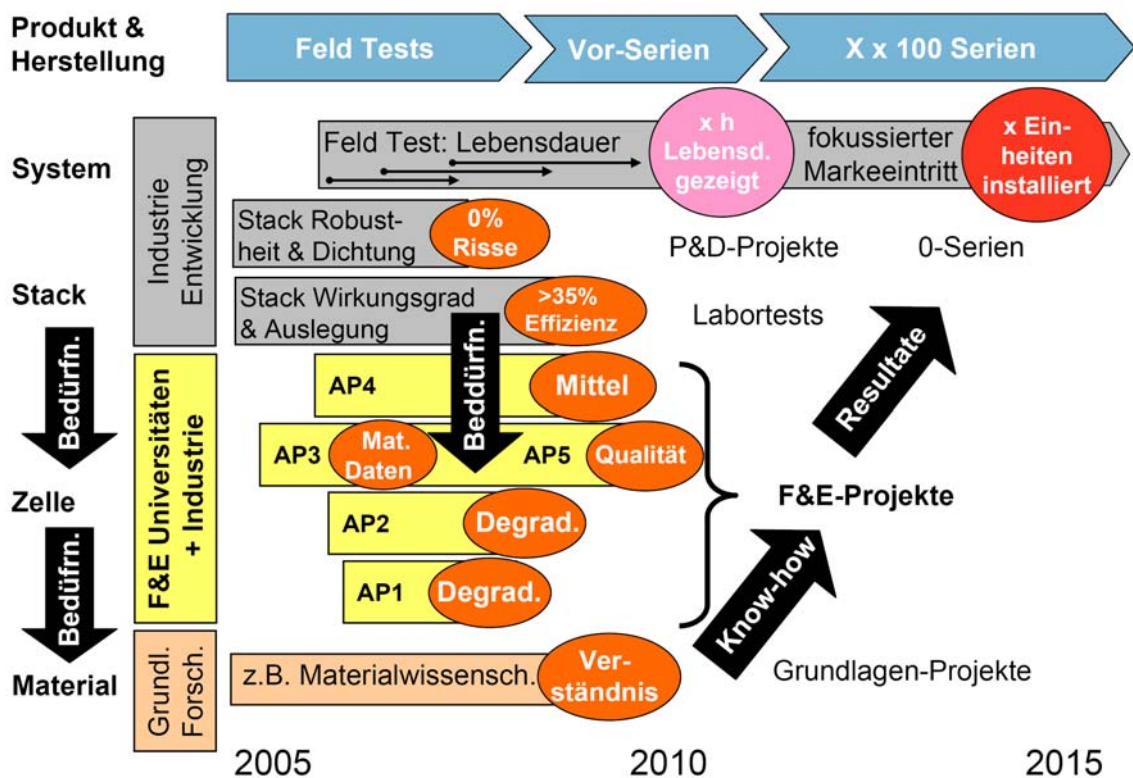


Rapports de synthèse des chefs de programme OFEN Überblicksberichte der BFE-Programmleiter 2007

PROGRAMM BRENNSTOFF- ZELLEN INKL. WASSERSTOFF

Andreas Luzzi / Michael Spirig

PLeitungHFC@hsr.ch



Roadmap zur Vorkommerzialisierung von SOFC-Brennstoffzellen-produkten.

Um den Herausforderungen für die Kommerzialisierung von Brennstoffzellen zu begegnen, ist eine enge, fokussierte Zusammenarbeit zwischen den Forschungs- und Industriepartnern unabdingbar. Die industriellen Bedürfnisse und Anforderungen werden laufend in Forschungsprojekte aufgenommen. Mittels spezifischer Arbeitspakete (AP) nähert man sich den mittelfristigen Hauptzielen [6]. Analoge Roadmaps unterstützen die Entwicklung von Produkten zur Wasserstoffherstellung und -Speicherung.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Das Programm Brennstoffzellen und Wasserstoff verfolgt **vier Hauptziele**:

1. Lieferung von Beiträgen zu den Zielen des Konzeptes der Energieforschung des Bundes [1] durch Begleitung, Koordination und Vernetzung von Forschung, Entwicklung und Demonstration der Schweizer Akteure.
2. Förderung der angewandten Forschung und Entwicklung sowie des daraus resultierenden Technologie und Wissenstransfers in die Industrie.
3. Einbettung der nationalen Forschungsaktivitäten in die internationalen Aktivitäten.
4. Operation als Schnittstellenfunktion zwischen Forschung und Politik.

Tabelle 1 zeigt die technischen und wirtschaftlichen Zielsetzungen, wie sie im Detailkonzept des Programms Brennstoffzellen (BZ) und Wasserstoff (H₂) [2] ausgeführt sind. Diese sind mit denjenigen der Europäischen Kommission abgeglichen. Das zielgerichtete Fortführen der Grundlagenforschung ist weiter eine wichtige Stütze für den Erhalt von Fachkompetenzen und Exzellenz. Das Sammeln von Erfahrungen mittels Pilot- und Demonstrationsprojekten wird auf die gebäudeintegrierte Wasserstoffkette (Produktion, Speicherung, Anwendung) und auf die energetische Verwendung von Wasserstoff im Mobilitätsbereich fokussiert.

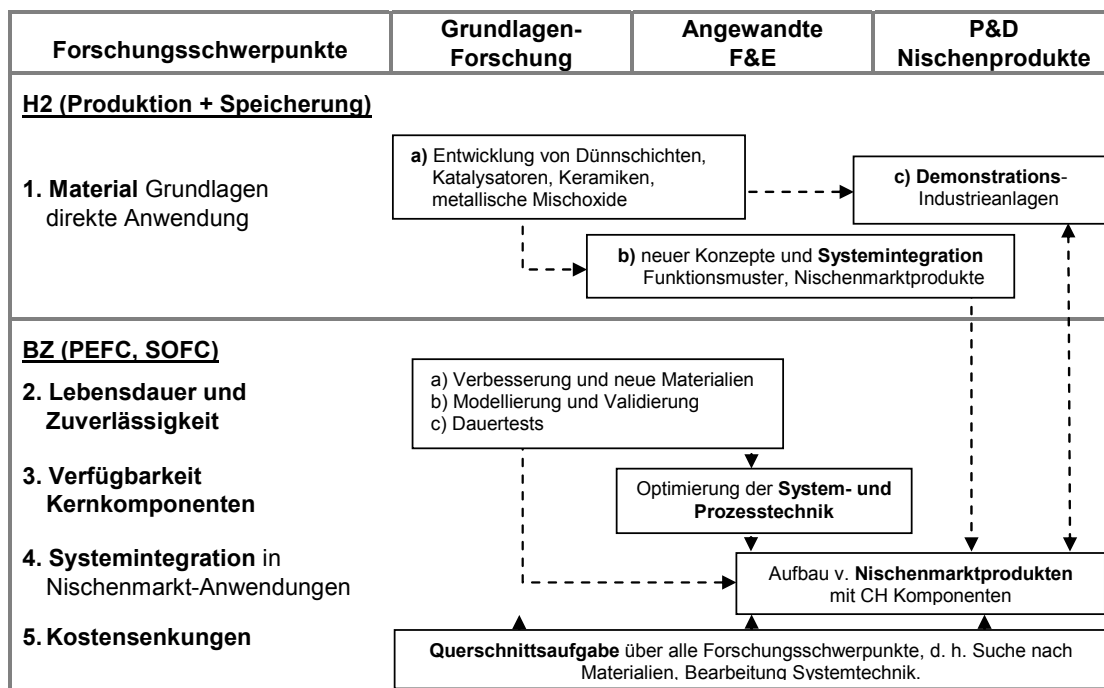


Tabelle 1: Ziele und Forschungsschwerpunkte des Programms **Brennstoffzellen und Wasserstoff** und Zuteilung zum entsprechenden F&E- sowie P&D-Bereich.

Im Bereich Brennstoffzellen werden folgende Werte angestrebt:

- Zuverlässigkeit: Unterbruchsfreier Betrieb: > 1 h (PEFC); 200 h (SOFC)
- Lebensdauer: Degradation um max. 20%: > 250 h (mobil); 1'500 (stationär)
- Investitionskosten für die Brennstoffzelle: < 5'000 – 15'000 €/kW

Im Bereich Wasserstoff werden folgende Entwicklungsschritte angestrebt:

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

Die Ziele gelten als „erreicht“, sobald im Brennstoffzellenbereich von den Entwicklern garantiert werden können und im Wasserstoffbereich die Materialien und Demonstratoren mit entsprechenden Funktionalitäten vorliegen.

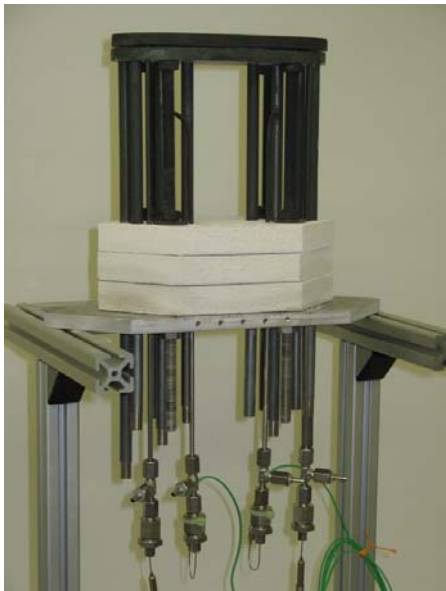
Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2007

BRENNSTOFFZELLENTECNOLOGIE

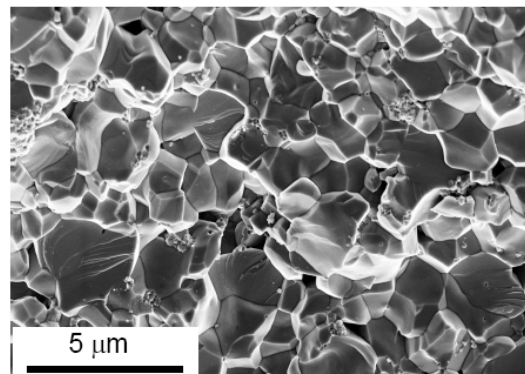
ERDGAS–FESTSTOFFOXID-BRENNSTOFFZELLEN (SOFC)

Im Rahmen des EU-Projekts **REAL-SOFC** [3] wurden – mit Schweizer Beteiligung – grosse Forschungsanstrengungen zur Reduktion der Materialdegradation von SOFC unternommen, insbesondere durch Verwendung besserer Kathodenmaterialien und Metallbeschichtungen. Auf der Stufe Materialien wurden Fortschritte auf dem Niveau Zellen mit Tests über 3'000 h Lebensdauer demonstriert. Mit den besten Materialien wurden Stacks gebaut. Jedoch überlebte keiner der getesteten Stacks 2'500 Betriebsstunden auf dem Teststand. 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. Mit einem neuen Stackdesign, das Abgasrückführung erlaubt, konnten *HTceramix* und die *EPFL* Stackbetriebszeiten von weit über 3'000 h erzielen. Die neuen Stacks wurden von der EU als neues Referenz-Design anerkannt und erlauben Langzeitmessungen auf Material- und Komponentenstufe.

Im Projekt **Advanced Test Set-up for Long-Term Testing of Anode Supported SOFC Stacks** [3] wurden zwei Test-setups für SOFC entwickelt und erste Messserien durchgeführt (siehe Fig. 1). Der einfachere Teststand wird mit synthetischen Brennstoffmischungen betrieben und dient vor allem für die Prüfung von Materialeigenschaften. Der zweite Teststand besitzt einen kleinen, integrierten Methandampfreformer und ermöglicht zusätzliche Temperatur- und Gasmessungen. Damit eignet er sich zu Abklärungen zum Langzeitverhalten von mit Methan als Standardbrennstoff betriebenen Stacks und somit für die Validierung von Modellen.



Figur 1: Test Set-up, der den Wärmehaushalt von bis zu 10 Zellen erfassen kann [3]



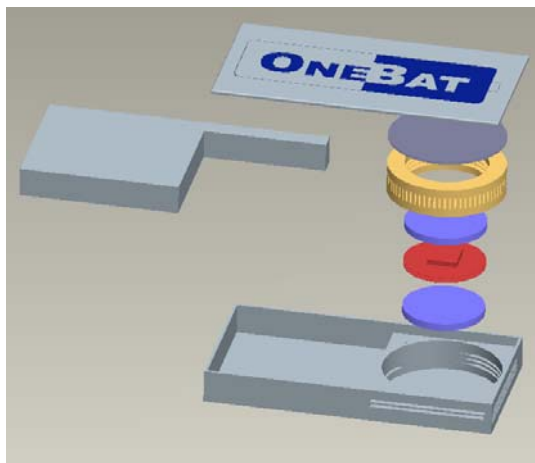
Figur 2: Bruchbild eines gesinterten BZY10 Pulvers für protonenleitende Brennstoffzellen [4]

Festoxid-Protonenleiter arbeiten im Temperaturbereich von 300 – 600 °C. Sie haben das Potential für eine Brennstoffzellentechnologie, welche die Vorteile der PEFC- und der SOFC-Technologien kombiniert. Unter den protonenleitenden elektrolytischen Materialien ist Yttrium dotiertes Bariumzirkonat (BYZ) der vielversprechendste Kandidat. Das Ziel des Projekts **Intermediate Temperature Fuel**

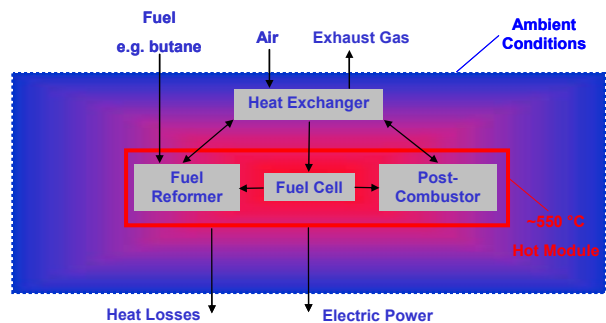
Cells Based on Proton Conducting Electrolytes [4] war die Synthese und Charakterisierung solcher Materialien. Es konnte gezeigt werden, dass BYZ aufskalierbar ist und mit hoher Phasenreinheit produziert werden kann. Messungen ergaben eine höhere Protonenleitfähigkeit in bulk BYZ als an den Korngrenzen. Als kritischer Parameter für dieses unerwünschte Verhalten wurde die Struktur von BYZ an den Korngrenzen identifiziert (Fig. 2). Eine Erklärung für die niedrige Protonenleitfähigkeit an den Korngrenzen steht jedoch noch aus. Bis zum Einsatz von BYZ in Brennstoffzellen ist es noch ein weiter Weg, hingegen könnte BYZ interessant für Anwendungen im Sensorenbereich sein.

Das inter-disziplinäre Verbund-Projekt **ONEBAT** [5], in dem die Kompetenzen von fünf Hoch- und Fachhochschulinstiuten vernetzt sind, wurde 2004 gestartet (<http://www.nonmet.mat.ethz.ch/>). Ziel ist die Herstellung einer Butangas-betriebenen Brennstoffzelle, die kostengünstiger als herkömmliche Kleinstakkumulatoren vermarktet werden kann. Bis anhin konnten folgende Ziele erreicht werden:

Die Brennstoffzelle funktioniert mit einer 5 mm grossen, freistehenden Membran mit einer Leistung von 150 mW/cm^2 . Das Design ist fertigungstechnisch machbar. Die Gasverarbeitungseinheit konvertiert mehr als 90% Butangas bei $550 \text{ }^\circ\text{C}$ und der Wärmetauscher kann so ausgelegt werden, dass bei einer Betriebstemperatur der SOFC von $550 \text{ }^\circ\text{C}$ die Aussentemperatur $35 \text{ }^\circ\text{C}$ nicht übersteigt (siehe Fig. 3 und 4). Künftige Schritte sind die Herstellung eines Demonstrators und die Verbesserung der Leistungsdaten.



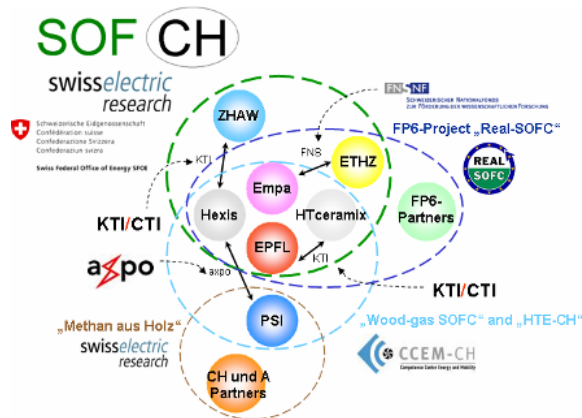
Figur 3: ONEBAT-Komponenten mit den System-spezifikationen: mittlere Leistung 2 – 10 W, Gesamtvolumen $< 75 \text{ cm}^3$ und spezifische Leistung 350 mW/cm^2 [5]



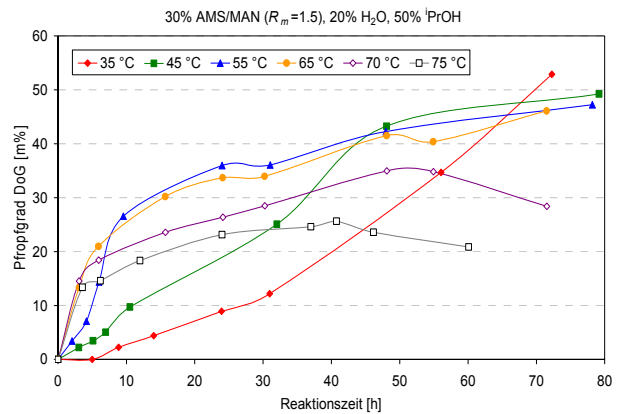
Figur 4: Funktionsweise und Randbedingungen des ONEBAT Systems: Elektrischer Wirkungsgrad 30%, Energiedichte des Brennstoffs 11 kWh/kg , Spitzengasfluss 0.29 g/h [5]

Nach wie vor leiden heutige SOFC an ungenügender Langzeitstabilität und Leistungseinbussen während ihrer Betriebszeit. Der primäre Grund ist die für die Stromproduktion typischerweise notwendige hohe Betriebstemperatur von $900 \text{ }^\circ\text{C}$. Diese führt zu hohen thermischen, mechanischen und chemischen Belastungen während des Betriebs und insbesondere beim An- und Herunterfahren der Brennstoffzelle. Thermische Spannungen führen zu Rissen in der Keramik und damit zu Leistungseinbussen. Mit vorkommerziellen Forschungsarbeiten für die beiden industriellen SOFC-Entwicklern *Hexis* und *HTceramix* tragen die Akademien im Konsortiums-Projekt **Enhancing the Lifetime of SOFC Stacks for Combined Heat and Power Applications, SOF-CH** [6] zum vertieften Verständnis dieser Fragestellungen und zur gemeinsamen Lösungssuche bei (siehe Fig. 5). Für die einzelnen Institute wurden ausgehend von einer entsprechenden Vision in einer Roadmap insgesamt 5 Workpackages (WP) definiert. Diese werden von verschiedenen Seiten finanziert und befassen sich mit den wichtigsten Fragen zur Degradation der SOFC (siehe Titelbild). In allen WP werden sowohl Experimente als auch Modellierungen zu den auftretenden Fragestellungen durchgeführt. WP1 konzentriert sich auf die Redox-Stabilität und die Anodenseite, WP2 befasst sich mit der Haltbarkeit resp. der Lebensdauer der Kathode. WP3 sieht Experimente zu den thermo-mechanischen Eigenschaften der Stack-Komponenten vor, welche als Basis für WP4, der Modellierung derselben, dienen sollen. WP5 ist eine Fortsetzung von WP3 mit Anwendung von zerstörungsfreien Methoden zur Charakterisierung. Eine erste Projektphase ist erfolgreich abgeschlossen.

Das Konsortium ist zudem noch in ein Biogas Projekt involviert, bei dem es unter anderem um die Untersuchung des Einflusses von Biogas, auf die anodenseitige Degradation bei der SOFC geht.



Figur 5: Kollaborationsnetzwerk SOF-CH für die vorkommerzielle gemeinsame Forschung & Entwicklung [6]



Figur 6: Reaktionsprofile für Pfröpfungen ohne Vernetzer bei verschiedenen Temperaturen [7]

POLYMER-ELEKTROLYT-BRENNSTOFFZELLEN (PEFC)

Ein wesentlicher Hinderungsgrund für den breiten Einsatz der PEFC-Technologie stellen die Kosten dar. Mit der Entwicklung verbesserter und kostengünstiger protonenleitender Polymermembranen, die als Festelektrolyte in PEFC und in H₂O-Elektrolyseuren zum Einsatz kommen, leistet das Paul Scherrer Institut (PSI) einen Beitrag zur verbesserten Effizienz und zur Kostensenkung dieser Technologien. Die Anforderungen an Polymermembranen sind komplex, da diese verschiedene Funktionen wie Protonenleitfähigkeit, Gastrennung, Grenzfläche zu Elektroden, Dichtungsfunktionen etc. zu erfüllen haben. Im Projekt **Protonen-Leitende Polymermembranen für Brennstoff- und Elektrolysezellen** [7,29] werden diese Parameter experimentell untersucht, theoretisch modelliert und optimiert. Zum Einsatz kommen Polymermembranen auf der Basis von 25 µm dicken FEP- (Fluorinated Ethylene Propylene) Filmen mit verschiedensten Pfröpfungen. Dazu wurden Reaktionsprofile gemessen, die den integralen Pfropfgrad als Funktion der Präparationsparameter ausweisen. Um kinetische Parameter zu bestimmen und dadurch die Effekte verschiedener Präparationsparameter quantitativ miteinander zu vergleichen, wurden die gemessenen Daten mit einem vereinfachten Modell dargestellt. Die Resultate waren aber unbefriedigend und machen die Ausarbeitung eines präziseren Modells notwendig. Einige der hergestellten Membranen konnten in Brennstoffzellenversuchen getestet und auf ihre Stabilität unter den Betriebsbedingungen einer H₂/O₂-Brennstoffzelle untersucht werden. Die erzielten Stabilitäten übertreffen jene mit Styrol als Propfkomponente erhaltenen um einen Faktor > 15. Weitere Tests von Membranen in der Brennstoffzelle sollen diese Ergebnisse untermauern und die Effekte der verschiedenen Membraneigenschaften (Pfropfgrad, Monomerverhältnis, Ionenaustauschkapazität, Leitfähigkeit, etc.) auf das Verhalten in der Brennstoffzelle evaluieren.

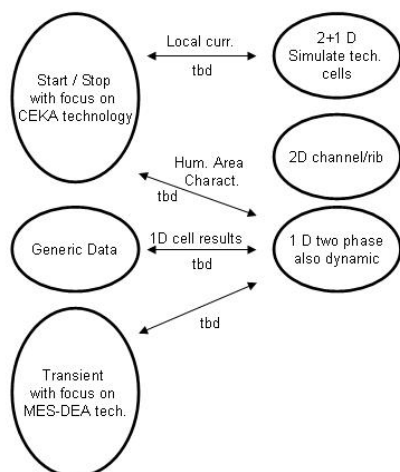
Lebensdauertests unter realen Bedingungen brauchen Tausende von Betriebsstunden und ein Durchsatz vieler Proben. Sie sind daher zeitraubend und führen zu einem langen Innovationszyklus, was wiederum eine kommerzielle Einführung der Brennstoffzellentechnologie weiter verzögert. Vorarbeiten zum Projekt **Lebensdauer Limitierungen von Brennstoffzellen-Membranen: Mechanismen, Methoden und Innovationen** [8] wurden in einer Diplomarbeit [30] zum Problemkreis Membranalterung durchgeführt. Darin wurden folgende Teilaspekte der Alterung der am PSI entwickelten strahlengepöpfen Membranen untersucht:

- Verschiedene Degradationsmechanismen unter Bedingungen beschleunigter Alterung
- Lokale Charakterisierung der Membranalterung in Bereichen, die Kanal und Steg zugeordnet werden können.

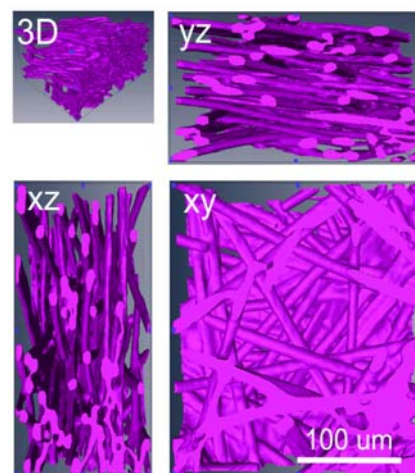
Erste Resultate weisen darauf hin, dass eine sorgfältig optimierte PSI-Membran unter gewissen Bedingungen länger halten kann, als die kommerzielle Nafion®112 Membran. Die Membran unterliegt gleichzeitig sowohl einer chemischen als auch einer mechanischen Degradation, deren Mechanismen unter gewöhnlichen Bedingungen schwierig auseinander zu halten sind. In der Folge soll im Projekt ein Ansatz gefunden werden, um diese Mechanismen unter kontrollierten Bedingungen separat zu untersuchen und beschleunigte Verfahren zum Verständnis von chemisch sowie mechanisch induzierten Alterungsprozessen zu finden, die aussagekräftige Testresultate zum Alterungsprozess von Membranen liefern.

Eine um 30% höhere Effizienz als herkömmliche Elektroden ist das Ziel des Projekts **New Highly Active Oxygen Reduction Electrode for PEM Fuel Cell and Zn/Air Battery Applications (NORA)** [9]. Hierzu ist die Überspannungen herkömmlicher Elektrodenmaterialien wie Platin auf aktiviertem Kohlenstoff bei der Sauerstoffreduktion in Zn/Luft-Batterien und Brennstoffzellen zu reduzieren. Im Berichtsjahr wurden vier verschiedene Elektroden, basierend auf Carbon Nanotubes (CNT's) und Perovskiten hergestellt und elektrochemisch charakterisiert. Dabei wurde festgestellt, dass es grundsätzlich für die Leistungsfähigkeit der Elektroden besser ist, wenn CNTs und Perovskite im Ultraschallbad gemischt werden, als wenn die CNTs direkt auf den Perovskiten gewachsen werden. Um die Aktivierungspolarisation (bei kleinen Stromstärken) möglichst klein zu halten, ist die Zugabe von geringen Mengen von Pt allerdings unerlässlich. Durch den kombinierten Einsatz von CNTs, Pt auf Kohlenstoff, Mangan-/Strontiumoxid-Perovskite optimierter Stöchiometrie wurde eine neue Elektrode entwickelt. Diese weist im gesamten Strombereich eine geringere Polarisation auf und hat einen wesentlich kleineren Platinbedarf als eine Vergleichselektrode aus Pt auf Kohlenstoff.

Weitere Hinderungsgründe für die Markteinführung von PEFC sind Alterungsprozesse und das schnelle Versagen der elektrochemischen Komponenten sowie die fehlende Zuverlässigkeit. Im PEF-CH-Netzwerk sollen diese Fragen in enger Zusammenarbeit mit der Schweizer PEFC-Industrie – *CeKa AG* und *MesDea SA* – vertieft angegangen werden. Im Projekt **Go.PEF-CH Enhancing PEFC Durability and Reliability under Application-Relevant Conditions** [10] sollen zwei Doktoranden diese Problemkreise, insbesondere die schnellen Laständerungen und der Einfluss der Start-Stop-Zyklen mit den neuen, am *PSI* entwickelten Diagnosewerkzeugen untersuchen. National wird auch mit der Berner Fachhochschule für Technik und Informatik (BFH-TI) zusammengearbeitet. Bei den Vorbereitungsarbeiten konnten unter anderem auf dem neuen Teststand der BFH-TI eine 200-Watt *IHPoS* (Integrated Hydrogen Power System) Brennstoffzelle der Firma *CEKA* während einer Laufzeit von 1'700 Stunden unter konstanten Bedingungen von 420 mA/cm^2 bei 65°C erfolgreich betrieben werden.



Figur 7: Verbindungen und Austausch zwischen den PEF-CH Konsortiumsprojekten links Go.PEF-CH [10] und rechts Cal.PEF-CH [11]



Figur 8: Hochaufgelöste, rekonstruierte Bilder (3D und in den 3 Schnittebenen) eines kleinen Volumens von toray T060 ohne PTFE [11].

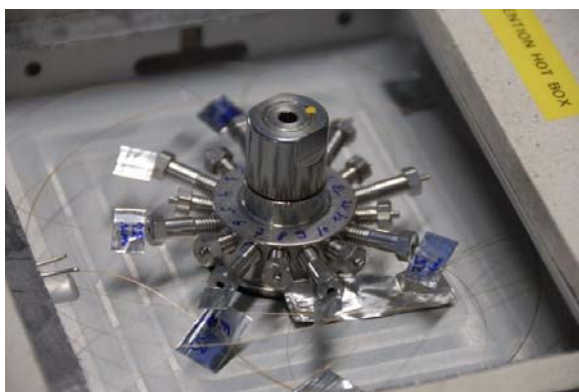
Im **Cal.PEF-CH** Projekt, welches ein weiteres PEF-CH Netzwerk Projekt ist und in enger Verbindung und Austausch mit dem Go.PEF-CH Projekt steht (siehe Fig. 7), werden Massentransporte (Gas, Wasserdampf und flüssiges Wasser) und deren Limitationen untersucht. Dies ist wesentlich sowohl für die Optimierung der Effizienz als auch für eine bessere Einsicht in die Degradationsmechanismen der PEFC-Zellen. Die anisotropen und mikroporösen Strukturen der Gasdiffusionsschichten (GDL), in denen der Gas-, Wasser- und Ladungstransport erfolgt, ist bisher mangels geeigneter Methoden nur wenig untersucht worden. Im **Cal.PEF-CH: Model Based Investigation of PE Fuel Cell Performance with Focus on Porous Layer Properties** [11, 31] wird nun diese Problematik experimentell untersucht und theoretisch modelliert.

Ein weiteres Ziel ist die Charakterisierung der strukturellen Eigenschaften von GDL-Materialien, insbesondere bezüglich Gastransport und Sättigung von Wasser. Durch geeignete Modellierungswerkzeuge sollen die physikalischen GDL Materialeigenschaften mit gemessenen Daten an Brennstoffzellen korreliert werden. Dank der *Swiss Light Source (SLS)* am *PSI* kann zur Bestimmung der anisotropen Mikroporenstruktur von GDL-Materialien – weltweit erstmals – die Röntgenstrahlen Mikro-Tomographie eingesetzt werden. Diese hat eine genügend hohe Auflösung um die feinen Strukturen innerhalb der GDL zu bestimmen. Sie erlaubt es auch, Transportvorgänge im Innern von Brennstoff-

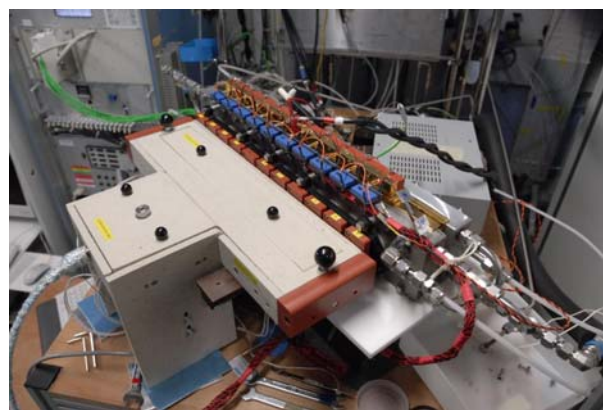
zellen dreidimensional zu verfolgen. Im Berichtsjahr wurde die Struktur von trockenen GDL-Materialien charakterisiert (siehe Fig. 8). Erstmals gelang es auch, die räumlichen Strukturen und deren Veränderungen unter verschiedenen mechanischen Beanspruchungen wie z.B. Druck zu verfolgen. Die Messmethoden und Modelle werden laufend verbessert und für 2008 sind Messungen und Berechnungen zum Transport von Gas und Wasser in GDL geplant.

Moderne Brennstoffzellenprüfstände ermöglichen eine vielfältige in-situ Charakterisierung mittels elektrischer, elektrochemischer und physikalischer Methoden. Die gezielte und angepasste Kombination der verschiedenen Systemkomponenten des Gasanalyseprüfstandes durch ein geeignetes Layout sind für die Messqualität von entscheidender Bedeutung. Im Projekt **Lokale Gasanalyse an PE-Brennstoffzellen** [12] des PSI wurde ein moderner Teststand für lokale und sequentielle Multiport-Gasanalysen in PEM-Zellen geplant, aufgebaut und erfolgreich in Betrieb genommen. Er ermöglicht sequentielle Messungen der Gaszusammensetzung entlang des Flussfeldkanals der Brennstoffzelle (siehe Fig. 9 und Fig. 10). Damit schnelle dynamische Analysen möglich sind, wurde der Prüfstand auf die Entnahme minimaler Gasmengen konzipiert. Die ersten Messungen zeigen die hohe Empfindlichkeit der Anlage. So kann die Diffusion von Helium durch die Membran mit guter Auflösung im einstelligen ppm-Bereich in der laufenden Brennstoffzelle gemessen werden.

Das neue Analysegerät am PSI kann sowohl für Messungen an experimentellen Zellen als auch industriellen Prototypen eingesetzt werden. Es kann daher sowohl zu Validierungsmessungen verschiedener Brennstoffzellenmodelle als auch für Untersuchungen bezüglich Degradation verschiedener Zellkomponenten dienen.



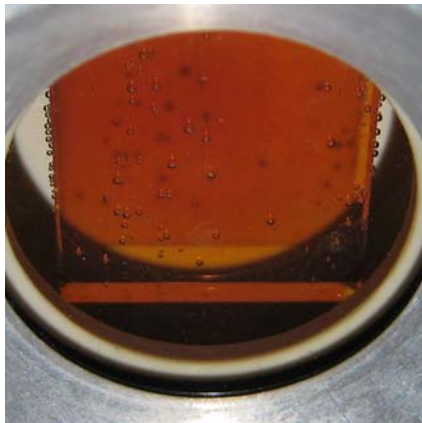
Figur 9: Beheiztes Multipositionsventil der Gasentnahmestrecke [12]



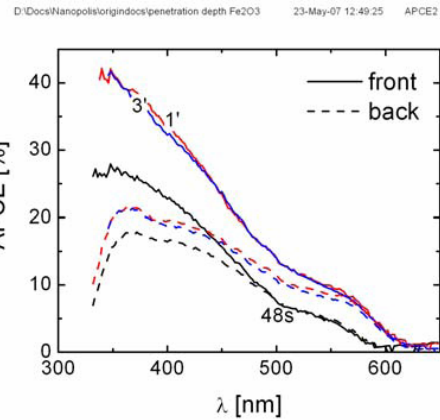
Figur 10: Gesamte Gas-entnahmestrecke an der Brennstoffzelle [12]

WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

Ziel der langjährigen Forschungsaktivitäten zum Thema **Photochemische Umwandlung und Speicherung von Sonnenenergie** an den Universitäten Bern und Genf sowie an der EPFL-Lausanne war die Photoelektrochemische Wasserspaltung mit sensibilisierten Ag/AgCl als Photoanode und einer Halbleiter Photokathode (siehe Fig. 11). Gegen Ende 2006 wurden die Arbeiten an den Universitäten Bern und Genf eingestellt und die EPFL forschte weiter im Projekt **Photolyse de l'Eau et Production d'Hydrogène au Moyen de l'Energie Solaire** [13]. In diesem Themenkreis übernimmt nun die EPFL die Führung und baut unter dem Namen **PEChouse: A Competence Centre devoted to the Photoelectrochemical Splitting of Water and Production of Hydrogen** [14] das künftige nationale photoelektrochemische (PEC-) Kompetenz-Netzwerk-Zentrum auf (siehe Nationale Zusammenarbeit Wasserstoff **PECnet** [20]). Mit neuen Forschungskräften, die inzwischen gut eingearbeitet sind, sollen die bisherigen Arbeiten weitergeführt und vertiefte PEC-Materialforschung betrieben werden. Dazu wurde zwei Forschungs-Arbeitspakete (WP1, WP2) und ein Koordinations-Arbeitspaket (WP3) definiert. Letztere WPs hatten insbesondere auch den Transfer von Equipment der Universitäten Bern und Genf sowie den Wissenstransfer an die EPFL zur Aufgabe. In der Folge wurde dieses Jahr noch auf der Basis modernster Beschichtungsgeräten eine neue Material-Charakterisierungs- und -Optimierungs-Plattform geschaffen und dann eine photo-inaktive Schicht auf dem Substratinterface identifiziert und eliminiert. Ferner wurden detaillierte Untersuchungen über die Güte und Sensitivität von Photoanoden in Abhängigkeit der Silizium-Dottierung durchgeführt (WP1, siehe Fig. 12, [32, 33]).



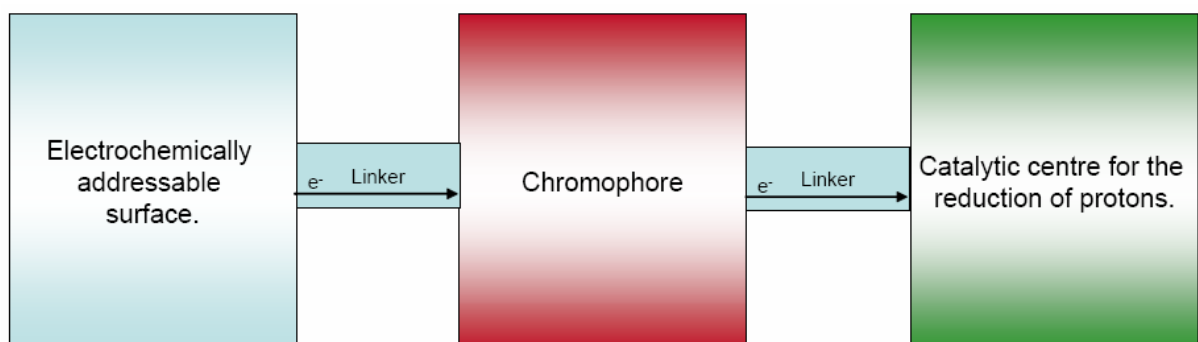
Figur 11: A nanostructured iron oxide (hematite) photoanode evolves oxygen and completes one half of the water-splitting reaction under simulated sunlight in a laboratory test cell. [14, 20]



Figur 12: Absorbed photon to current efficiency (APCE) of meso-porous silicon doped hematite films on conductive SnO₂:F deposited during 48 sec, 1 and 3 min [14]

Die **nationale Erweiterung der PEChouse** Aktivitäten ist in Vorbereitung, insbesondere mit der Uni Basel [15], der Uni Genf (Neu-Aktivitäten unter Prof. Wenger) und der **EMPA** (Neu-Aktivitäten unter Dr. Graule und Dr. Braun). Letztere ist am Aufbau einer PEC-Kompetenzgruppe im Bereich der Materialsynthese, Pulverherstellung und Charakterisierung. Ein entsprechender SNF-Antrag hat zum Ziel die bestehende Instrumentierung entsprechend zu erweitern.

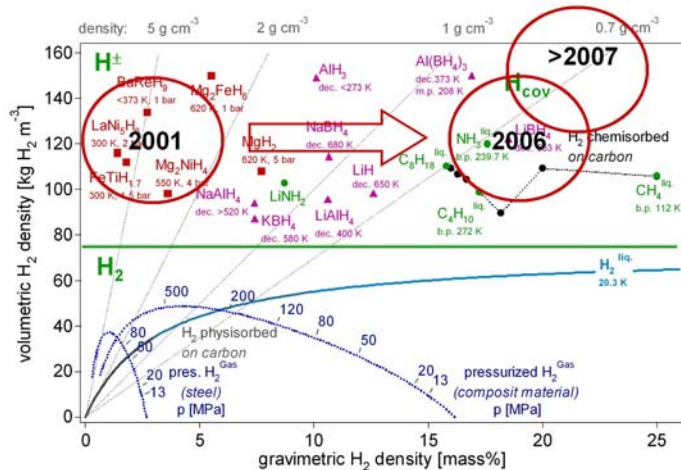
Im Projekt **NefiosHydro** [15] wird eine neuartige Produktion von Wasserstoff aus durch Solarstrahlung erzeugten Protonen angestrebt. Zu diesem Zweck bildet eine nanokristalline Elektrodenoberfläche mit lichtsensitiven Eisen-Schwefel Clustern den aktiven, Protonen erzeugenden Teil der photosynthetischen Wasserstofferzeugung und auf der Anodenseite soll die Reduktion der Protonen katalytisch zum Wasserstoffmolekül erfolgen. Im Prinzip erfolgt die Wasserstoffproduktion in den drei in Fig. 13 dargestellten Schritten. Dieser modulare Approach hat den Vorteil, dass die Blöcke einzeln getestet und die Verbindungen dazwischen individuell optimiert werden können. Drei Ziele wurden priorisiert: Die Erzeugung einer nanokristallinen Oberfläche mit Eisen-Schwefel-Clustern, die Synthese geeigneter Ru(II)-Komplexen und die Überwachung der Reduktion der Protonen zu Wasserstoffmolekülen bezüglich der angelegten negativen Vorspannung. Im Berichtsjahr wurden synthetische Pfade für biomimetische Ru(II)-Eisen Schwefel Verbindungen untersucht und Komponenten von biomimetischen Protonenreduktionssystemen wurden mit Chromophoren auf den Oberflächen kombiniert. Die Resultate sind Gegenstand zweier eingereichten Publikationen. Dieses Projekt ist Teil der interdisziplinären Forschungspalette der Gruppe an der Universität Basel und einige Aspekte sind in engem Zusammenhang mit einem laufenden EU-Projektteil im EU Programm HETEROMOLMAT.



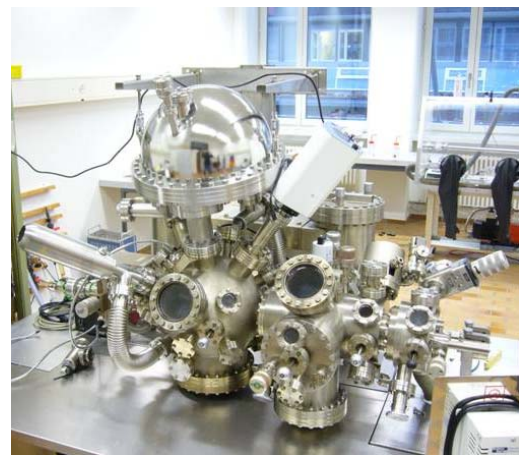
Figur 13: Schematische Darstellung der photosynthetischen Wasserstoffproduktion basierend auf biomimetischen Protonenreduktionssystemen [15]

Als weltweiter Pionier im Bereich spezieller Feststoff-Wasserstoffspeicherung startete die heutige **EMPA**-Gruppe im Jahr 2001 an der Universität Freiburg ihre Untersuchungen an den Tetrahydridboraten [34]. Mittlerweile ist das Potential dieser Materialien als Wasserstoffspeicher weltweit anerkannt

(siehe Fig. 14). Das Projekt **Wasserstoffspeicherung in Metall- und komplexen Hydriden** [16] widmet sich intensiv mit LiBH_4 , welches mit 18-Massenprozenten die höchste Wasserstoffspeicherdichte der Familie besitzt. Erstmal konnte die Raumtemperaturstruktur mittels Röntgen- und Neutronendiffraktion sowie die Stabilität durch thermodynamische Untersuchungen mittels Differential-Scanning-Kalorimetrie anhand von H_2 -Druckzellen bestimmt werden. Ebenfalls konnte ein vollständiges Energiediagramm des Materials erstellt und modelliert werden. Die Identifikation des Desorptions-Mechanismus erwies sich als besondere Herausforderung. Dank konsequentem Einsatz neuester Analyse- und Mess-System-Eigenentwicklungen konnten wesentliche Aspekte des Mechanismus geklärt werden. Mit der erstmals gelungenen direkten Synthese von LiBH_4 aus den Elementen ist auch die Herstellung von isotonenreinen Proben in Reichweite und damit auch die Aufschlüsselung der Desorptionsprodukte. Als wesentlicher Schritt im Hinblick auf mögliche Anwendungen von LiBH_4 als Speichermedium konnte die hohe Desorptionstemperatur durch geeignete Katalysatoren reduziert werden. Ebenfalls festgestellt wurde, dass im Unterdruckbereich ein substantieller Anteil an Borwasserstoff-Verbindungen in die Gasphase übergeht. Dies zeigt, dass auch die Reversibilität prinzipiell gegeben ist. Es sind jedoch noch viele offene Fragen, beispielsweise die thermischen Eigenschaften und insbesondere des Verhalten dieser Hydride bezüglich Wärmetransport und Wärmeaustausch zu klären, bevor diese Materialien zur Anwendung kommen. Die EMPA-Gruppe bringt ihre Erfahrungen in die IEA (International Energy Agency) -Projekte Hydrogen Safety und Hydrogen Storage Materials Development ein und ist bestrebt, dort ihre Spitzenposition mit weiteren Projekten zu halten.



Figur 14: Fortschritte zwischen den Jahren 2001 und 2007 bei den Wasserstoff-Speichermaterialien [16]



Figur 15: Electron Spectroscopy for Chemical Analysis (ESCA) Set-up an der EMPA [17]

Materialien zur Speicherung von Wasserstoff müssen auf ihre Sicherheit geprüft werden, bevor sie als Speichermedium zur Anwendung kommen. Komplexe Metallhydride wie LiBH_4 sind hoch reaktive Materialien und daher eine potentielle Gefahrenquelle. Die noch weitgehend unbekanntes Oberflächen- und Desorptionseigenschaften von LiBH_4 sollen im Projekt **Relevant Physical Aspects of Hydrides for System Integration and Safety (SAFSYST)** [17] mit neuesten Methoden weiter erforscht werden. Die ESCA (Electron Spectroscopy for Chemical Analysis)-Apparatur mit Massenspektrometer (siehe Fig. 15) erlaubt die Analyse der Oberflächenreaktivität und Desorptionsnebenprodukte von LiBH_4 . Sie wurde im Berichtsjahr installiert und erfolgreich in Betrieb genommen. Dasselbe gilt für die thermische Desorptions-Spektroskopie, welche komplementäre Experimente ermöglicht. Vier Arbeitspakete sind vorgesehen:

- Untersuchungen der Oberflächenreaktivität mit O_2 , H_2O und Wasserstoffverunreinigungen.
- Untersuchungen von thermischen Desorptionsprodukten und der Desorptionsmechanismen auf atomistischer Basis.
- Wärmetransport in komplexen Hydriden (im Gitter, an Korngrenzen, zwischen Teilchen und in der H_2 -Gasphase).
- Verbreitung der Ergebnisse in IEA Task 18 (Gesamtsysteme) und IEA Task 19 (Hydrogen Safety) und Zusammenarbeit mit der Privatwirtschaft.

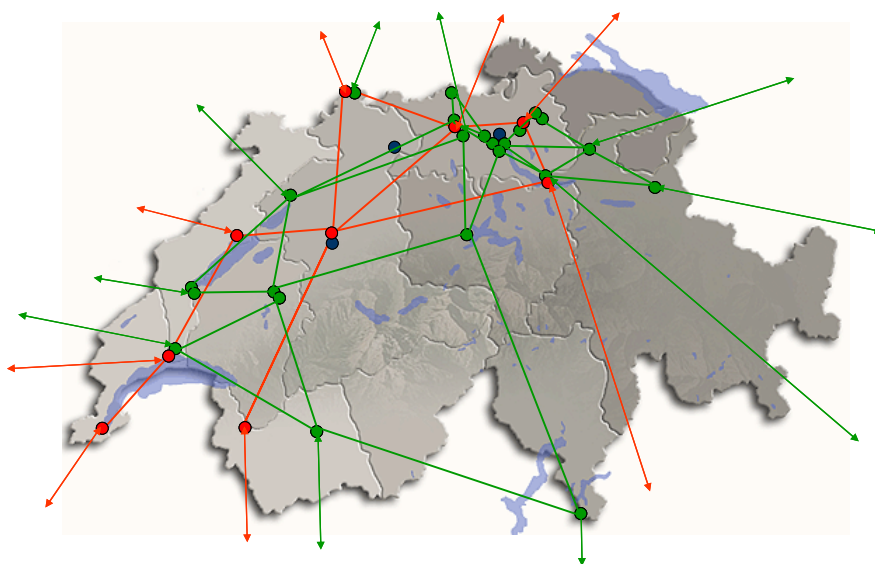
Komplexe Metallhydride wie LiBH_4 erlauben höchste Wasserstoffspeicherdichten. Bevor sie als Speichermedium zur Anwendung kommen, müssen die Absorptions- und Desorptionsmechanismen von Wasserstoff sowie die Rolle der Katalysatoren genauer bekannt sein. Im Projekt **Hydrogen Storage in New Complex Hydrides (COMPHY)** [18] wird die Rolle und die lokale Umgebung eines Ti-Atoms

als Katalysator mittels EXAFS und Raman Spektroskopie eingehend untersucht. Ferner wird die Ionenstruktur von $[BH_4]$ während der Wasserstoffdesorption untersucht und die Wasserstoffdynamik im Gitter modelliert. Zusätzlich werden UV-VIS Spektroskopie eingesetzt und durch Einsatz des Wasserstoffisotops Deuterium die Transporteigenschaften von Wasserstoff im Hydrid untersucht. Projektziel soll die detaillierte Beschreibung des Mechanismus der Sorptionsreaktion des Wasserstoffs sein. Die Arbeiten bilden den Schweizer Beitrag zum IEA Projekt Hydrogen Storage Materials Development.

Auch an der Universität Genf wird seit Jahren intensiv nach neuen Metallhydriden mit höchsten Wasserstoffspeicherdichten geforscht. Im Projekt **New Metal Hydrides Hydrogen Storage in PEM Fuel Cell Systems** [19, 35] wurden komplexe d- und p- Metallhydride für mögliche Anwendungen, insbesondere in PEFC Brennstoffzellensystemen, synthetisiert. Die Magnesium-Eisenverbindung Mg_2FeH_6 konnte kostengünstig in der Kugelmühle mit einer Rekordausbeute von 91% hergestellt werden. Das neue Hydrid $La_2MgNi_2H_8$ wurde hinsichtlich Struktur und Eigenschaften evaluiert, zeigte sich aber für mögliche Wasserstoff-Speicheranwendungen als zu wenig reversibel. Nach langjährigen Bemühungen gelang es jedoch, das äusserst komplex p-Metallhydrid $Mg(BH_4)_2$ mittels einer neuartigen synthetischen Methode unter guter Ausbeute zu präparieren. Diese Verbindung hat eine theoretische Wasserstoffspeicherkapazität von >10 Gewichtsprozenten, gibt den Wasserstoff jedoch erst bei $150^\circ C$ ab, was bei einer Anwendung in PEFC Brennstoffzellen einen Nachteil darstellt. Damit konnte das IEA-Ziel (Gewichtsverhältnis Wasserstoff/Metall > 5 wt-%) wohl erreicht, dasjenige der thermischen Stabilität (Wasserstoffdissoziationstemperatur < $80^\circ C$ bei 1,5 bar Druck) jedoch nicht erreicht werden. Als Nebenprodukt der Arbeiten wurden neue Materialien entdeckt, die als Wasserstoffdetektoren geeignet sein könnten.

Nationale Zusammenarbeit

Die nationale Zusammenarbeit der Experten innerhalb des HFC-Programms konnte 2007 insbesondere durch die bestehenden (SOF-CH) sowie neuen, vernetzten Forschungsschwerpunkts-Konsortien (PEM-CH und PEChouse) auf weitere Bereiche ausgedehnt werden. Als krönende, programmweite Austauschplattform konnte im November 2007 der Nationale Impulstag „Wasserstoff + Brennstoffzellen“ am PSI mit circa 120 Experten aus Industrie und Forschung erfolgreich durchgeführt werden. Die Vernetzung der Schweizer Stakeholder im Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Bereich ist in Fig. 16 andeutungsweise dargestellt, worin auch die steigende internationale Vernetzung erkennbar ist.



Figur 16: Vernetzung der Stakeholder im Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Bereich national und in zunehmenden Mass international.

BRENNSTOFFZELLENTechnologie

Für die nationale Zusammenarbeit im SOF-CH Netzwerk ist der intensivierete wissenschaftliche Austausch der Forschungspartner EMPA, EPFL, ETHZ und ZHAW Erwähnenswert. Koordinierte Aktivitäten des Netzwerkes erfolgten zusätzlich auf der EU-Ebene (siehe internationale Zusammenarbeit).

Im PEFC-Bereich konnte das neue PEM-FC Netzwerk zwischen den Industriepartnern *Ceka AG* und *MesDea SA* in Zusammenarbeit mit den institutionellen und universitären Forschungsgruppen *PSI*, *EMPA*, *HTI* und *ZHAW* erfolgreich starten. Besonders erwähnenswert ist dabei der netzwerkübergreifende Kompetenzausbau betreffend Modelling (*ZHAW*, *PSI*) und Testing (*HTI*, *PSI*) - Stichwort „Modelling und Validation Factory“, welche die Forschungs- (*EMPA*, *PSI*) und Entwicklungsanstrengungen (*Ceka*, *MesDea*) des Netzwerkes effizient ergänzen.

Die Betriebserfahrungen des seit dem Jahre 2000 während 5 Jahre kommerziell im Einsatz gestandenen 200 kW_{el} PAFC Brennstoffzellensystems der *Alternativ-Energie Birsfelden AG (AEB)* wurden 2007 von *Thoma & Renz* umfassend bewertet und präsentiert. Die Schlüsselresultate waren ein langjähriger Gas-zu-Strom Umwandlungswirkungsgrad von 39% über eine kumulative Betriebszeit von über 36'000 Stunden. Infolge alterungsbedingter Leistungseinbussen und finanzieller Unsicherheiten wurde im Jahre 2006 der 5-jährige Pilotbetrieb eingestellt. Über Nachfolgeprojekte allenfalls auch durch Einsatz anderer Technologien wurde unter anderem auch an der MCFC Tagung von DaimlerChrysler PowerSystems Schweiz AG in Schlieren diskutiert.

WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

Die nationale Wasserstoff-Gesellschaft *Hydropole* www.hydropole.ch, in welcher auch die meisten der durch das HFC unterstützten Wasserstoff-Forschungsgruppen der Schweiz als Mitglieder aktiv beteiligt sind, hatte auch 2007 wieder diverse Vernetzungsaktivitäten durchgeführt. Überleitend ins 2008 sind dabei auch die Vorbereitungsarbeiten für die Präsenz bei internationalen Events wie dem Fuel Cell Expo in Tokyo (Februar 2008) sowie der World Hydrogen Energy Conference and Fair in Brisbane (Juni 2008) zu erwähnen.

Dank signifikanter Vorbereitungsarbeiten im Projekt **PECNet** [20] (Ziel: Forschungs-Netzwerk für photoelektrochemische – PEC – Wasserspaltung) konnte 2007 das neue Schweizer Kompetenzzentrum PEChouse unter dem Lead des Energy Centers der *EPFL* seine Arbeit aufnehmen. Ziel von PEChouse ist es, das Materialforschungswissen für PEC Wasserspaltung derart zu verfeinern, dass Photoanoden mit Photoströmen von 7 mA/cm² erreicht und dadurch Funktionsmuster der Grösse von 10 cm x 10 cm mit Systemwirkungsgraden von bis zu 10% demonstriert werden können (siehe Fig. 11). Gegen Ende 2007 hat neu auch eine Forschergruppe der *EMPA* PEC Wasserspaltungsarbeiten aufgenommen und eine neue Gruppe der Uni Genf mit Vorbereitungsarbeiten für PEC Wasserspaltung begonnen.

Im Bereich der Wasserstoff-Speicherung sind Bestrebungen im Gange, die Schweizer Kompetenzen netzwerkartig zu bündeln und damit zielgerichtet zu auszubauen. Als Hauptakteure im Metallhydridbereich arbeiten Forschergruppen der Universität von Genf sowie der *EMPA* Dübendorf, unterstützt durch einzigartige Messkompetenzen am *PSI*.

Internationale Zusammenarbeit

Brennstoffzellentechnologie:

Im **IEA-Programm Advanced Fuel Cells (AFC)** ist die Schweiz wie in nachfolgender Tabelle aufgelistet vertreten (www.ieafuelcell.com):

IEA-Programm: Advanced Fuel Cells AFC	Schweizer Vertreter
Executive Committee	BFE Bern
Projekt <i>Polymer Electrolyte Fuel Cells</i> Kostenreduktion und Steigerung der Leistungsfähigkeit	Offen
Projekt <i>Solid Oxide Fuel Cells, making ready for application</i> Erhöhung der Lebensdauer und Kostenreduktion	Htceramix Yverdon [21]
Projekt <i>Fuel Cells for Stationary Applications</i> Systemoptimierung, Best Practice <i>Subtask 2 Market Outlook (Lead CH)</i>	Thoma & Renz, Basel [22]

Hauptereignis im Projekt **SOFC for application** [21, 37] war der Nara Workshop, dessen Fokus die Degradationsmechanismen der SOFC und ein Aktivitäten- und Planungs-Überblick der Programme der Mitgliedsländer war. Eine koordinierte Kollaboration zu den Themen der Degradation wird von den USA, Canada und Australien als (noch) nicht relevant taxiert. Ein Start solcher Aktivitäten scheint je-

doch zwischen den EU-Ländern, der Schweiz und Japan möglich zu sein. Zudem wurde ein Konsens für eine gemeinsame Datenbank für BZ-Materialien erzielt. Organisator für das 2008 Meeting ist die Schweiz; es wird im Juli 2008 zusammen mit dem FC-Symposium in Luzern stattfinden.

Im Projekt **Stationary Fuel Cells** werden die Rahmenbedingungen und die Möglichkeiten für den Markteinstieg von Brennstoffzellen für stationäre Anwendungen untersucht. Im von der CH-Vertretung geleiteten Subtask 2 Market Outlook [22] werden die für Brennstoffzellen relevanten Eigenschaften der Energiemärkte verschiedener Länder analysiert und daraus Anforderungen an die Brennstoffzellen sowie die Geschäftsmodelle für den Markteinstieg abgeleitet. Signifikant sind in den meisten Ländern die Unterschiede zwischen Strommarkt und Wärmemarkt. Der Strommarkt wird durch wenige Produzenten und grosse Produktionseinheiten gekennzeichnet. Hinzu kommt weltweit ein grosser Ersatz- und Zusatzbedarf an Stromerzeugungsanlagen, der entsprechend den bestehenden Gegebenheiten mit Grossanlagen abgedeckt werden soll. Der Wärmemarkt ist stark diversifiziert und der Absatz ist eher rückläufig. Die aktuell angebotenen Brennstoffzellen liegen im Leistungsbereich 1 – 1'000 kW und damit kaum im Fokus des heutigen Strommarktes sondern passen eher zum Wärmemarkt. In den USA wurden die Anforderungen des Strommarktes und die Veränderungen in der Verfügbarkeit von fossilen Brennstoffen in die Förderstrategie des Bundes aufgenommen. Das Ziel ist die Entwicklung von Brennstoffzellen im MW-Bereich für die Nutzung von Gasen aus der Kohlevergasung mit CO₂-Sequestration. Die Nutzung von Erdgas als Brennstoff wird nicht mehr unterstützt. Der Reigen der bisher im Förderprogramm SECA engagierten Unternehmen hat sich durch den Richtungswechsel gelichtet. In Japan wird demgegenüber ein Programm mit dem dezentralen Einsatz 1200 PEFC im 1 kW-Bereich und Erdgas umgesetzt. Mit der Nutzung von Brennstoffzellen als Wärmekraftkoppelungssysteme wird ein Beitrag zur CO₂-Reduktion erwartet. Zwischen den beiden extremen Anwendungsbeispielen USA und Japan liegt ein Potential für Brennstoffzellen in Nischenmärkten. Dazu gehört im stationären Bereich vor allem die Nutzung von biogenen Brennstoffen (Klärgas, Biogas).

Thema des *Subtask 2 Market Outlook* [22] sind auch die Auswirkungen einer grossen Anzahl dezentral ans Stromnetz angeschlossener Brennstoffzellen auf die Stromversorgung. Erforderlich sind die frühzeitige Standardisierung sowie die Eingriffsmöglichkeit des Netzkontrolleurs. Im Subtask 3 werden die technischen und marktrelevanten Eigenschaften von verschiedenen Brennstoffen für die Nutzung mit Brennstoffzellen erforscht. MCFC und SOFC weisen Vorteile für den Einsatz von Klärgas oder Biogas auf. Untersuchungen zeigen ein grosses Potential in der Landwirtschaft und zudem Betriebsgrössen, die sich für die Erzeugung von Biogas und den Einsatz von Brennstoffzellen im mittleren Leistungsbereich eignen. Die Tatsache, dass $\frac{3}{4}$ der Kosten einer Brennstoffzelle durch die peripheren Anlagekomponenten bestimmt werden, ist Basis für Subtask 4. Durch Befragungen von Brennstoffzellenherstellern und Zulieferern sollen Möglichkeiten für die Standardisierung und damit Kostenreduktion geortet werden. Erstaunlich ist das geringe Interesse der befragten Unternehmen an diesen Massnahmen. In Subtask 5 wird der Stand der Markt- und Technologieentwicklung in den USA verfolgt. Leader ist heute die MCFC von *Fuel Cell Energy*, die den grössten Anteil an neu installierten Anlagen aufweisen. Zahlreiche Projekte im unteren MW-Bereich sind in Vorbereitung. Eine verstärkte Nachfrage besteht nach PAFC von *UTC-Power*. Das über Jahre verbesserte 200 kW System soll bis 2009 durch eine 400 kW-Einheit mit einer technischen Nutzungsdauer von 80'000 h ergänzt werden. In der Schweiz absolvierte zwischen 2000 bis 2005 eine 200 kW PAFC 36'000 h Betriebstunden und erreichte einen gemittelten elektrischen Wirkungsgrad von über 39%.

Wasserstofftechnologie:

Das **IEA-Programm** bleibt weiterhin die Hauptplattform der internationalen, vor-kommerziellen Forschungszusammenarbeit im Bereich Wasserstoff, weltweit. 2007 ist nicht nur die Zahl der Mitglieder des Programms auf 21 angewachsen sondern hat auch die Schweiz ihre Mitarbeit weiter ausgebaut. Die Forschungskollaboration der Schweizer Expertengruppen im Jahre 2007 sind in folgender Tabelle aufgezeigt:

Projekte im IEA-Hydrogen Programm	Schweizer Beitrag	Schweizer Vertreter
Executive Committee		BFE Bern
Projekt <i>Integrated Systems Evaluation</i> Systemintegration, best practice	Entwicklung von optimierten Wasserstoffsystemen	EMPA Dübendorf
Projekt <i>Hydrogen Safety</i> Erhebung von Risikomodellen, Standardisierung von Testprozeduren, best practice	Risikobewertung bei Metallhydridspeichersystemen	EMPA Dübendorf
Projekt <i>Hydrogen from Waterphotolysis</i>	Leitung dieses IEA-Projekts	SPF Rapperswil

Identifizierung und Charakterisierung neuer Materialien, Systemanalyse, Demonstration	Entwicklung von Hochleistungsphotonanodenmaterialien und Leitung von „PEChouse“ Oberflächenfunktionalisierung mittels [Fe ₂ S]-Clustern	EPF Lausanne Uni Basel
Projekt <i>Fundamental and Applied Hydrogen Storage Materials Development</i> Identifizierung und Charakterisierung von Materialien, Systemanalyse für stationäre Anlagen	Entwicklung und thermodynamische Untersuchungen an komplexen M[BH ₄] _x -Hydriden Entwicklung von neuen komplexen d- und p-Metallhydriden	EMPA Dübendorf Uni Genf
Projekt <i>Wind Energy and Hydrogen Integration</i> Systemintegrationslösungen, Geschäftskonzepte, best practice	Regeltechnische Leistungsoptimierung von alkalischen Wasserelektrolyseuren	IHT Monthey
Projekt <i>High Temperature Processes for Hydrogen Production</i> Innovative CO ₂ -emissionsfreie Hochtemperaturprozesse	Entwicklung von Thermochemischen Metalloxid-Redox-Reaktionen für die Hochtemperatursolarthermie Entwicklung von neuen Keramikmaterialien für die Hochtemperatur-elektrolyse	PSI Villigen EMPA Dübendorf

Generell:

Nachfolgende Tabelle zeigt die Schweizer Vertretung und somit Informations- sowie Einflussmöglichkeiten in weiteren EU Aktivitäten:

EU Aktivitäten	Schweizer Vertreter
FP6 und FP7	Diverse als Projektpartner oder lead applicant
ERAnet Hyco	SPF Rapperswil
EU FP7 JTI	EUreserch Bern (allg. Informationen)
Hydrogen & Fuel Cell Programm	Hexis Winterthur (IG) HTceramix Yverdon (JTI Board) PSI Villigen (RG, MG HFP) SPF Rapperswil, HTceramix Yverdon (IG Management)

Die meisten universitären Wasserstoff-Forschungsexperten der Schweiz hatten im Jahre 2007 bei verschiedenen Projekteingaben des **EU-Rahmenforschungsprogramms 7** (FP7) als Projektpartner oder gar als lead applicant bei internationalen Konsortien teilgenommen. Unerwarteterweise war die Erfolgsquote im ersten Call unterdurchschnittlich niedrig nur eine einzige Eingabe scheint gesichert. Etliche adaptierte und/oder neue Eingaben für den zweiten Call anfangs 2008 sind jedoch in Vorbereitung.

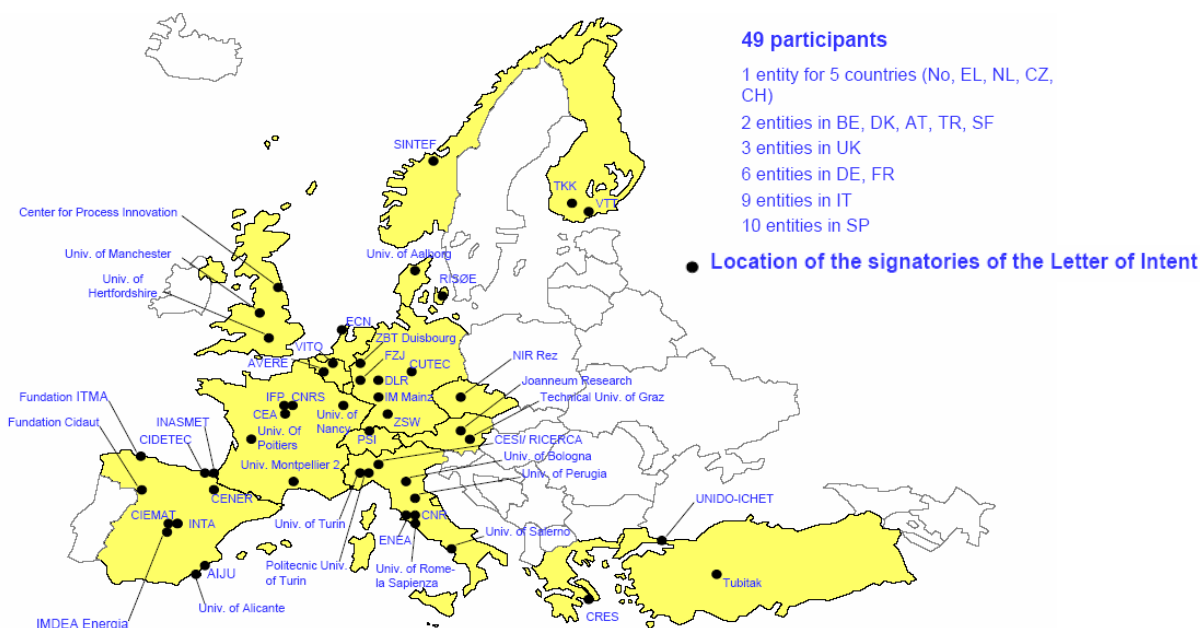
Im **HYCO-Eranet** hat sich die Schweiz bis jetzt bei folgenden 2 Calls beteiligt:

1. Wasserstoffspeicherung mit DE und AT. 3 transnationale Projekte wurden eingereicht, eines davon zwischen Deutschland und der Schweiz.
2. - PEFC – Zellen, Stacks, Systeme und Fertigung und Produktionstechnologie
- SOFC – Zellen, Stacks, BoP-Entwicklung und System Integration
mit IT, FI, GR, ES Basque, DE, RO, CH, SE, AT, NL

Ausgehend von der Hydrogen and Fuel cell Platform (HFP, www.hfpeurope.org) wurde eine Joint Technology Initiative (JTI) lanciert. Momentan ist unter der Führung der Industrie (European Industry Grouping for a Fuel Cell and Hydrogen Joint Technology Initiative - NEW IG, www.fchindustry-jti.eu) die Erarbeitung des mehrjährigen Vorgehensplanes, respektive der entsprechenden Calls im Gange.

Erfreulich ist in dieser Berichtsperiode die Beteiligung der Schweiz an EU-Projekten. Schweizer Forscher und Industriepartner sind u.a. in folgenden Projekten involviert: **Dynamics** (CO₂ capture and storage, Alstom), **NESSHY** (EU IP FP6 Novel Efficient Solid Hydrogen Storage Energy System, UniFR), **EU-SOLZINC** (300-kW_{th} Solar Reactor Carbothermic ZnO/Zn Cycle: ZIRRUS, PSI, ETH, WIS, CNRS, ScanArc), **EU-STREP** (EU-FP6, Water Vapour Electrolysis, High-temperature Hydrogen Production based on SOFC Technology, EMPA), **FlameSOFC** (EU-IP FP6, 2-kW_{el} micro-CHP System, HTceramix, EMPA), **GenFC** (EU-STREP EMPA), **HySYS** (FC Hybrid Vehicle System Component

Development, *EPFL, Fischer AG, Microchemical System SA*), **Real-SOFC** (EU-IP FP6, Durability + Lifetime of SOFC Cells and Stacks *HTceramix, EMPA, ETHZ, EPFL*), **SOFC600** (EU-IP FP6, SOFC Stack at 600°C, *EMPA*), **StorHy** (Hydrogen Storage Systems for Automotive Application, *ETHZ*).



Figur 17 : Am JTI Research Group beteiligte Institutionen (www.hfp-europe.org/hfp/research-news). Von der Schweiz ist das PSI direkt involviert, zudem sind diverse Stakeholder als Experten aktiv.

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 2007**.

Die im Jahr 2004 vom BFE gestartete Symposiumsreihe mit internationaler Beteiligung **Fuel Cell Research Symposium Modelling and Experimental Validation** wurde 2007 am FZ-Jülich erfolgreich fortgesetzt. 2008 wird das fünfte Symposium von der ZHW Winterthur organisiert (11.-12. März 08, www.ccp.zhw.ch), 2009 voraussichtlich von der Universität Karlsruhe und 2010 allenfalls wieder in der Schweiz [38, 39]. 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 FP7-Projekt Eingaben dient.

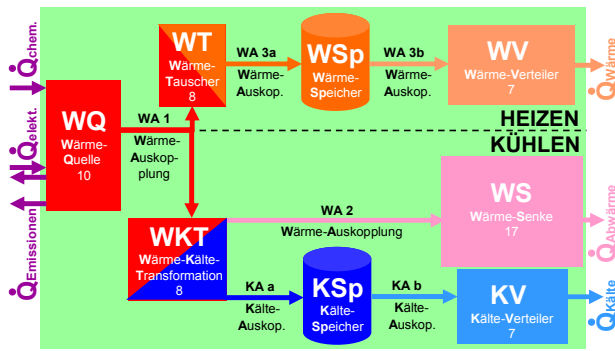
Pilot- und Demonstrationsprojekte

BRENNSTOFFZELLENGEOTECHNOLOGIE

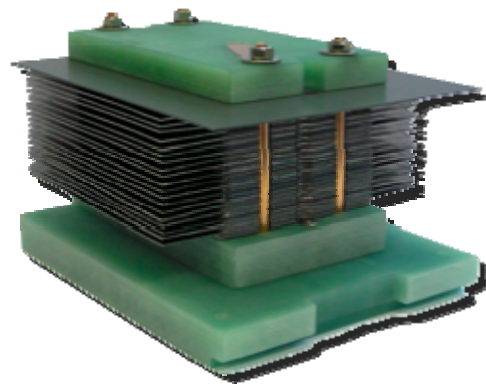
ERDGAS-FESTOXID-BRENNSTOFFZELLEN (SOFC)

Ein ganzjähriger, durchgehender Betrieb von SOFC-Heizsystemen wäre zur Verminderung der Zelldegradation sowie einer besseren Auslastung und Generierung eines zusätzlichen Amortisationsbeitrags sehr erstrebenswert. Eine interessante Realisierung bietet die Nutzung der der SOFC-Abwärme mittels Absorptionskältemaschine (AKM) zur Raumklimatisierung (siehe Fig. 18). Im Projekt **Konzeptstudie Klimatisierung durch Abwärmenutzung aus Brennstoffzellen** [23] wurde das technische, wirtschaftliche und marktrelevante Potential dieser Nutzungsart evaluiert.

Für die Varianten im Haus-Retrofit- und Neubau-Bereich besteht ein mittelfristiges Realisierungspotential in südländischen Märkten. Zur Anwendung eignen würde sich eine 2-stufige Absorptionskältemaschine mit einer Kälteleistung von mindestens 12 kW_R sowie Luft als Kälteverteilmedium. Eine Hauptbarriere für eine Umsetzung ist neben den hohen Kosten die noch mangelhafte Marktreife bzw. die fehlende Verfügbarkeit von mehrstufigen Absorptionskältemaschinen. Die Studie gibt einen aktuellen Stand wieder. Die technischen und wirtschaftlichen Annahmen und Randbedingungen sind nach circa 2-5 Jahren wieder zu überprüfen.



Figur 18: WärmeKraftKopplungs-System mit den thermodynamischen Behandlungsfunktionen Heizen und Kühlen sowie Wandlung von chemischer in elektrische Energie. Als Wärmequelle WQ soll eine Festoxid-Brennstoffzelle eingesetzt werden. Die eingetragenen dimensionslosen Zahlen in den Systemteilen dienen dem relativen Vergleich der Leistungsgrößen [23]



Figur 19: Der in Zusammenarbeit BFH HTI und CeKa AG im KTI Projekt IPHoS entwickeltet, luftgekühlte 12 Zellen PEFC-Stack [24]

Zusätzlich zu ausführlichen Lebendauer- und Labortests zum Erreichen von relevanten Benchmarks sind zudem in grösseren Gemeinden im Raum Bodensee Diskussionen über eine breitere Demonstration des WKK-Einsatzes von SOFC und MCFC im Gange. Auf Schweizer Seite ist vor allem die Zusammenarbeit zwischen Hexis AG und der Stadt St.Gallen erwähnenswert, welche an der Umsetzung eines umfassenden, längerfristigen Energiekonzeptes arbeitet.

POLYMERELEKTROLYT-BRENNSTOFFZELLEN (PEFC)

Die Umsetzungsaktivitäten sowohl im stationären (Batterieersatz in USV-Anlagen) als auch im portablen Bereich (APU-Anhänger, luftgekühlter 1kW-Stack) sowie im Transportbereich (Boote, Spezialfahrzeuge) wurden fortgesetzt.

Im Hinblick auf die Weiterentwicklung des IHPoS-Stacks und dessen verstärkten Umsetzung in die Praxis war eine Erweiterung des bestehenden Teststandes an der HTI-Biel unumgänglich. Mit dem Projekt **Erweiterung des BFH Testlabors für PEM Brennstoffzellen** [24] werden neu Gasgemische auf der Anodenseite von PEFC-Stacks einsatzbereit sein und ausgedehnte Testserien zur groben Lebensdaueruntersuchungen ermöglicht. Im Berichtsjahr wurde das Anlagekonzept des neuen 1kW_{el}-Teststandes in enger Zusammenarbeit mit dem PSI erarbeitet und die Anlage erfolgreich in Betrieb genommen. Das Ziel, Kompatibilität der Testinfrastruktur beider Institute und damit Testing- und Validierungs-Dienstleistungen aus einer Hand anbieten zu können, ist in vielen Punkten bereits erreicht. Diese Option wird auch von MesDea SA zur Stackverbesserung genutzt und soll künftig auch international als zusätzliche CH-Kompetenz angeboten und ausgebaut werden. In ausgedehnten Lebensdauererests wurde die Langzeitstabilität der Stacks ohne merkliche Degradation nachgewiesen. Parallel dazu wurde der IHPoS-Stack von der Firma CEKA AG weiterentwickelt und die Tauglichkeit des Teststandes für Proben aus der Privatwirtschaft nachgewiesen und somit Synergien zum KTI-Projekt [40] genutzt.

In den Projekten **Intégration d'une Pile à Combustible 300W pour la Motorisation Electrique de Petites Embarcations** [25] und **Hydrogène dans les Ports** [26] wird die Tradition des Einbaus von Brennstoffzellen in Boote an der HES-SO in Yverdon weitergeführt. Das erste Projekt wurde im Berichtsjahr beendet. In einem Fischerboot (siehe Fig. 20) wurde ein Stack der Firma HorizonFC (300-Watt) und ein Elektromotor der Firma MinneKota eingebaut. Dieses Projekt wurde an der Konferenz EVER07 in Monaco [41] präsentiert. Zusammen mit einer Pufferbatterie würde diese Motorisierung für eine Fischereisaison ausreichen. Für den kommerziellen Einsatz von BZ betriebenen Booten ist die Verfügbarkeit von Wasserstoff wichtig (siehe unten).



Figur 20: Boot Piccolo mit Jonson - MinneKota Motorisierung [26]

In den vergangenen Jahren wurde an der Hochschule Luzern der Prototyp einer Anlage zur unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) mit Brennstoffzellen und Superkapazitäten, welche zusammen mit Industriepartnern konzipiert wurde, erfolgreich in Betrieb gesetzt. Im Berichtsjahr wurde anlässlich zweier Fachtagungen darüber informiert und im Projekt **Fortsetzung Feldtests USV für GSM-Basisstationen mit BZ** [27, 42, 6] sollen nun mit Unterstützung der beiden industriellen Projektpartnern für zwei Jahre Langzeiterfahrungen im Betrieb der USV gesammelt und auch die Verbrauchskosten für verschiedene Installationsvarianten abgeschätzt werden. Anfangs 2007 war das PEM Brennstoffzellensystem infolge eines Defekts im DC/DC-Wandlers während 5 Monate nicht in Betrieb. Von Juni bis November 2007 wurden gemäss einem Testprogramm mit verschiedenen Antennen- und externer Lasten monatliche Stromausfall-Simulationen durchgeführt, wobei die Brennstoffzelle Leistungen zwischen 3,2 und 8,5 kW liefern musste. Nach einer Betriebsdauer von 2 Jahren, einer Gesamtlaufzeit von 57 Stunden und über 200 Start-Stops musste die Brennstoffzelle verstärkt ihren Feuchtigkeitshaushalt regulieren, was als Anzeichen des Alterungsprozesses interpretiert wird. Dieses Phänomen sowie Fehlermeldungen im Betrieb der BZ werden Gegenstand vertiefter Untersuchungen sein.

Als Entscheidungsgrundlage für den Bau einer mobilen Basisstation mit Brennstoffzellen wurde in der **Konzeptstudie für eine Energieversorgung mobile Basisstation Polycorn mit BZ** [28] der Einsatz von kommerziell erhältlichen Brennstoffzellen-Systemen untersucht. Die Systeme wurden hinsichtlich Systemeignung, Systemreife und Kosten beurteilt und es wurde eine Brennstoffversorgung evaluiert. Drei grosse Hersteller bieten heute standardisierte Brennstoffzellensysteme für die Notstromversorgung an. Ihre Richtpreise für ein 5-kW_{el} Outdoor-System liegen im Bereich von CHF 30'000. Ein Hersteller bietet zusätzlich ein System für Methanol (geringerer Platzbedarf als bei H₂-Stahlflaschen) mit Reformier und integriertem Tank an. Bei einer Dauerleistung von 2 kW reichen 2 Bündel Wasserstoff Stahlflaschen für eine Laufzeit von ca. 120 Stunden bzw. 5 Tage bei allen drei BZ-Herstellern. Ein Bündel Wasserstoff mit 120 m³ Inhalt kostet je nach Lieferant zwischen CHF 660 und 850. Für die Umschaltstation zwischen den Bündeln muss mit Preisen zwischen CHF 4000 und 9000 gerechnet werden. Zusätzlich fallen Transportkosten zwischen CHF 60 bis 100 pro Bündel und die Miete der Behälter an.

WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

Im wasserstoffbetriebenen Pistenfahrzeug kam im Projekt Swiss Alps 2000 ein von der Universität Fribourg entwickeltes Metallhydrid Wasserstoffspeichersystem zum Einsatz. Das Speichersystem wurde inzwischen durch Fachleute der EMPA modernisiert und der Universität Manchester/Birmingham für ein öffentlichkeitswirksames Demonstrationsprojekt, ein auf Wasserstoffantrieb umgebautes Touristen-Kanalboot, zur Verfügung gestellt. Ebenfalls im Bereich der „Binnenschifffahrt“ ist oben genanntes Anwendungsprojekt der Fachhochschule in Yverdon angesiedelt, bei welchem die Optimierung einer Mikro-Wasserstofftankstelle für Kleinboote mit hybridem Brennstoffzellen/Batterie Elektroantrieb evaluiert wird (siehe Fig. 23, [26]).

Auf nationaler Ebene wurden angespornt durch die Aussicht auf ein neues P+D Budget des BFE die schon früher angedachten Pilotprojektideen anlässlich eines Workshops an der EMPA weiter diskutiert. Dabei wird derzeit die Realisierbarkeit von Projektvorschlägen für integrale Wasserstoffprojekte geklärt, welche die gesamte Prozesskette von Solarstrom, Elektrolyse, Speicherung und Transportanwendung betreffen. Projektideen umfassen sowohl den gewerblichen Bereich (WEKA), den For-

schungs- und Ausbildungsbereich (*EMPA*) wie auch den häuslichen Bereich (Unternehmen *Belenos AG* der *Swatch* Gruppe).

Ein tragender Baustein für die künftige Umsetzung von Wasserstoffproduktionsprojekten ist die Verfügbarkeit von entsprechenden Elektrolyseuren. In dem industriebasierten KTI Projekt **Neue Membranen für alkalische Elektrolyseure (NMAE2)** [43] werden Ersatzmaterialien für die nur noch bis 2008 (!) erlaubten Asbestdiaphragmen für alkalische Druckelektrolyseure gesucht, neue Membranen aufgebaut und ihre Einsatzfähigkeit geprüft.

Bewertung 2007 und Ausblick 2008

Das Wasserstoff und Brennstoffzellen Programm verfolgte auch im Jahre 2007 weiterhin das **Hauptziel**, die bestehenden **Kompetenzen, Kooperationen** und **industriellen Players** zu **bündeln** und weiter auszubauen, dazu gehört auch der Start des Aufbaus einer Expertenbegleitgruppe für die Programmleitung.

Auf der operativen Ebene konnte im Jahr 2007 die Schweizer Expertenwelt der Wasserstoff- und Brennstoffzellenforschung weiter vernetzt und fokussiert werden. So gesellten sich zu dem bereits Ende 2006 etablierten Forschungskooperationsnetzwerk **SOF-CH** (Festoxid-Keramik-Brennstoffzellen) neu im 2007 das Netzwerk **PEF-CH** (Polymer-Membran-Brennstoffzellen) und **PEChouse** (Photoelektrolytische Wasserspaltung). Die Programmleitung konnte dabei breite Unterstützung bieten, sowohl für den nationalen Aufbau wie auch bei der internationalen Vernetzung. Ein weiteres Netzwerk im Bereich der Wasserstoffspeicherung („Stor-CH“) ist in Vorbereitung für 2008.

Strategisch stand 2007 ganz im Zeichen der Bereinigung, Vorstellung und Genehmigung des **Detailkonzeptes 2008-2011** für Wasserstoff und Brennstoffzellen durch die Commission de la Recherche (**CORE**). Die Arbeiten im 2008 werden weiter geführt anhand der im Detailkonzept festgelegten Forschungsschwerpunkten, mit den spezifischen Zusatzzielen der **Verbesserung der Beteiligung der Privatwirtschaft** (inklusive Umsetzung mittels Prototypen) sowie des **Ausbaus der zielgruppengerechten Informationsdissemination** (inklusive Wissen über national sowie international vorhandene Mittel).

Was die Forschungsfinanzierung anbetrifft, so darf man für **2008** ferner gespannt sein auf die Entschiede und neuen Aktivitäten der **EU-FP7** sowie **HFP-JTI Programme** – schliesslich wird eine **möglichst hohe Beteiligung von Schweizer Forschungskonsortien** sowie von einzelnen Stakeholdern angestrebt. Gleichzeitig wird auch die bi- und multinationale Zusammenarbeit im **HYCO ERA-Net** weitergeführt.

Als erfolgreiches Grossereignis im Bereich der nationalen Vernetzung betreffend Wasserstoff und Brennstoffzellen konnte Ende **2007** wieder ein **Impulstag** durchgeführt werden. Am Paul *PSI* trafen sich rund 120 nationale Vertreter von Akademia, Forschungsinstituten und Industrien zum regen Erfahrungsaustausch und zur Vernetzung. Im 2008-2009 ist angedacht, dass technologiespezifisch „Speed-days“ – Workshops zur Umsetzung von vorhandenen Impulsen in Projekte – organisiert werden. Im Brennstoffzellenbereich wird zusätzlich anfangs 2008 an der Zürcher Hochschule der Angewandten Wissenschaften (ZHAW) auch wieder eine nächste Runde des jährlichen **„Fuel Cell Research Symposium on Modelling and Experimental Validation“** durchgeführt werden. Diese beiden Events helfen unter anderem mit, ein „**Who-Is-Who**“ der Schweizer Wasserstoff und Brennstoffzellen Szene aufzubauen.

Die technischen und wirtschaftlichen Zielsetzungen des Programms sind mit der Europäischen Kommission abgeglichen. Dabei spielt vor allem das **zielgerichtete Fortführen der Grundlagenforschung** eine **stützende Rolle für den Erhalt von Fachkompetenzen und Exzellenz**. Das **Sammeln von Erfahrungen mittels Pilot- und Demonstrationsprojekten** wird auf die gebäudeintegrierte Wasserstoffkette (Produktion, Speicherung, Anwendung) und auf die energetische Verwendung von Wasserstoff im Mobilitätsbereich fokussiert. Bis 2011 werden vorbereitende Arbeiten und, soweit das Engagement der Privatwirtschaft gewonnen werden kann und es die Budget-Situation im P+D-Bereich erlaubt, die Umsetzung in Angriff genommen. Begleitende erste Demonstrationsaktivitäten sollen bis 2011 bei EnergieSchweiz verankert und auf die dezentralisierte WKK-Anwendung von Festoxid-Brennstoffzellen fokussiert werden. Dies dient als Brückenschlag zur Marktumsetzung, welche dem Portfolio der KTI zugesprochen wird.

Ziel für 2008 ist es die vier identifizierten Haupt-Schwachpunkte zu verbessern. Diese sind (i) schwache Beteiligung der Privatwirtschaft, (ii) mangelnde Umsetzung in Prototypen, (iii) Information und (iv) Akquisition von zusätzlichen Finanzierungspartnern.

Abschliessend bedankt sich die Programmleitung beim scheidenden Bereichsleiter Dr. Andreas Gut für die hervorragende Zusammenarbeit und wünscht ihm weiterhin eine energetische und erfolgreiche Karriere. Die Bereichsleitung wird anfangs 2008 an Dr. Stefan Oberholzer übergeben.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2007 vorhanden

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

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

BRENNSTOFFZELLENTechnologie

- [1] **Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 – 2011**, Bundesamt für Energie, April 2007, Download: www.energieforschung.ch.
- [2] **Energieforschungsprogramme Wasserstoff und Brennstoffzellen für die Jahre 2008-2011**, Bundesamt für Energie, Januar 2008, Download: www.energieforschung.ch.
- [3] O. Bucheli (olivier.bucheli@htceramix.ch), HTceramix SA, Yverdon: **Advanced Test Set-up for Long-Term Testing of Anode Supported SOFC Stacks** (SB). Dieses Projekt ist einer der Schweizer Beiträge zum EU-Projekt **REAL-SOFC**.
- [4] P. Holtappels (peter.holtappels@empa.ch), EMPA, Laboratory for High Performance Ceramics, Dübendorf: **Intermediate Temperature Fuel Cells Based on Proton Conducting Electrolytes**, (SB).
- [5] **ONEBAT** -Präsentation der ETHZ am Impulstag 2007 am PSI, <http://ecl.web.psi.ch>
- [6] J. Sfeir (josef.sfeir@hexis.com), HEXIS AG, Winterthur: **Enhancing the Lifetime of SOFC Stacks for Combined Heat and Power Applications, SOF-CH** (SB).
- [7] G. Scherer (guenther.scherer@psi.ch), Paul Scherrer Institute, Villigen-PSI: **Protonen-Leitende Polymermembranen für Brennstoff- und Elektrolysezellen**, (JB).
- [8] G. Scherer et al. (guenther.scherer@psi.ch), PSI, Villigen: **Lebensdauer Limitierungen von Brennstoffzellen-Membranen: Mechanismen, Methoden und Innovationen**, (JB).
- [9] D. Thiele und A. Züttel (andreas.zuetzel@empa.ch), EMPA, Dübendorf: **New Highly Active Oxygen Reduction Electrode for PEM Fuel Cell and Zn/Air Battery Application (NORA)**, (JB).
- [10] L. Gubler (lorenz.gubler@psi.ch), Paul Scherrer Institut, Villigen: **go.PEF-CH Enhancing PEFC Durability and reliability under Application-Relevant Conditions** (JB).
- [11] F. Büchi (felix.buechi@psi.ch), Paul Scherrer Institute, Villigen-PSI: **Cal.PEF-CH: Model Based Investigation of PE Fuel Cell Performance with focus on Porous Layer Properties**, (JB).
- [12] G. Schuler (gabriel.schuler@psi.ch), Paul Scherrer Institut, Villigen: **Lokale Gasanalyse an PE-Brennstoffzellen** (SB).

WASSERSTOFFTEchnologie

- [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** (JB06).
- [14] K. Sivula, M. Graetzel (Michael.graetzel@icp.dc.epfl.ch), EPF-Lausanne: **PEChouse: A competence centre devoted to the photoelectrochemical splitting of water and production of hydrogen** (JB)
- [15] E. Constable (Edwin. Constable @unibas.ch), Universität Basel, Basel: **NefiosHydro** (JB).
- [16] A. Züttel (andreas.zuetzel@empa.ch) et al., EMPA, Dübendorf: **Wasserstoffspeicherung in Metall- und komplexen Hydriden**, (SB).
- [17] A. Züttel (andreas.zuetzel@empa.ch) et al., EMPA, Dübendorf: **Relevant Physical Aspects of Hydrides for System Integration and Safety (SAFSYST)**, (JB).
- [18] A. Züttel (andreas.zuetzel@empa.ch) et al., EMPA, Dübendorf: **Hydrogen Storage in New Complex Hydrides (COMPHY)**, (JB).
- [19] K. Yvon (klaus.yvon@cryst.unige.ch), laboratoire de cristallographie, Université de Genève, Genève: **New Metal Hydrides Hydrogen Storage in PEM Fuel Cell Systems**, (SB).

Liste der Internationalen Aktivitäten

- [20] 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)
- [21] O. Bucheli (olivier.bucheli@htceramix.ch), HTceramix SA, Yverdon: **Participation of Switzerland in IEA Implementing Agreement, Annex XVIII (SOFC)**, (JB).
- [22] S. Renz (renz.btr@swissonline.ch), THOMA+RENNZ Basel: **Market Outlook for stationary Fuel Cells**, (JB).

Liste der P+D-Projekte

- [23] P. Gantenbein (paul.gantenbein@solarenergy.ch), Hochschule für Technik Rapperswil HSR, Rapperswil: **Konzeptstudie Klimatisierung durch Abwärmenutzung aus Brennstoffzellen** (SB).
- [24] M. Höckel (hkm1@bfh.ch), Hochschule für Technik und Informatik, Biel: **Erweiterung des BFH Testlabors für PEM Brennstoffzellen**, (JB).

- [25] JF. Affolter (jean-francois.affolter@hieig-vd.ch), HES-SO/HEIG-VD/IESE, Yverdon: **Intégration d'une pile à combustible 300W pour la motorisation électrique de petites embarcations**, (SB).
- [26] JF. Affolter (jean-francois.affolter@hieig-vd.ch), HES-SO / HEIG-VD / IESE, Yverdon: **Hydrogène dans les ports**, (JB).
- [27] U. Trachte (utrachte@hta.fhz.ch), HTA Luzern: **Fortsetzung Feldtests USV für GSM-Basisstationen mit BZ**, (JB).
- [28] U. Trachte (utrachte@hta.fhz.ch), HTA Luzern: **Konzeptstudie für eine Energieversorgung mobile Basisstation Polycor**, (JB).

Referenzen

- [29] L. Gubler et al., **Crosslinker Effect on fuel Cell Performance Charaktersitics of ETFE Based Radiation Grafted Membranes**, Electrochem. Soc. Trans 11 (1), 27-34, (2007).
- [30] M. Schisslbauer: **Untersuchungen zur Degradation von strahlengepöpferten Membranen in der Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle**, Diplomarbeit ETH Zürich/PSI
- [31] S. A. Freunberger et al., **Measuring the Current Distribution in PEFCs with Sub-Millimeter Resolution**, J. Electrochem. Soc., 153, A2158 (2006).
- [32] Kay, Andreas; Cesar, Ilkay; Graetzel, Michael. **New Benchmark for Water Photooxidation by Nanostructured a-Fe2O3 Films**. *Journal of the American Chemical Society* (2006), 128(49), 15714-15721.
- [33] Cesar, Ilkay; Kay, Andreas; Gonzalez Martinez, Jose A.; Graetzel, Michael. **Translucent Thin Film Fe2O3 Photoanodes for Efficient Water Splitting by Sunlight: Nanostructure-Directing Effect of Si-Doping**. *Journal of the American Chemical Society* (2006), 128(14), 4582-4583.
- [34] A. Züttel et al., LiBH₄, **A new Hydrogen Storage Material**, Journal of Power Sources, 118, 2003, pp 1 – 7.
- [35] K. Yvon in **Complex Transition Metal Hydrides**, ch 6.4 in **Hydrogen as a future Energy Carrier**, Eds. A. Züttel et al. . Wiley-VCH, (2008, ISBN: 978-3-527-10957 (Konferenz-Proceeding?).
- [36] BFE-Reiseberichte zum AFC-ExCo 2007: leafuelcell.com
- [37] O. Bucheli (olivier.bucheli@htceramix.ch), HTceramix SA, Yverdon: **CD-ROM Nara Workshop**
- [38] **4th Fuel Cell Research Symposium on Modelling and Experimental Validation**, 6.-7. März 07, FZ-Jülich <http://www.fz-juelich.de/iwv/iwv3/modelling>
- [39] **5th Fuel Cell Research Symposium on Modelling and Experimental Validation**, 11.-12. März 08, ZHW Winterthur, www.ccp.zhwh.ch
- [40] M. Höckel (hkm1@bfh.ch), Hochschule für Technik und Informatik, Biel: **IHPoS: Independent-Hydrogen-Power-System**, Nr 7700.1 EPRP-IW
- [41] JF. Affolter et al., **Compact Hydrogen Fuel Cell Solution for Recreational Fishing boats**, Proc. EVER07, Monaco, 2007.
- [42] Fachtagung „Trends und Aussichten: USV bei komplexen IT-Anwendungen“ vom 10./11. Mai 2007 in ???.. Unterlagen zu beziehen bei Fa. Servicenet, Industriestr. 5, 5432 Neuenhof.
- [43] A. Züttel (andreas.zuettel@empa.ch) et al., EMPA, Dübendorf: **Neue Membranen für alkalische Elektrolyseure (NMAE2)**, KTI Projekt 8574