein ist die FCH JTI im Berichtsjahr spürbar aktiv geworden. Neben dem Aufbau eines offiziellen Offices in Brüssel wurden auf der Basis des *Multi-Annual Implementation Plan 2008–2013* [33] zwei Ausschreibungen realisiert. In den Jahren 2008 und 2009 standen hierfür 28 bzw. 70 Mio. Euro zur Verfügung, 2010 werden es 90 Mio. Euro sein. Aus der Schweiz haben sich verschiedene Institutionen besonders im Brennstoffzellenbereich stark an den Ausschreibungen beteiligt. Von der ersten Ausschreibung 2008 her sind sechs Brennstoffzellenprojekte mit Schweizer Beteiligung am anlaufen (DEMMEA, Auto-Stack, NextHyLights, ROBANODE, GENIUS, ASSENT). In der zweiten Ausschreibung 2009 wurden acht Projekte mit Schweizer Institutionen als Partner oder Projektleader in einer ersten Evaluationsrunde gutgeheissen. Diese Projekte befinden sich jetzt in der Verhandlungsphase (FITUP, MobyPost, Asterix 3, Lotus, Ramses, SOFC life, SOFC design, Adel).

## EU-Forschungsrahmenprogramme

Schweizer Projektpartner beteiligten sich ebenfalls aktiv an Projekten aus den EU-Forschungsrahmenprogrammen. Im SOFC-Bereich laufen die Projekte *FlameSOFC*, *SOFC600* und *FCTESQA* aus dem 6. Rahmenprogramm mit Schweizer Beteiligung weiter. Im Wasserstoffbereich sind dies die Projekte *EU-SOLZINC*, *NESSHY*, *SOLHYCARB*, *NanoPEC* und *SOLARH2*.

## Pilot- und Demonstrationsprojekte

Demonstrationsprojekte in den Bereichen Wasserstoff und Brennstoffzellen sind aus Gründen hoher Investitionskosten und limitierter Verfügbarkeit von Wasserstoff schwierig zu realisieren. Trotzdem wurden im Berichtsjahr ein paar wenige Umsetzungsprojekte erfolgreich weitergeführt oder neu gestartet.

### Wasserstoff

Anfang 2009 konnte das im CCEM-Projekt *hy.muve* unter der Leitung der EMPA entwickelte Wasserstoff-Kommunalfahrzeug *Bucher CityCat H2* fertig gestellt werden, welches im Mai 2009 mit einem grossen medialen Echo der Öffentlichkeit präsentiert wurde ([www.empa.ch/hy.muve](http://www.empa.ch/hy.muve)). Ursprünglich geplant war ein erster Praxiseinsatz ab Mitte Jahr, allerdings wurde dieser auf Grund technischer Probleme auf Ende 2009 zurückgestellt. Insgesamt konnte das Fahrzeug lediglich einzelne Tage im Reinigungsbetrieb eingesetzt werden. Die wenigen Einsätze zeigten allerdings bereits, dass das Konzept von der Auslegung her gut funktioniert und die beabsichtigte Halbierung des Energieverbrauchs erreicht wird. Ebenfalls positiv zu werten ist, dass die Wasserstoff-Betankungsanlage von Messer Schweiz und die Gesamtfahrzeugregelung von Anbeginn weg sehr gut funktionierte (Fig. 13) [34].

Im Berichtsjahr wurde die Machbarkeitsstudie *Hydrogène dans les ports (H2port)* [35] an der HEIG-VD in Yverdon abgeschlossen. In dem Projekt wurden die Ressourcen evaluiert, welche für den verbreiteten Einsatz von mit Wasserstoff betriebenen Kleinbooten wie das *Hydroxy 3000* notwendig wären. Es konnte gezeigt werden, dass erst ab einem

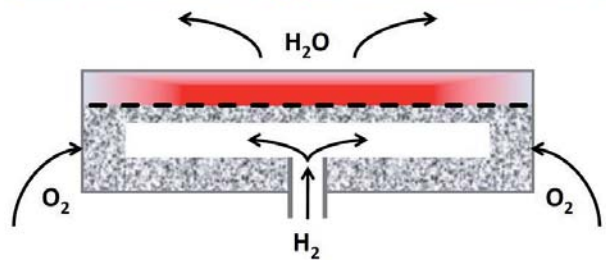
## Tagungen

Im Berichtsjahr fand in Luzern wiederum das internationale *European Fuel Cell Forum* statt. Die Zukunft dieses Anlasses ist momentan noch offen, es laufen jedoch Bestrebungen, diese wichtige Veranstaltung künftig weiterhin in Luzern durchführen zu können. Weiter fand im Frühjahr 2009 in Karlsruhe die sechste Ausgabe der vom BFE initiierten Symposiumsreihe *Fuel Cell Research Symposium: Modelling and Experimental Validation* mit reger Schweizer Beteiligung statt.

Wasserstoffverbrauch von mehr als  $500'000 \text{ Nm}^3$  ( $\sim 1.5 \text{ GWh}$ ) eine lokale Produktion im Hafen ökonomisch sinnvoll ist. Bei einer Antriebsleistung von  $9 \text{ kW}$  pro Boot würde dies einer Flotte von mehr als 800 Booten entsprechen, welche im selben Hafen betankt würde. Im experimentellen Teil des Projektes wurden kommerziell erhältliche Anlagen zur Produktion von Wasserstoff in kleinem Umfang



Figur 13: (oben) Wasserstoff-Kommunalfahrzeug «Bucher CityCat H2». (unten) Mobile Wasserstofftankstelle auf dem Werkhofareal in Basel [33]



Figur 14: In der an der EMPA entwickelten SELF-Raumzelle wird der überschüssige Strom aus der Photovoltaikanlage benutzt, um elektrolytisch Wasserstoff zu erzeugen, welcher in einem katalytischen Brenner zum Kochen benutzt wird. Durch die saisonale Energiespeicherung mit Wasserstoff wird eine grosse Autarkie erreicht [37, [www.empa.ch/self/](http://www.empa.ch/self/)].

getestet. Die Tests haben gezeigt, dass zurzeit auf dem Markt keine geeigneten Produkte vorhanden sind, um kleinere Mengen Wasserstoff über Elektrolyse und Druckspeicherung zu produzieren.

Ebenfalls im Berichtsjahr abgeschlossen wurde das an der Luzerner Hochschule für Technik & Architektur (HTA) durchgeführte Projekt zur unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) von GSM-/UMTS-Basisstationen der Swisscom mit Brennstoffzellen und Wasserstoffversorgung [36]. Insgesamt wurden bis im Juli 2009 seit Beginn des praktischen Teil des Projektes im Jahr 2006 rund 350 Start/Stops simuliert bzw. gemessen mit einer totalen Betriebszeit von 95 h. Sowohl bei geplanten wie auch ungeplanten (Unwetter) Unterbrü-

chen hat sich die USV-Anlage sehr gut bewährt und der Funktionsnachweis kann als 100 % zufrieden stellend gewertet werden. Die Hydrogenics-Brennstoffzelle zeigte im Laufe des Projektes (3 Jahre) eine zu erwartende Degradation von 3 % auf. Momentan ist ein Nachfolgeprojekt in Planung und es wurde zusammen mit europäischen Partnern ein entsprechender Antrag (FITUP) auf einen Call des *JTI Fuel Cell and Hydrogen* eingereicht.

An der EMPA wurde im Projekt *SELF* ein energieautarker Wohncontainer entwickelt, an welchem innovative Technologien und Materialien für Gebäudehüllen praktisch erprobt werden. Der Container wurde im Berichtsjahr fertig gestellt und an Ausstellungen der Öffentlichkeit präsentiert. Um eine energetische Langzeitautarkie zu erreichen, wird mit solarem Überschussstrom durch Elektrolyse Wasserstoff produziert, welcher in Metallhydriden zwischengespeichert und bei Bedarf zum Kochen benutzt wird. Bei dem dabei eingesetzten katalytischen Brenner, welcher aus einer Platin-beschichteten porösen Keramik besteht, wird Wasserstoff ohne zusätzliche Zündquelle verbrannt, wobei im Gegensatz zu fossilen Brennstoffen keinerlei schädliche Abgase entstehen (Fig. 14). Die Entwicklung des katalytischen Wasserstoffbrenners und die Anwendung von Wasserstoff als Langzeitspeicher im *SELF*-Projekt werden vom BFE unterstützt [37].

## Brennstoffzellen

Im Bereich der stationären Anwendung von Feststoffoxid-brennstoffzellen (SOFC) besteht auf Grund des grossen technologischen Fortschrittes (Robustheit und Langzeitstabilität) ein vermehrtes Interesse an Stapel höherer Leistungen von 2,5 bis 10 kW, welche nicht für Wärme-Kraft-Kopplungssysteme in Eigenheimanwendungen eingesetzt werden sollen, sondern eher für industrielle Anwendungen konzipiert sind. Aufbauend auf Arbeiten im europäischen Projekt *Flame-SOFC* arbeitet die Firma HTceramix in Yverdon in einem vom BFE unterstützten Pilotprojekt daran, einen bestehenden 2,5-kW-Stapel zu einem 5-kW<sub>er</sub>-System aufzuskalieren [38]. Hierzu wird in dem Projekt ein geeigneter Teststand aufgebaut und validiert, um die Leistungsmerkmale des aufskalierten Stacks unter verschiedenen Betriebsbedingungen testen zu können. Im Berichtsjahr wurde das Testsystem aufgebaut und mit einem 20-Zellenstapel von 1,85 kW betrieben und validiert.

Seit Ende 2008 läuft in Deutschland der breit angelegte Praxistest *Callux* ([www.callux.net](http://www.callux.net)) für

Brennstoffzellensystemen fürs Eigenheim. Am Projekt beteiligt sind diverse Energieversorgungsunternehmen und Hersteller sowie das deutsche Bundesbauministerium. Über einen deutschen Abnehmer kann sich die Firma Hexis hier als einer von vier Herstellern beteiligen (Baxi Innotech, Hexis, Vaillant und Viessmann). Insgesamt werden 800 Anlagen installiert und mindestens bis 2015 betrieben. Der Firma Hexis eröffnet dies die Möglichkeit, bis Ende 2012 mehr als 200 Brennstoffzellensysteme des Typs Gallileo 1000N auszuliefern und Praxiserfahrungen zu sammeln. Um die Serviceleistungen für die geographisch weit gestreuten Systeme gewährleisten zu können, ging Hexis eine Zusammenarbeit mit dem Heizungsunter-

nehmen Hoval ein. Mitte 2009 waren in der Schweiz, Deutschland und den Niederlanden insgesamt 17 Gallileo 1000N-Systeme und fünf HXS 1000 Premiere-Systeme in Betrieb. Kumuliert erreichten diese Anlagen 90'000 h Betriebsstunden und produzierten bis anhin 50 MWh Strom (DC).

Im Kanton Zürich befinden sich zwei verschiedene Projekte in Planung, bei denen jeweils eine Schmelzkarbonatbrennstoffzelle (MCFC) im Leistungsbereich 230 kW als Blockheizkraftwerk eingesetzt werden soll. Vorgesehen sind MCFC-HotModule der Firma MTU Onsite Energy mit elektrischen Wirkungsgraden bis 50 %. Geplant ist, dass die Anlagen im Jahr 2010 installiert werden.

## Bewertung 2009 und Ausblick 2010

Im Berichtsjahr konnten in verschiedenen Programteilen grosse Fortschritte beobachtet werden. Im Bereich der Forschung und Entwicklung seien hier insbesondere die herausragenden Resultate bei der photoelektrochemischen Produktion von Wasserstoff hervorgehoben, ein Themenbereich, welcher seit vielen Jahren ein Bestandteil des Forschungsprogramms *Wasserstoff* bildet und wo in den letzten Jahren durch zielgerichtete Forschungsplanung massive Verbesserungen – sechsfache Erhöhung des Photostroms in fünf Jahren – erzielt werden konnten. Weiter seien hier erwähnt: die Entwicklungserfolge im Bereich der Anoden-getragenen SOFC-Brennstoffzellen bei der Firma HTceramix, sowie die fundamentalen Beiträge und neuen Messmethoden am PSI zum besseren Verständnis der PEM-Brennstoffzellen.

Allgemein sind im Bereich Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnologie materialtechnische Fragestellungen weiterhin von grösster Wichtigkeit und bildeten daher auch im Berichtsjahr nach wie vor einen zentralen Bestandteil im Forschungsprogramm. Resultate aus diesen Forschungsaktivitäten tragen vorerst zum Erkenntnisgewinn bei und fliessen nur zum Teil direkt in bestehende Produkte ein, sind aber für die Weiterentwicklung der Technologie – Erhöhung der Lebensdauer und damit verbundene Kostenreduktion – unabdingbar.

Für die wenigen im Brennstoffzellenbereich tätigen Schweizer Firmen ist die Situation nach wie vor schwierig, da die Technologie heute auf dem Markt noch nicht wirklich konkurrenzfähig ist. Damit sich diese wenigen Firmen nachhaltig entwickeln kön-

nen, wird es in den kommenden Jahren nötig sein, diese Technologie schrittweise in Pilotmärkte einzuführen. Als kleines Land kann die Schweiz hier von Umsetzungsbemühungen im internationalen Kontext profitieren. Allgemein sind die Forschungskompetenzen hierzulande in diesem Bereich sehr hoch, was auch an der hohen Anzahl internationaler Projekte mit Schweizer Beteiligung abzulesen ist.

Im Bereich der Umsetzung konnte im Berichtsjahr in verschiedenen Projekten aufgezeigt werden, dass der Einsatz von Wasserstoff und Brennstoffzellen in gezielten Anwendungen bereits heute sinnvoll sein kann. Angesichts der eher knappen Förderungsmöglichkeiten der öffentlichen Hand und dem sinnvollen Ansatz, drängende energetische und ökologische Probleme nachhaltig durch die geeignetste Technologie angehen zu wollen, ist in den nächsten Jahren weiter Kreativität gefragt, um Nischen für Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnologie zu finden, wo keine tauglichen Alternativen vorhanden sind, und daher ein Einsatz der Technologie unter den bestehenden Kosten bereits heute möglich wäre.

Neben der fortlaufenden Unterstützung langfristig angelegter Kernprojekte soll im Jahr 2010 weiter versucht werden, die Vernetzung unter den diversen Akteuren zu intensivieren. Dabei scheint es wichtig, neben dem Erkenntnisgewinn verstärkt noch die aktuellen Forschungs- und Entwicklungsbedürfnisse der Industriepartner zu berücksichtigen.

## Referenzen

(JB) Jahresbericht

(SB) Schlussbericht

- [1] Deutsche Energie-Agentur: *Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie*, März 2005, Download: [www.offshore-wind.de](http://www.offshore-wind.de)
- [2] Weinmann O., Vattenfall Europe: *Wasserstoff aus Windenergie*, Oktober 2008.
- [3] Bundesamt für Energie, *Energieforschungsprogramme Brennstoffzellen und Wasserstoff für die Jahre 2008 bis 2011*, Januar 2008 ([www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)).
- [4] Bundesamt für Energie, *Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 bis 2011* ([www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)).
- [5] Züttel A. et al. ([andreas.zuettel@empa.ch](mailto:andreas.zuettel@empa.ch)), EMPA: *Neue Membranen für alkalische Elektrolyseure*, KTI-Projekt 8574.
- [6] Hydrogen Implementing Agreement der IEA, Task 24: *Wind Energy and Hydrogen Integration* ([www.task24.hidrogenoaragon.org](http://www.task24.hidrogenoaragon.org)).
- [7] Chappuis T. et al. ([thierry.cahppuis@hefr.ch](mailto:thierry.cahppuis@hefr.ch)), EIA-FR: *Développement d'un électrolyseur haute pression destiné à la production domestique d'hydrogène et d'oxygène* (JB).
- [8] Graetzel M. et al. ([michael.graetzel@epfl.ch](mailto:michael.graetzel@epfl.ch)), EPFL: *PEChouse: A Competence Centre Devoted to the Photo-electrochemical Splitting of Water and Production of Hydrogen* (JB).
- [9] Braun A. et al. ([arthur.braun@empa.ch](mailto:arthur.braun@empa.ch)), EMPA: *Synthesis and Assessment of Mixed Metal-Oxide Nanoparticles and Films for Solar Photo-Electrochemical Hydrogen Fuel Production* (JB).
- [10] Meier A. et al. ([anton.meier@psi.ch](mailto:anton.meier@psi.ch)), PSI: *Solar Thermal Production of Zinc* (JB).
- [11] Meier A. et al. ([anton.meier@psi.ch](mailto:anton.meier@psi.ch)), PSI: *Towards Industrial Solar Production of Zinc and Hydrogen – 100 kW Solar Pilot Reactor for ZnO Dissociation* (JB).
- [12] Züttel A. et al. ([andreas.zuettel@empa.ch](mailto:andreas.zuettel@empa.ch)), EMPA: *Hydrogen Storage in New Complex Hydrides* (JB).
- [13] Laurency G. et al. ([gabor.laurency@epfl.ch](mailto:gabor.laurency@epfl.ch)), EPFL: *Hydrogen storage in formic acid – high pressure hydrogen generator – power supply unit*, KTI Projekt 9777.
- [14] Züttel A. et al. ([andreas.zuettel@empa.ch](mailto:andreas.zuettel@empa.ch)), EMPA: *«Relevant Physical Aspects of Hydrides for System Integration and Safety»* (JB).
- [15] Yvon K. et al. ([klaus.yvon@unige.ch](mailto:klaus.yvon@unige.ch)), Universität Genf: *Hydrogen detectors and sensors for PEM fuel cell and electrolyser systems*, KTI-Projekt 9942.
- [16] Scherer G. et al. ([guenther.scherer@psi.ch](mailto:guenther.scherer@psi.ch)), PSI: *Protonen-Leitende Polymermembranen für Brennstoff- und Elektrolysezellen* (SB).
- [17] Gubler L. et al. ([lorenz.gubler@psi.ch](mailto:lorenz.gubler@psi.ch)), PSI: *Lebensdauer Limitierungen von Brennstoffzellen-Membranen: Mechanismen, Methoden und Innovationen* (JB).
- [18] Büchi F. et al. ([felix.buechi@psi.ch](mailto:felix.buechi@psi.ch)), PSI: *Gas-Analysis in Polymer Electrolyte Fuel Cells* (JB).
- [19] Gubler L. et al. ([lorenz.gubler@psi.ch](mailto:lorenz.gubler@psi.ch)), PSI: *Enhancing PEFC Durability and Reliability under Application-Relevant Conditions* (JB).
- [20] Höckel M. et al. ([michael.hoeckel@bfh.ch](mailto:michael.hoeckel@bfh.ch)), BFH-TI: *IHPoS-E, Modulares Brennstoffzellensystem*, KTI-Projekt 9376.
- [21] Büchi F. et al. ([felix.buechi@psi.ch](mailto:felix.buechi@psi.ch)), PSI: *Model Based Investigation of PEM Fuel Cell Performance with focus on Porous Layer Properties* (JB).
- [22] Büchi F. et al. ([felix.buechi@psi.ch](mailto:felix.buechi@psi.ch)), PSI: *X-Ray Micro-Tomography of Polymer Electrolyte Fuel Cells* (JB).
- [23] Mantzaras I. et al. ([ioannis.mantzaras@psi.ch](mailto:ioannis.mantzaras@psi.ch)), PSI: *Modeling of energy conversion processes at the micro-scale with application to PEFCs* (JB).
- [24] Höckel M. et al. ([michael.hoeckel@bfh.ch](mailto:michael.hoeckel@bfh.ch)), BFH-TI: *Ausbau des Teststandes für Wasserstoff-betriebene Brennstoffzellen* (JB).
- [25] Dietrich P. et al. ([philipp.dietrich@psi.ch](mailto:philipp.dietrich@psi.ch)), PSI: *Development of a 25 KW Hydrogen/Oxygen Fuel Cell system*, KTI-Projekt 10050.
- [26] Mai A. et al. ([andreas.mai@hexis.com](mailto:andreas.mai@hexis.com)), HEXIS: *Enhancing the Lifetime of SOFC Stacks for Combined Heat and Power Applications* (JB).
- [27] Mai A. et al. ([andreas.mai@hexis.com](mailto:andreas.mai@hexis.com)), HEXIS: *Accelerated Testing of SOFC-Components* (JB).
- [28] Luebbe H. et al. ([henning.luebbe@epfl.ch](mailto:henning.luebbe@epfl.ch)), EPFL: *Robust microtubular SOFC design by cheap processing and using a new material* (JB).
- [29] Ihringer R. ([info@fixell.com](mailto:info@fixell.com)), Fixell: *Development of a low cost and adaptive SOFC glass-free sealing* (JB).
- [30] Ihringer R. ([info@fixell.com](mailto:info@fixell.com)), Fixell: *A reliable anode supported thin electrolyte SOFC cell resistant to multiple thermal redox-cycles* (JB).
- [31] Fischer F. ([fabian.fischer@hevs.ch](mailto:fabian.fischer@hevs.ch)), HES-SO: *Technische Machbarkeitsstudie zur Rückgewinnung von Phosphat aus ausgefaultem Klärschlamm mit Hilfe einer mikrobiellen Brennstoffzelle* (JB).
- [32] Renz S. ([renz.btr@swissonline.ch](mailto:renz.btr@swissonline.ch)), Beratung Renz Consulting: *Market Outlook for stationary fuel cells* (SB).
- [33] FCH JU Governing Board: *Multi-Annual Implementation Plan 2008–2013*, Mai 2009 ([ec.europa.eu/research/fch](http://ec.europa.eu/research/fch))
- [34] Bach C. ([christian.bach@empa.ch](mailto:christian.bach@empa.ch)), EMPA: *Hydrogen driven municipal vehicle (hy.muve)* (JB).
- [35] Affolter J.-F. et al. ([jean-francois.affolter@heig-vd.ch](mailto:jean-francois.affolter@heig-vd.ch)), HEIG-VD: *Hydrogène dans les ports* (SB).
- [36] Trachte U. ([ulrike.trachte@hslu.ch](mailto:ulrike.trachte@hslu.ch)), HTA Luzern: *USV für GSM/UMTS-Basisstationen mit Brennstoffzellen* (SB).
- [37] Vogt U. et al. ([ulrich.vogt@empa.ch](mailto:ulrich.vogt@empa.ch)), EMPA: *Nachhaltige H<sub>2</sub> Synthese und Speicherung für die autarke Energieversorgung von SELF* (JB).
- [38] Autissier N. et al. ([nordahl.autissier@htceramix.ch](mailto:nordahl.autissier@htceramix.ch)), HTceramix: *5 kW SOFC Stack PowerTower Demonstration* (JB).