

Rapports de synthèse des chefs de programme OFEN Überblicksberichte der BFE-Programmleiter 2006

PROGRAMM BRENNSTOFF- ZELLEN INKL. WASSERSTOFF

Andreas Luzzi / Michael Spirig

PLeitungHFC@hsr.ch

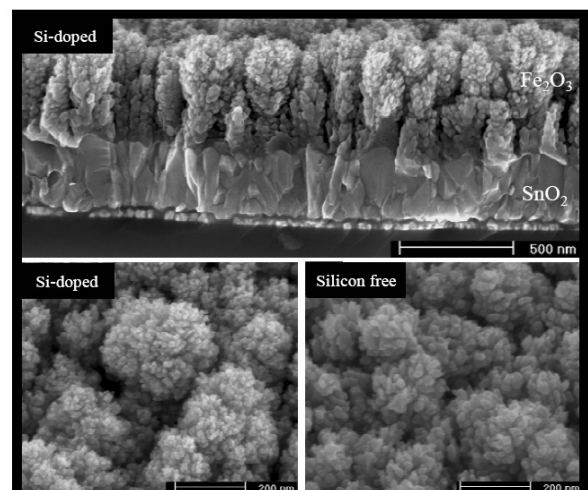


Nach fünfjähriger Betriebsdauer: Das „Aus“ für die 200kW ONSI-Brennstoffzelle in Birsfelden

Mit ihren über 36'000 Betriebsstunden lieferte das ONSI PC25C-Brennstoffzellensystem, heute UTC Purcell, wertvolle Erfahrungen im Betrieb und der Integration von Brennstoffzellen in einem der grössten schweizerischen Wärmeverbundnetz [28]. Die Behebung der technischen Probleme und Revision der Brennstoffzelle sowie der Komponenten, welche im Zusammenspiel zum Wärmeverbund stehen, hätten nun eine grössere Kapitalinvestition erfordert. Dies führte bei der Alternativ-Energie-Birsfelden AEB zum, auch für die internationale Brennstoffzellen Community, bedauerlichen „Aus“ Entscheid.

Brennstoffzellen- und Wasserstoff-Forschung im gleichen BFE Programm – Materialtechnologien als einer der Schlüssel zum Erfolg

Im 2006 wurden die Brennstoffzellen- und Wasserstoff-Forschung im gleichen BFE Programm erfolgreich vereint. In beiden Bereichen sind neben den anwendungsorientierten Aktivitäten besonders materialtechnische Grundlagen einer der Schlüssel zum erwarteten Erfolg. Als Beispiel sei genannt: Die erfolgreiche Anwendung neuer Depositionsverfahren zur Erzeugung Si-dotierter, nanokristalliner Fe_2O_3 -Filme, welche eine signifikant höhere Effizienz bei der photoelektrochemischen Wasserspaltung PEC bewirken [13].



Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Mit den laufenden Projekten in den Bereichen der Festoxyd- (**SOFC**) und der Polymer-Brennstoffzellen-Technologie (**PEFC**) sowie Wasserstoff folgt das Programm den im Energieforschungskonzept 08-11 des Bundes vorgegebenen Schwerpunkten.

Die Projektarbeiten befassen sich bei den **Brennstoffzellen** mit Fragen wie:

- Steigerung der Lebensdauer und Zuverlässigkeit der Zellen und Stacks und damit der Systeme.
- Systemintegration in Nischenmarkt-Anwendungen mit den Zielen „Ausbau des erforderlichen Know-hows“, „produktreife Abstimmung der Komponenten“ und „Proof of Concept“ (PoC).
- Verfügbarkeit, resp., Lieferbarkeit der spezifizierten, leading-edge-Kernkomponenten für verschiedenste Anwendungen zu konkurrenzfähigen Preisen.
- Kostensenkungen in der ganzen Wertschöpfungskette und -Prozessen d.h. bei den Materialien, den Komponenten, dem System und der Integration zur Anwendung.

Konkret werden bis 2008 folgende Werte* angestrebt:

- Zuverlässigkeit: Unterbruchsfreier Betrieb: > 1 [h] / 200 [h] (PEFC/SOFC)
- Lebensdauer: Degradation um max. 20%: > Mobil 250 [h], Stationär 1500 [h]
- Investitionskosten für die Brennstoffzelle: < 5'000 – 15'000 [EURO/kW]

Im Bereich **Wasserstoff** sind die behandelten Themenkreise:

- **H₂-produktionsmethoden** auf der Basis von erneuerbaren Energien, nämlich:
 - Optimierung der Hochdruckelektrolyse im Hinblick auf die Wasserkraftstärken der Schweiz
 - Umsetzung der in der Schweiz patentierten Tandemzellenphotoelektrolyse Entwicklung
 - Grosstechnische Demonstration von solarthermochemischen Metalloxidreaktionen
- **H₂-speicherung** mittels Metallhydriden:
Angestrebt wird die Entwicklung von neuen Materialien und Systemen mit Anwendungsfokus im Mobilitäts- und Stationärbereich

Konkret werden bis 2008 folgende konkreten Entwicklungsschritte* angestrebt:

- H₂-Produktion:
 - Wasserkrafterelektrolyse 20-35 [€/kg H₂]
 - Tandemzellenphotoelektrolyse Funktionsmuster als PoC mit einer Netto Solar-zu-Wasserstoff Effizienz STH von >4% Metalloxidreaktion 3 MW Demonstrator
 - Solarthermochemische Realisierung von 3 neuen (Metallhydrid-) Materialien
- H₂-Speicherung:
- Nischenmarktanwendung
 - Mobile Systeme 2 Demonstratoren
 - Stationäre Systeme 5 Demonstratoren

*Als Erreicht gelten die Ziele, wenn für diese international vergleichbaren Werte garantiert werden könnte, respektive Materialien und Demonstratoren mit entsprechenden Funktionalitäten vorliegen.

Längerfristig werden folgende Ziele angestrebt:

Analog der Umsetzungsstrategie der EU-Technologieplattform HFP für Wasserstoff und Brennstoffzellen sollen Einstiegsmärkte bei portablen Anwendungen bis 2010, bei stationären Anwendungen bis 2015 und in der Mobilität bis 2020 geschaffen werden. Die analogen Fragestellungen werden - mit unterschiedlicher Gewichtung - auch in den entsprechenden IEA-Implementing Agreements (AFC, HIA) und innerhalb der HFP-Plattform der EU mit Priorität behandelt.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2006

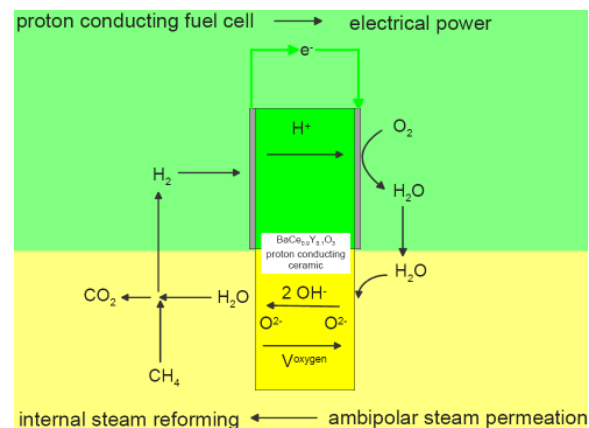
BRENNSTOFFZELLENTECNOLOGIE

ERDGAS-SOFC-BRENNSTOFFZELLEN

Das EU-Projekt **REAL SOFC** [1] visiert die Reduktion der Materialdegradation in SOFC Zellen und Stacks mittels besserer Kathodenmaterialien und Beschichtungen. Insbesondere sind Langzeittests (>3000 h) an SOFC-Stacks notwendig, um die Gründe der bisher aufgetretenen zu kurzen mittleren Lebensdauer (≈ 2500 h) zu analysieren. Als wesentlicher Grund für die ungenügende Stack-Lebensdauer wurde die inhärente Schwäche der anodengestützten Zellen hinsichtlich Reoxidations-Bedingungen identifiziert. Dies ist eng mit dem bisher üblichen R-Design des Stacks verknüpft, der eine offene Nachverbrennungszone aufweist. Daher wurde, parallel in einem Projekt der KTI, ein neuer Stack-Design, der auch die Abgase zurückführt, von HTceramix und der ETHL entwickelt. Das neue Design soll zur künftigen Referenz für SOFC-Materialtest Set-ups werden und Testdauern von weit über 3000 h erlauben. Das Projekt ist noch in der Startphase und die Realisierung des Prototyps (siehe Fig. 1) war erfolgreich. HTceramix zeichnet für das Stack-Design und die -Produktion, die EPFL für den Bau und Betrieb der Langzeit-Teststände verantwortlich. Im Rahmen von REAL-SOFC sind weitere Langzeit-Teststände mit ergänzenden Testzielen am VTT in Finnland, am EIFER in Karlsruhe und bei GdF in Paris im Aufbau.



Figur 1: Erster Entwurf eines fortgeschrittenen Test-set-ups für SOFC [1]

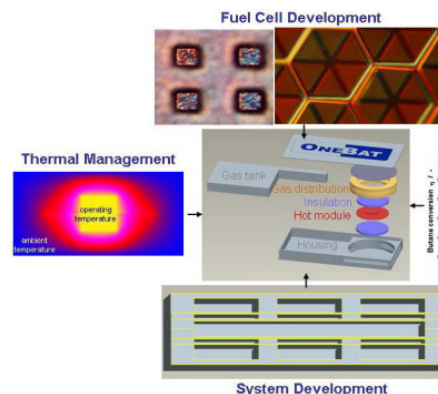


Figur 2: Funktionsweise einer protonenleitenden Brennstoffzelle [2]

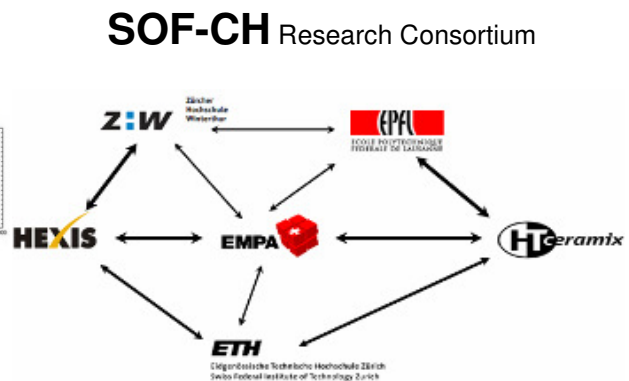
Da Festoxid-Protonenleiter im Temperaturbereich von 300 – 700 °C arbeiten, haben sie das Potenzial einer neuen, verbesserten Brennstoffzellentechnologie, welche die Vorteile der PEFC- und der SOFC-Technologien kombiniert (siehe Fig. 2). Unter den protonenleitenden elektrolytischen Materialien ist das Y-dotierte Bariumzirkonat (BYZ) der vielversprechendste Kandidat. Das Ziel des Projektes **Intermediate Temperature Fuel Cells based on Ceramic Proton Conducting Electrolytes** [2] an der EMPA war die Synthese und Charakterisierung solcher Materialien. Es konnte gezeigt werden, dass BYZ aufskalierbar und mit hoher Phasenreinheit produziert werden kann. Die Leitfähigkeit von Protonen in BYZ wurde untersucht und im Bulkmaterial eine hohe aber an den Korngrenzen eine niedrige Protonenleitfähigkeit gemessen. Die Struktur von BYZ an der Korngrenze wurde als kritischer Parameter identifiziert. Jedoch konnte weder ein Zusammenhang zwischen Mikrostruktur und Leitfähigkeit noch eine andere Erklärung der niedrigen Protonenleitfähigkeit gefunden werden. BYZ könnte interessant für Anwendungen im Sensorenbereich sein, für solche im Brennstoffzellenbereich sind aber noch zu viele offene Fragen zu klären.

Das inter-disziplinäre Verbund-Projekt **ONEBAT** [3], in dem die Kompetenzen von fünf Hoch- und Fachhochschulinstiuten vernetzt sind, wurde 2004 mit Unterstützung des BFE unter der Leitung der ETH Zürich (<http://www.nonmet.mat.ethz.ch/>) gestartet. 2005 flossen durch ein KTI-Discovery-Projekt weitere Mittel in das umfangreiche Vorhaben. Vom BFE wurde zudem das Teilprojekt **ONEBAT Micro Solid Oxide Fuel Cell on the Chip** [4] an der ETH Zürich unterstützt, in welchem die Mikro-Reformierung von Kohlenwasserstoffen experimentell und numerisch untersucht wurden. Hauptziele des Gesamt-Projekts sind die Entwicklung einer miniaturisierten Hybrid-SOFC als Batterieersatz für tragbare elektronische Geräte. Unterziele sind die Evaluation von Mikrofabrikationstechniken für SOFC-Materialien, die Integration des Gas-Processings, des Wärme-Managements und die System-

entwicklung im Mikro-System Grössenbereich. Gezeigt wurde die technische Realisierbarkeit dieses Vorhabens. Die wesentlichen Erkenntnisse in den einzelnen Subsystemen (siehe Fig. 3) sind: a) freistehende Multischichtdünnschichten von SOFC-Materialien können mit Dünnschicht-Deposition und Mikro-Fabrikation hergestellt werden, b) Freistehende Membrane können mittels Nickelgitterstrukturen geeignet verstärkt werden, c) eine hohe Butankonversion mit Wasserstoff-Selektivität höher als 85% konnte in einem Mikro-Reformer bei Temperaturen unter 550 °C erreicht werden. Mittels Simulationen des thermischen Systems konnte ferner gezeigt werden, dass die visierten Temperaturen von 500 °C erreichbar sind [4]. Die Machbarkeit einer Mikro-Brennstoffzelle als Ersatz von Li-Ionenbatterien konnte somit erfolgreich demonstriert werden. In einem neu lancierten CCEM Projekt unterstützt vom Swiss Electric Research Fonds wird zur Zeit an den umfangreichen Detailproblemen weiter gearbeitet.

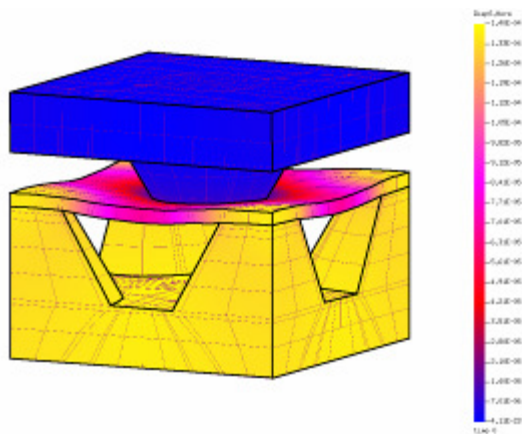


Figur 3: ONEBAT: Mikro-Brennstoffzellenmodell und Hauptuntersystemresultate für die Zellenentwicklung, Gas-Processing, thermisches Management und Systementwicklung [3, 4]

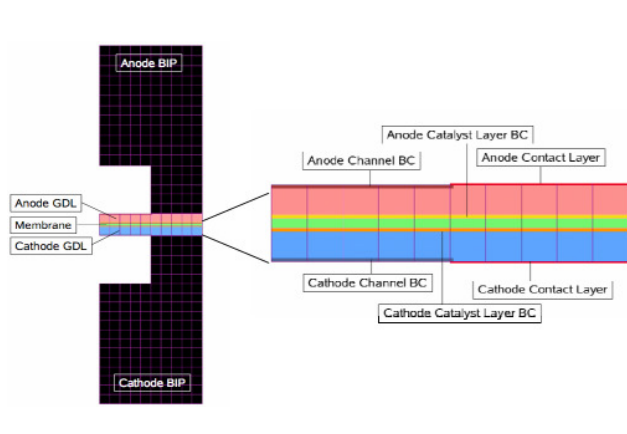


Figur 4: Mitglieder des SOF-CH Research Consortiums unter der industriellen Führung von Hexis AG und HTceramix SA [5]

Ein sehr spannender und nachhaltig erfolgreicher Prozess wurde durch die beiden Firmen Hexis AG (siehe nationale Zusammenarbeit) und HTceramix SA Anfang 2006 in Gang gesetzt. Unter dem Fokus Verbesserung der Lebensdauer von SOFC Stacks für Wärmekraft Anwendungen vereinten sie wesentliche Kompetenzträger von EMPA-HLK, EPFL-LENI, ETHZ-NIM und ZHW-CCP zu einer Arbeitsgruppe und später zum sogenannten SOF-CH Konsortium (siehe Fig. 4). Ausgehend von der moderat abgefassten Vision 2015 „1 MW installierte Leistung“, d.h. 1000 „1 kW Systeme“, zu erreichen wurde gemeinsam eine zielführende Roadmap entwickelt. Daraus liessen sich wiederum eine ganze Reihe erforderlicher Workpackages im „präkompetitiven“ Bereich ableiten und schliesslich priorisieren. Um die Arbeiten möglichst schnell in Gang zu bringen und dem Konsortium Gelegenheit zu geben sich optimal aufzustellen, wurde unter dem Titel Enhancing the lifetime of SOFC stacks for combined heat and power applications [5] ein Projekt mit den 3 wichtigsten Workpackages – Redox Stabilität von State-of-the-Art Anoden, Dauerfestigkeit von Kathoden und Messung, Simulation sowie Berechnung thermochemischer Eigenschaften von Komponenten – in Form einer Anschubfinanzierung unterstützt. Neben der erfolgreichen Durchführung der geplanten Messungen und Simulationen (siehe Fig. 5), war es auch Ziel einen Antrag bei Swiss Electric Research zu platzieren. Dieser wurde kurz nach dem Ende der Berichtsperiode zu einem grossen Teil angenommen und sichert nun vorerst den beschleunigten Fortgang der Forschungsaktivitäten in diesem Bereich.



Figur 5: Repetitives Element eines Hexis SOFC Stacks geprüft unter externer Last. Das 3D Seses FE-Model wird verwendet um die räumlich gemittelten, mechanischen Eigenschaften zu berechnen. [5]



Figur 6: Simulationsgebiet: Kleinste repetitive Einheit der Testzelle (links) und vergrößerter Ausschnitt der MEA (rechts) mit Randbedingungen. [6]

POLYMERELEKTROLYT-BRENNSTOFFZELLEN (PEFC)

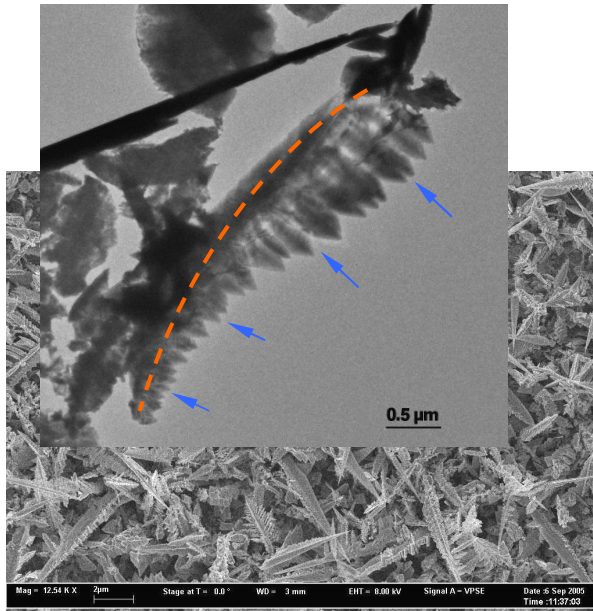
Wasserhaushalt und Temperaturverteilung sind wichtige Parameter zur Optimierung der Leistung heutiger PEFC. Die beiden gegenläufigen Prozesse, das Austrocknen der Membran beim Betrieb mit zu trockenem Oxidationsmittel (Luft oder Sauerstoff) oder hoher Temperatur, resp. das Fluten der porösen Schicht und/oder des Flussfeldes mit entstehendem Wasser, reduzieren den Wirkungsgrad der PEFC. Oft existiert nur ein schmaler Parameterbereich, der einen effizienten Betrieb gewährleistet, welcher zudem empfindlich auf äussere Einflüsse, wie Laständerungen, etc. reagiert und daher die Regelung von PEFC-Stapeln aufwändig macht. Im Rahmen des Gemeinschaftsprojektes (*PSI/ZHW Numerische Modellierung von PEFC, Weiterentwicklung und erste Validierung des 2D+1 Modellansatzes*) [6] wurde ein vertieftes Verständnis der zugrunde liegenden Prozesse angestrebt. Dazu entwickelte das PSI eine weltweit neue innovative Messmethode zur lokalen Bestimmung der Stromdichte via Potenzialmessungen. Numerische Modelle der ZHW (www.ccp.zhwin.ch/seses/docu.php) wurden dazu verwendet, um aus gemessenen Potenzialverteilungen die Stromdichte zu eruieren (siehe Fig. 6). Der eingeschlagene Weg hat sich als vielversprechend zur Verbesserung der Zuverlässigkeit technischer Zellen erwiesen und soll fortgesetzt werden.

Zwei Schwerpunkte zur Weiterentwicklung von Polymerelektrolyt Brennstoffzellen vertiefte das PSI im Projekt **Polymerelektrolyt Brennstoffzellen mit H_2 oder Methanol als Brennstoff** [7]. Im ersten Teil wurden spezifische materialwissenschaftliche Aspekte dieser Technologie und deren erzielte Fortschritte innerhalb dieses Projekts behandelt, nämlich (i) der grundlegenden Elektrochemie von Platin in Kontakt zu einem Festelektrolyten, mit den Aspekten der Platinabreicherung zur kostengünstigeren Gestaltung von Membran-Elektroden-Einheiten und deren Charakterisierung im Hinblick auf deren Alterung, und (ii) der Entwicklung von Platin freien oder Platin armen Katalysatoren für die Sauerstoffreduktion auf der Basis von Oxiden, und (iii) Die Entwicklung von kostengünstigen protonenleitenden Polymerelektrolyten auf der Basis strahlengepfropfter Filme und deren anschliessender Sulfonierung zur Einführung von Protonenleitfähigkeit. Der zweite Teil beschäftigt sich mit der Entwicklung von in situ diagnostischen Methoden für Polymerelektrolyt Brennstoffzellen. Die Methode der Neutronenradiographie zur Visualisierung und Quantifizierung von flüssigem Wasser in Polymerelektrolyt Brennstoffzellen wurde weiter entwickelt. In Kombination mit orts aufgelösten Impedanzmessungen konnten erstmalig Ergebnisse dieser beiden kombinierten Methoden vorgestellt werden. Weiterhin konnte ebenfalls erstmalig eine pseudo-Referenzelektrode in eine Polymerelektrolyt Brennstoffzelle eingeführt werden, die die Bestimmung von Einzelelektroden Impedanzen der Anode und Kathode erlauben und damit auch die Ermittlung kinetischer Daten sowohl für die Wasserstoff Oxidations- als auch der Sauerstoff Reduktions-Reaktion.

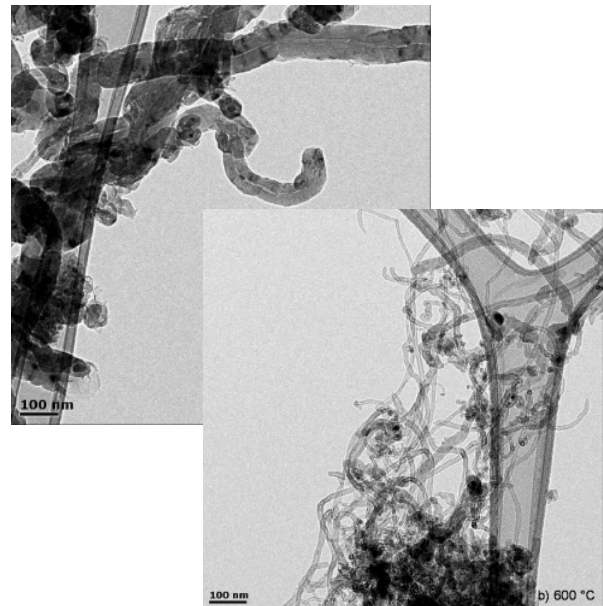
Protonenleitende Polymerelektrolyten, präpariert durch die Methode der Strahlungspfpfropfung, sind als kostengünstige Alternative zu kommerziellen Membranen interessant. Ziel des gegen Ende des Berichtsjahres gestarteten PSI-Projekts **Protonenleitende Polymerelektrolyten für Brennstoff- und Elektrolysezellen** [8] ist die Optimierung der für den Betrieb in Brennstoff- und Elektrolysezellen notwendigen Eigenschaften dieser Polymerelektrolyten im Hinblick auf ihre Anwendung als Festelektrolyte. Die Arbeiten sind eine Fortsetzung der im Projekt [7] gestarteten Untersuchungen und visieren eine Erhöhung der Standzeiten der Membran in Brennstoffzellen bei erhöhten Temperaturen von ca. 80 °C,

unter zyklischen Bedingungen.

Bei der Optimierung der Platinbelegung an der Grenzfläche Elektrode/polymerer Festelektrolyt ist ein besseres Verständnis der grundlegenden Platin- und Platinnanopartikel-Elektrochemie nötig. Die kinetischen Prozesse der H-Adsorption an Platin im Unterpotentialbereich, besonders zur Charakterisierung der elektrochemisch aktiven Fläche in Brennstoffzellenelektroden, wurden weiter untersucht. Dabei konnte eine bisher unbekannte Federstruktur von Platin [9] festgestellt werden (siehe Fig. 7).



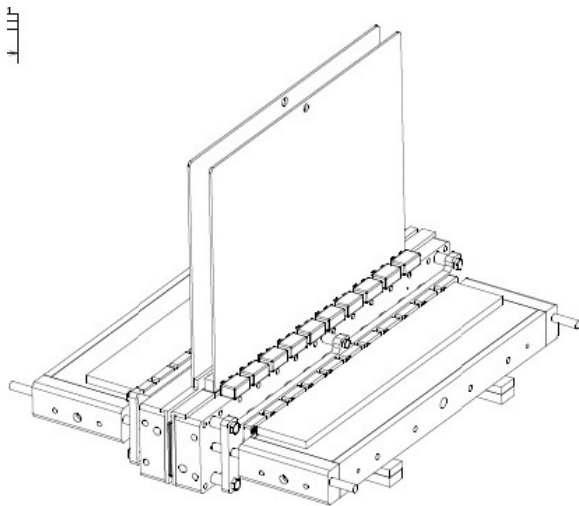
Figur 7: Rasterelektronische (unten) und transmissi- onselektronische (oben) Aufnahme der bisher unbe- kannten Federstruktur von Platin. [7, 9]



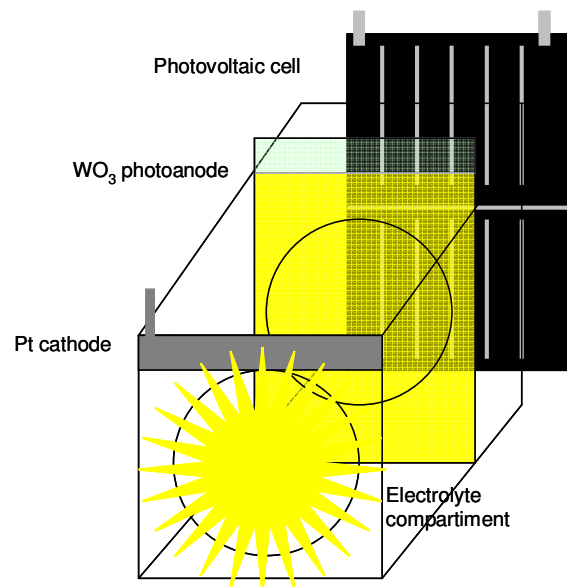
Figur 8: TEM-Bilder der MWCNTs (MWCNTs = Multi Wall Carbon Nanotubes), hergestellt bei a) 800 °C (links oben) und b) 600 °C (rechts unten) [10]

Herkömmliche Elektrodenmaterialien wie Platin auf aktiviertem Kohlenstoff führen zu Überspannungen bei der Sauerstoffreduktion in Zn/Luft-Batterien und Brennstoffzellen. Im neu gestarteten Projekt **New Highly Active Oxygen Reduction Electrode for PEM Fuel Cells and Zn/Air Battery Application (NORA)** [10] soll ein Elektrodenmaterial, basierend auf CNTs und Perovskiten, entwickelt werden, das diese Überspannungen drastisch senkt. Sauerstoff- und OH-Bindungsenergien des Katalysators sind entscheidend für die katalytische Aktivität. Perovskite haben eine hohe Sauerstoffbedeckung an der Oberfläche und eine bedeckungsabhängige Sauerstoffbindungsenergie. Das Projekt visiert eine um 30% höhere Effizienz an als mit dem herkömmlichen Elektrodenmaterial erreicht wird. Ziel des ersten Projektjahres ist die Herstellung eines ersten CNT/Perovskit Composite (sogenannte MWCNTs = Multi Wall Carbon Nanotubes, siehe Fig. 8) und die Untersuchung dessen Stabilitätsbedingungen.

Präzise Gasanalysen sind wichtig für die Weiterentwicklung von Brennstoffzellen. Im neu gestarteten Projekt **Lokale Gasphasenanalyse an PE-Brennstoffzellen** [11] sind ein neuer Teststand mit einem Massenspektrometer als Kernkomponente aufgebaut und erste Messungen mit Laborluft durchgeführt worden. Demnächst werden die Gasentnahme komplettiert und verschiedene Kalibrationsmessungen durchgeführt, so dass erste Messungen an den Modellbrennstoffzellen möglich sein (siehe Fig. 9).



Figur 9: Modellbrennstoffzelle zur lokalen Gasanalyse [11]

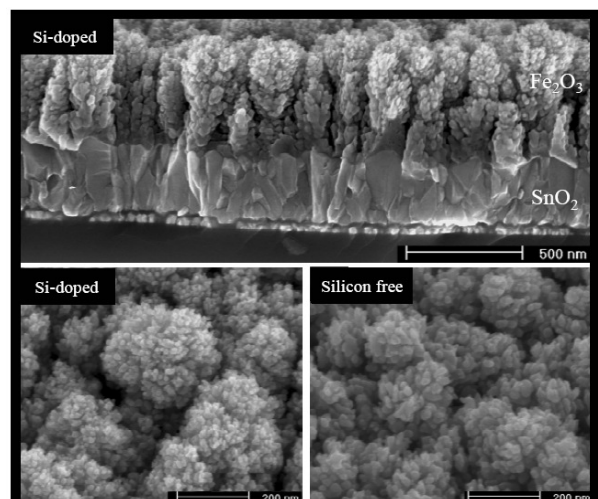
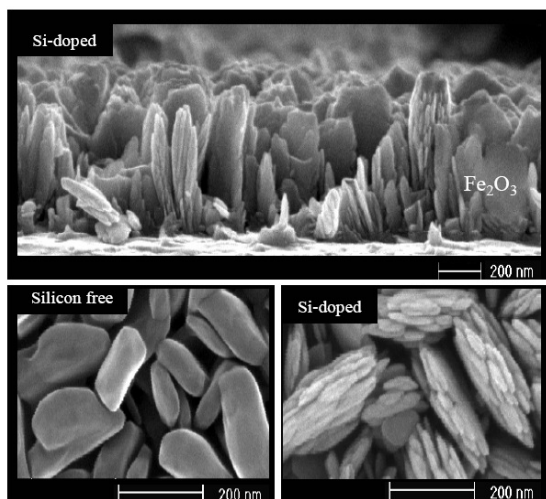


Figur 10: Tandem PEC Zelle angewendet zur H₂-Herstellung durch Wasserspaltung mit in diesem Fall simuliertem Sonnenlicht [12,13]

WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

Im langjährigen Projekt **Photolyse de l'eau et production d'hydrogène au moyen de l'énergie solaire** [12,13] geht es um die direkte Wasserspaltung durch das Sonnenlicht in einer Tandemzelle (siehe Fig. 10). In enger Zusammenarbeit wird an der *Universität Genf* und an der *ETH-Lausanne* insbesondere an der Optimierung verschiedener Anodematerialien gearbeitet. Die Photoanode oxidiert Wasser. Als Kathode dient vorderhand Platin zur Wasserspaltreaktion, unterstützt durch eine leichte Spannungserhöhung mittels Farbstoffphotovoltaikzelle.

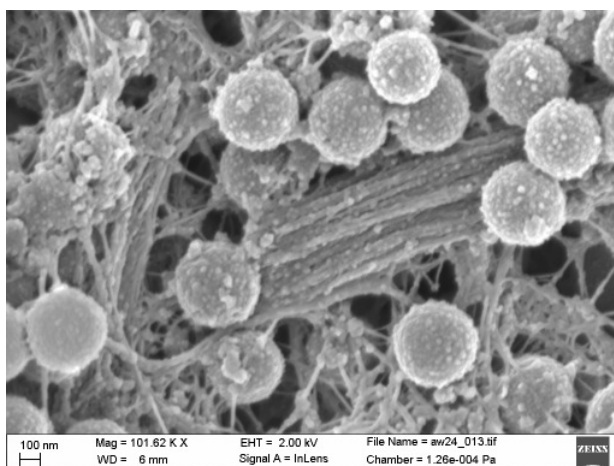
Die Arbeiten an der *Universität Genf* konzentrierten sich im Berichtsjahr auf die Optimierung des Elektrolyten zwischen der WO₃-Photoanode und der Platin-Kathode sowie auf die Stabilitätseigenschaften der Anode bei der Verwendung verschiedener Elektrolyten. Entgegen der bisherigen vorherrschenden Meinung konnte gezeigt werden, dass nicht die Elektronendiffusion durch die Halbleitermatrix das Photostrom-Spannungsverhalten kontrolliert, sondern die Migrations-/Diffusions-Transportphänomene im Elektrolyten, der die Poren der Photoelektrode füllt [14]. Die wichtigen Parameter bei der Verwendung dicker, nanostrukturierter Elektroden sind die Eindringtiefe des einfallenden Lichtes, die Diffusions-/Migrationsraten elektroaktiver Ionen in der Elektrode und insbesondere die Leitfähigkeit des Elektrolyten.



Figur 11: Morphologie von undotierten und durch Ultraschallspray Pyrolyse (USP) siliziumdotierten Fe_2O_3 -Photoanoden. Si-Dotierung und ein Depositionsverfahren welches eine möglichst grosse Gesamtoberfläche erzeugt sind massgebend für eine signifikante Effizienzsteigerung [13].

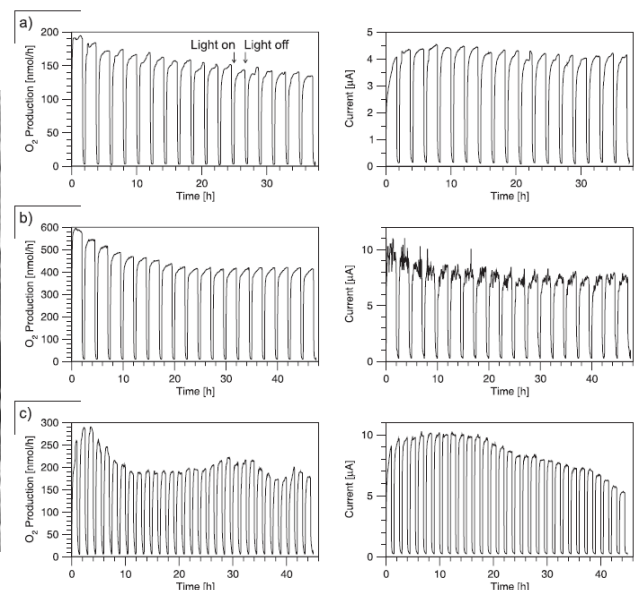
Da die Lichtausbeute der an der WO_3 -Photoanode der *Universität Genf* [P1] nicht optimal ist, wird seit einigen Jahren im Projekt **Photolyse de l'eau et production d'hydrogène au moyen de l'énergie solaire** [13] an der *ETH-Lausanne* das vielversprechende Material Fe_2O_3 (Hämatit) als Photoanode untersucht. Im Berichtsjahr wurde ein neues Depositionsverfahren von nanokristallinen Fe_2O_3 -Filmen Fig. 11 und Fig. 12 auf die Anode entwickelt und dadurch eine unerwartet hohe Effizienz erreicht. Eine weitere Effizienzsteigerung brachte die Deposition von Kobalt Monolayers auf die Hämatit-Anode, welche eine katalytische Wirkung auf die Wasseroxydation hat. Des Weiteren wurde durch Verwendung von Zinkverbindungen auch die Lichtausbeute im infrarotnahen Lichtspektrumsbereich verbessert.

Im neu gestarteten Projekt **NEFIOS-Hydro** [15] werden an der *Uni Basel* und an der *Fachhochschule Nordwestschweiz* im Zusammenhang mit dem Projekt [12] der *Universität Genf* verschiedene Ansätze zur Synthese von neuartigen, leitenden nanokristallinen Oberflächen untersucht. Um eine möglichst effiziente Wasserspaltung durch Sonnenstrahlung zu erzielen, müssen die Oberflächen nicht nur transparent, sondern auch eine möglichst grosse Gesamtoberfläche aufweisen. Als erfolgversprechende Kandidaten werden Kombinationen von Silica Nanopartikeln und Kohlenstoff Nanoröhrchen untersucht (siehe Fig. 13).



Figur 13: REM Bild von Silica Nanopartikeln kombiniert mit Kohlenstoff Nanoröhrchen [15]

Figur 12: Morphologie von durch atmosphärische chemische Dampfdeposition (APCVD) siliziumdotierten und undotierten Fe_2O_3 -Photoanoden. Das angewendete Verfahren führt zu einer stark vergrösserten aktiven Oberfläche damit zu einer deutlichen Effizienzsteigerung [13].

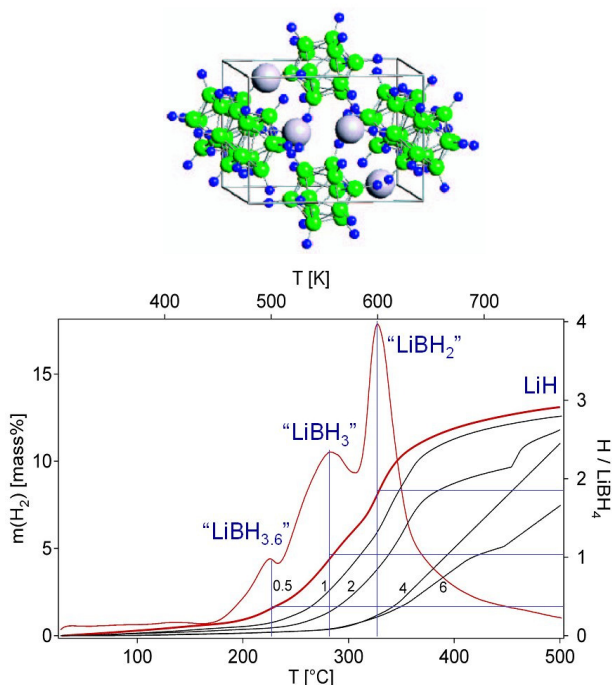


Figur 14: O_2 Produktion und Photostrom gegen die Zeit für drei verschiedene Photoanoden. a) AgCl Elektrode, b) Zeolith A Monoschicht modifiziert mit AgCl, c) Zeolith L Monoschicht modifiziert mit AgCl [16]

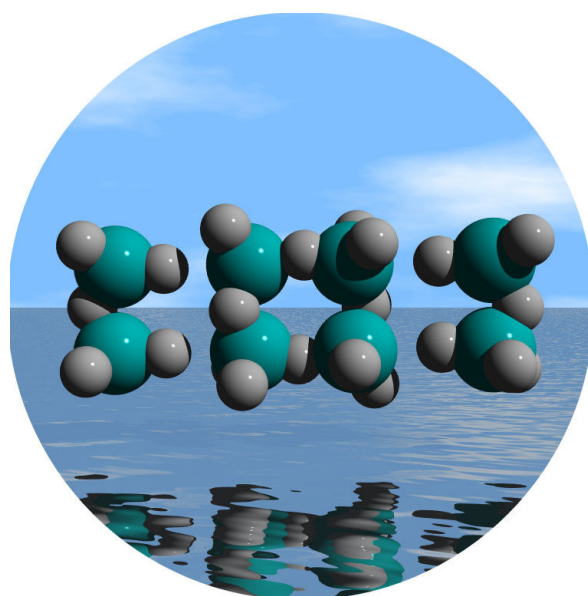
Ziel der langjährigen Forschungsaktivitäten zum Thema **Photochemische Umwandlung und Speicherung von Sonnenenergie** ist die Photoelektrochemische Wasserspaltung mit sensibilisierten Ag/AgCl als Photoanode und einer Halbleiter Photokathode. Vorderhand wurde eine Platinelektrode in der Halbzelle für die H_2 -Produktion benutzt. An der Universität Bern wurde der Nachweis erbracht, dass durch die Verwendung von nanoporösen Materialien als Trägermaterial die Effizienz der AgCl Photoanode erhöht werden kann [16]. Fig. 14 zeigt die Sauerstoff Produktion und den Photostrom gegen die Zeit für drei verschiedene Photoanoden. Für eine gewöhnliche AgCl Photoanode liegt die O_2 Produktion bei ca. 160 nmol/h und der Photostrom bei ca. 4 μA . Wird eine Zeolith A Monoschicht auf einer leitenden Goldschicht als Trägermaterial für die AgCl Photoanode verwendet, so erhält man eine mittlere Sauerstoff Produktion von ca. 400 nmol/h und einen Photostrom von ca. 9 μA . Wird eine Zeolith L Monoschicht als Trägermaterial verwendet, so ist die Erhöhung der Sauerstoff Produktion und des Photostroms etwas kleiner (ca. 220 nmol/h bzw. ca. 7 μA). Auf Grund dieser Ergebnisse wird nun der Einfluss von mesoporösen Materialien oder Membranen auf die Effizienz der AgCl Photoanode untersucht, wenn diese als Matrix für das AgCl verwendet werden.

Im Projekt **Wasserstoffspeicherung in Metall- und komplexen Hydriden** [17] geht es darum, neue Materialien für die Wasserstoffspeicherung zu definieren und zu analysieren. Potentielle Kandidaten wie LiBH_4 , welches das Hydrid mit der grössten bekannten gravimetrischen Wasserstoffdichte ist, weisen eine volumetrische Wasserstoffdichte von $> 120 \text{ kg H}_2 \text{ m}^{-3}$ und eine gravimetrische Wasserstoffdichte von $> 8 \text{ mass\%}$ auf. Ihre physikalischen Eigenschaften sind jedoch weitgehend unbekannt. Die Struktur und die Wasserstoffsorptionseigenschaften von LiBH_4 sind geklärt worden. Ziel des Projektjahres 2006 war es, die komplexen Hydride oberflächenanalytisch zu untersuchen und den Mechanismus der Wasserstoffdesorption hinsichtlich der möglichen Zwischenstufen zu verstehen.

In theoretischen Modellrechnungen konnten Zwischenprodukte identifiziert werden, welche eine grössere Stabilität als die Endprodukte (siehe Fig. 15) haben. Experimentell wurden mit dem umgebauten Photoelektronenspektrometer (Einschleusen durch Ar-Kammer, Temperaturkontrolle der Probe, Massenspektrometer) während der Wasserstoffdesorption die Oberflächenzusammensetzung untersucht und gleichzeitig mit dem Massenspektrometer die desorbierten Spezies identifiziert. Dabei wurde festgestellt, dass nicht nur Wasserstoff sondern auch Verbindungen von der Art $(\text{BH}_3)_n$ desorbiert werden. Der Desorptionsmechanismus im Hochvakuum scheint grundsätzlich anders zu sein als unter einer Wasserstoffatmosphäre. Eine neue Sorptionsanlage wurde entwickelt und gebaut, welche ein Systemvolumen von nur noch 2 cm^3 aufweist. Zudem ist die Anlage im Endausbau vollständig digital, d.h. die Genauigkeit der Druck- und Massenflussmessung konnte signifikant gesteigert werden.



Figur. 15: Thermische Desorptionsspektroskopie an LiBH_4 (links) und der metastabile Cluster bestehend aus Li, B und H (rechts) [17]



Figur 16: Dinuclear $[\text{Ni}_2\text{H}_7]^{7-}$ und tetranuklear $[\text{Ni}_4\text{H}_{12}]^{12-}$ Komplexe in $\text{La}_2\text{MgNi}_2\text{H}_8$ (die Ni-Atome sind grünblau, die Wasserstoffatome graublau dargestellt) [18]

Festkörpermetallhydride sind kompakte und sichere Wasserstoffspeicher. Im Projekt **New metal hydrides for hydrogen storage in fuel cell systems** [18] werden an der Universität Genf systematisch nach Hydriden mit höchster Speicherdichte gesucht. Vielversprechende Kandidaten sind d- und p-Metallhydridkomplexe. Der Komplex Mg_2FeH_6 konnte mit einem yield von 91% erzeugt werden, ein neuer Rekord im Vergleich zu früher erreichten yields von 80%. Der Komplex MgMnH_9 ist ein Kandidat mit sehr hoher Wasserstoff-Speicherdichte. Seine Herstellung gelingt aber nur durch besseres Verständnis ähnlicher, jedoch thermodynamisch stabilerer Komplexe. Im Berichtsjahr wurde die Dynamik des Komplexes BaReH_9 mit der Neutronenstreutechnik untersucht, um die Stabilität von MgMnH_9 besser zu verstehen. Ausserdem konnte der Komplex $\text{La}_2\text{MgNi}_2\text{H}_8$ hergestellt und betreffend Struktur (siehe Fig. 16) und Eigenschaften charakterisiert werden.

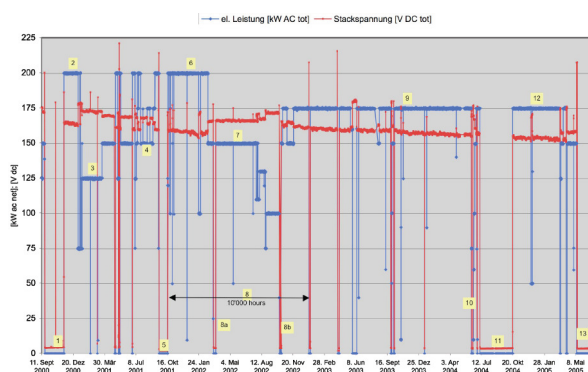
Nationale Zusammenarbeit

BRENNSTOFFZELLENTECNOLOGIE

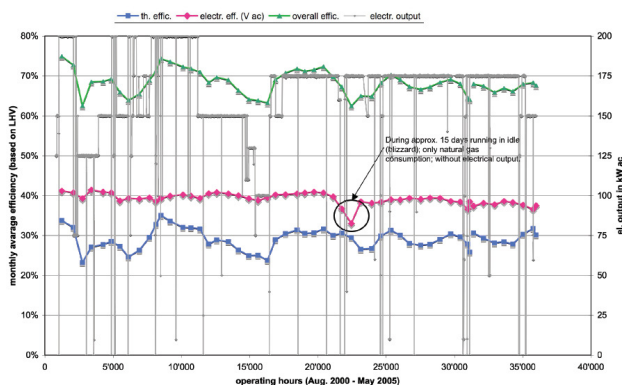
Neben der erfolgreichen Lancierung des oben beschriebenen SOF-CH Netzwerkes als „präkompetitives“ Forschungskonsortium und der schon längeren guten Zusammenarbeit im **ONEBAT**-Verbund-Projekt hat auch im PEFC-Bereich ein guter Austausch unter den Stakeholder stattgefunden. Einerseits haben die beiden Firmen *Ceka AG* und *MesDea SA* diverse Gespräche über den gemeinsamen Forschungsfokus miteinander geführt, andererseits konnten dank starker Präsenz des PSI sowohl im Modelling als auch im Testingbereich sehr vielversprechende Kooperationen und Dialoge über den Abgleich der Ziele initiiert werden. Es ist aber noch nicht gelungen aus dem Strauss der vorgeschlagenen Projekte ein gebündeltes Bouquet von abgestimmten und über den Output ineinander verflochten Workpackage-Folgen zu gestalten.

Die Neu-Gründung der *Hexis AG* wurde durch eine Winterthurer Stiftung ermöglicht. Dies gestattet die unabhängige Weiterführung der, während den letzten 15 Jahren auch mit namhaften Mitteln der öffentlichen Hand, aufgebauten hohen Kompetenz und Forschungsarbeit im SOFC-Bereich der ehemaligen *Sulzer Hexis AG*. Das Inventar und die Rechte sowie ein Teil der *Hexis*-Mannschaft wurden übernommen. Mit dem, den realen Verhältnissen angepassten, Business Plan wird nun ein neues, auch von Zusammenarbeit geprägtes Kapitel (siehe oben SOF-CH Consortium) in dem noch forschungsabhängigen Industrialisierungsprozess geschrieben.

Bereits im Sommer 2005 erreichte die durch die *AEB Alternativ-Energie Birsfelden AG* (lokaler privater Fernwärmeversorger) betriebene stationäre 200 kW_{el} Brennstoffzelle vom Typ ONSI PC 25 C (PAFC) ihr 5-jähriges Betriebsjubiläum. Die Demonstrationsanlage ist auf einem Schulhof in Birsfelden und in unmittelbarer Nähe zu einem Einkaufszentrum aufgestellt und damit täglich für zahlreiche Passanten ersichtlich. Der Strom wird ins Netz des lokalen Stromversorgers und die Wärme ins Fernwärmenetz der *AEB* gespeist. Die Anlage lief in dieser Zeit ohne grössere Reparaturen und konnte vorwiegend durch einen lokalen Energiedienstleister gewartet werden. Insgesamt absolvierte die Anlage 36'000 Betriebsstunden (Fig. 17) mit einem gemittelten elektrischen Wirkungsgrad von über 39 % (berechnet aus der netto nutzbaren Strommenge und der eingesetzten Erdgasmenge, siehe Fig. 18).



Figur 17: Leistungs- (blau) und Spannungsverlauf (rot) der ONSI-Zelle über die ganze Betriebszeit von 36'000 h [28]



Figur 18: Thermischer (blau), elektrischer (rot) und overall (grün) Wirkungsgrad sowie elektrische (grau) Leistung der ONSI-Zelle über die ganze Betriebszeit 36'000 h [28]

Jedoch war es zu keinem Zeitpunkt gelungen, mehr als 60% der von der Brennstoffzelle produzierten thermischen Energie zu nutzen, was zu einer beträchtlichen finanziellen Einbusse führte. Seit Sommer 2005 traten diverse, ungeklärte, technische Probleme auf. Da auf der Herstellerseite keine deutlichen Kostensenkungen eingetreten sind und die Reparaturanfälligkeit mit zunehmender Alterung ansteigt, bedeutet eine Fortsetzung des Betriebs weitere unplanbare finanzielle Risiken. All dies und die ungenügenden Zukunftsperspektiven und Abdeckung der finanziellen Risiken führten dazu, den Weiterbetrieb der Brennstoffzelle mit eigenen Mitteln einzustellen. Zusammengefasst wurden diese Ergebnisse von *THOMA+RENZ* in dem **Erfahrungsbericht über 5 Jahre Betrieb der Brennstoffzelle vom Typ ONSI in Birsfelden** [28].

WASSERSTOFFTECNOLOGIE

Der Austausch und die Transparenz innerhalb der relativ kleinen, international anerkannten Wasserstoff-Gemeinschaft in der Schweiz sind gut. Zudem hat sie in der Wasserstoff-Gesellschaft *Hydropole*

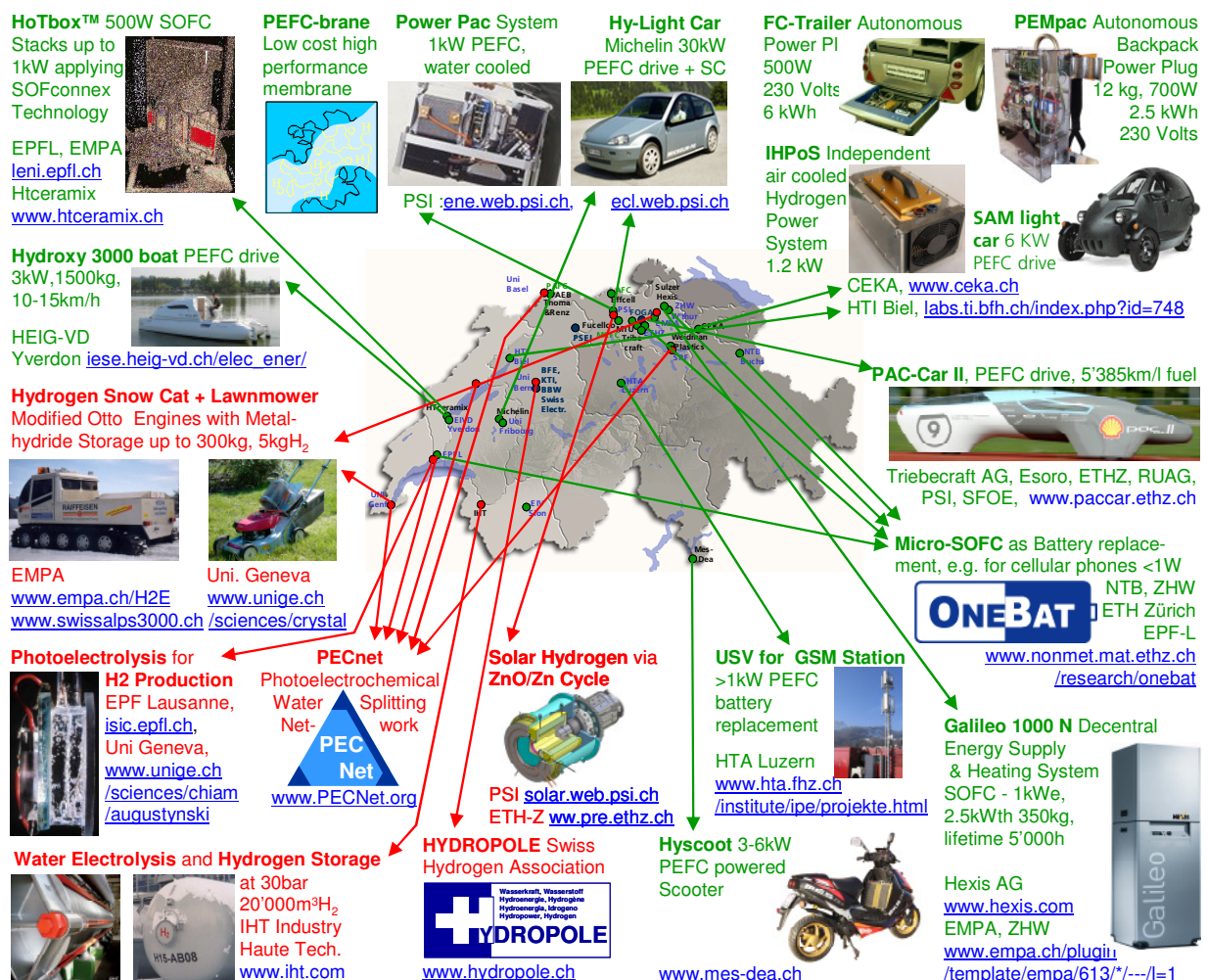
www.hydropole.ch einen gewissen kleinsten gemeinsamen Nenner. Speziell bemerkenswert bei den Hydropole-Aktivitäten sind folgende Outputs: 1) Erstellung des Hydrogen Report Switzerland [29], 2) Organisation und Durchführung eines „Village Suisse“ an der World Hydrogen Energy Conference WHEC 2006, 3) aktive Industriebeteiligung an den Vereinsaktivitäten (*Weka, Bieri, IHT*) 4) fruchtbare Industrie-Kontakte, welche u.a. zu einem KTI Projekt führte.

Eine besonders zukunftssträchtige Nachricht ist die Gründung der *Abteilung Wasserstoff und Energie* an der *EMPA* unter der Führung von Prof. Andreas Züttel [17]. Neben der Lehre sind folgende Schwerpunkte in der Forschung hervorzuheben: 1) Struktur und Dynamik der Hydride, 2) Thermodynamik der Hydride und 3) Übrige wie theoretische Modelle (DFT, Phonon), Elektrochemie, Konstruktion und Sicherheit.

Im Bereich der Photovoltaik (PV) und insbesondere der photoelektrochemischen Wasserspaltung (PEC) bestehen in der Schweiz international führende Kompetenzen. Im Wissens- und Technologie Transfer Projekt **PECNet Aufbau eines Schweizer Kompetenznetzwerkes für die solare Wasserspaltung mittels hybrider PV-PEC Zellen** [30] ist es das Ziel, diese Kompetenzen zu bündeln, interdisziplinär und umsetzungsorientiert mit der Industrie zu vernetzen (PECNet), und erfolgreich auf eine von EU-FP7 getragene internationale Weiterarbeit zu fokussieren (siehe auch Fig. 19). Bisher ist PECNet sowohl national als auch international auf sehr positives Echo gestossen und im 2007 sind wesentliche Durchbrüche zu erwarten.

GANZER PROGRAMMBEREICH

Im ganzen Programmbereich kann auf eine der allgemeinen Stärken der Schweiz, nämlich einen sehr guten Austausch und Kontakt unter den Stakeholdern zu pflegen, gezählt werden. Die diesbezüglichen Anstrengungen dürfen jedoch nicht vermindert werden. In diesem Sinne wurde daher auch der Überblick der Schweizerischen Brennstoffzellen- und Wasserstoffforschungs-Community ständig aktualisiert (siehe Fig. 19).



Figur 19: Aktualisierter Überblick der Schweizerischen Brennstoffzellen- und Wasserstoffforschungs-Community

Zwar sind auf der Website des BFE über das Programm einige Informationen, welche eine nationale Zusammenarbeit subsidiär unterstützen abgelegt, eine diesbezüglich fokussierte Informationsplattform konnte jedoch bis jetzt aus Mangel an Ressourcen noch nicht aufgebaut werden.

Internationale Zusammenarbeit

Im **IEA Programm Advanced Fuel Cells (AFC)** nimmt die Schweiz in den Annexen XIX [31] und XVIII [32] teil. An den beiden AFC-ExCo [33] standen der Beitritt der Türkei und von Mexiko, die Statusberichte der Annexe XVI – XXI sowie des EU Projekts FCTESTNET im Vordergrund. Dabei wurde festgestellt, dass der Informationsaustausch zwischen EU- und IEA-Programmen funktioniert und somit Doppelspurigkeiten vermieden werden. AFC-seitig ist eine Informationsbroschüre geplant, um weitere Mitglieder – im Fokus sind China, Russland, Indien, Südafrika und Brasilien – zu gewinnen. Der neue AFC-Webauftritt ist inzwischen unter www.ieafuelcell.com aufgeschaltet. Schweizseitig wurden die ExCo-Vertreter über die abnehmende Finanzierung der Energieforschung durch die öffentliche Hand [34] und die Arbeiten am Energieforschungskonzept 2008-11 ebenso informiert wie über das aktuelle PEFC- und SOFC- Portfolio und die Zusammenarbeit zwischen Hochschul- und Industriepartnern sowie die neuen Finanzierungsmöglichkeiten via swisselectric research (www.swisselectric-research.ch).

Im **Annex XIX Stationary Fuel Cells** stehen die Rahmenbedingungen und Möglichkeiten für den Markteintritt von Brennstoffzellen für stationäre Anwendungen im Vordergrund. Sowohl die Eigenschaften (Marktleistungen) und der Entwicklungsstand der Brennstoffzellen als auch die daran zu stellenden Anforderungen der Zielmärkte (Marktbedürfnisse) werden unter die Lupe genommen. Zudem werden die Möglichkeiten zur Vereinheitlichung der peripheren Anlagekomponenten (Balance of Plant) untersucht und der internationale Stand der Brennstoffzellenentwicklung verfolgt. Die Schweiz leitet die **Subtask 1 Market Outlook** [31]. Interessante Zwischenergebnisse sind: Dem dezentralen Einsatz von (kleinen) Brennstoffzellen für Strom- und Wärmenutzung stehen die sehr unterschiedlichen Strukturen von Strom- und Wärmemarkt gegenüber. Der Strommarkt wird angebotsorientiert von einigen wenigen Unternehmen dominiert, wogegen der Wärmemarkt sehr heterogen und nachfrageorientiert funktioniert. Daraus entstehen konträre Interessen und Bedürfnisse der Marktteilnehmer. In Europa treten immer wieder neue Konsortien mit eigenen Entwicklungen von kleinen Brennstoffzellen (PEFC, SOFC) auf. Diese werden durch regionale Förderprogramme angetrieben. Die damit entstehende Diversität hemmt jedoch die Vereinheitlichung und damit Kostenreduktion der peripheren Anlagekomponenten. Die Arbeitsgruppe musste feststellen, dass bei den europäischen Entwicklern nur ein geringes Interesse an der Standardisierung und gemeinsamen Kooperation mit Komponentenlieferanten besteht. Damit fehlen auch die Anreize für die Komponentenhersteller, sich stärker für die Entwicklung von Brennstoffzellensystemen zu engagieren. In den USA wurde die Entwicklung der Brennstoffzellen durch Förderprogramme des Bundes (*SECA*) auf die Entwicklung von 5kW SOFC fokussiert. Dies hat auch den Einstieg von bisher im Brennstoffzellegebiet wenig aktiven Grossfirmen beschleunigt.

In Europa treten immer wieder neue Konsortien mit eigenen Entwicklungen von kleinen Brennstoffzellen (PEFC, SOFC) auf. Diese werden durch regionale Förderprogramme angetrieben. Die damit entstehende Diversität hemmt jedoch die Vereinheitlichung und damit Kostenreduktion der peripheren Anlagekomponenten, die in der Regel mehr als 2/3 der Systemkosten ausmachen und hauptverantwortlich für Störungen sind. Die Arbeitsgruppe musste feststellen, dass bei den Entwicklern nur ein geringes Interesse an der Standardisierung und gemeinsamen Kooperation mit Komponentenlieferanten besteht. Damit fehlen auch die Anreize für die Komponentenhersteller, sich stärker für die Entwicklung von Brennstoffzellensystemen zu engagieren. In Japan fokussiert sich die Entwicklung im stationären Bereich auf die PEFC. In einem koordinierten Demonstrationsprogramm wurden bisher über 1000 Anlagen von verschiedenen Herstellern installiert. Die weiteren Entwicklungsschritte umfassen eine strukturierte Selektion und Einbindung von Zulieferern. Bei den Grossanlagen (100 – 1000 kW) dominieren zur Zeit die MCFC. Das in Deutschland entwickelte Hot Modul mit einer 250 kW MCFC wird neu mit einem in Europa entwickelten Stack bestückt. In zahlreichen Demonstrationsanlagen wurden Nutzungsdauern von über 20'000 Stunden erreicht. Keine marktrelevanten Fortschritte sind bei den grossen SOFC erkennbar.

Hauptereignis im **Annex XVIII (SOFC)** [32] war der Helsinki-Workshop [35]. Er diente als Network Forum für die Schweizer SOFC-Community. Festgestellt wurde, dass die USA, Japan und die EU als starke Konkurrenten die weltweite SOFC-Szene beherrschen. Jedoch nehmen die US- und J-Budgets stärker zu als die im 7. RP der EU vorgesehenen SOFC-Budgets. Ferner sind Korea und China daran, punkto F&E aufzuholen. In diesem Projekt werden auch die CH-Interessen an der HFP-Plattform in

Brüssel wahrgenommen. Festgestellt wurde, dass mehr Lobby-Aktivität seitens der CH-Industriepartner dringend nötig ist. Die Schweiz läuft in Gefahr, nicht mehr als Partner für EU-Projekte im 7. RP aufgenommen zu werden und verliere damit auch den Anschluss zur *Joint Technology Initiative (JTI)* der EU.

Im **Hydrogen Implementing Agreement (HIA)** der IEA (www.ieahia.org) ist die Schweiz auf breiter Basis der Grundlagenforschung aktiv, dies dank der Weitsicht des BFE schon seit der Gründungszeit der HIA im Jahre 1977. Die Mitgliederzahl des HIA wächst stetig und betrug im Jahre 2006 neunzehn Länder. Das HIA zeichnet sich vor allem aus durch weltumspannende Koordination von Forschungsaufgaben im vor-kommerziellen Stadium. Die Hydrogen Coordination Group (HCG) der IEA wurde von der HIA umfassend beraten, was im Jahre 2006 zu entsprechenden Positionspapieren geführt hatte. Die Mitarbeit durch Schweizer Expertengruppen betrifft derzeit insbesondere die Gebiete:

- Niedertemperatur-Wasserspaltung durch direkte Solarbestrahlung
Annex-20: Hydrogen from Waterphotolysis; *Universitäten Basel, Bern, Genf und EPFL*
Das Management von Annex-20 ist weiterhin in Schweizer Hand.
- Hochtemperatur Wasserstoff-Produktion, wofür Vorbereitungen im Gange sind zum Start eines **neuen Annex:** High Temperature Production of Hydrogen mit Schweizer Expertenbeteiligung durch das *PSI* - Solarchemie und der *EMPA* - Keramik.
- Energiespeicherung mittels Metallhydriden
Annex-22: Fundamental and Applied Hydrogen Storage Materials Development; *Universitäten Fribourg und Genf*.
- Executive Committee
Das **ExCo** der HIA wird sich 2007 in der Schweiz treffen.

Die Schlüsselpunkte im **HFP EU-Strategie-Programm** www.hfpeurope.org sind: - die Notwendigkeit eines hoch fokussierten Zehnjahres-Forschungsprogramms, um u. a. die Brennstoffzellen-Systemkosten um einen Faktor zehn zu senken und die Leistungs- und Dauerhaftigkeit von BZ-Systemen zu verdoppeln. Um diese Ziele zu erreichen, sollen EU-weit nicht nur die öffentlichen und privaten, sondern auch die regionalen Ressourcen koordiniert und gebündelt innerhalb der Joint Technology Initiative (JTI) eingesetzt werden [36]. Einige Schweizer Brennstoffzellen Firmen sind daran sich an den JTI zu beteiligen und in den entsprechenden Gremien Einsitz nehmen zu können. Um die Aktivitäten von HFP insgesamt beobachten zu können, stellt das BFE mit der Person von Dr. A. Gut einen entsprechenden aktiven Teilnehmer in der HFP Mirror Group.

Etwas passiver ist die Beobachtung des Arbeitsfortschritts von **HYCO-Eranet** www.hy-co-era.net. Hier wäre eine Beteiligung im Network-Committee und/oder in einigen der Action Groups (2, 3, 4, 5) wünschenswert, jedoch sind die entsprechenden Ressourcen hierfür z.Z. nicht vorhanden.

Sehr erfreulich ist auch in dieser Berichtsperiode die Beteiligung der Schweiz an EU-Projekten. Schweizer Forscher und Industriepartner sind u.a. in folgenden Projekten involviert: **NESSHY** (EU IP FP6 Novel Efficient Solid H₂ Storage Energy System, *UniFR*), **EU-SOLZINC** (300kW Solar Reactor Carbothermic ZnO/Zn Cycle: *ZIRBUS, PSI, ETH, WIS, CNRS, ScanArc*), **EU-STREP** (EU-FP6, Water vapour electrolysis, high temperature H₂ production based on SOFC Technology, *EMPA*), **Real SOFC** (EU-IP FP6, Durability+Lifetime of SOFC cells and stacks *HTceramix, EMPA, ETHZ, EPFL*), **Flame-SOFC** (EU-IP FP6, 2 kWel micro-CHP system, *HTceramix, EMPA*), **SOFC600** (EU-IP FP6, SOFC Stack at 600 °C, *EMPA*), **GenFC** (EU-STREP) *EMPA*.

In **FCTESTNET** werden weltweit die Testprozeduren von Brennstoffzellen auf ihre Praxistauglichkeit durchleuchtet. Der Schlussbericht soll anlässlich des Workshops (September 2007) über Degradationsphänomene von Brennstoffzellen vorgestellt werden. Das LPI beendete im Berichtsjahr seine Verpflichtungen [37] in den EU-Programmen FCTESTNET (standardisierte Testprotokolle für alle Typen von Brennstoffzellen und Technisches Glossar der Brennstoffzellentechnologie) und SOFCNET (Schulung und Demonstration der SOFC-Technologie). Im Rahmen von SOFCNET war das LPI behilflich bei der Organisation der Sommerschule 2006 in Lemnos (GR) [38]

Vertreter des BFEs und/oder des Programms haben zum direkten oder indirekten Austausch und zur Repräsentation diverse Konferenzen, Workshops und/oder Diskussionsrunden besucht. Speziell zu erwähnen bleibt das internationale **Lucerne Fuel Cell Forum 2006** an welchem der Vizedirektor des BFEs M. Kaufmann die Eröffnungsrede gehalten hat.

Die im Jahr 2004 vom BFE gestartete Symposiumsreihe mit internationaler Beteiligung **Fuel Cell Research Symposium Modelling and Experimental Validation** wurde an der *EMPA* in Dübendorf wie

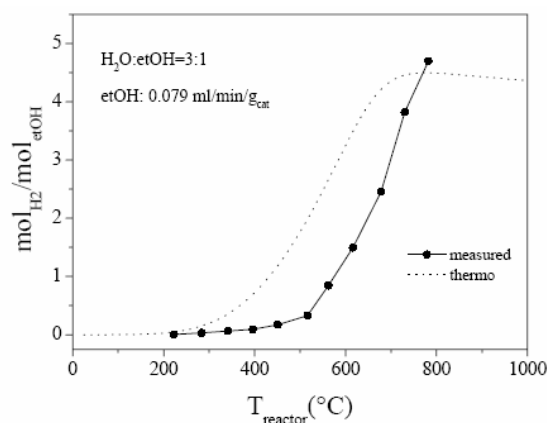
üblich im März mit Erfolg fortgesetzt. 2007 wird das Symposium vom *FZ-Jülich*, 2008 von der *ZHW Winterthur* und 2009 voraussichtlich von einem Institut in Österreich (*Leoben*) organisiert [39-43]. Dies zeigt, dass in diesem Bereich eine breite internationale Trägerschaft gefunden werden konnte. Neben fachlichen Vorträgen findet an diesem Symposium auch ein intensives Networking statt, welches als Nährboden für Kooperationen und auch EU FP7 Projekt Eingaben dient. Im Programm wird jeweils auch Platz für eine Panel-Diskussion eingeräumt um das bisher Erreichte zu beleuchten und den Fokus für das nächste Symposium gemeinsam zu setzen.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

BRENNSTOFFZELLENTECNOLOGIE

ERDGAS-SOFC-BRENNSTOFFZELLEN

Zwei tragbare Prototypen einer SOFC-Brennstoffzelle wurden von *HTceramix* in Zusammenarbeit mit dem *Institut d'énergie et de systèmes énergétiques der FH Yverdon* im Projekt **Development of an autonomous transportable SOFC system operating on C-based fuel** [19] gebaut und werden an diesen beiden Institutionen als Demonstratoren zum Einsatz kommen. (siehe Fig. 20). Hierbei wurde ein spezielles thermisches Management realisiert, so dass das System in der erforderlichen Zeit sich aufheizt. Zudem haben die Versuche gezeigt, dass die Konvertierung von Methanol im Reformer möglich ist (siehe Fig. 20). Ebenfalls erreicht wurden die Spezifikationen für das Gewicht des Systems. Weitere, verbesserte und validierte Versionen sollen in der Folge als Demonstratoren im Nischenmarkt "Unterricht" verkauft werden.



Figur 20: Der Test des Reformerkatalysators für Methanol brachte für die Praxis brauchbare Resultate [19]



Figur 21: Übersicht über die Einbaupositionen des Stapels im BZ-Fahrzeug SAM [20]

POLYMERELEKTROLYT-BRENNSTOFFZELLEN (PEFC)

Sowohl im stationären (Batterieersatz in USV-Anlagen) als auch im portablen Bereich (APU-Anhänger, luftgekühlter 1kW-Stack) sowie im Transportbereich (Boote, Spezial-Fahrzeuge) wurden die Umsetzungsaktivitäten fortgesetzt. Um die Gründe für Unzulänglichkeiten, die erst während dem Betrieb von Demonstratoren und Pilotanlagen auftauchen, zu finden sowie die Qualität der Entwicklungen zu steigern, ist ein Monitoring mit anschließender Auswertung der Betriebsdaten unerlässlich.

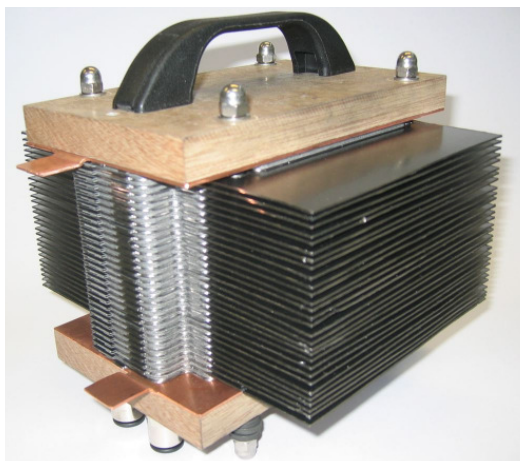
Der 6 kW Brennstoffzellenstapel für den LEV-SAM verzeichnete innerhalb von 2 Jahren einen erheblichen Leistungsverlust. Von anfänglichen 6,25 kW Stapelleistung im Jahr 2004 waren nach 2 Jahren Betrieb nur noch 2,0 kW übrig geblieben (siehe Fig. 21). Interessanterweise erfolgte der Performance-Verlust schubweise, so dass die grössten Einbussen nach längeren Stillstandszeiten des Stapels auftraten. Das Ziel des Projektes **Analyse der vorzeitigen Alterung des PEM-Stacks im LEV SAM** [20] der *BFH HTI* ist die Ermittlung des Ist-Zustandes des 2004 gebauten Brennstoffzellen-Stapels, sowie die Beurteilung des Performanceverlustes und die Diskussion von Verbesserungsvorschlägen zur Reaktivierung des Stapels.

Erste Untersuchungen am Stapel ergaben, dass die Performance-Verluste aufgrund von Verschmutzungen auftraten, die durch eine ungenügend gute Dichtung zwischen dem Kühlwasser und der Zellen hervorgerufen wurden. Diese erhöhte Undichtheit führte bei diesem Stapel auch zum starken Austrocknen der Membran wenn er lange ungenutzt war. Weitere Untersuchungen bestätigten, dass das Hauptproblem in dem Dichtungssystem des Stapels liegt. Die Vertiefungstaschen in den Graphitfluss-

feldplatten, in welchen die Elektroden der Membran-Elektroden-Einheiten liegen, sind zu wenig tief. Hierdurch kann die flexible Dichtung nicht optimal dichten, da sie nicht genügend stark zusammengepresst wird. Dies führt einerseits dazu, dass Kühlwasser in die Gaszellen der Brennstoffzellen gelangen kann. Die Undichtheit der flexiblen Graphitschicht führte zu einem weiteren Problem. Wenn der Brennstoffzellenstapel längere Zeit ungenutzt herumsteht, kann er austrocknen. Je schneller er austrocknen kann, um so eher werden die Membranen durch Schrumpfen beschädigt. Da die Membran aber durch die Flussfeldstruktur eingeklemmt ist kann sie sich nicht frei bewegen und so spannt sich die Membran, bis sie sogar überdehnt wird und kleinste Risse oder Mikrolöcher entstehen können. Als Folge verliert die Zelle deutlich an Leerlaufpotential und benötigt eine höhere Gasstöchiometrie. Nach der Inbetriebnahme neuer Stapel muss daher darauf geachtet werden, dass der Stapel regelmässig in Betrieb genommen wird, so dass er allzeit genügend feucht bleibt. Idealerweise sollte der Stapel jede Woche eine Stunde in Betrieb genommen werden.

Neuere Entwicklungen in der Reformattechnik zeigen, dass auch PE-Brennstoffzellen kleinerer Leistung vermehrt mit reformierten Gasen betrieben werden können. Da die Zusammensetzung des Anodengases dabei recht unterschiedlich sein kann, müssen die BZ-Stacks mit flexiblen Gasgemischen getestet werden können. Im neu gestarteten Projekt **Erweiterung des BFH Testlabors für PEM-Brennstoffzellen** [21] wird eine Anlage zur Beimischung von CO und N₂ zum Wasserstoff, der Aufbau eines Teststandes für PEM-Stacks im kleinen Leistungsbereich sowie eine Testanlage für Einzelzellen aufgebaut. U.a. ist auch im Hinblick auf eine Weiterentwicklung des IHPoS-Stacks eine Erweiterung des bestehenden Teststandes unumgänglich.

Mit dem Ziel, aus einem früheren Forschungsobjekt (ein 500 W Stapel mit 32 Zellen) ein kommerzielles Produkt zu entwickeln, wird an der **BFH HTI Biel** in Zusammenarbeit mit der Firma **CEKA Elektrowerkzeuge** aus **Wattwil** in Rahmen des BFE/KTI-Projekts **IPHoS, luftgekühlten PEM-Brennstoffzellenstapel** [22] ein Polymer Elektrolyt Membran Brennstoffzellenstapel für die industrielle Anwendung entwickelt (siehe Fig. 22). Als Konstruktionsmaterialien für die Bipolarplatte werden bewährte flexible Graphitfolien eingesetzt, deren Vorteil in einer einfachen Verarbeitung liegen und dadurch sehr schnell und verhältnismässig kostengünstig hergestellt werden können. Im Projektjahr 2006 wurden mehrere Stackgenerationen aufgebaut in welchen u.a. die Ergebnisse der thermischen Simulationen und die Patentsituation berücksichtigt werden konnten. Dabei konnte die Leistungsfähigkeit des Stacks erhöht werden, die Anforderungen an die Peripherie verringert und der Zellaufbau erheblich vereinfacht werden. Die Eignung des Stapels für Anwendungen mit Reformatgas wurde auf Wunsch eines Systemintegrators in das Projekt aufgenommen. Die Untersuchung zur Tiefstartfähigkeit wurde zurückgestellt. Zudem konnte an der **BFH HTI** ein weiterer Demonstrator für den IHPoS-Stack in Form einer tragbaren Stromversorgung gebaut und getestet werden.



Figur 22: Der in Zusammenarbeit BFH HTI und CeKa AG im KTI Projekt IPHoS entwickelt, luftgekühlte PEFC-Stapel [22]



Figur 23: PacBoat: eine 300W PEFC Brennstoffzelle dient als Powersupply für den elektrischen Antrieb eines Fischerbootes Jonson - MinneKota [24]

Im Projekt **PacBoat: Possibilités et limitations des piles à combustibles dans la navigation** [23] werden an der **HE-SO** in Yverdon die Möglichkeiten und Grenzen brennstoffzellenbetriebener Boote für Seen und Kanäle ausgelotet. Verglichen wurden dabei die Eigenschaften der bisher am Institut gebauten brennstoffzellenbetriebenen Boote (siehe <http://energies-renouvelables.hes-so.ch/>) mit solchen mit reinem Batteriebetrieb. Eingeflossen sind auch die Resultate des Projektes **PacBoat Integ-**

ration d'une pile a combustible 300W pour la motorisation electrique de petites embarcations [24], einem Batterie/BZ-betriebenen Fischerboot (siehe Fig. 23). Die Brennstoffzelle (300W) wurde von Horizon Fuel Cell Technology (Singapore), das Antriebssystem (1500W) von Jonsohn Outdoors (USA) inklusive technischer Beratung geliefert. Die Analyse aller Betriebsdaten zeigte klar, dass die Grenzen durch die Speicherkapazitäten von Wasserstoff auf dem Boot gesetzt sind. Anlässlich der in Yverdon organisierten Journée ER06“ (energies renouvelables dans les domaines du bâtiment et de la mobilité) [25] wurde die Öffentlichkeit über die neuesten Resultate der Brennstoffzellen Boote informiert.

An der HTA Luzern wurde im Projekt **USV für GSM-Basisstationen mit BZ(PEM Fuel Cell Back-Up System)** [26] ein Anlage-Prototyp zur Unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) mit Brennstoffzellen anstelle von Bleibatterien konzipiert und erfolgreich in Betrieb gesetzt. Das verzögerte Anfahrverhalten der Brennstoffzelle wird durch Superkapazitäten überbrückt. Die erste Projektphase umfasste Planung, Systemzusammenbau und Labortests. In der zweiten Projektphase wurde das BZ-System an eine reale Telekommunikations-Basisstation (Antenne) angeschlossen und im Feldtest für den Zeitraum eines Jahres erprobt (siehe Fig. 24). Der Feldtest umfasste monatliche Stromausfall-Simulationen bei einer realen Verbraucherlast von ca. 3.3 kW sowie Tests mit externer Last bis 8.5 kW zur Aufnahme der Kennlinie. Wasserstoff wird über zwei 50l-Druckgasflaschen zur Verfügung gestellt, die bei Antennenlast einen autonomen Betrieb der Anlage bis zu 6 h gewährleisten. Die Ergebnisse der insgesamt 138 Stromausfall-Simulationen mit einer Gesamtlauzeit der Brennstoffzelle von 39 h waren sehr zufrieden stellend. Auch bei einem unwetterbedingten, realen Stromausfall hat die Anlage für eine knappe Stunden den Strom problemlos überbrückt. Das Projekt findet in Zusammenarbeit mit den Industriepartnern APC Industrial Systems, als Hersteller und Marktleader im Bereich von USV-Anlagen und Swisscom Mobile AG, als Anwender von USV-Anlagen im Telekommunikationsbereich statt. Um Erfahrungen im Langzeitverhalten der Brennstoffzelle zu sammeln, wird der Feldtest für zwei weitere Jahre fortgesetzt.



Figur 24: Aussen Ansicht der USV-Anlage für Mobilfunkantennen mit Luftkühler und H₂-Druckflaschen direkt neben der Antenne [26]



Figur 25: Tisch-Demonstratormodell zur photoelektrolytischen Wasserspaltung mittels Sonnenlicht (WO₃-Photoanode mit Pt-Kathode und Spannungserhöhung durch Si-Photovoltaikzelle – im Quarzglasbehälter mit 1M H₂SO₄ als Elektrolyt). [27]

WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

Das Projekt **Demonstrator-Zelle für photoelektrolytische Wasserspaltung** [27] bezweckt in einer ersten Phase die photoelektrochemische (PEC) Wasserspaltung anhand eines einfachen Tischmodells praktisch zu bestätigen und später die rechtliche Situation des in der Schweiz erfundenen und patentierten PEC Tandem-Zellenkonzepts zu analysieren.

Für das Kleist-Tischmodell wurde eine an der *Universität Genf* hergestellte nanokristalline Wolframtrioxid (WO₃) Photoanode für die Sauerstoffproduktion gewählt, während davon getrennt die Wasserstoffproduktion an einer an der *Universität Bern* vorbereiteten Platinkathode erfolgte. Da die WO₃-Photoanode nur im UV- sowie im Blaulichtspektrum absorbiert, sorgt bei diesem PEC Demonstrator eine Photovoltaikzelle für die Absorption der restlichen Solarlichtspektra und damit für die zur Wasserspaltung nötige Spannungserhöhung (siehe Fig. 25). Die am *SPF Institut für Solartechnik* aufgebaute PEC-Demonstrator-Tandemzelle eignet sich als einfaches und anschauliches Tischmodell im Freien.

Bewertung 2006 und Ausblick 2007

Das Jahr 2006 war ein Jahr des Auf- und Umbruchs. Abgesehen davon, dass die **Programmleitung in neue Hände** gegeben wurde, was zu einer mehrmonatigen Einarbeitungszeit mit Besuchstour führte, ist neu auch die Wasserstoffforschung ins Programm integriert worden. Dies ist unter anderem auch in der Abkürzung **HFC** und in der Neugestaltung sowie Farbgebung des **Programmlogos** ersichtlich. Die neue Programm- und Bereichsleitung verfügt über komplementäre Kompetenzen und einen sehr guten **Teamgeist**, welche auch kontroverse jedoch konstruktive Diskussionen und Bewertungen der Vorhaben sowie Ziele bewirkt.



Im **SOFC-Bereich** ist es ein grosser Glücksfall, dass das Know-how von *Sulzer Hexis* in der *Hexis AG* wieder neu aufblühen und die vielversprechende **Forschungs-Kooperation SOF-CH** mit *HTceramix SA* und den in diesem Bereich führenden Schweizer Forschungsinstitutionen gegründet werden konnte. Die gute Ziel-Absprache und das fokussierte Vorgehen führte zu einer sehr positiven Wahrnehmung der SOFC-Gemeinschaft, so dass auch andere Förderorganisationen wie das *CCEM*, die *KTI* und vor allem der *swisselectric research*, das Förderprogramm der Organisation der Schweizer Stromverbundunternehmen, die Bündelung des Schweizer SOFC Know-hows estimiert.

Im **PEFC-Bereich** sind die zielbewusste Weiterführung der Aktivitäten bei *Ceka AG* in verschiedenen Projekten sowie das erneute Hinzukommen von *MesDea SA* auf dem Schweizerischen Forschungsparkett besonders erwähnenswert. Dies bringt gesunde Spannung in die Diskussionen und bedeutet zudem eine Erweiterung der künftigen Brennstoffzellen-Marktabdeckung. Ziel ist es im nächsten Jahr die unterstützen Forschungsaktivitäten mit dem *PSI*, *Unis* und *FHS* zum Nutzen beider Industriepartner über eine **fokussierte Roadmap** optimal zu koordinieren und den Aufbau von Nischenmarktanwendungen zu unterstützen. Die verstärkte Nutzung von Synergien ist beim weiterhin reduzierten Energieforschungsbudget des BFE eine wichtige Massnahme.

Im **Wasserstoffbereich** war es in diesem Jahr abgesehen von der Verlagerung der Aktivitäten der *Uni Fribourg* zur *EMPA* verhältnismässig ruhig. Im 2007 sind aber aufgrund der **anstehenden Pensionierungen**, vorab von *Prof. Calzaferri Uni Bern* und *Prof. Augustynski Uni Genf* grössere Verlagerungen der Photoelektrolyse-Aktivitäten zu erwarten. Ziel wird es sein die **Forschungsschwerpunkte** sowie die **Schweizer Kompetenzen** kritisch zu bewerten und entsprechend international optimal positionierte Gruppen oder Kooperationseinheiten zu initiieren.

Ziel des Programms insgesamt ist es die bestehenden **Kompetenzen, Kooperation und industrielle Basis zu bündeln** und im Rahmen der Möglichkeiten auszubauen. Neben Stabilität in der Grundlagenforschung soll unter anderem auch durch längere PhD-Projekte ein entsprechender Beitrag für die Konstanz in der Ausbildung erreicht werden. Immer wichtiger ist ferner die Unterstützung zur Vernetzung der Stakeholder mit dem Ausland und mit anverwandten Bereichen wie beispielsweise Verkehr, elektrische Systeme und Gebäude. Speziell auch im P&D Bereich gehören das Anregen und Ermöglichen von **nationalen Verbundprojekten** sowie von **EU-Projekten** zu den wichtigsten Schnittstellenfunktion des BFEs (Stichworte: WTT, Anschubfinanzierung). Hierzu soll auch das internationale Engagement zumindest bei der *IEA* und der *HFP* (Mirror-Group) der EU weitergeführt werden.

Nach der Ausarbeitung und Finalisierung des Konzeptes 2008-2011 durch die 8. Energieforschungskonferenz in Neuchâtel im März 07, steht dann bis Ende 2007 die **Formulierung des Vierjahres-Detailkonzeptes** unter Berücksichtigung der nationalen (Industrie-)Bedürfnisse und der internationalen Vorgaben aus. Ebenfalls vorgesehen ist im Herbst 07 (KW 48) eine Neuauflage eines **nationalen HFC-Programm-Impulstages**.

Abschliessend ist zu erwähnen, dass die neue Programmleitung vom scheidenden Programm- und Bereichsleiter *Dr. Alphons Hintermann* ein grosses Erbe dankend übernehmen konnte. Dieses soll nach dem inzwischen berücktigten „**Hintermann Prinzip**“ – persönlicher Kontakt, Zusammenarbeit und Kontinuität – gepflegt und ausgebaut werden.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2005 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch)

Unter den angegebenen Internet-Adressen sind die Berichte sowie weitere Informationen verfügbar.

BRENNSTOFFZELLENTHEOLOGIE

- [1] O. Bucheli (olivier.bucheli@htceramix.ch), Yverdon: **Advanced Test Set-up for long-Term Testing of Anode supported SOFC** (JB).
- [2] S. Duval, P. Holtappels (peter.holtappels@empa.ch), Empa Dübendorf: **Intermediate Temperature Fuel Cells based on Ceramic Proton Conducting Electrolytes**, (SB)
- [3] A. Bieberle et. al. (anja.bieberle@mat.ethz.ch), Zürich **A Mikro-solid Oxide Fuel Cell System for Battery replacement** (Zusammenfassung, Überblick)
- [4] Michael Stutz (michael.stutz@lnt.iet.mavt.ethz.ch), Nico Hotz (nico.hotz@lnt.iet.mavt.ethz.ch), Nicole Bieri (nicole.bieri@lnt.iet.mavt.ethz.ch), Dimos Poulikakos (dimos.poulikakos@sl.ethz.ch), Zürich, **Micro-Solid Oxide Fuel Cell on the Chip** (SB).
- [5] Josef Sfeir (josef.sfeir@hexis.com) Hexis AG, Winterthur, **Enhancing the lifetime of SOFC stacks for combined heat and power applications** (JB)
- [6] F. Büchi, M. Roos, (felix.buechi@psi.ch), PSI, Villigen: (markus.roos@zhwin.ch) ZHW, CCP, Winterthur: **Numerische Modellierung von PEFC, Weiterentwicklung und erste Validierung des 2D+1 Modellansatzes**, (SB).
- [7] G. Scherer et al. (guenther.scherer@psi.ch), PSI, Villigen: **Polymerelektrolyt Brennstoffzellen mit H₂ oder Methanol als Brennstoff**, (SB).
- [8] G. Scherer et al. (guenther.scherer@psi.ch), PSI, Villigen: **Protonenleitende Polymerelektrolytmembranen für Brennstoff- und Elektrolysezellen**, (JB).
- [9] A. Rainer et. al: **Influence of the Morphology on the Platinum Electrode Surface Activity**, J. Power Sources, **156**, 28-32, 2006.
- [10] D. Thiele, A. Züttel, (andreas.zuetzel@bluewin.ch), EMPA, Dübendorf: **New Highly Active Oxygen Reduction Electrode for PEM Fuel Cells and Zn/Air Battery Application (NORA)**, (JB).
- [11] G. Schuler, (gabriel.schuler@psi.ch), PSI, Villigen: **Lokale Gasphasenanalyse an PE-Brennstoffzellen** (JB).

WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

- [12] J. Augustynski (jan.augustynski@cham.unige.ch), Université de Genève, Genève: **Photolyse de l'eau et production d'hydrogène au moyen de l'énergie solaire** (JB)
- [13] M. Graetzel (Michael.graetzel@icp.dc.epfl.ch), EPF-Lausanne: **Photolyse de l'eau et production d'hydrogène au moyen de l'énergie solaire** (JB).
- [14] W. Hyk, J. Augustynski: **Under the Conditions of Mixed Diffusional and Migrational Mass Transport**, J. Electrochem. Soc., **153**, A2326 (2006) also selected for Virtual Journal of Nanoscale Science and Technology, Nov. 13, 2006
- [15] Egbert Figgemeier, (Edwin.Constable@unibas.ch, egbert.figgemeier@unibas.ch), Uni Basel, **Nanocrystalline Electrodes Functionalized with Light Sensitized [2Fe-2S]-Iron-Sulfur Clusters for Hydrogen Production (NEFIOS-Hydro)** (JB).
- [16] A. Currao (currao@iac.unibe.ch), Calzaferri (calzaferri@iac.unibe.ch) UNI Bern: **Photochemische Umwandlung und Speicherung von Sonnenenergie** (JB).
- [17] A. Züttel (andreas.zuetzel@empa.ch) EMPA Dübendorf: **Wasserstoffspeicherung in Metall- und komplexen Hydriden** (JB).
- [18] K. Yvon (Klaus.yvon@cryst.unige.ch), UNI Genf: **New metal hydrides for hydrogen storage in fuel cell systems** (JB).

Liste der P+D-Projekte

BRENNSTOFFZELLENTHEOLOGIE

- [19] O. Bucheli (olivier.bucheli@htceramix.ch), Yverdon **Development of an autonomous transportable SOFC system operating on C-based fuel** (SB).
- [20] M. Höckel, (hkm1@bfh.ch), Hochschule für Technik und Informatik, Biel: **Analyse der vorzeitigen Alterung des PEM-Stacks im LEV SAM** (SB).
- [21] M. Höckel, (hkm1@bfh.ch), Hochschule für Technik und Informatik, Biel: **Erweiterung des BFH Testlabors für PEM-Brennstoffzellen** (JB).
- [22] M. Höckel, (hkm1@bfh.ch), Hochschule für Technik und Informatik, Biel: **IPHoS, luftgekühlten PEM-Brennstoffzellenstapel** (JB).
- [23] JF. Affolter, (jean-francois.affolter@heig-vd.ch), HES-SO / HEIG-VD, Yverdon: **PacBoat: Possibilités et limitations des piles à combustibles dans la navigation** (JB).
- [24] JF. Affolter, (jean-francois.affolter@heig-vd.ch), HES-SO / HEIG-VD, **PacBoat Integration d'une pile a combustible 300W pour la motorisation électrique de petites embarcations** (SB)
- [25] Affolter JF (jean-francois.affolter@heig-vd.ch), Carpita M, Gaille F, Schintke S: **Possibilités et limites des piles à combustible dans la navigation, article, recueil des conférences**, ER06, 4 octobre 2006.

- [26] U. Trachte (utrachte@hta.fhz.ch), HTA-Luzern, **USV für GSM-Basisstationen mit BZ(PEM Fuel Cell Back-Up System**, (SB)

WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

- [27] A. Luzzi (Andreas.Luzzi@solarenergy.ch), SPF Rapperswil, **Demonstrator-Zelle für photoelektrolytische Wasserspaltung**, (JB)

Referenzen

- [28] S. Renz (renz.btr@swissonline.ch), THOMA+RENNZ Basel: **Erfahrungsbericht über 5 Jahre Betrieb der Brennstoffzelle vom Typ ONSI in Birsfelden**, (SB)
- [29] Hydrogen Report Switzerland
- [30] M. Spirig, A. Luzzi (info@PECNet.org) SPF HSR Rapperswil, **PECNet Aufbau eines Schweizer Kompetenznetzwerkes für die solare Wasserspaltung mittels hybrider PV-PEC Zellen** (JB)
- [31] S. Renz (renz.btr@swissonline.ch), THOMA+RENNZ Basel: **Market Outlook for stationary Fuel Cells**, (JB).
- [32] O. Bucheli (olivier.bucheli@htceramix.ch), HTceramix SA, Yverdon: **Participation of Switzerland in IEA Implementing Agreement, Annex XVIII (SOFC)**, (JB).
- [33] BFE-Reiseberichte zu den beiden AFC-ExCo 2006: ieafuelcell.com
- [34] BFE-Webseite zum Download Liste der Projekte 2004/2004, Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 bis 2011, www.bfe.admin.ch/themen/00519/00521/index.html?lang=de&dossier_id=00798
- [35] O. Bucheli (olivier.bucheli@htceramix.ch), HTceramix SA, Yverdon: CD-ROM Helsinki Meeting vom 30.06.2006
- [36] A. Gut (Andreas.Gut@bfe.admin.ch), BFE, BFE-Reiseberichte zu den HFP-Meetings 2006: https://www.hfpeurope.org/hfp/mg_25jan2007, Login auf Anfrage
- [37] McEvoy/Thampi (Augustin.McEvoy@epfl.ch), LPI, **Summary of fuel-cell related activities** (interner Bericht)
- [38] McEvoy/Thampi (Augustin.McEvoy@epfl.ch), LPI, **Proceedings Sommerschool Lemnos**, Sept. 2006
- [39] **1st Fuel Cell Research Symposium** 18. März 04, ETH Zürich
www.nonmet.mat.ethz.ch/news_events/conference/Fuel_Cell_Research_Symposium_040318
- [40] **2nd Fuel Cell Research Symposium Modelling and Experimental Validation**, DLR Stuttgart, 3.-4. März, 2005, www.fuel-cell-mv2.dlr.de
- [41] **3rd Fuel Cell Research Symposium on Modelling and Experimental Validation**, 16.-17. März 06, Empa Dübendorf, www.empa.ch/plugin/template/empa/1032/*/--/l=1
- [42] **4th Fuel Cell Research Symposium on Modelling and Experimental Validation**, 6.-7. März 07, FZ-Jülich
<http://www.fz-juelich.de/iwv/iwv3/modelling>
- [43] **5th Fuel Cell Research Symposium on Modelling and Experimental Validation**, 11.-12. März 08, ZHW Winterthur
www.ccp.zhwh.ch