

Rapport de synthèse 2008 du chef de programme OFEN Synthesebericht 2008 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Brennstoffzellen und Wasserstoff

Andreas Luzzi, Michael Spirig und Stefan Oberholzer

andreas@luzzi.ch; m.spirig@fomonta.ch; stefan.oberholzer@bfe.admin.ch



Bucher CityCat 2020: Kommunalfahrzeug mit Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb

Auch in der Schweiz werden demnächst erste praktische Erfahrungen mit wasserstoffbetriebenen (H_2) Fahrzeugen mit Brennstoffzellen (FC) im Alltagsbetrieb gesammelt. Solche Fahrzeuge eignen sich insbesondere für den Einsatz an sensiblen Orten (Fussgängerzonen, Indoor), wo die Null-Emission dieser Fahrzeuge direkt erlebbar ist. Das Projekt hy.muve (www.EMPA.ch/hy.muve) wird von der EMPA geleitet und umfasst ein Konsortium aus verschiedenen Industriebetrieben. Von öffentlicher Seite wird das Projekt vom CCEM, verschiedenen Kantonen sowie dem Bundesamt für Energie unterstützt (Quelle: EMPA [28]).

Programmschwerpunkte

Der Energieträger Wasserstoff, vor allem wenn aus erneuerbaren Energien produziert, birgt in Kombination mit Brennstoffzellen als effiziente Energieumwandler ein grosses Potenzial zur Verringerung des globalen CO₂-Ausstosses und für eine nachhaltige Energieversorgung. Weltweit wurden im vergangenen Jahr diverse grosse Förderungsprogramme gestartet, um die Entwicklung von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien voranzutreiben und die Einführung in erste Nischenmärkte vorzubereiten. Die damit verbundenen grossen Herausforderungen sind im Wesentlichen:

- die effiziente Produktion und Speicherung von Wasserstoff;
- die Erhöhung der Lebensdauer sowie die Kostenreduktion der Brennstoffzellen.

In der Schweiz liegen die Schwerpunkte des Forschungsprogramms Brennstoffzellen und Wasserstoff in der angewandten Grundlagenforschung, insbesondere im Bereich der Materialforschung [1]. Neue Pilot- und Demonstrationsprojekte befinden sich im Moment in der Planungsphase. Die diversen Aktivitäten beider Programme gliedern sich in verschiedene Teilgebiete, deren Zielsetzungen sich nach den Vorgaben des *Konzepts der Energieforschung des Bundes für die Periode 2008 bis 2011* [2] richten.

Brennstoffzellen

Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEM-FC oder PEFC) für portable und mobile Anwendungen

Bei den PEM-Brennstoffzellen steht die Reduzierung der Kosten sowie Robustheit (Start-Stop) und Verfügbarkeit der Komponenten – was letztlich auch zur Erhöhung der Lebensdauer beiträgt – im Vordergrund. Im Berichtsjahr wurde die Optimierung von Polymerelektrolytmembranen weiter vorangetrieben. Gleichzeitig starteten neue Projekte, in denen Verfahren für die künstliche Beschleunigung der Degradation entwickelt werden. Auf diese Weise können die Mechanismen, welche für die Degradation verantwortlich sind, besser und gezielter untersucht werden. Ein weiterer Schwerpunkt bildete die Systemintegration von PEM-Brennstoffzellen und die Anwendung in Nischenmärkten wie z.B. in portablen Systemen.

Feststoffoxid-Brennstoffzellen (SOFC) für stationäre Anwendungen

Im Bereich der SOFC ist die Erhöhung der Lebensdauer für die praktische Anwendung ein zentraler Forschungsschwerpunkt. Im Berichtsjahr

wurden hierzu diverse grundlegende Forschungsarbeiten weitergeführt. Ähnlich wie im PEM-Brennstoffzellenbereich startete auch hier ein neues Projekt betreffend künstlicher Alterungsbeschleunigung von SOFC, um Degradationsphänomene kostengünstiger und systematischer untersuchen zu können.

Wasserstoff

Nachhaltige Wasserstoffproduktion

Die Arbeiten zur nachhaltigen Produktion von Wasserstoff konzentrierten sich im Berichtsjahr weiterhin auf die Forschung im Bereich der Materialien, welche für die photo-elektrochemische (PEC) Produktion von Wasserstoff durch Wasserspaltung in Frage kommen. Im Zentrum standen dabei die Weiterentwicklung von nanostrukturierten Photoanoden auf der Basis von Eisenoxid, inklusive deren Abscheidetechnik und die Auswahl der geeignetsten Trägermaterialien, sowie neue Herstellungstechniken für PEC-aktive komplexe Nanopartikel.

Effiziente Wasserstoffspeicherung

Der Schwerpunkt in diesem Teilbereich bildet nach wie vor die Forschung an komplexen Metallhydriden, welche als Feststoffkomplexe Wasserstoff effizient in ihrem Kristallgefüge speichern können. Im Mittelpunkt stehen dabei die Boronat-Verbindungen LiBH₄, die sich durch eine besonders gute Wasserstoffspeicherdichte auszeichnen. Im Berichtsjahr wurden intensive Untersuchungen durchgeführt, um die De- und Adsorptionskinetik dieser Materialien besser zu verstehen. Weiter wurde an sicherheitsrelevanten Fragen im Zusammenhang mit den Desorptionsprodukten und der Oberflächenreaktivität von komplexen Hydriden geforscht.

Zusätzlich zu den wissenschaftlichen und technischen Fokusaktivitäten verfolgt das Programm Brennstoffzellen und Wasserstoff weiter folgende Langzeitziele:

- Kontinuität der wissenschaftlichen Forschung und damit Generationen übergreifender Erhalt sowie Ausbau des Know-how;
- Unterstützung des Technologietransfers anhand von mehrstufigen Road-maps in Zusammenarbeit mit Industriepartnern;
- Verstärkte Vernetzung von Schweizer Forschungs- und Entwicklungsprojekten durch gezielte Förderung der aktiven Zusammenarbeit in nationalen und internationalen Gremien.

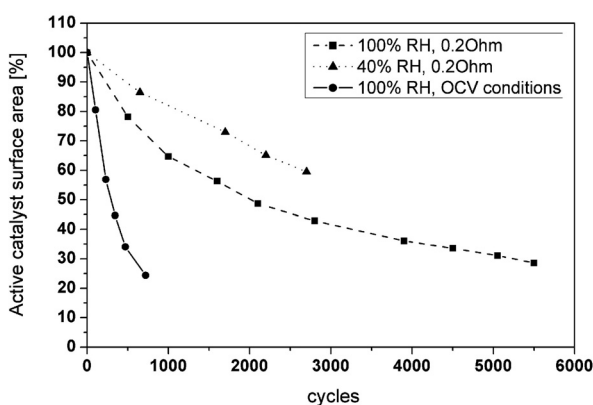
Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2008

Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen (PEM-FC) für portable und mobile Anwendungen

PEM-Brennstoffzellensysteme zeichnen sich durch eine kompakte Bauweise und durch eine hohe Leistungsdichte aus. Solche Systeme arbeiten bei relativ tiefen Temperaturen ($\sim 100^\circ\text{C}$), lassen sich schnell ein- und ausschalten und besitzen hohe elektrische Wirkungsgrade von bis zu 50 %.

Momentan steht die Weiterentwicklung der PEM-Brennstoffzelle für diverse Anwendungen von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen bis zu Fahrzeugantrieben im Vordergrund. Der wirtschaftliche Einsatz und die erfolgreiche Markteinführung von PEM-Brennstoffzellensystemen in den kommenden Jahren hängen allerdings stark von der Steigerung der Leistungsdichte und der Lebensdauer ab. Weiter braucht es kostengünstigere Herstellungsverfahren für die verschiedenen Komponenten der Zellen, der Elektrodenmaterialien (Katalysatoren) sowie des Brennstoffes (vornehmlich Wasserstoff oder Methanol) und den consequenten Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur.

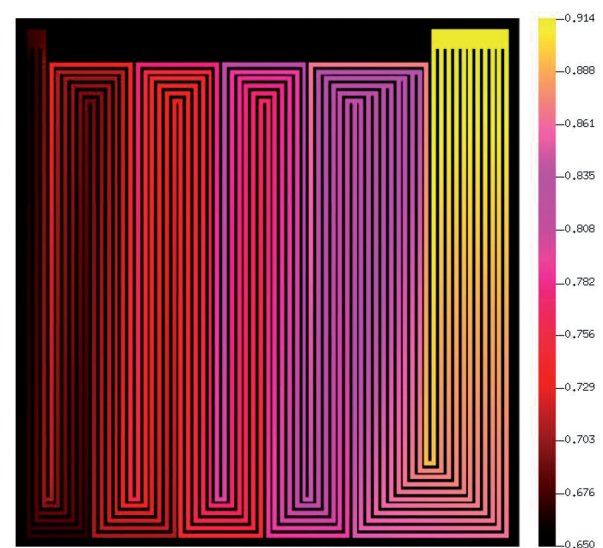
Federführende Grundlagen- und Entwicklungsarbeiten im Bereich PEM-Brennstoffzellen finden im Labor für Elektrochemie am Paul Scherrer Institut (PSI) statt. Im BFE-Projekt *Protonenleitende Polymerelektrolytmembranen für Brennstoff- und Elektrolysezellen* [3] wird an der Entwicklung verbesserter Protonen leitender Polymerelektrolytmembranen geforscht, welche in PEM-Brennstoffzellen und -Elektrolyseuren als kostengünstigere Alternative zu kommerziellen Produkten zum Einsatz kommen können. Speziell soll die Standzeit der Membran in Brennstoffzellen bei erhöhter Temperatur und unter zyklischen Bedingungen verbessert werden.



Figur 1: Einfluss der Betriebsparameter (Feuchtigkeit – RH; Last – Ohm) auf die Degradation von Polymer-Membranen durch Start-Stop-Zyklen. (Quelle: PSI, [5])

Durch die Methode der Strahlungs-pfropfung (radiation grafting) werden bestimmte Komponenten (funktionale Monomere) in einen Basis-Polymerfilm eingebaut, um damit der Membran eine Funktionalität wie z.B. Protonenleitfähigkeit zu verleihen. Im Projektteil *Herstellung* wurde im Berichtsjahr der Einfluss von Crosslinkern auf den Vernetzungsgrad der Membranen studiert. Um dabei die Kinetik des Pfropfungsprozesses besser zu verstehen, wurde ein physikalisches Modell weiterentwickelt, mit welchem der Einfluss verschiedener Reaktionsparameter quantitativ verglichen werden kann. Im Projektteil *Charakterisierung gepfropfter Filme* stand die Weiterentwicklung von spektroskopischen Methoden zur lokalen Strukturanalyse im Vordergrund. Es wurde gezeigt, dass der Pfropfungsgrad an der Oberfläche der Membranen deutlich höher ist als in deren Zentrum. Solche Informationen sind wichtig für das Verständnis sowohl der Funktion als auch der Degradation der Membranen. Weiter wurden verschiedene Eigenschaften (Leitfähigkeit, Ionenaustauschkapazität, Quellung) ex-situ untersucht und erste Langzeittests durchgeführt. Dadurch sollen mögliche Kandidaten für Langzeit-Brennstoffzellenversuche evaluiert werden.

Die Lebensdauer strahlungsgepfropfter PEM-Membranen wird in einer 2008 gestarteten Doktorarbeit am PSI im BFE-Projekt *Lebensdauer-Limitierungen von Brennstoffzellen-Membranen: Mechanismen, Methoden und Innovationen* [4] speziell untersucht. Zielsetzungen dieser Arbeit sind die Identifikation verschiedener Degradationsmechanismen sowie die Bestimmung der Schädigung.



Figur 2: Flussfeld einer Mikro-PEFC des PSI mit einer aktiven Fläche von 1 cm x 1 cm. Gemessen wurde der Verbrauch von Sauerstoff entlang des kathodischen Flussfeldes. (Quelle: PSI [6])

gungsrate in Abhängigkeit diverser Betriebsbedingungen und Membranzusammensetzungen. Die Quantifizierung solcher Degradationsprozesse erlaubt es, Alterungsversuche an Membranen beschleunigt durchzuführen und somit den Probenumsatz zu erhöhen. Die Innovationszyklen werden dadurch wesentlich verkürzt. Im Berichtsjahr wurden in einer ersten Messreihe am PSI hergestellte Membranen in Einzelzellversuchen bei Leerlaufspannung künstlich gealtert. Die gemessene Degradation nach 500 Betriebsstunden bei Leerlaufspannung ist mit bis zu 97 % sehr stark im Vergleich zu einer Degradation von 3 % bei hoher Stromdichte. Weiter konnte gezeigt werden, dass die Degradation stark inhomogen und hauptsächlich während den ersten 150 Stunden abläuft.

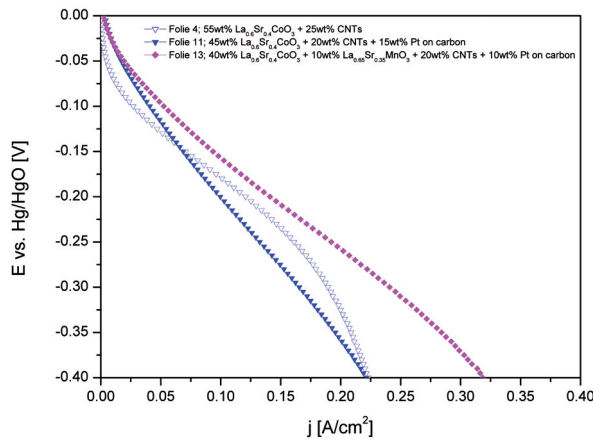
Neben den Herstellungskosten sind Alterungsprozesse sowie frühzeitiges Versagen elektrochemischer Komponenten eine allgemeine Problematik bei der Markteinführung der PEM-Brennstoffzellentechnologie. Diese Thematik wird, in zwei weiteren vom BFE mitfinanzierten Doktorarbeiten am PSI, im BFE-Projekt *go.PEF-CH: Enhancing PEFC Durability and Reliability under Application-Relevant Conditions* [5] untersucht (siehe Figur 1). Die Arbeiten erfolgen innerhalb des PEF-CH-Netzwerks in enger Zusammenarbeit mit der Berner Fachhochschule BFH-TI und der Schweizer PEM-Industrie (Ceka AG, Mes-Dea SA). Wichtigste Faktoren im Zusammenhang mit der Lebenszeitbeschränkung sind schnelle Laständerungen sowie häufige Start-Stop-Zyklen. Der Einfluss dieser beiden Faktoren auf die Lebenszeit wird mit neu entwickelten Diagnosemethoden erforscht. Im Berichtsjahr wurden erste Start-Stop-Zyklus-Experimente an einer Einzelzelle ausgeführt, wobei eine beträchtliche Schädigung der Kathode bei unkontrollierter Laständerung aufgezeigt werden konnte. Auf Seite der Industriepartner wurden am IPHoS (Integrated Hydrogen Power System)-Stapel der Firma Ceka verschiedene Designmodifikationen vorgenommen, um die Leistung und die Zuverlässigkeit im Betrieb zu erhöhen. Die Firma Mes-Dea hat einen 500-Watt-Stapel mit lokalen Stromkollektoren ausgerüstet, damit durch das PSI an diesem örtlich besser aufgelöst Reaktionen bei Laständerungen gemessen werden können.

Direkte experimentelle Untersuchungen an Brennstoffzellen sind auf Grund der Abgeschlossenheit des Systems nur beschränkt möglich. 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 sowohl Kosten als auch Entwicklungszeit eingespart werden können. Im BFE-Projekt *cal.PEF-CH: Model Based Investigation of PE-Fuel Cell Performance*

with Focus on Porous Layer Properties [6] des PSI und der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) werden Transportprozesse in PEM-Brennstoffzellen modelliert, insbesondere der Einfluss von flüssigem Wasser innerhalb der porösen Gas-Diffusionsschicht. Experimentell wird die Wechselwirkung zwischen flüssigem Wasser und Wasserdampf in den GDL-Materialien mit Hilfe der Röntgen-Mikro-Tomographie untersucht, wozu die Schweizer Synchrotronquelle SLS am PSI in Villigen genutzt werden kann. Im Berichtsjahr konnten erstmals der Wasseranteil in den GDLs auf der Skala der porösen Struktur (1 µm) aufgelöst werden. Die Porosität und die lokale Wassersättigung wurden für verschiedene Dicken der GDL als Funktion des Wasserdrucks untersucht. Im theoretischen Teil dieses Projektes wurde ein numerisches Modell für die Membran-Elektroden-Einheit und die Gas-Diffusionsschicht weiterentwickelt, um insbesondere die Limitierung des Massentransports bei hoher Last zu studieren. In einem zweiten Modell konnte das Verhältnis zwischen Kanal- und Rippenbreite in den Flussfeldern der Brennstoffzellen simuliert werden, welches einen grossen Einfluss auf die Funktionalität der Brennstoffzelle hat. Beide Modelle wurden erfolgreich auf reale Flussfelder angewendet, um damit Informationen über die räumliche Gas-, Wasser- und Stromverteilung zu erhalten (siehe Figur 2).

Bereits Ende 2007 abgeschlossen wurde das BFE-Projekt *Local Gas Analysis in PEFC During Accelerated Membrane Degradation*, welches ebenfalls am PSI durchgeführt wurde. In diesem Projekt wurde eine neue Methode entwickelt, um die Gaszusammensetzung in einer Brennstoffzelle lokal und während des Betriebes mittels Massenspektrometrie zu analysieren. Aufbauend auf den bisherigen Arbeiten wird die bestehende Methodik 2009 in einem Nachfolgeprojekt ausgebaut und gezielt auf das Verständnis der lokalen Gaszusammensetzung eingesetzt. Die Resultate können in die technischen Entwicklungsarbeiten für die Optimierung von Betriebsbedingungen und Zellstrukturen der Projekte am PSI einfließen. Die Methodik soll in Zukunft auch als Dienstleistung für den weltweiten Entwicklungsmarkt angeboten werden.

Im Berichtsjahr konnte das BFE-Projekt *New Highly Active Oxygen Reduction Electrode for PEM Fuel Cell and Zn/Air Battery Applications (Nora)* [7] an der EMPA abgeschlossen werden. Ziel dieses Projektes war die Steigerung der Effizienz der Sauerstoffreduktion an der Kathode, was entweder durch eine Erniedrigung der Aktivierungs- oder der Konzentrationspolarisation an der Elektrode erreicht werden kann. Hierzu wurden neue Elektrodenmaterialien, basierend

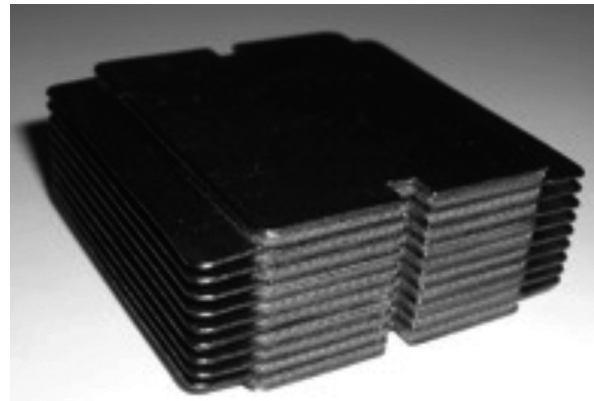


Figur 3: Strom-Spannungskennlinien von verschiedenen Elektroden, welche mit Carbon Nanotubes (CNTs) und Perovskiten verbessert werden konnten. (Quelle: EMPA [7])

auf Carbon Nanotubes (CNTs) und Perovskiten entwickelt, bei denen die auftretenden Überspannungen bei der Sauerstoffreduktion im Vergleich zu herkömmlichen Elektrodenmaterialien, aus Platin auf aktiviertem Kohlenstoff gesenkt werden konnten (siehe Figur 3).

Insgesamt wurden vier verschiedene Elektroden hergestellt und elektrochemisch charakterisiert. Die Leistungsfähigkeit der Elektroden ist – im Vergleich zum direkten Wachstum von CNTs auf den Perovskiten – höher, wenn CNTs und Perovskite im Ultraschallbad gemischt werden. Um die Aktivierungspolarisation bei kleinen Stromstärken möglichst gering zu halten, ist die Zugabe von geringen Mengen von Platin (Pt) unerlässlich. Durch den kombinierten Einsatz von CNTs, Pt auf Kohlenstoff und Perovskiten mit optimierter Stöchiometrie wurde eine neue Elektrode entwickelt, welche im gesamten Lastbereich eine geringere Polarisation aufweist und ausserdem wesentlich weniger Platin bedarf als eine konventionelle Vergleichselektrode aus Pt auf Kohlenstoff.

Die Brennstoffzellengruppe der Berner Fachhochschule BFH-TI in Biel konzentriert sich auf die Entwicklung und den Test von PEM-Brennstoffzellenstapeln und Brennstoffzellensystemen bis zu einer elektrischen Leistung von 1 kW. Im Hinblick auf die Weiterentwicklung des luftgekühlten IHPoS-Stapels der Firma Ceka AG wurde in Zusammenarbeit mit dem PSI im BFE-Projekt Erweiterung des BFH Testlabors für PEM-Brennstoffzellen [8, 9] ein Teststand für den Leistungsbereich zwischen 0,1 und 1 kW entwickelt und aufgebaut. Im Berichtsjahr wurde der Teststand mit IHPoS-Stacks in zwei Leistungsgrössen und von unterschiedlichem Entwicklungsstand erfolgreich in Betrieb genommen. Darüber hinaus wurden zwei Dauertests durchgeführt, in welchen ein stabiler Betrieb der IHPoS-Stacks über mehr als 3'000

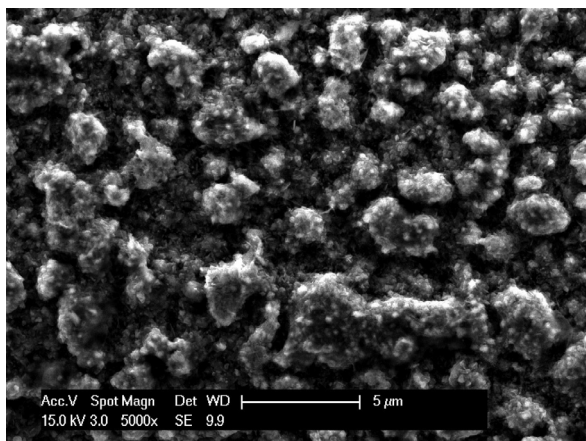


Figur 4: Miniatur-PEM-Brennstoffzellenstapel (25 W) für portable Anwendungen. (Quelle: BFH-TI [10])

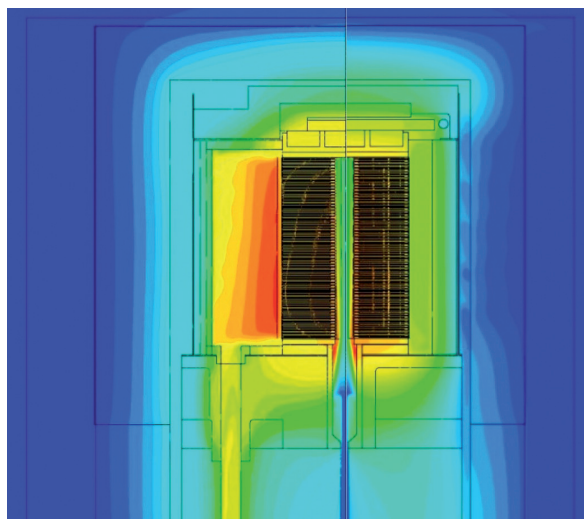
Stunden nachgewiesen und der Einfluss von CO-haltigem Wasserstoff dargestellt werden konnte.

Ebenfalls in der Brennstoffzellengruppe der BFH-TI wurde im Berichtsjahr eine Machbarkeitsstudie für ein PEFC-Ministapel im Leistungsbereich 100 W [10] durchgeführt. Anwendungsbereiche für solche Systeme finden sich im Bereich der portablen Elektronik im zivilen wie im militärischen Sektor. In diesem BFE-Projekt wurde ein Brennstoffzellenstapel im Bereich von 25 Watt entwickelt und erfolgreich getestet (siehe Figur 4). Material- und Fertigungskosten konnten dabei optimiert und stark reduziert werden. Gleichzeitig wurde am Managementzentrum der BFH in Bern eine begleitende Marktstudie durchgeführt. Die Studie bestätigte, dass ein hohes Verlangen nach Mobilität allgemein zunehmend höhere Anforderungen an Energiespeicher stellt. Herkömmliche Batterien wie auch moderne LiPo-Batterien seien hier teilweise den Anforderungen nicht gewachsen. Brennstoffzellen oder hybride Brennstoffzellen-Batteriensysteme wären möglicherweise in der Lage, diesen Bedarf zu abzudecken.

In einem Ende 2008 bewilligten KTI-Projekt der Firma Ceka AG [9] soll der erwähnte IHPoS-Stapel zu einem modularen 500-Watt-Brennstoffzellensystem für verschiedene Anwendungen weiterentwickelt und zur Marktreife gebracht werden. In diesem Projekt soll die gesamte Wertschöpfungskette vom zertifizierten Brennstoffzellensystem über die Wasserstoffspeicherung und -logistik bis zum Einsatz in einer speziellen Anwendung realisiert werden. Am Projektkonsortium beteiligt sind die Berner Fachhochschule, das PSI, die EMPA sowie fünf industrielle Partner. Als Pilotanwendung ist der Einbau eines solchen Stapels in eine mobile Minibar der Elvetino AG vorgesehen, welche in einer Testphase im praktischen Betrieb in Zügen der SBB zum Einsatz kommen soll.



Figur 5: Elektronenmikroskopaufnahme einer unter H₂/N₂-Atmosphäre geglühten Cu-Schicht auf Crofer-Stahl zum Schutz von SOFC-Innterconnects. (Quelle EPFL [12])



Figur 6: Modellierter Temperaturverteilung im Brennstoffzellen-System Galileo 1000 N von Hexis. (Quelle: ZHAW [11])

Das PSI ist im vergangenen Jahr ein Joint-Venture-Abkommen mit der Belenos Clean Power Holding in Biel eingegangen. Ziel des Projektes *Swiss Fuel Cell* ist die Entwicklung eines neuen Wasserstoff/Sauerstoff-Brennstoffzellensystems für einen Fahrzeugantrieb. Das Projekt ist Teil eines Mobilitätskonzeptes der Belenos Clean Power Holding, welches auf eine private Energieversorgung für den Individualverkehr ausgelegt ist mit verschiedenen Projekten im Bereich Photovoltaik, Wasserstoffherstellung und -speicherung.

Feststoffoxid-Brennstoffzellen (SOFC) für stationäre Anwendungen

Alle Brennstoffzellen sind energetisch attraktive Energiewandler auf Grund ihres hohen Wirkungsgrades. Im Vergleich zu andern Brennstoffzellentypen zeichnen sich Feststoffoxid-Brennstoffzellen (SOFC) durch die höchsten elektrischen Wirkungsgrade, der Möglichkeit, neben reinem Wasserstoff auch Ergas direkt nutzen zu können, sowie der anfallenden Wärme auf hohem Temperaturniveau aus. SOFC haben ihr Potenzial vor allem im stationären WKK-Bereich. Weitere potenzielle Applikationen kommen im Bereich der dezentralen Energieumwandlung – z.B. Auxiliary Power Units – hinzu. 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 Wärme-Kraft-Kopplungssystemen sollten SOFC-Stapel eine Mindestlebensdauer von 40'000 Stunden aufweisen. Die Materialdegradation als limitierender Faktor der Lebensdauer von SOFC wurde im Rahmen des EU-Projekts *REAL-SOFC* intensiv untersucht. Aus der Schweiz beteiligten sich hier die Firmen Hexis

AG und HTceramix SA sowie deren Forschungspartner EMPA und EPFL. Es konnte gezeigt werden, dass mit verbesserten Kathodenmaterialien und Metallbeschichtungen sowie mit Anoden-gestützten Zellen Degradationsraten unter 1 % pro 1'000 Stunden bei einer Betriebsdauer von mehr als 5'000 Stunden reproduzierbar erreicht werden. Verschiedene Stapel wurden über mehr als 10'000 Stunden getestet. Das Projekt *Real-SOFC* wurde im Herbst 2008 abgeschlossen. Die Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet werden im nationalen Projekt *Enhancing the Lifetime of SOFC Stacks for Combined Heat and Power Applications (SOF-CH)* [11] sowie im europäischen Era-Net-Projekt *Accelerated Testing of SOFC-Components (AccelenT)* [12] weitergeführt.

Das Projekt *SOF-CH* [11], welches von Swiss-electric Research und BFE gemeinsam unterstützt wird, vereint alle Schweizer Hauptakteure aus Forschung und Industrie im Bereich der SOFC (EPFL, EHTZ, ZHAW, Hexis AG und HTceramix SA). Angestrebt wird generell eine Erhöhung der Lebensdauer der SOFC-Zellenstapel. Das Projekt startete im Jahr 2007 und hat im Berichtsjahr zu ersten experimentellen Resultaten geführt. Ergänzt werden die experimentellen Arbeiten durch Modellierungen und Validationstests. Im Projektteil, der sich mit Degradationsphänomenen der Kathode beschäftigt, wurden auf keramischem Lanthan-Strontium-Manganoxid basierende Elektroden analysiert auf die chemische Wechselwirkung verschiedener Phasen, auf den Einfluss auf Prozessparameter wie die Sinter-Temperatur sowie auf physikalische Faktoren (Partikelgrösse, Schichtdicke). Ein weiterer Projektteil beschäftigt sich mit der Redox-Stabilität der Anode. Mikrostrukturelle Veränderungen in Nickel-basierten

Anoden sind hauptverantwortlich für deren Degradation, da u.a. das Netzwerk aus metallischen Körnern und Keramikmaterial thermodynamisch verhältnismässig instabil ist. Ein weiterer Projektteil erforscht die Verminderung von Degradation des Interconnect Materials u.a. durch metallische Coatings (siehe Figur 5). Im Berichtsjahr startete die systematische Untersuchung der Vergrößerung der Nickelpartikel als Funktion der Betriebsparameter. Im dritten Projektteil wurden Simulationstools entwickelt, um das elektrochemische Verhalten der Stapel sowie das thermische Gesamtmanagement studieren zu können. Das SOF-CH Konsortium ist ausserdem noch in das CCEM-Projekt *Wood-gas-SOFC* involviert. Bei diesem geht es unter anderem um die Untersuchung des Einflusses von Biogas auf die anodenseitige Degradation bei SOFC. Auch hier sind die Resultate viel versprechend.

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 mitunterstützt. Die europäischen Partner sind das Forschungszentrum Jülich und das Europäische Zentrum für Energieforschung Eifer (DE), das finnische Forschungszentrum VTT sowie die Industriepartner Plansee AG (AT) und Kerafol GmbH (DE). Ziel dieses Projektes ist es, beschleunigte Testverfahren für SOFC zu entwickeln, um die Degradation im Zeitraffer studieren zu können. Auf diese Weise können kostspielige Langzeitstudien minimiert werden (siehe Figur 6).

Weiter wurde im Berichtsjahr ein kleineres dreimonatiges BFE-Projekt *Simulationsunterstützung für die Weiterentwicklung von Stacks mit geringer thermomechanischer Belastung* [13] der Firma Hexis AG abgeschlossen. Darin wurden numerische Modelle entwickelt, um die Einflüsse von Designmodifikationen an den metallischen Interkonnektoren der Zellen sowie von Fertigungstoleranzen auf die thermomechanischen Eigenschaften des Stapels zu simulieren. Erkenntnisse aus diesem Projekt fliessen direkt in die Weiterentwicklung des Brennstoffzellenstapels von Hexis ein.

Im BFE-Projekt *System Reliability of a Product-Near CHP System Operating with a SOFC HoT-box* [14] der Firma HTceramix SA, des zweiten Schweizer Unternehmens im SOFC-Bereich, wurde in einer Wärme-Kraft-Kopplungsanlage der dänischen Firma Dantherm Power das von HTceramix entwickelte SOFC-System HoTbox erfolgreich getestet. Das System von Dantherm mit dem Stapel von HTceramix hat eine Nominalleistung von 500–100 Watt DC und wird mit entschwefeltem Erdgas betrieben. Für die Firma HTceramix ist dies ein weiteres wichtiges Beispiel

für die Integration ihres Produktes in Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen.

Ferner entwickelt HTceramix innerhalb des europäischen Projekts *Flame-SOFC* ein 2-kW-System für Wärme-Kraft-Kopplungsanwendungen und beteiligt sich am europäischen Projekt *SOFC600*, welches eine Senkung der SOFC-Betriebstemperatur auf 600 °C zum Ziel hat.

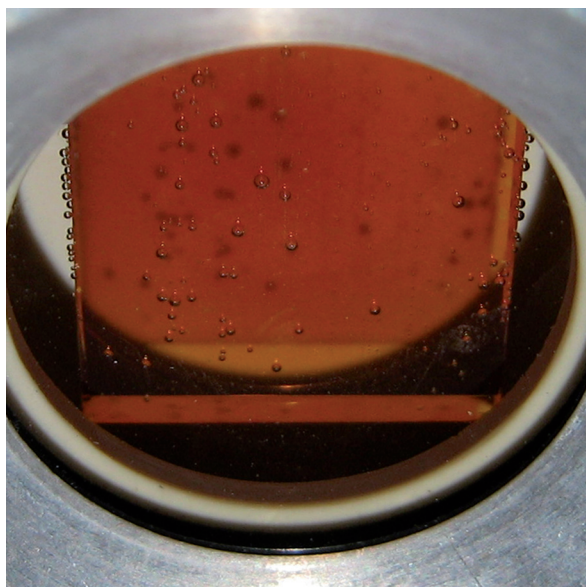
In dem von Swisselectric Research getragenen Projekt *Onebat* wird seit 2004 eine Miniatur-SOFC entwickelt. Ein solches Produkt könnte eine kostengünstige Alternative zu herkömmlichen Mini-Akkumulatoren für portable Anwendungen bieten. Das Projekt befindet sich momentan noch in einer grundlegenden Entwicklungsphase. Es ist geplant, einen ersten Demonstrator zu entwickeln, dessen Leistungsdaten danach kontinuierlich verbessert werden sollen.

Wasserstoff

Nachhaltige Wasserstoff-Produktion

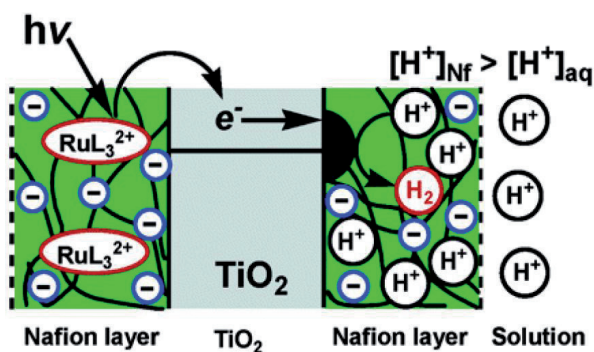
Im Rahmen des Projekts *PEChouse: A competence centre devoted to the photoelectrochemical splitting of water and production of hydrogen* [15] wurde 2007 an der EPFL ein Schweizer Kompetenzzentrum für Photoelektrochemie (PEC) eingerichtet, welches von der EPFL und dem BFE getragen wird. Allgemeines Ziel ist die Weiterentwicklung der direkten photoelektrochemischen Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff (siehe Figur 7). Hierbei besteht eine enge nationale Zusammenarbeit mit Forschungsaktivitäten an der Universität Basel und an der EMPA. Speziell sollen in dem Projekt neue Halbleiter-basierte PEC-aktive Materialien entwickelt werden, um langfristig einen Systemwirkungsgrad von 10 % für die Umwandlung von solarer Energie zu Wasserstoff zu erreichen. Im Berichtsjahr wurde an der EPFL viel Aufbauarbeit geleistet in der Bereitstellung von Techniken, Materialien und Gerätschaften, um die Weiterentwicklung der nächsten Generation PEC-Zellen voranzutreiben. Es wurden erste, viel versprechende Resultate mit einer neuen Abscheideanlage erreicht sowie leistungsfähige Substrat-Materialien für Eisenoxid Photoanoden identifiziert.

Im Projekt *NanoPEC, Nanostructured Photoelectrodes for Energy Conversion*, des 7. EU-Rahmenprogramms werden diese Forschungsaktivitäten intensiviert und auf Nanotechnologie-basierte Konzepte und Methoden ausgeweitet. Ziel des durch die EPFL geleiteten internationalen Forschungskonsortiums ist es, neuartige Komposit-Nanostrukturen zu schaffen, welche einstellbare Funktionalitäten aufweisen. Als Schweizer Partner beteiligen sich auch die EMPA.



Figur 7: Eisenoxid Photoanode, die unter Lichteinfall durch Wasserspaltung Sauerstoff generiert. (Quelle: EPFL [15])

Im abgeschlossenen BFE-Projekt *NefiosHydro: Nanocrystalline Electrodes Functionalized with Light Sensitized [2Fe-2S]-Iron-Sulfur Clusters for Hydrogen Production* [16] wurde an der Universität Basel eine neuartige, biomimetische Produktion von Wasserstoff mit aus Solarstrahlung erzeugten Protonen untersucht (siehe Figur 8). Die Protonen werden an der Kathode durch eine nanokristalline Elektrodenoberfläche mit lichtsensitiven Eisen-Schwefel Clustern generiert. Auf der Anodenseite erfolgt die katalytische Reduktion der Protonen zum Wasserstoffmolekül. Die Arbeiten dieses innovativen Projektes waren auf folgende drei Ziele ausgerichtet: Die Erzeugung einer nanokristallinen Oberfläche mit Eisen-Schwefel-Clustern, die Synthese geeigneter Ruthenium(Ru)-Komplexen und die Überwachung der Reduktion der Protonen zu Wasserstoffmolekülen bezüglich der angelegten negativen Vorspannung. In einer ersten Phase wurde die Struktur einer Serie von Prototyp-Komponenten mit Eisen-Schwefel-Clustern und Chromophoren für die Lichtabsorption untersucht und dabei festgestellt, dass die Komponenten extrem kurzlebig sind. Zur Steuerung der H_2 -Produktion wurde ein Zwei-Elektroden-System verwendet, wobei eine Elektrode mit Nafion- und Ru-Komplexen modifiziert wurde. Als eine der Hauptschwierigkeiten erwies sich die ungleiche Bedeckung mit Ru-Komplexen als Folge einer ungleichen Nafion-Schicht. Gegen Ende des Projekts konnten zwar die meisten Probleme bei der Herstellung der synthetischen Elektroden gelöst werden, die verwendeten Komponenten erwiesen sich jedoch nach wie vor als ungeeignet zur Herstellung von Wasserstoff ausserhalb von Laborbedingungen.



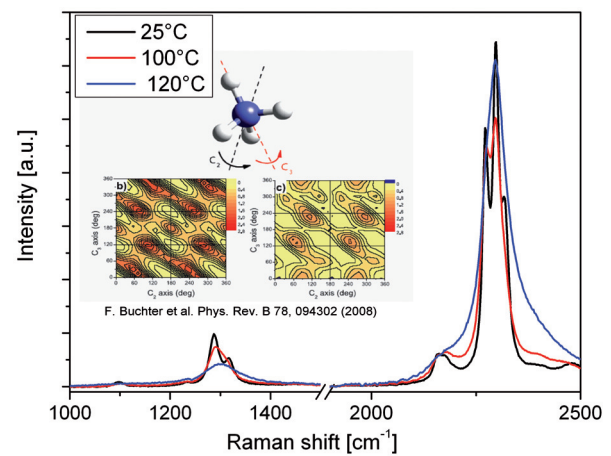
Figur 8: Zweielektrodensystem zur photosynthetischen Wasserstoffproduktion, basierend auf biomimetischen Protonenreduktionssystemen. (Quelle: Universität Basel [16])

Die EMPA baut in Dübendorf in Ergänzung und Synergie zu PEChouse am Labor für High Performance Ceramics eine weitere PEC-Kompetenzgruppe im Bereich der Materialsynthese, Pulverherstellung und Charakterisierung auf. Basis bilden vom Schweizer Nationalfonds (SNF), dem BFE, der EU sowie der EMPA intern unterstützte Projekte. Das Projekt *Fundamental Aspects of Photocatalysis and Photoelectrochemistry / Basic Research Instrumentation for Functional Characterization* [17] ist das Aufbauprojekt, in welchem die erforderliche Instrumentierung und Grundlagen für photoelektrochemische Experimente erarbeitet wurden. Im neu gestarteten Projekt *Synthesis and assessment of mixed metal-oxide nanoparticles and films for solar photo-electrochemical hydrogen fuel production* [18], welches in Synergie mit dem EU-Projekt *NanoPEC* läuft, werden eisenhaltige Keramik-Nanopartikel der Universität Basel und der Fachhochschule Nord-Westschweiz sowie die synthetische Hydrogenasen der EPFL untersucht. Hierzu werden Synchrotron-Röntgenspektroskopie und Multiplett-Simulation eingesetzt, so dass sich in Abhängigkeit von der Molekularstruktur des Photokatalysators dessen photokatalytischen Effizienz-Eigenschaften bestimmen lassen.

Effiziente Wasserstoff-Speicherung

Komplexe Metallhydride wie Boranat- ($LiBH_4$) oder Alanat-Verbindungen ($NaAlH_4$) haben ein grosses Potenzial als effizientes WasserstoffspeichermEDIUM mit theoretisch bis zu 18-Massenprozenten. Bevor diese Materialien jedoch zur breiten Anwendung kommen können, müssen die Adsorptions- und Desorptionsmechanismen sowie die Rolle der Katalysatoren wie Titan genauer bekannt sein. An der EMPA werden im BFE-Projekt *Hydrogen Storage in New Complex Hydrides (CompHy)* [19] diese Fragestellungen mit experimentellen Methoden in nationaler und internationaler Zusammenarbeit untersucht. Endziel die-

ses Projekts ist die detaillierte Beschreibung der Wasserstoffsorptionsreaktion zusammen mit den physikalischen Eigenschaften der Hydridkomponenten als Funktion der Wasserstoffkonzentration. In diesem Projekt wurden fünf Arbeitspakete (WP) definiert. Im WP1 wird die Rolle von Titan als Katalysator für die thermische Wasserstoffdesorption am Beispiel von NaAlH_4 eingehend untersucht, unter anderem mit weltweit einzigartigen Messungen an der Swiss Synchrotron Light Source des PSI. In WP2 geht es darum, die langsame Kinetik des Wasserstoffs in den Boronat-Verbindungen (LiBH_4) zu optimieren und die Temperaturen für die Bildung sowie die Dekomposition von Boronat herunterzusetzen (Figur 9). Hierzu wurden eingehende Raman-spektroskopische Untersuchungen durchgeführt, um die Stabilität der Hydride, d.h. deren elektronische Struktur und die dynamischen Eigenschaften des Pseudoatoms $[\text{BH}_4]$ – inklusive Substitution von Wasserstoff mit Deuterium (D) – zu untersuchen. Es wurden sehr gute Übereinstimmungen zwischen experimentellen und berechneten Strukturen in der Tief- und Hochtemperaturphase von LiBD_4 gefunden, woraus insbesondere die energetischen Rotationszustände des Ions $[\text{BH}_4]$ bestimmt werden können. Die Wasserstoffdiffusion im Gitter wird im WP3 mit Hilfe inkohärenter quasielastischer Neutronstreuung untersucht und ergänzt mit theoretischen Modellen aus dem WP5. Die experimentellen Arbeiten erfolgen an der kontinuierlichen Schweizer Spallationsquelle am PSI. Es konnte gezeigt werden, dass NaAlH_4 sich durch Bildung von AlH_3 Fehlstellen zersetzt, und dass LiBH_4 sehr ähnliche Desorptionsmechanismen besitzt. Dies birgt das Potenzial, dass eine effiziente Dotierung gefunden werden könnte, was ein wichtiger Durchbruch für die Wasserstoff-Speicherung bedeuten würde. Untersuchungsgegenstand im WP4 sind ferner die elektronischen Vibrationseigenschaften und die angeregten Zustände der komplexen Hydride NaAlH_4 und LiBH_4 . Hierzu wird international zusammen gearbeitet: Die notwendigen inelastischen Neutronenstreuexperimente (INS), welche ein interessantes dynamisches Verhalten des $[\text{BH}_4]$ -Anions zeigen, werden an der Isis-Infrastruktur des Rutherford Appleton Laboratory (UK) durchgeführt, die Raman-Streuexperimente an der Technischen Universität Braunschweig. Um die kompletten optischen Eigenschaften von Infrarot bis Ultraviolett zu untersuchen, wurde zusammen mit der Universität Amsterdam ein Glasfaserspektrometer entwickelt und erste Resultate generiert. Diese Arbeiten bilden den anerkannten Schweizer Beitrag zum IEA-HIA Task-22, Projekt *Fundamental and Applied Hydrogen Storage Materials Development*. Offen ist zurzeit, ob und wie eine Vernetzung und Kollaboration mit den langjährig erarbeiteten Metallhydrid-Grundlagen-



Figur 9: Spektren von Lithium-Boronat-Verbindungen (LiBH_4) als Wasserstoffspeichermaterial für Temperaturen um den Phasenübergang von 110 °C. (Quelle: EMPA [19])

Kompetenzen an der Universität Genf zur Erreichung von maximaler Qualität und kritischer Masse realisiert werden kann.

Komplexe Metallhydride wie LiBH_4 sind hoch reaktive Materialien und daher eine potenzielle Gefahrenquelle. Sicherheitsrelevante Fragestellungen zur Desorptionsprodukte und zur Oberflächenreaktivität sind daher die Themen des BFE-Projekts *Relevant Physical Aspects of Hydrides for System Integration and Safety (Safesyst)* [20], welches an der EMPA durchgeführt wird. Im Berichtsjahr wurden nach längerem Um- und Ausbau die experimentellen Analysetechniken in Betrieb genommen und erste Messungen durchgeführt. Durch die Thermodesorptionsspektroskopie konnte der Einfluss der Exposition von Alkaliborohydriden mit O_2 und H_2O sowohl auf die Desorptionstemperatur als auch auf die Desorptionsprodukte untersucht werden. Dabei wurde festgestellt, dass die Dosierung mit O_2 sowohl zu einer leichten Herabsetzung der Desorptionstemperatur als auch zu einer Reduktion der ungewünschten Diboran-Emissionen führt.

Mit dem eigens dafür aufgebauten Esca-Oberflächenanalysensystem kann dieser Effekt nun eingehender auf die zugrunde liegenden Mechanismen auf der Oberfläche untersucht werden. Erste Untersuchungen ergaben, dass die Oberflächenreaktivität von LiBH_4 mit O_2 wesentlich weniger stark als vermutet ist. Hingegen war die Reaktivität mit H_2O wie erwartet stark. International werden die Ergebnisse in den IEA-HIA Task-19 *Hydrogen Safety* eingebracht.

Unter dem Titel *Hydrogen as a future energy carrier* wurde von Prof. A. Züttel und Prof. L. Schlapbach (EMPA) sowie Dr. A. Borgschulte (ETH) in Zusammenarbeit mit anderen Autoren ein umfassender Überblick über das Wasserstoff-

Basiswissen und die Ansichten bezüglich der potenziellen und künftigen Entwicklungen der Wasserstoffwissenschaften und -technologien in gebundener Buchform publiziert. Das Buch gibt u.a. einen historischen Überblick über die beinahe 200-jährige Geschichte des Wasserstoffs und dessen spezielle Eigenschaften. Der Fokus liegt

beim Wasserstoffkreislauf, entsprechend werden Wasserstoffproduktion, die -speicherung und die Umwandlung von Wasserstoff in Strom, Kraft und Wärme detailliert behandelt. Zudem sind Kapitel über funktionalisierte Materialien und neuste Anwendungen enthalten [21].

Nationale Zusammenarbeit

Die nationale Zusammenarbeit von Projektnehmern konnte auch im Berichtsjahr 2008 innerhalb des Programms Brennstoffzellen und Wasserstoff weiter ausgedehnt und intensiviert werden. Nachfolgende Arbeitsnetzwerke bestehen bereits oder befinden sich momentan in Diskussion:

Wasserstoff-Produktion

- Photoelektrochemische Wasserspaltung mit Sonnenlicht: PEChouse;
- Hochtemperatur-Elektrolyse mittels Solarwärme, Geothermie oder Überschusswärme: HTE-CH (geplant).

Effiziente Umwandlung

- Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen: PEF-CH;
- Feststoff-Oxid-Brennstoffzellen: SOF-CH.

Verlustarme Speicherung

- Feststoffspeicher-Metallhydride: STOR-CH (geplant).

Hydropole www.hydropole.ch ist die nationale Wasserstoffvereinigung, in welcher die meisten Schweizer Akteure im Wasserstoff- wie auch im PEFC-Bereich aktiv beteiligt sind. Im Berichtsjahr erfolgten wieder diverse Vernetzungsaktivitäten von Hydropole. Dank der Initiative der EMPA wurde eine Neuauflage des *Hydrogen Reports Switzerland 08/09* lanciert, bei welchem die Wasserstoff-Forschungsaktivitäten der Schweiz speziell vorgestellt werden [22]. Hydropole war als Vertretung der Schweiz zudem bei internationalen Anlässen wie der Fuel Cell Expo in Tokyo (Februar 2008) sowie der World Hydrogen Energy Conference and Fair in Brisbane (Juni 2008) mit verschiedenen Exponaten präsent.

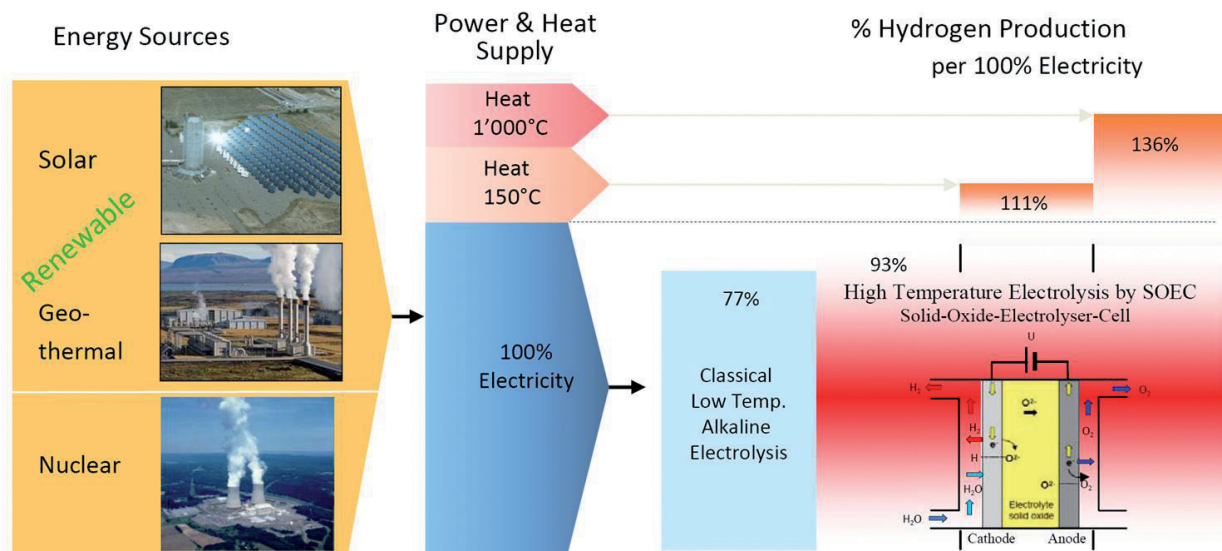
Ebenfalls unter der Leitung der EMPA fand im Januar 2008 in Braunwald das *2nd International Symposium Hydrogen & Energy* statt (www.empa.ch/h2e).

Im Bereich der PEC-Wasserspaltung verfügt die Schweiz dank der Initiative und der tatkräftigen Unterstützung des BFE und nicht zuletzt dank der Vorbereitungsarbeiten im abgeschlossenen

Projekt *PECNet: Aufbau eines CH Kompetenznetzwerkes für die solare Wasserspaltung mittels hybrider PV-PEC Zellen* [23] über eine national und international gut vernetzte, koordinierte und aktive institutionelle Forschungslandschaft. *PECnet* erreichte, dass relevantes Wissen für die nationalen und internationalen Fortsetzungsaktivitäten erhalten, ein nationaler PEC-Forschungsplan entwickelt und ein Schweizer PEC Kompetenz- und Forschungszentrum namens *PEChouse* (<http://pechouse.epfl.ch>) an der EPFL etabliert werden konnte. Projektfinanzierung und Forschungszusammenarbeiten konnten durch zusätzliche nationale (SNF), europäische (EU-FP7, Marie Curie) und internationale Projekte des Hydrogen Implementing Agreements der Internationalen Energie Agentur (IEA-HIA, Annex 26) signifikant gesteigert werden.

Als weitere Ausbauarbeit wurde in der Folge von PEChouse ein nationales Meeting *SwissPEC* organisiert, aus dem letztlich die Kollaborationen mit der EMPA und der Universität Basel resultierten.

Unter dem Acronym *HTE-CH: High-Temperature Electrolysis* hatte sich ein Schweizer Konsortium, bestehend aus Forschern von EMPA, EPFL, ETHZ, Hexis AG, HTceramix SA, Insultech AG und PSI gebildet mit dem Ziel, die Technologie der Hochtemperatur-Dampfelektrolyse (HotElly) weiterzuentwickeln (Figur 10). Die auf dem Konzept der Solid-Oxide-Electrolyser-Cell (SOEC) basierte Hochtemperatur-Wasser-Elektrolyse kann zur effizienten Wasserstoffproduktion aus Strom unter gleichzeitiger Nutzung von Überschusswärme zwischen 150 °C und 1'000 °C genutzt werden. Kombiniert mit der Umkehrreaktion als SOFC liesse sich in flacheren Regionen, wo keine Pumpspeicherkraftwerke möglich sind, mit überschüssiger Wärme und Strom eine effiziente Energiespeicherung realisieren. Ein entsprechendes Projekt *Swiss initiative of high temperature electrolysis for hydrogen production* wurde im dritten Call des CCEM des PSI lanciert. Eine viel versprechende Basis hierzu waren die neusten Erkenntnisse aus dem EU-Projekt *Hi2H2* (www.hi2h2.com). Das Thema SOEC wird im IEA-HIA Task-25 *High temperature hydrogen production process* international bearbeitet und in den



Figur 10: Hochtemperatur-Elektrolyse: Effiziente Wasserstoffproduktion aus Strom unter künftiger Ausnutzung von erneuerbaren Wärmequellen zwischen 150 und 1'000 °C. Ein HTE-CH-Netzwerk mit verschiedenen Schweizer Akteuren ist geplant. (Quelle: EMPA)

am Task beteiligten Ländern DE, FR, US, JP und KR spezifisch gefördert. Gegen Ende 2008 wurde ein erster Antrag zur Ko-Finanzierung durch das CCEM zurückgewiesen.

Im Bereich der Wasserstoffspeicherung sind nach wie vor Konzept-Diskussionen im Gange um die Schweizer Kompetenzen in einem kleinen Netzwerk (STOR-CH) zusammenzubringen. Die

Hauptakteure im Bereich Metallhydride arbeiten an der Universität Genf und der EMPA, unterstützt durch Messkompetenzen am PSI.

Eine wie bereits im Jahre 2007 erfolgreich durchgeführte, nationale BFE-Tagung der Programme Brennstoffzellen und Wasserstoff findet voraussichtlich Ende 2009 wieder statt.

Internationale Zusammenarbeit

Die Schweiz beteiligt sich seit 1990 aktiv am **Implementing Agreement (IA) Advanced Fuel Cells AFC** (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 19 Länder an diesem IA beteiligt.

Neben der Vertretung der Schweiz im Executive Committee des IEA-AFC durch das BFE beteiligt sich die Schweiz aktiv in Task-18 *Solid Oxide Fuel Cells* [24], vertreten durch die Firma HTceramix (Yverdon), sowie im Task-19 *Fuel Cells for Stationary Applications* [25], vertreten durch Thoma & Renz (Basel). In Task-19 leitet die Schweiz den Subtask-2 *Market Outlook*. Im Berichtsjahr ging die fünfjährige Phase des AFC-IA zu Ende; es soll für weitere fünf Jahre durch das Governing Board der IEA (CERT) bewilligt werden.

Der Task-18 wurde im Berichtsjahr abgeschlossen [24]. Im Juni 2008 wurde das Meeting von Task-18 in der Schweiz durchgeführt in Verbindung

mit dem *European Full Cell Forum* in Luzern. Die Firma HTceramix SA hat in den letzten vier Jahren die Schweizer SOFC-Akteure in diesem Task vertreten. Der besondere Wert dieser Plattform liegt darin, dass sie die einzige Möglichkeit für einen wirklich globalen Informationsaustausch über technische Entwicklungen im SOFC-Bereich bietet. Solche Informationen sind insbesondere wichtig im Zusammenhang mit neuen koordinierten Forschungsprojekten im europäischen Raum wie die Joint Technology Initiative (JTI) für Wasserstoff und Brennstoffzellen. Im Vergleich zu Teilnahmen bei öffentlichen Konferenzen fällt es insbesondere am Task-18 teilnehmenden börsenkotierten Firmen leichter, innerhalb dieses eher abgeschlossenen Rahmens Informationen über Entwicklungsfortschritte auszutauschen. Der Task soll in der neuen Phase des IA fortgeführt werden.

Der Fokus im Task-19 *Fuel Cells for Stationary Applications* [25], betrifft die Entwicklung und Implementierung von Brennstoffzellen für die stationäre Energieversorgung. Die in den möglichen Einsatzgebieten für Brennstoffzellen gestellten Anforderungen wie Kundenbedürfnisse, technische und

gesetzliche Rahmenbedingungen, Nachfrage- und Angebotssituation sowie die Konkurrenzsysteme werden in diesem Projekt untersucht. Daraus werden geeignete Märkte für Brennstoffzellen und dafür relevante Marktleistungen und Distributionsformen abgeleitet. Neben den technischen und wirtschaftlichen Herausforderungen, welche die Brennstoffzellen im Vergleich zu den Konkurrenzsystemen zu meistern haben, stellen die Energiemärkte grössere Hindernisse dar. Die Rahmenbedingungen in den Märkten für Strom- und für Wärmeherzeugung sind in den meisten Ländern grundlegend verschieden. Der Strommarkt wird in der Regel durch ein Oligopol weniger Anbieter mit grossen Produktionseinheiten dominiert, wogegen der Wärmemarkt stark diversifiziert ist und auch bei kleinsten Leistungen grosse Marktanteile vorliegen. Der Einsatz von Brennstoffzellen als Systeme, die Strom und Wärme produzieren, erfolgt im Spannungsfeld dieser sehr unterschiedlichen Marktvoraussetzungen. Der grosse Ersatz- und Zusatzbedarf an Produktionseinheiten im Strommarkt wird zudem vorwiegend durch Anlagen im Gigawatt-Bereich abgedeckt.

Die internationalen Brennstoffzellenexperten des Task-19 führten 2008 eine SWOT-Analyse durch und leiteten entsprechende und durch Markttrends bestätigte Strategien für die Implementierung stationärer Brennstoffzellen ab. Nur in Japan werden dank staatlich geförderten Projekten in grossen Stückzahlen ergasbetriebene Brennstoffzellen (PEFC) im Leistungsbereich von 1–5 kW eingesetzt. In Europa wird dagegen im untersten Leistungsbereich verstärkt auf die SOFC gesetzt. Bei den grösseren Anlagen (200–1'000 kW) dominieren die MCFC, die immer häufiger mit biogenen Brennstoffen (Klärgas, Biogas) betrieben werden. Ein «Revival» erlebt die Phosphorsäure-Brennstoffzelle PAFC vom US-Hersteller UTC. Von der für 2009 angekündigten neuen Version mit 400 kW elektrischer Leistung wurden bereits über 20 Stück bestellt. Wie in früheren Berichten dargestellt, wurde eine 200-kW-PAFC in einem Nahwärmeverbund in der Schweiz zwischen 2000 bis 2005 bereits erfolgreich pilotiert. Die Entwicklung von SOFC für höhere Leistungen wird weitere Zeit beanspruchen.

Im Berichtsjahr wurden ferner von der Programmleitung Kontakte mit Projektnehmern am PSI aufgenommen, um diese für eine Teilnahme am PEFC Task-16 des IA-AFC zu motivieren. Zur Abklärung der Teilnahme wird ein PSI-Vertreter als Observer am ersten Task-Meeting im Juni 2009 teilnehmen. Danach wird über eine Teilnahme zusammen mit dem BFE entschieden.

Das **Hydrogen Implementing Agreement** der IEA (www.ieahia.org) hat sich als Hauptplatt-

form der internationalen, vorkommerziellen Forschungszusammenarbeit im Bereich Wasserstoff fest etabliert. Die Schweiz beteiligt sich seit 1977 in diesem Implementing Agreement und ist mit entsprechenden Projekten in diversen Tasks aktiv. 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 und die Universität Genf; 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 (Nachfolge des Task-20) *Advanced Materials for Hydrogen Waterphotolysis*, vertreten durch die EPFL. Das Berichtsjahr zehnte sich durch den erfolgreichen Abschluss von Task-20 [26] unter der Leitung von Andreas Luzzi (HSR Rapperswil) und der Vorbereitungsarbeiten für den Nachfolge-Task-26 aus.

Das HyCo-Eranet endete im Herbst 2008. Insgesamt ergaben sich aus der Zusammenarbeit in HyCo-Eranet 7 transnationale Calls mit 7 geförderten Projekten (total 6 Mio. €). Weiter entstanden diverse Berichte, so zum Beispiel ein Überblick über die nationalen Programme und eine zusammenfassende Broschüre. Im Rahmen der Joint Technology Initiative (JTI) für Wasserstoff und Brennstoffzellen (FCH) wäre der Plattform HyCo-Eranet in den nächsten Jahren eine wichtige Rolle als Koordinationsstelle zwischen der JTI und den nationalen Programmen zugekommen. Diese Funktion übernimmt nun aber die neu gebildete States Representatives Group der JTI.

Seit April 2008 sind EU-weit auch die Regionen und Gemeinden im Netzwerk HyRaMP Hydrogen Regions and Municipalities Partnership koordiniert (www.hy-ramp.eu). Beim Abgleich mit FCH-JTI und der Koordination von Forschung und Demonstration auf Projektebene leistete das SPF der Fachhochschule für Technik Rapperswil wichtige Koordinationsarbeit. Aktuell sind jedoch keine Schweizer Akteure bei HyRaMP beteiligt.

Basierend auf den Vorarbeiten der Hydrogen and Fuel Cell Platform HFC der EU, und dem in diesem Gremium 2007 ausgearbeiteten Implementation Plan (IP) wurde 2008 von der EU-Kommission (EC) und der Industrie (European Industry Grouping, www.fchindustry-jti.eu) die *Fuel Cell and Hydrogen Joint Technology Initiative* mit einer geplanten Laufzeit bis Ende 2017 lanciert (www.hfpeurope.org/hfp/jti). Unter der Führung europäischer Firmen und der EC, mit Schweizer Beteiligung in der Management Crew, wurden das JTI-Umsetzungskonzept sowie die Forschungs- und Demonstrationsprogramme erarbeitet. Un-

ter anderem resultierten daraus der Multi-Annual Implementation Plan (MAIP) 2008–2013, in welchem neben den quantifizierten Zielen 2010 und 2015 bis auf Projektebene die Themen mit Beschreibung und Budget ausgearbeitet wurden. Die Schwergewichte von MAIP liegen unter anderem in den folgenden Bereichen:

- Grossdemonstration von einigen 100 Fahrzeugen inklusive Betankungsinfrastruktur;
- Koordinierte Zusammenarbeit für einen europäischen Brennstoffzellenstapel für den Mobilitätsbereich;
- Entwicklung und Demonstration von nachhaltiger Produktion, Speicherung und Verteilungsmethoden von Wasserstoff;
- Demonstrationsprojekte im stationären Bereich;
- Early Market: Demonstration und Verbreitung von «Back-up Power»-Systemen, unterbrechungsfreien Stromversorgungen (USVs) und tragbaren Stromversorgungsprodukten sowie von Industrie-Fahrzeugen mit Fokus auf Material Handling (Gabelstapler);
- Aufbau und Etablierung von vorteilhaften Marktkonditionen (Codes and Standards).

Der MAIP wurde vom Governing Board der FCH-JTI angenommen. Ausgehend vom Konzept des MAIP wurde der Annual Implementation Plan (AIP) 08 abgeleitet. Davon ausgehend wurde im Oktober 2008 von der EC ein erster FCH-JTI Call mit einem Volumen von 28,1 Mio. € lanciert. Von Schweizer Seite beteiligten sich das PSI, die HTA Luzern sowie Akteure aus dem SOF-CH-Netzwerk an entsprechenden Projektkonsortien. Die Evaluation der Anträge findet in der ersten Hälfte 2009 statt. Ein zweiter Call mit ca. 70 Mio. € Funding

soll 2009 lanciert werden. Themen werden unter anderem sein: Katalysatoren für die Reformierung von Kohlenwasserstoffen, Gasreinigungsprozesse, Hochtemperatur elektrolyse, feste und flüssige Wasserstoffspeicherung, Wasserstoffinfrastruktur, Demonstration von Brennstoffzellenfahrzeugen und verbesserte PEFC-Komponenten.

Auf Ebene der BFE-Programmleitung war die Schweiz 2008 neben der Mitarbeit in der IEA an diversen Konferenzen, Workshops und Diskussionsrunden beteiligt und hat solche zum Teil auch finanziell unterstützt. Speziell zu erwähnen sind dabei die *Fuel Cell Expo* in Tokyo im Februar 2008, die *World Hydrogen Energy Conference and Fair* in Brisbane im Juni 2008, das internationale *Lucerne Fuel Cell Forum* im Juli 2008, die *FCH-JTI General Stakeholder Assembly* im Oktober 2008 und die Treffen der *FCH-JTI States Representatives Group*.

Die im Jahr 2004 vom BFE ins Leben gerufene Symposiumsreihe *Fuel Cell Research Symposium Modelling and Experimental Validation* wurde auch im Berichtsjahr erfolgreich fortgeführt. Das fünfte Symposium wurde mit Unterstützung des BFE an der ZHAW Winterthur im März 2008 [6, 27] durchgeführt. Ursprünglich nahmen an diesem Workshop vor allem Forscher aus Deutschland und der Schweiz teil, wobei im Berichtsjahr die internationale Beteiligung mit Beiträgen aus zehn verschiedenen Ländern wesentlich stärker war. Bedeutsam ist ebenfalls die aktive Beteiligung von Industrievertretern (General Motors, Bosch, Daimler AG, Siemens, Toyota sowie diverse KMUs). 2009 ist das sechste Symposium vom DLR Stuttgart und der Uni Karlsruhe organisiert und im Frühling 2010 ist geplant, dass das siebte Symposium an der EPFL statt findet.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Brennstoffzellen

Im SOFC-Bereich hat die Firma Dantherm auf der Basis einer HotBox der Firma HTceramix das Demonstrationsystem *Asterix* für Wärme-Kraft-Koppelung (WKK) aufgebaut und praxisrelevante Leistungseigenschaften im Labor demonstriert (siehe Figur 11 links). Im Jahr 2009 wird angestrebt, ein 500-W-System einem praxis-relevanten, repräsentativen Langzeittest zu unterziehen. Die erforderliche Anzahl Prüfstände ist bei der Mutterfirma SOFCpower in Trento (Italien) im Aufbau.

Im Demonstrationsbereich engagiert sich weiterhin die Firma Hexis AG mit ihrem «Galileo 1000 N»-System sehr stark (siehe Figur 11 rechts). Unter anderem konnte sich Hexis über den deutschen

Ableger Hexis GmbH an dem nationalen Innovationsprogramm für Brennstoffzellen und Wasserstoff beteiligen. Hier konnten Galileo-Systeme für praktische Anwendungstests geliefert werden.

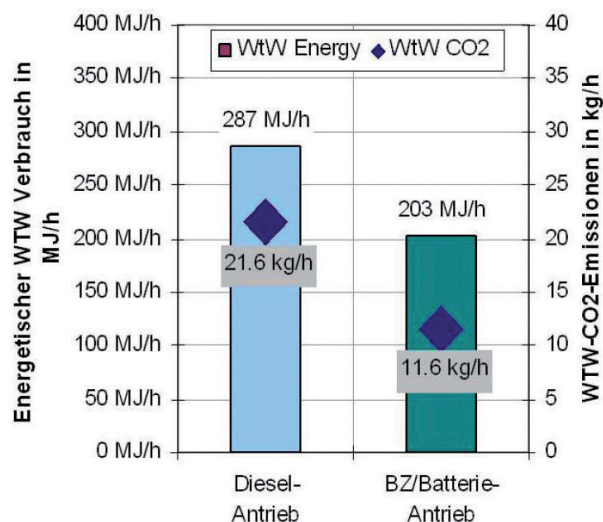
Im Demonstrationsbereich konzentriert sich die Brennstoffzellengruppe der BFH in Biel weiter auf die Entwicklung und Demonstration von PEM-Brennstoffzellenstapeln und Brennstoffzellensystemen bis zu einer elektrischen Leistung von 1 kW für Mobilitätsanwendungen (Projekte: Sam I, Sam II (hybrid) und PEM-Scoot). Ein weiteres Demonstrationsprojekt ist Teil des von der KTI unterstützten Projekts für die Weiterentwicklung des IHPoS-Stapels mit einer Anwendung in einer mobilen Minibar der Elvetino AG.



Figur 11: Links: WKK-Demonstrationssystem Asterix der Firma Dantherm auf der Basis eines HTceramix/SOFCpower-Brennstoffzellenstacks (Quelle: HTceramix [14]). Rechts: WKK-Gerät «Galileo 1000 N» der Firma Hexis AG. (Quelle: Hexis, [13])

Im CCEM-Projekt *Hydrogen driven Municipal Vehicle (hy.muve)* [28], welches vom BFE mitunterstützt wird, wird in einem Projektkonsortium bestehend aus der EMPA, dem PSI und den schweizerischen Industriepartnern Bucher Schörli AG, Brusa AG und Messer Schweiz AG ein Brennstoffzellenantrieb für ein Kommunalfahrzeug entwickelt. Der Antrieb wird anschliessend im Rahmen einer eineinhalbjährigen Praxiserprobung hinsichtlich seines Alterungsverhaltens unter realen Umgebungsbedingungen getestet. Dabei werden die grundsätzliche Eignung für den Einsatz in solchen Fahrzeugen und sozio-ökonomische Fragestellungen untersucht (siehe Figur 12). Damit kann in der Schweiz ein weiterer Folgeschritt mit Wasserstoffantrieben «vom Labor auf die Strasse» gemacht werden.

An der Luzerner Hochschule für Technik & Architektur (HTA) wurde im BFE-Projekt *Fortsetzung Feldtests USV für GSM-Basisstationen mit BZ* [29] ein Prototyp einer Anlage zur unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) mit Brennstoffzellen entwickelt und in Betrieb genommen. Um das verzögerte Anfahrverhalten der Brennstoffzelle zu überbrücken wurden Superkapazitäten integriert. In einem ersten Projekt wurde das Brennstoffzellen-System an eine reale Telekommunikationsbasisstation (GSM-Antenne der Swisscom) angeschlossen und im Feldtest für den Zeitraum eines Jahres erprobt. Aufgrund der guten Ergebnisse und um Erfahrungen zum Langzeitverhalten der Brennstoffzelle zu gewinnen wird dieser Feldtest im aktuellen Projekt bis Mitte 2009 fortgesetzt. Der Feldtest umfasst monatliche Stromausfallsimulationen bei einer realen Antennenlast von ca. 2,4 kW sowie Tests



Figur 12: Vergleich des energetischen «Well-to-Wheel» (WtW)-Verbrauchs und der WtW-CO₂-Emissionen für ein Kommunalfahrzeug basierend auf konventionellem Dieselantrieb (Verbrennungsmotor) respektive auf Brennstoffzellen-Batterie-Hybridantrieb versorgt mit Wasserstoff aus Erdgas. (Quelle: EMPA, [28])

mit externer Last bis 8,5 kW. Die Ergebnisse der bisher rund 300 Stromausfallsimulationen mit einer Gesamtlauzeit der Brennstoffzelle von ca. 75 Stunden sind positiv zu bewerten. Die Brennstoffzelle startete 100 % zuverlässig, wobei eine leichte Degradation der Brennstoffzelle festgestellt wurde. Das Projekt findet in Zusammenarbeit mit den Industriepartnern Swisscom (Schweiz) AG als Anwender von USV-Anlagen im Telekommunikationsbereich und APC Industrial Systems als Hersteller von USV-Anlagen statt.

In der *Konzeptstudie für eine Energieversorgung mobile Basisstation Polycorn mit BZ* [30] wurde der Einsatz eines kommerziell erhältlichen Brennstoffzellensystems für die Energieversorgung einer mobilen Basisstation für das Funknetz Polycorn evaluiert. Ziel war es, die Entscheidungsgrundlage für den Bau zu erarbeiten. Hierzu wurde das System hinsichtlich Systemeignung, Systemreife und Kosten beurteilt, mögliche Brennstoffversorgungen evaluiert, und geprüft, wo der Energiebedarf des Gesamtsystems optimierbar ist.

Wasserstoff

Demonstrationsprojekte in den Bereichen Wasserstoff und PEM-Brennstoffzellen sind aus Gründen hoher Investitionskosten und limitierter Verfügbarkeit von Wasserstoff generell schwierig zu realisieren.

Ein ursprünglich von der Universität Fribourg im Zusammenhang mit einem Pistenfahrzeug-Pilot-Projekt der «Swiss Alps 3000» entwickeltes Metallhydrid-Wasserstoffspeichersystem steht nach wie vor im praktischen Einsatz. Aktuell ist dieses Speichersystem in ein mit Wasserstoff betriebenes

nes Touristenboot in der Stadt Birmingham im Einsatz.

Ein tragender Baustein für die künftige Umsetzung von Wasserstoffproduktionsprojekten ist die Verfügbarkeit von entsprechenden Elektrolyseuren. Im industriebasierten KTI-Projekt *Neue Membranen für alkalische Elektrolyseure (NMAE2)* [31] von IHT und EMPA werden Ersatzmaterialien für die nur noch bis Ende 2008 (!) erlaubten Asbestdiaphragmen für alkalische Druckelektrolyseure erforscht, neue Membranen aufgebaut und ihre Einsatzfähigkeit geprüft.

Im Projekt *Hydrogène dans les ports (H2port)* [32] der HES-SO in Yverdon wird der Einbau von Brennstoffzellensystemen in kleinere Ausflugsboote untersucht. Ziel des Projektes ist die richtige Dimensionierung von Wasserstofftankstellen und von H₂-Tanks in den Booten. Hierzu wurde ein Rechenprogramm entwickelt, welches die Dimensionierung einer Gesamtanlage betreffend Kosten einer Wasserstofftankfüllung, Grösse des notwendigen Elektrolyseurs, Reichweite des Bootes und weiteren wichtigen Parametern erlaubt. Zum Thema Öko-Mobilität auf Gewässern wurde ein Fragebogen an 110 Instanzen (Industrien, Vereine,

Gemeinden, Bootsbauer) versendet. Die Hauptaussagen der retournierten Fragebogen waren: Eine Mehrheit ist sich der Gewässerverschmutzung durch Motorboote bewusst und kennt sowohl elektrisch betriebene Boote als auch die Brennstoffzellentechnologie. Auch die Vorteile der elektrischen Navigation (keine Abgase, weniger Lärm) wurden als sehr positiv bewertet und viele wären auch bereit, ein Brennstoffzellenboot zu kaufen. Da der Kaufpreis jedoch mangels Marktreife und kommerziell erhältlicher Produkten weitestgehend unbekannt ist, hat letztere Aussage nur eine geringe Aussagekraft.

Neben den oben erwähnten Demonstrationsprojekten im Bereich PEM-Brennstoffzellen, welche auch für die Wasserstofftechnologie relevant sind, werden momentan verschiedene weitere Demonstrationsprojekte angedacht, wobei diese zum Teil nur geringe Realisierungschancen aufweisen. Aufgrund der Fülle von Ideen ist geplant, ein BFE-Pilot- und Demonstrationsprojekt im Bereich der gesamten Energiekette Wasserstoff gezielt zu planen und zu realisieren, in Zusammenarbeit mit verschiedenen Schweizer Akteuren.

Bewertung 2008 und Ausblick 2009

Der Anfang des Berichtsjahr 2008 war auf Programmebene geprägt durch die Vorstellung des Detailkonzeptes 2008-2011 vor der Commission de la Recherche (CORE) sowie deren positives Evaluierungsergebnis. Für die Themen Wasserstoff und Brennstoffzellen heisst das, dass es nach wie vor eine klare, offizielle Unterstützung gibt, welche im Fall von zukünftigen, generellen Budgetaufstockungen auch finanziell ausgebaut würde.

Von Analyse und Vorgaben des Detailkonzeptes ausgehend, versuchte die Leitung des BFE Forschungsprogramms Brennstoffzellen und Wasserstoff im Berichtsjahr 2008 folgende Schwachpunkte weiter zu verbessern: (a) geringe Beteiligung der Privatwirtschaft, (b) mangelnde Umsetzung in Prototypen, (c) Information und (d) Akquisition von zusätzlichen Finanzierungspartnern. Rückblickend kann festgestellt werden, dass diesbezüglich dank der Unterstützung des BFE Programms und insbesondere dank der qualitativ hochstehenden Arbeit der Projektnehmer selbst signifikante Fortschritte erreicht werden konnten. Konkrete Ergebnisse sind:

- a. Privatwirtschaft: Start der Brennstoffzellen-Entwicklungsprojekte PSI/Belenos sowie EMPA/BFH/Ceka/elvetino; Fortsetzung der USV-Brennstoffzellen-Demo-projekte HTA/Swiss-

com/APC; Aufbau des industrienahen Brennstoffzellen-Testlabors BFH/ PSI;

- b. Prototypen: Ausbau von Hexis AG Richtung Deutschland; gemeinsamer Aufbau des WKK Demonstrator-Systems Asterix von HTceramix und Dantherm; Machbarkeit des BFH Ministapels; Ausbau des hy.muve -Projektes durch Unterstützung des BFE-P&D-Programms;
- c. Information: Guter Austausch und verstärkte Kommunikation mit und unter den Projektnehmern dank Reviews, Projekt-Set-up Meetings und Vertragspartnerbesuche seitens der Programm- und Bereichsleitung; Beteiligung in IEA Forschungsprogrammen, starke Beteiligung an nationalen und internationalen Konferenzen und Ausstellungen (CH, EU, JP, AU); Mitarbeit bei EU-FCH-JTI und ERANet; Allgemein intensiver internationaler Informationsfluss in und durch die Schweiz; und
- d. Akquisition: Erweiterung der finanziellen Unterstützung von PEChouse (EU-NanoPEC); verschiedenste Eingaben in EU-FCH-JTI durch Industrie und Forschung; verstärkter Miteinbezug verschiedenster Förderstellen (SNF, KTI, CCEM, Swisshelvetia Research).

Trotz einer ansehnlichen Liste von Erfolgen sind für 2008 auch einige Misserfolge zu berichten.

So wurden beispielsweise einige EU-FCH-JTI Anträge mit Schweizer Beteiligung sowie Projekte beim CCEM und der KTI aus verschiedenen Gründen abgewiesen. Es muss auch festgestellt werden, dass die industrielle Basis in der Schweiz nach wie vor sehr dünn ist und einzelne Themen wie Wasserstoffspeicherung noch unterkritische Ressourcen und optimierbares Zusammenarbeitspotenzial haben.

Als Ausblick für das Jahr 2009 seien als wichtigste Ziele genannt:

- Fortlaufende Unterstützung laufender und viel versprechende Kernprojekte sowie der tragenden Projektnehmer-Konsortien;
- Ausrichtung der Forschungsaktivitäten weiterhin auf die Anforderungen der Industrie;
- Unterstützung von Grundlagenprojekten (Dissertationen) als Wissens- und Innovations-Generatoren und als Sicherung von künftigen Kompetenzträgern (Ausbildung);
- Verstärkte Zusatzfinanzierungen durch öffentliche, private und institutionelle Förderer sowie durch EU-Projekte;
- Fortführung und Ausbau der P&D Projektaktivitäten.

Auf dieser Basis soll weiter die Priorisierung und Realisierung von Teilen aus folgendem EU-nahem Zielkatalog hingearbeitet werden: Beteiligung an Grossdemonstrationen mit Brennstoffzellen-Fahrzeugen und Betankungs-Infrastruktur, Zusammenarbeit für einen Europäischen Automotive- Brennstoffzellenstapel, Entwicklung und Demonstration von nachhaltiger Wasserstoff Produktion, Speicherung und Verteilung, Demonstrationsprojekte im stationären Bereich, sowie die Einführung der Technologie in Pilotmärkte.

International betrachtet war das Jahr 2008 in Europa geprägt durch den Start der Joint Technology

Initiative für Brennstoffzellen und Wasserstoff, ein gemeinsames Programm der Europäischen Union zusammen mit der Industrie zur Markteinführung der Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnologie in den kommenden Jahren. Ähnlich grosse Programme existieren bereits in den USA und Japan. Weltweit engagiert sich die Industrie stark insbesondere im Bereich Mobilitätsanwendungen der Brennstoffzellentechnologie. So hat Honda 2008 weltweit zum ersten Mal die Serienproduktion eines Brennstoffzellen-Fahrzeugs (FCX Clarity) aufgenommen. Neben Honda sind es insbesondere die Autohersteller Opel / GM und Daimler, welche sich in diesem Bereich stark machen. Es besteht hier ein allgemeiner Konsens, dass sich für elektrisch betriebene Fahrzeuge Batterien und Brennstoffzellen langfristig ergänzen werden. Reine Batteriefahrzeuge wären theoretisch die effizienteste Lösung, die sich jedoch nur für einen Teil der gesamten Fahrzeugflotte realisieren lässt. Die Anwendung von Wasserstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen hat langfristig gute Perspektiven, wenn alle technischen Parameter, Infrastruktur-aspekte wie auch Kundenanforderungen an die Leistungsparameter mitberücksichtigt werden.

Auf Seite Infrastruktur wurden im Jahr 2008 weltweit 15 neue Wasserstoff-Tankstellen in Betrieb genommen. Die Gesamtzahl stieg damit auf 175 Tankstellen, wobei weitere 108 Tankstellen sich in Planung befinden. In Europa gibt es verschiedene Bestrebungen, transnationale Autobahnen mit einem Wasserstoff-Tankstellennetz auszurüsten.

Zusammenfassend ist global gesehen im Moment viel in Bewegung im Bereich Brennstoffzellen-/ Wasserstofftechnologie. Die Schweiz kann auf Grund der hervorragenden Kompetenzen hierzulande weiter einen Beitrag leisten, sowohl im Bereich Forschung wie auch vermehrt noch im Bereich der Umsetzung in Pilot- und Demonstrationsprojekten.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2008 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

(siehe www.recherche-energetique.ch).

- [1] Bundesamt für Energie, «Energieforschungsprogramme Brennstoffzellen und Wasserstoff für die Jahre 2008 bis 2011», Januar 2008, Download: www.energieforschung.ch.
- [2] Bundesamt für Energie, «Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 bis 2011», April 2007, Download: www.energieforschung.ch.
- [3] Scherer G. (guenther.scherer@psi.ch), PSI, Villigen: «Protonen-Leitende Polymere Membranen für Brennstoff- und Elektrolysezellen», (JB).

- [4] Scherer G. et. al. (guenther.scherer@psi.ch), PSI, Villigen: «Lebensdauer Limitierungen von Brennstoffzellen-Membranen: Mechanismen, Methoden und Innovationen», (JB).
- [5] Gubler L. (lorenz.gubler@psi.ch), PSI, Villigen: «Enhancing PEFC Durability and Reliability under Application-Relevant Conditions» (go.PEF-CH), (JB).
- [6] Büchi F. (felix.buechi@psi.ch), PSI, Villigen: «Model Based Investigation of PEM Fuel Cell Performance with focus on Porous Layer Properties» (Cal.PEF-CH), (JB).
- [7] Thiele D. und Züttel A. (andreas.zuetzel@empa.ch), EMPA, Dübendorf: «New Highly Active Oxygen Reduction Electrode for PEM Fuel Cell and Zn/Air Battery Application» (NORA), (SB).

- [8] Höckel M. (hkm1@bfh.ch), Hochschule für Technik und Informatik, Biel: «Erweiterung des BFH Testlabors für PEM Brennstoffzellen», (SB).
- [9] Höckel M. (hkm1@bfh.ch), Hochschule für Technik und Informatik, Biel: «IHPoS: Independent-Hydrogen-Power-System», Nr 7700.1 EPRP-IW.
- [10] Fumey B. (benjamin_fumey@kastanet.org), Privat, Steffisburg: «Machbarkeitsstudie für ein PEFC-mini-Stapel im Leistungsbereich bis 100 W» (HYP), (SB).
- [11] Sfeir J. (josef.sfeir@hexis.com), HEXIS AG, Winterthur: «Enhancing the Lifetime of SOFC Stacks for Combined Heat and Power Applications» (SOF-CH), (SB).
- [12] Sfeir J. (josef.sfeir@hexis.com), HEXIS AG, Winterthur: «Accelerated Testing of SOFC-Components» (AccelenT), (JB).
- [13] Sfeir J. (josef.sfeir@hexis.com), HEXIS AG, Winterthur: «Simulationsunterstützung für die Weiterentwicklung von Stacks mit geringerer thermomechanischer Belastung», (SB).
- [14] Hoffmann J. (jan.hoffmann@htceramix.ch), HTceramix SA, Yverdon: «System Reliability of a Product-Near CHP System Operating with a SOFC Hotbox™», (SB). Dieses Projekt ist einer der Schweizer Beiträge zum EU-Projekt REAL-SOFC.
- [15] Sivula K. und Graetzel M. (Michael_graetzel@icp.dc.epfl.ch), EPFL, Lausanne: «PEChouse: A Competence Centre Devoted to the Photoelectrochemical Splitting of Water and Production of Hydrogen», <http://pechouse.epfl.ch>, (JB).
- [16] Constable E. (Edwin.Constable@unibas.ch), Universität, Basel: «Nefios-Hydro: Nanocrystalline Electrodes Functionalized with Light Sensitized [2Fe2S] Iron-Sulfur Clusters for Hydrogen Production» (Nefios), (SB).
- [17] Braun A. et al. (arthur.braun@EMPA.ch), EMPA, Dübendorf: «Fundamental Aspects of Photocatalysis and Photoelectrochemistry / Basic Research Instrumentation for Functional Characterization», (JB Kurzfassung).
- [18] Braun A. et al. (arthur.braun@EMPA.ch), EMPA, Dübendorf: «Synthesis and Assessment of Mixed Metal-Oxide Nanoparticles and Films for Solar Photo-Electrochemical Hydrogen Fuel Production», (JB Kurzfassung).
- [19] Züttel A. et al. (andreas.zuettel@EMPA.ch), EMPA, Dübendorf: «Hydrogen Storage in New Complex Hydrides» (COMPHY), (JB).
- [20] Züttel A. et al. (andreas.zuettel@EMPA.ch), EMPA, Dübendorf: «Relevant Physical Aspects of Hydrides for System Integration and Safety» (SAFSYS), (JB).
- [21] Züttel A., Schlappbach L., et al., «Hydrogen as a Future Energy Carrier», Wiley-VCH, 2008, ISBN: 978-3-527-30817-0.
- [22] Züttel A. et al., (andreas.zuettel@EMPA.ch), EMPA, Dübendorf: «Hydrogen Report Switzerland 08/09».
- [23] Spirig M. und Luzzi A. (info@PECNet.org), SPF-HSR, Rapperswil: «PECNet - Aufbau eines Schweizer Kompetenznetzwerkes für die solare Wasserspaltung mittels hybrider PV-PEC Zellen», (SB).
- [24] Bucheli O. (olivier.bucheli@htceramix.ch), HTceramix SA, Yverdon: «Participation of Switzerland in IEA Implementing Agreement, Annex XVIII (SOFC)» (SB).
- [25] Renz S. (renz.btr@swissonline.ch), THOMA+RENTZ, Basel: «Market Outlook for Stationary Fuel Cells», (SB).
- [26] Luzzi A. (andreas@luzzi.ch), «Hydrogen from Water-Photolysis», Final Report IEA-HIA Task-20, www.ieahia.org.
- [27] Schumacher J. et al., ZHAW, Winterthur: «5th Fuel Cell Research Symposium on Modelling and Experimental Validation», Proceedings verfügbar [ModSym], 11.-12. März 2008, www.ccp.zhaw.ch.
- [28] Bach C. (Christian.Bach@EMPA.ch), EMPA, Dübendorf: «Kommunales Brennstoffzellenfahrzeug, CCEM Projekt» (HyMuve), 2008.
- [29] Trachte U. (utrachte@hta.fhz.ch), HTA, Luzern: «Fortsetzung Feldtests USV für GSM-Basisstationen mit BZ», (JB).
- [30] Trachte U. (utrachte@hta.fhz.ch), HTA, Luzern: «Konzeptstudie für eine Energieversorgung mobile Basisstation Polycom», (SB).
- [31] Züttel A. et al. (andreas.zuettel@EMPA.ch), EMPA, Dübendorf: «Neue Membranen für alkalische Elektrolyseure», KTI Projekt 8574.
- [32] Affolter JF. (jean-francois.affolter@hieg-vd.ch), HES-SO, Yverdon: «Hydrogène dans les Ports» (H2port), (SB).

Impressum

Juni 2009

Bundesamt für Energie BFE

CH-3003 Bern

Druck: Ackermanndruck AG, Bern-Liebefeld

Bezug der Publikation: www.energieforschung.ch

Programm- und Bereichsleiter

Dr. Stefan Oberholzer

Bundesamt für Energie BFE

CH-3003 Bern

stefan.oberholzer@bfe.admin.ch