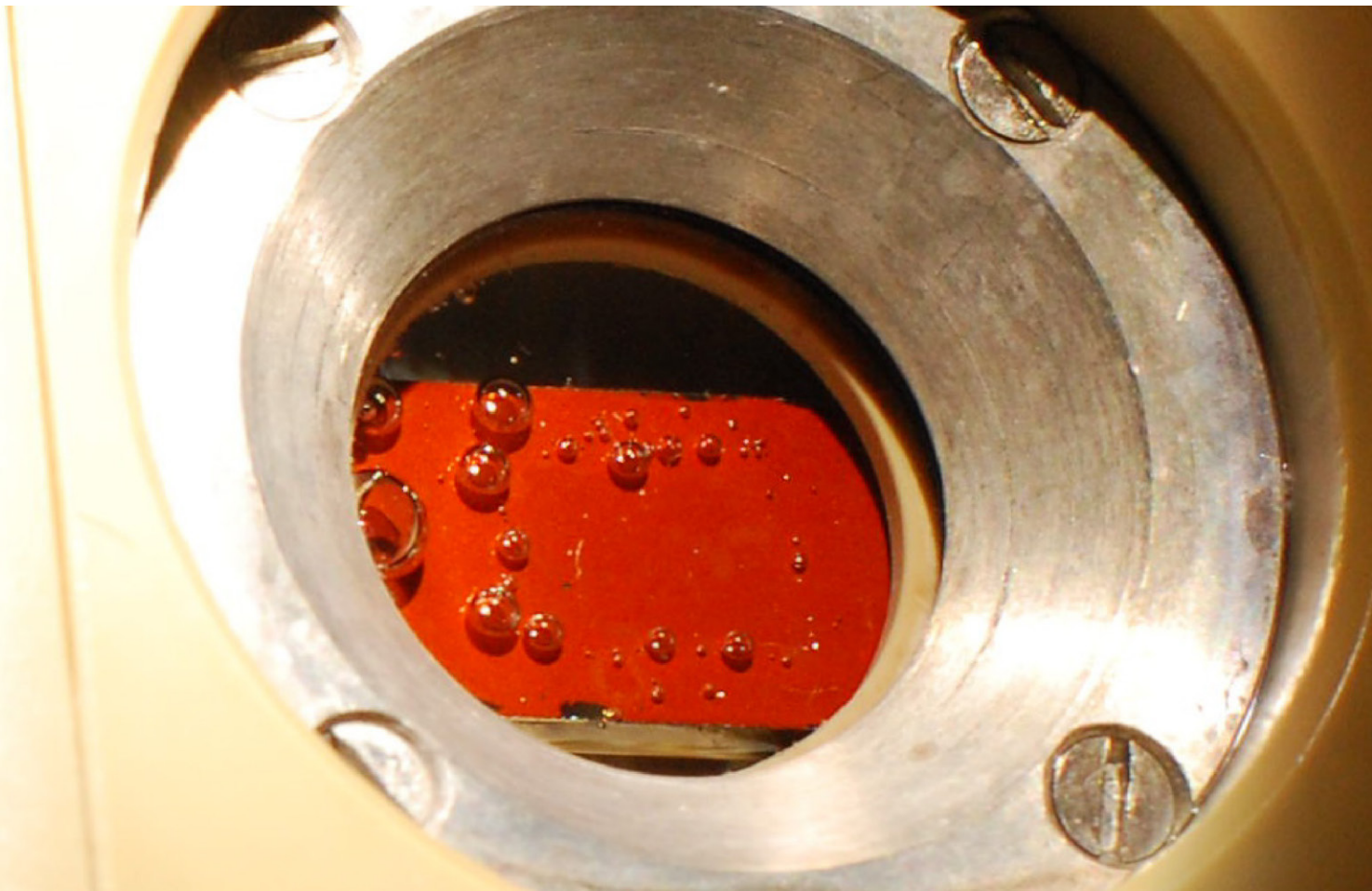


Überblicksbericht 2010

Forschungsprogramm Wasserstoff



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE
Office fédéral de l'énergie OFEN

Titelbild:

It's all about tiny bubbles – Durchbruch bei der Entwicklung neuer Photokathoden für photoelektrochemische (PEC-)Zellen zur Umwandlung von Sonnenlicht in eine chemische Speicherform (Wasserstoff)

Der p-Typ-Halbleiter Kupferdioxid (CuO_2) wurde als erfolgversprechendes Material zum Einsatz als Photokathode in PEC-Zellen identifiziert. Das Problem der starken Photokorrosion dieses Materials konnte durch das Aufbringen von Schutzschichten gelöst werden. PEC-Zellen mit solchen Photokathoden zeigen Photostromdichten von bis zu 7 mA/cm^2 bei Standardbeleuchtung, was einer Solar-zu-Wasserstoff-Effizienz von 10 % entspricht! Das Bild zeigt die Wasserstoffentwicklung an einer CuO_2 -Photokathode mit einer aktiven Fläche von $0,4 \text{ cm}^2$ (Quelle: EPFL, PEChouse).

BFE Forschungsprogramm Wasserstoff

Überblicksbericht 2010

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern

Programmleiter BFE (Autor):

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

Bereichsleiter BFE:

Dr. Stefan Oberholzer (stefan.oberholzer@bfe.admin.ch)

www.bfe.admin.ch/forschungwasserstoff

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

Einleitung

In einer Energiewirtschaft mit einer starken Diversifikation erneuerbarer Primärenergiequellen kommt der Wahl der Energievektoren eine entscheidende Bedeutung zu. Eine dezentrale Elektrifizierung scheint in vielen Bereichen sinnvoll, da etliche erneuerbare Energiequellen direkt Strom produzieren und dieser höchst effizient in andere Energieformen umgewandelt werden kann. Gleichzeitig wird dadurch die Problematik der Integration fluktuierend produzierter Strommengen – zyklisch wie stochastisch – und deren Speichermöglichkeiten verschärft. So fielen beispielsweise in Deutschland bereits 2009 die Strompreise im Grosshandel zu Schwachlastzeiten ins Negative mit Rekordwerten von -50 c€/kWh . Gemäss der 2010 veröffentlichten Studie «Electricity Storage: Making Large-Scale Adoption of Wind and Solar Energy a Reality» der Boston Consulting Group [1] müssten 2025 bei einem Anteil der erneuerbaren Energiequellen von 35 % an der in Europa insgesamt installierten Leistung – zusätzlich zu einer Verstärkung der Netze – rund 100 GW an Kompensationsleistung bereitstehen, die 150 TWh an Kompensationsenergie liefern. Dies entspricht mehr als 5 % des jährlichen europäischen Strombedarfs. Damit diese Kapazitäten installiert werden, bräuchte es in einer Anfangsphase entsprechende Anreizsysteme, analog zu den Vergütungssystemen für die Installation erneuerbarer Quellen. Technologisch besitzen laut der Studie Pumpspeicherkraftwerke, Druckluftspeicher, Batterien und Wasserstoffspeicher das grösste Potenzial, wobei nur eine Kombination verschiedener Speicherlösungen die Differenzen zwischen Angebot und Nachfrage auf verschiedensten Zeitskalen ausgleichen könnte.

Wie Elektrizität ist Wasserstoff ein sekundärer Energieträger, welcher aus verschiedenen Primärquellen erzeugt werden kann. Analog zum Strom erfolgt die weitere Energieumwandlungskette emissionsfrei, umweltverträglich und mit einem hohen Anteil an Exergie. Eine auf erneuerbare Quellen basierte Produktionskette erlaubt eine vollständig nachhaltige Umwandlungskette.

Als Speichertechnologie kommt Wasserstoff insbesondere eine Bedeutung als chemischer Langzeitspeicher zu, welcher saisonale Schwankungen ausgleichen kann. Dabei wäre für die Stromspeicherung nicht notwendigerweise eine teure Infrastruktur aufzubauen, da Produktion, Speicherung und Verbrauch – auch anderweitig als nur für die Elektrizitätserzeugung – am selben Ort erfolgen. Zu ähnlichen Schlussfolgerungen kommt eine im Auftrag des Ministeriums für Wissenschaft, Wirtschaft und Verkehr des Bundeslandes Schleswig-Holstein, der Stadt Hamburg und der Wasserstoff-Gesellschaft Hamburg durchgeführte Studie zur «Untersuchung der Potenziale von Wasserstoff aus überschüssiger Windenergie im Raum Hamburg und Schleswig-Holstein bis 2020 und darüber hinaus» [2]. Laut dieser Studie würden 2020 bis zu 20 % des «onshore» erzeugten Windstromes als Überschussstrom anfallen, welcher zu Wasserstoff umgewandelt die steigende Nachfrage nach Wasserstoff in dieser Region (Mobilität, industrielle Grossabnehmer und andere) zu einem grossen Teil abdecken würde.

In Europa laufen bereits verschiedene Feldversuche, in denen das Potenzial von Wasserstoff als Langzeit-Stromspeicher eindrücklich demonstriert

wird. So wurde im Februar 2010 in Grönland eine erste Wasserstoffspeicheranlage in der Hauptstadt Nuuk in Betrieb genommen, wo Überschussstrom aus Wasserkraft zwischengespeichert wird, welcher im Winterhalbjahr in einer Brennstoffzelle in Strom und Wärme umgewandelt wird (www.h2logic.com). Das Projekt will aufzeigen, dass durch die Kombination von erneuerbarer Energie und Wasserstoff mittelfristig auf den Einsatz von Diesel verzichtet werden kann, und dass der so erzeugte Wasserstoff künftig auch in der Mobilität eingesetzt werden könnte.

In der Schweiz laufen im Bereich Umsetzung im Vergleich zum umliegenden Ausland wenig Aktivitäten. Eine Ausnahme bildet das Projekt SELF der Empa (www.empa.ch/self/), eine Energie-autarke Wohnzelle, wo bis zu 120 kWh an solar erzeugtem Strom in Form von Wasserstoff zwischengespeichert wird. Dieser dient nach Bedarf als Heizunterstützung und zum Kochen. Oder das europäische Projekt FITUP mit starker Schweizer Beteiligung, wo in einem gross angelegten Feldversuch der Einsatz von Wasserstoff für Anlagen zur unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) getestet wird.

In dem vorliegenden Bericht werden die herausragendsten Resultate 2010 aus Forschung und Entwicklung in diesem Bereich vorgestellt.

IEA-Klassifikation: 5.1 Hydrogen

Schweizer Klassifikation: 2.2 Wasserstoff

Programmschwerpunkte

Die Schwerpunkte des Forschungsprogramms Wasserstoff liegen in der materialorientierten Grundlagenforschung, in der Systementwicklung, sowie in der Demonstration und Erprobung in Pilotprojekten [3, 4].

Nachhaltige Wasserstoffproduktion:

Die Erforschung neuer Materialien, welche für die photoelektrochemische (PEC) Produktion von Wasserstoff in Frage kommen, ist ein zentrales Thema des Programms. Dabei wird insbesondere die Weiterentwicklung von nanostrukturierten Photoanoden auf der Basis von Eisenoxid (Hämatit) vorangetrieben. Forschungsprojekte hierzu laufen an der École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), der Empa und der Universität Basel.

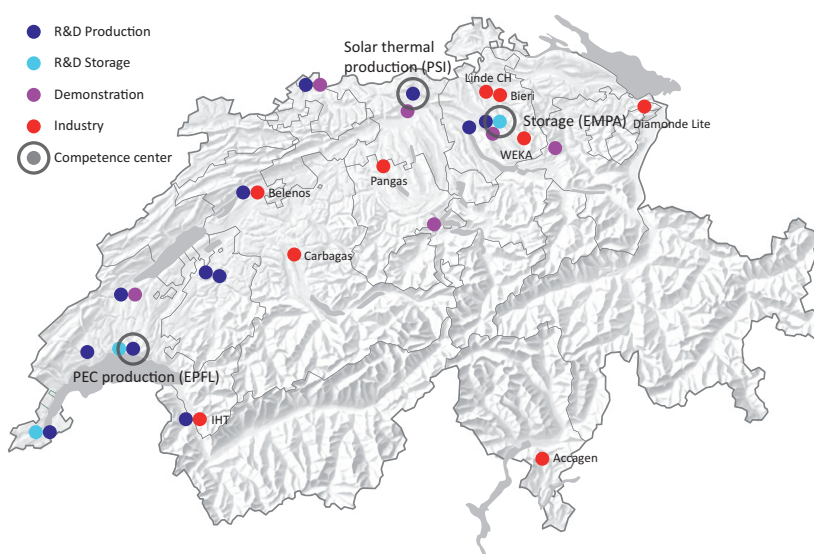
Die solarthermische Produktion von Wasserstoff und Synthesegas bildet einen zweiten Schwerpunkt. Hier werden am Paul Scherrer Institut (PSI) sowie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETHZ) verschiedene thermochemische Kreisprozesse studiert, bei denen konzentrierte Solarwärme als Energiequelle eingesetzt wird.

Ein weiterer Themenbereich bildet die effiziente Hochdruckelektrolyse zur Umwandlung von Strom in Wasserstoff. Die Entwicklung alkalischer Hochdruckelektrolyseure im hohen Leistungsbereich haben in der Schweiz eine lange Tradition. Die Forschungsaktivitäten konzentrieren sich auf die Kombination solcher Anlagen mit erneuerbaren Quellen wie Wind, sowie auf die Entwicklung neuer Membranmaterialien. Weiter werden hier auch gänzlich neue Ansätze für die Elektrolyse bei sehr hohen Drücken erforscht.

Effiziente Wasserstoffspeicherung:

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

Weiter wird in diesem Bereich die Speicherung von Wasserstoff in Form von



Kohlenwasserstoff-Verbindungen wie Formalinsäure (CH_2O_2) studiert. Die Attraktivität solcher Speicherformen liegt in der leichteren Handhabbarkeit solcher Stoffe (Flüssigkeiten) sowie in den Kombinationsmöglichkeiten mit «Carbon Capture and Storage»-Technologien.

Rückblick und Bewertung 2010

Im Berichtsjahr konnten in verschiedenen grundlegenden Projekten herausragende Erfolge erzielt werden. Insbesondere im Projekt PEChouse zur photoelektrochemischen Wasserstoffproduktion (siehe unten), welches seit 2007 plangemäss läuft, schlug sich dies in etlichen wissenschaftlichen Publikationen in renommierten Zeitschriften nieder. Dank der langjährigen Unterstützung durch das BFE-Forschungsprogramm konnte sich das Labor für Photonics and Interfaces (LPI) an der EPFL weltweit als «Leading house» im Bereich der oxid-basierten PEC-Zellen etablieren.

Ein weiterer Durchbruch erfolgte in einer 2009 gestarteten Forschungsaktivität an der Fachhochschule Fribourg zur Entwicklung eines dezentralen Hochdruckelektrolyseurs: das «Proof of concept» war erfolgreich und das Projekt kann planmässig weitergeführt werden.

Verschiedene Projekte (CompHy, SafeSyst u. a.) wurden im Berichtsjahr erfolgreich abgeschlossen. Einige Forschungsprojekte konnten in natio-

nale wie europäische Demonstrationsprojekte übergeführt werden, um die Technologie im Feldversuch zu testen.

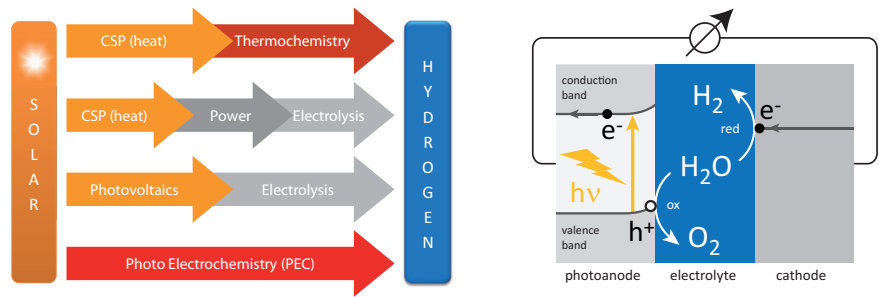
An der World Hydrogen Energy Conference, welche im Mai 2010 in Essen stattfand, waren Schweizer Forschungsprojekte und Firmen an einem der grösseren Stände stark präsent und wurden entsprechend wahrgenommen.

Ausblick 2011

Trotz bescheidener nationaler Forschungsmittel wird versucht, durch gezielte Unterstützung der Schwerpunktsbereiche ein Maximum an Wirkung zu erzielen. 2011 werden insbesondere die Forschungsaktivitäten im Bereich Festkörperspeicherung von Wasserstoff an der Empa weitergeführt, welche diese Technologie der Anwendung ein gutes Stück näher bringen sollte. Im Bereich Umsetzung laufen 2011 verschiedene Pilotversuche, welche in diesem Jahr vermehrt Resultate liefern werden. Durch die Mitwirkung von Postauto AG in einem europäischen Feldversuch zum Einsatz von Brennstoffzellenbussen [5] wird hierzulande eine erste Wasserstofftankstelle in grösserem Massstab aufgebaut werden. Ein weiteres wichtiges Ereignis wird das jährlich in Luzern stattfindende European Fuel Cell Forum [6], welches sich 2011 verstärkt auch mit der Thematik der Wasserstoffproduktion und -speicherung auseinandersetzen wird.

Highlights 2010

Als Basisstoff für die chemische Industrie, die Raffinerien und die Stahlindustrie wird Wasserstoff zum allergrössten Teil (> 95 %) aus fossilen Energieträgern gewonnen. Dieser wird dabei fast ausschliesslich vor Ort produziert und da gleich wieder verbraucht. Um Wasserstoff als (nachhaltigen) Energieträger einzusetzen, können die heute existierenden Verfahren zur Produktion, Speicherung und Verteilung verbessert werden. Hier leisten die zum Teil grundlegenden Forschungsaktivitäten an verschiedensten Institutionen in der Schweiz einen wichtigen Beitrag.



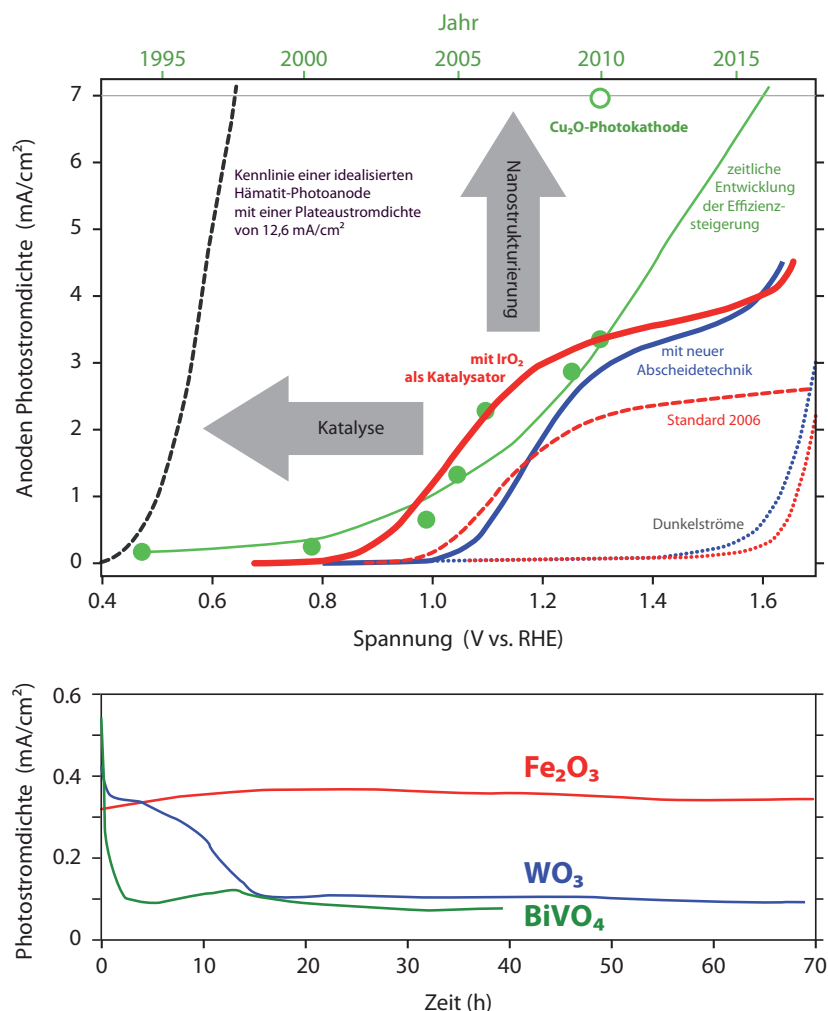
Figur 1: (Links) Wasserstoff kann aus verschiedensten Primärquellen gewonnen werden. Insbesondere interessant ist die direkte Produktion aus Solarenergie. (Rechts) Bei photoelektrolytischen Zellen werden die solar generierten Elektronen direkt zur Wasserspaltung genutzt. Dadurch treten im Vergleich zur Kombination von Photovoltaik mit klassischer Elektrolyse oder der Produktion über solarthermische Prozesse weniger Verluste auf.

Weltweit führende Forschungsaktivitäten zur solaren Wasserstoffproduktion

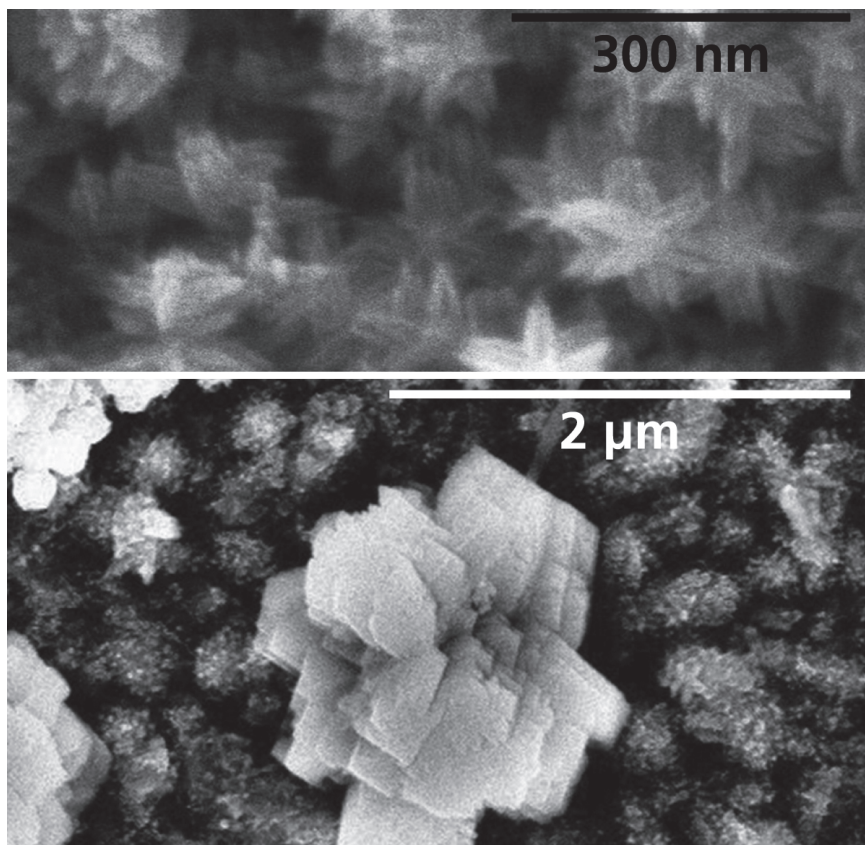
Die Gewinnung von Wasserstoff kann über verschiedenste Prozesse laufen, beispielsweise über thermische, elektrolytische oder photolytische (Figur 1). Unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit sind insbesondere solar-thermische Verfahren mit konzentrierter Solarenergie, die Elektrolyse mit dem Einsatz von Strom aus erneuerbaren Quellen und die Photoelektrolyse (PEC) interessant. In letzterem Prozess wird die Energie des Sonnenlichts zur Aufspaltung von Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff genutzt.

Photoelektrolyse

Am Kompetenzzentrum PEChouse (pechouse.epfl.ch) an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne (EPFL) wird in Zusammenarbeit mit Gruppen an der Empa, der Universität Basel und verschiedensten internationalen Institutionen an der Entwicklung von photoelektrochemischen Zellen zur Wasserspaltung gearbeitet. Die Attraktivität dieser Methode liegt in der direkten Umwandlung und Speicherung der Energie des Sonnenlichts in Wasserstoff, wobei die Komplexität der auf PEC basierenden Wasserspaltung sehr hoch ist. So müssen die photoaktiven Elemente in PEC-Zellen eine Spannung liefern, welche oberhalb des elektrochemischen Potentials für die Wasserspaltung (1,23 V) in Sauerstoff und Wasserstoff liegt. Gleichzeitig sollen die Zellen eine hohe Photon-Umwandlungseffizienz (IPCE) aufweisen



Figur 2: (Oben) Im Berichtsjahr erfolgte ein Durchbruch bei der Performance von Fe_2O_3 Photoanoden mit verbesserten Abscheidebedingungen und mit IrO_2 als Katalysator. Die zeitliche Entwicklung zeigt, dass Photoströme von bis zu 7 mA/cm^2 bis 2015 realistisch sind. Optimierungspotenzial liegt bei der weiteren Verbesserung der Morphologie (Nanostrukturierung) sowie der weiteren Absenkung von Überspannungspotenzialen durch den Einsatz von Katalysatoren. (Unten) Im Vergleich zu anderen auf Oxiden basierenden PEC-Zellen sind Hämatit-Zellen zeitlich stabil (nach EPFL).



Figur 3: (Oben) Elektronenmikroskopische Aufnahme eines Hämatit-«Nanoflower»-Films für die PEC-Produktion von Wasserstoff. (Unten) Zusätzliche Cobaltoxid-«Mikrorosen» erhöhen die PEC-Effizienz (Quelle: Empa).

(hoher Photostrom), die eingesetzten Materialien und die Herstellung dürfen nicht zu kostenintensiv sein, und schliesslich muss eine Langzeitstabilität (Korrosionsbeständigkeit) der PEC-Zellen gewährleistet sein. Die Forscher an der EPFL und ihre Projektpartner konzentrieren sich auf PEC-Zellen auf Basis von Hämatit (Fe_2O_3) als Photoanodenmaterial. Mit diesem Material wurde im Berichtsjahr im PEChouse-Projekt ein neuer Durchbruch erzielt. Eine verbesserte (kontrolliertere) Abscheidetechnik (atmospheric pressure chemical vapor deposition APCVD) des Anodenmaterials sowie der Einsatz von IrO_2 -Nanopartikeln als Katalysatoren für die Sauerstoffreaktion (oxygen evolution reaction) lieferten eine Rekord-Photostromdichte von $3,3 \text{ mA/cm}^2$ unter Standardbeleuchtung (1 Sonne bei AM 1,5) bei einer Spannung von $1,23 \text{ V}$ bezogen auf das Wasser-Redoxpotenzial [7]. Für die Umwandlungseffizienz von Solar-zu-Wasserstoff (STH) bedeutet dies einen Wirkungsgrad von $4,8 \%$. Dieses Resultat übertrifft alles, was bisher mit Oxidmaterialien (TiO_2 , WO_3 u. a.) erreicht wurde. Die Resultate der EPFL wurden in einer renommierten Zeitschrift letztes Jahr publiziert [8] und in der Zeitschrift *Nature*

«gehighlighted» [9]. In der Vergangenheit konnten bereits höhere STH-Wirkungsgrade von bis zu $12,8 \%$ erzielt werden (www.nrel.gov/hydrogen), dies mit auf III-V-Halbleitermaterialien basierenden PEC-Zellen ($\text{GaInP}_2/\text{GaAs}$), welche in ihrer Produktion äusserst kostenintensiv sind und daher für eine Anwendung eher nicht in Frage kommen (Panels mit $\$ 10'000/\text{m}^2$).

Mit den 2010 erzielten Fortschritten sollten die Ziele des PEChouse-Projekts bis Ende 2011 erreicht werden: Photostromdichten von 5 mA/cm^2 (entspricht einem STH von 7%), eine Degradation von weniger als 5% auf $1'000 \text{ h}$ sowie das Aufzeigen einer machbaren Entwicklung, welche bis 2015 Wasserstoffproduktionskosten auf PEC-Basis von weniger als 5 €/kg H_2 erlaubt. Eine extensive techno-ökonomische Studie zu den Wasserstoffproduktionskosten auf Basis von PEC-Konzepten wurde kürzlich am US Department of Energy veröffentlicht [10].

Optimierungspotenzial bei Hämatit-PEC-Zellen liegt bei der weiteren Verbesserung der Morphologie der Filme durch Nanostrukturierung sowie der Absenkung der Überspannungen durch den Einsatz geeigneter Katalysa-

toren (Blockpfeile in Figur 2). Letzteres ist wichtig, um auf den Einsatz einer zusätzlichen PV-Zelle in Tandemkonfiguration verzichten zu können, da eine solche Tandemstruktur teuer in der Produktion wäre. Die Morphologie wird in einem weiteren Arbeitspaket des PEChouse-Projekts bearbeitet, in welchem ein «host-guest»-Ansatz verfolgt wird. Hämatit besitzt eine eher geringe Lichtabsorption und kurze Lochdiffusionslängen im Vergleich zu anderen Halbleitern. Mit Anoden bestehend aus extrem dünnen Hämatitschichten, welche auf einer Trägermatrix (WO_3) aufgebracht werden, können diese Nachteile kompensiert und dadurch die Effizienz weiter erhöht werden. Als problematisch stellte sich eine nicht photoaktive Schicht bei extrem dünnen Hämatitschichten heraus, jedoch konnte dieser Effekt im Berichtsjahr durch eine spezielle Behandlung vor der Abscheidung der dünnen Filme behoben werden, so dass dieser Ansatz vielversprechend weiterverfolgt werden kann.

Als weiterer Meilenstein in diesem Projekt wurde Kupferoxid (Cu_2O) als geeignetes Material für Photokathoden in PEC-Zellen identifiziert (Titelbild). Kupferoxid ist ein intrinsischer p-Halbleiter mit einer direkten Bandlücke und einer Leitungsbandkante, welche für die Wasserstoffreaktion energetisch gut positioniert ist. Ausserdem weist das Material gute Leitungseigenschaften auf. Problematisch ist die hohe Photokorrosion des Materials. Durch das Aufbringen (atomic layer deposition) von geeigneten Schutzschichten konnte dieser Effekt um Grössenordnung verkleinert werden.

Das PEChouse-Projekt an der EPFL wird national ergänzt durch Projekte an der Universität Basel und an der Empa, wo soft-chemische Methoden zur Präparierung von Hämatitfilmen eingesetzt werden. Speziell interessant sind PEC-Multi-Bandgap-Systeme auf Basis von Hämatit und Nickeloxid, bei welchen ein weiterer Bereich des solaren Spektrums absorbiert wird, womit höhere Effizienzen erzielt werden. International entstand aus dem nationalen Projekt heraus das europäische Projekt NanoPEC mit der EPFL als leitende Institution und Partnern aus sieben europäischen Ländern. Ausserdem sind diese Aktivitäten sehr gut in den PEC-Task des Hydrogen Implementing Agreements der Internationalen Energieagentur (IEA) eingebunden.



Figur 4: Ansicht der Experimentierplattform am 1 MW-Solarofen in Odeillo (Frankreich) bei geöffnetem Shutter und unter Bestrahlung. Rechts im Hintergrund erkennt man einen Teil des Heliostatenfelds. Im Berichtsjahr wurde am PSI der Reaktor zur solaren Zink-Produktion erfolgreich hochskaliert. Die Tests im zweiten Halbjahr 2011 in Odeillo sollen aufzeigen, ob die theoretisch ermittelten Solar-zu-Zink- bzw. Solar-zu-Wasserstoff-Effizienzen experimentell bestätigt werden können (Quelle: CNRS-PROMES, Odeillo).

Solare Thermochemie

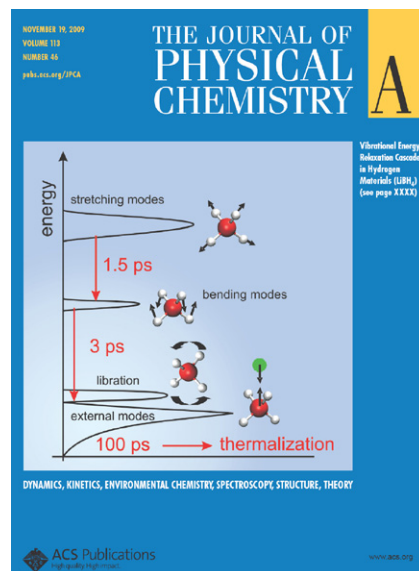
Am Labor für Solartechnik (STL) des Paul Scherrer Instituts (PSI) werden verschiedenste thermochemische Prozesse zur Erzeugung chemischer Energieträger (Wasserstoff, Syngas u. a.) untersucht, bei welchen konzentrierte Solarstrahlung als Energiequelle genutzt wird. Das BFE unterstützt über das Forschungsprogramm «Industrielle Solarenergienutzung» ein langfristiges Projekt zur thermischen Dissoziation von Zinkoxid zu Zink und Sauerstoff, wobei das entstehende Zink in einem zweiten Prozessschritt zur Wasserstoffproduktion genutzt werden kann. Im Gegensatz zur direkten Thermolyse von Wasser (oder Kohlendioxid) ermöglicht der Einsatz von Metalloxiden wie Zinkoxid in einem solchen zweistufigen Prozess die Separation der Produktgase Wasser- und Sauerstoff (bzw. Kohlenmonoxid und Sauerstoff).

Besondere Aufmerksamkeit – mediale bis hin zu bundesrätlicher – erregte eine Ende 2010 in *Science* [11] publizierte Arbeit des PSI-STL in Zusammenarbeit mit der ETHZ und dem California Institute of Technology. In dieser Publikation wurde demonstriert, dass durch die zyklische Oxidation und Reduktion von Ceriumoxid (CeO_2) in einem relativ einfach gebauten Solarreaktor Wasser und/oder Kohlendioxid in Wasserstoff und Syngas umgewandelt

werden kann. Sowohl die gemessenen Umwandlungseffizienzen als auch die Zyklenraten sind noch relativ klein bedingt durch hohe thermische Verluste, welche aber durch ein optimiertes Design deutlich verringert werden könnten. Die thermodynamischen Materialeigenschaften von CeO_2 würden theoretisch Umwandlungseffizienzen von 16–19 % zulassen.

Wasserstoffspeicherung in Festkörpern – neue Erkenntnisse in der Thermodynamik von komplexen Hydriden

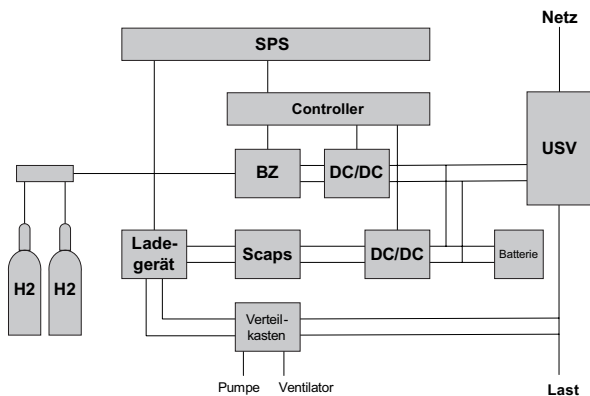
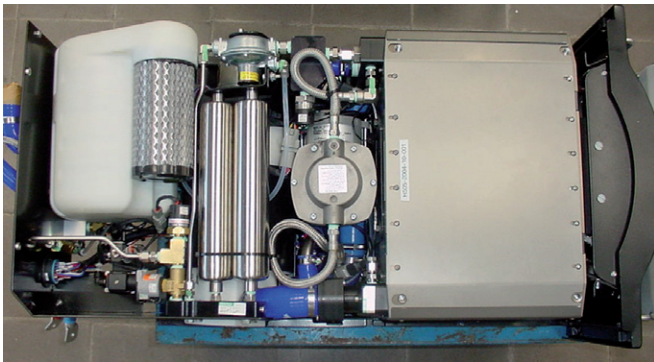
Die effiziente Speicherung von Wasserstoff in Festkörpern bildet ein zentrales Thema des Forschungsprogramms. Für die Anwendung von Wasserstoff im Mobilitätsbereich ist zur Zeit die Speicherung als komprimiertes Gas bei 350 oder 700 bar Standard. Die Attraktivität der Speicherung in Festkörpern liegt in einer erhöhten Sicherheit, geringeren Energieverlusten im Vergleich zur Komprimierung oder Abkühlung auf kryogene Temperaturen sowie in der hohen volumetrischen Dichte. Die hierfür in Frage kommenden Materialsysteme – sogenannte komplexe Hydride, welche ein besonders hohes Potenzial zur Wasserstoffspeicherung



Figur 5: Cover des Journal of Physical Chemistry C, welches die Relaxationskaskade verschiedener Vibrationszuständen des komplexen Hydrids LiBH_4 zeigt (volume 113, issue 46) (Quelle: Empa).

aufweisen – sind allgemein in ihren thermodynamischen Eigenschaften noch nicht gut verstanden. Das Projekt CompHy, welches an der Empa durchgeführt und 2010 abgeschlossen wurde, hat dazu grundlegende Erkenntnisse geliefert. Hier wurden Bor-Hydride $\text{M}[\text{BH}_4]_n$ untersucht, welche sich aus einem metallischen Kation M (beispielsweise Na, Mg oder Cu) und einem Bor-Hydrid BH_4 zusammensetzen. Bor-Hydride weisen unter den komplexen Hydriden die höchsten Speicherdichten auf. Als eines der zentralen Ergebnisse konnte in einem empirischen Modell der Zusammenhang zwischen der Bildungs-Enthalpie verschiedener komplexer Hydride und der Elektronegativität des involvierten Kations M dargestellt werden, was einen systematischeren Ansatz zur Untersuchung der Stabilität erlaubt, beispielsweise der Wasserstoff-Desorption verschiedener Bor-Hydride. Experimentell wurde die Dynamik thermodynamischer Prozesse in Hydriden durch zeitlich aufgelöste Infrarot-Messungen (pump-probe) auf Femtosekunderskala analysiert (Figur 5). Dies lieferte neue Einsichten in die Natur der Bor-Wasserstoff-Verbindung während des Desorptionsprozesses.

Auch bei der Synthese von komplexen Hydriden wurden neue Verfahren entwickelt. Die heute kommerziell



Figur 6: (Links oben) Die in der USV-Anlage eingesetzte 10 kW-Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle. (Links unten) Blockschaltbild der Anlage. (Rechts) Mobilfunk-Basisstation (GSM/UMTS) auf dem Dach der Hochschule Luzern (Quelle: HTA Luzern).

erhältlichen Bor-Hydriden werden naschemisch produziert, was teuer und mit einem grossen Einsatz an Lösungsmitteln verbunden ist. Im Empa-Projekt wurde ein lösungsfreies Herstellungsverfahren auf Grundlage von mechano-chemischer Synthese entwickelt. Die direkte Synthese von Bor-Hydrid ausgehend von den Elementen ist bis jetzt noch nicht möglich.

Die im Projekt erarbeiteten Analyse- und Synthesemethoden werden in Nachfolgeprojekten, welche vom BFE, Swisselectric Research, CCEM und der Europäischen Kommission gefördert werden, eingesetzt, um komplexe Hydride systematischer zu untersuchen, und diese der praktischen Anwendung ein gutes Stück näher zu bringen.

Notstromversorgung als Erfolg versprechende Early-Market-Anwendung für Wasserstoff

In einem Feldtest an der Hochschule Luzern – Technik & Architektur wurde in den letzten vier Jahren der Einsatz von Wasserstoff und Brennstoffzellen

zur unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) getestet. Als weitere Partner im Projekt beteiligten sich Swisscom AG, welche die USV-Anlage für eine im realen Betrieb arbeitende Mobilfunk-Basisstation nutzte (Figur 6), und American Power Conversion Corporation als Hersteller von unterbrechungsfreien Stromversorgungsanlagen. Das verzögerte Anfahrverhalten der eingesetzten Brennstoffzelle wurde mit Superkapazitäten (Figur 6, unten links) überbrückt. Die Wasserstoffbereitstellung in Form von Druckflaschen war auf eine Autonomiezeit von sechs Stunden ausgelegt.

Während des Feldtests über einen Zeitraum von mehr als dreieinhalb Jahren wurden pro Monat Stromausfälle von 5x5 und 2x20 Minuten simuliert, wobei die Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit des Systems unter Beweis gestellt werden konnte. Auch bei längeren Unterbrechungszeiten von mehr als 4 Stunden sowie während zwei realen Stromausfällen von bis zu anderthalb Stunden funktionierte das System zuverlässig (100 %). Insgesamt wurden 350 Starts durchgeführt mit einer Laufzeit der USV-Anlage von knapp 100

Stunden. Nach Abschluss des Feldtests zeigte die eingesetzte Brennstoffzelle einen Spannungsabfall von rund 3 %. Insgesamt wurden durch die Brennstoffzelle 470 kWh an elektrischer Energie bereitgestellt. Nach Beendigung der Tests war die Brennstoffzelle noch voll funktionsfähig. In Ergänzung zu den Feldtests wurde in einer Lebenszyklusanalyse die Brennstoffzelle mit den üblicherweise eingesetzten Bleibatterien verglichen. Mit der Brennstoffzelle wird in USV-Anlagen im Vergleich zu Bleibatterien (inkl. Recycling) eine Reduktion der CO₂-Äquivalente von über 80 % erreicht.

Die Marktsituation für USV-Anlagen mit Brennstoffzellen hat sich über die Dauer des Projektes stark verändert. Industriell wurden deutliche technische Fortschritte erzielt und der Bereich Notstromversorgung zählt zu den erfolgversprechendsten Anwendungen der Brennstoffzelle in sogenannten «Early Markets». Das Projekt läuft in einem grösseren Europäischen Feldversuch (FITUP) weiter, in der Schweiz an acht Standorten mit verschiedensten Partnern.

Nationale Zusammenarbeit

Die nationale Zusammenarbeit zwischen Projektnehmern wurde auch im Berichtsjahr weiter gepflegt. In vom BFE unterstützten Projekten bestehen verschiedene Arbeitsnetzwerke, so zum Beispiel bei der solaren Wasserstoffproduktion mittels Photoelektrochemie (PEChouse, pechouse.epfl.ch). In Wildhaus fand im Januar 2010 bereits zum vierten Mal das von der Empa-Akademie organisierte Symposium Hydrogen and Energy statt, welches sich als Informationsplattform für Themen aus der Grundlagenforschung und der Technologie im Bereich Wasserstoff etabliert hat.

Auf Programmebene konnte die Zusammenarbeit mit verschiedenen Förderinstitutionen weiter ausgebaut werden, dies insbesondere mit Swisselectric Resarch, dem Competence Center Energy and Mobility CCEM und der Kommission für Technologie und Innovation KTI. Im Bereich Wasserstofftechnologie, wo der Abstand zur Marktanwendung verglichen zu anderen Energietechnologien zum Teil noch wesentlich höher ist, kommt

der subsidiären Forschungs- und Entwicklungsförderung durch das BFE nach wie vor eine zentrale Funktion zu, welche insbesondere für die Kompetenzerhaltung von hoher Bedeutung ist.

Die meisten Schweizer Akteure im Bereich Wasserstoff- und PEM-Brennstoffzellentechnologie – aus der Forschung und der Industrie – sind in der nationalen Wasserstoffvereinigung Hydropole (www.hydropole.ch) organisiert. Auf Initiative von Hydropole wurde an der World Hydrogen Energy Conference WHEC 2010 in Essen wie bereits am WHEC 2006 in Lyon und am WHEC 2008 in Brisbane wiederum ein nationaler Stand aufgebaut, an dem sich die Schweizer Industrievertreter und Hochschulen gut präsentieren konnten, und der international gut wahrgenommen wurde. Weiter wurde von Hydropole wiederum unter Mitwirkung aller wichtiger nationaler Vertreter im Bereich Wasserstoff der Hydrogen Report Switzerland 2010/2011 veröffentlicht (www.hydropole.ch/index.php?go=publications).

Internationale Zusammenarbeit

Das Wasserstoffprogramm (HIA) der IEA (www.ieahia.org) bildet eine Hauptplattform der internationalen, vorkommerziellen Forschungszusammenarbeit im Bereich Wasserstoff. Es ist dies eines der ältesten laufenden Implementing Agreements der IEA. Die Schweiz beteiligt sich seit 1977 daran. Neben der Vertretung im Executive Committee durch das BFE beteiligen sich Schweizer Akteure aktiv in verschiedensten Tasks (siehe Kasten auf nächster Seite). Weiter ist die Schweiz Mitglied in der European Hydrogen Association EHA (www.h2euro.org/), welche insbesondere durch die Publikationen von Strategiepapieren und Newslettern zum Thema Wasserstoff aktiv ist.

An der World Hydrogen Energy Conference WHEC 2010 in Essen wurde erstmalig der IEA-HIA-Prize for technology demonstration an das Projekt «ITHER – Green Hydrogen from Wind and Solar Mobile Applications» (task24. hidrogenoaragon.org/docs/ITHER.pdf) aus dem Task 24 «Wind Energy and Hydrogen Integration» an das Projektkonsortium übergeben. Die Schweizer Firma IHT, Industrie Haute Technologie SA aus Monthey, trug zum Gelingen des Projekts IOTHER wesentlich bei, indem sie einen alkalischen Hochdruckelektrolyseur lieferte, welcher sich besonders gut für den Betrieb mit fluktuierenden Quellen wie Photovoltaik und Wind eignet.

Verschiedenste Wasserstoffprojekte werden durch die EU-Forschungsrahmenprogramme unterstützt. Speziell im Forschungsprojekt NanoPEC (nanopec.epfl.ch) koordiniert die EPFL als Leading House die in Europa laufende Forschung im Bereich der Hämatit-basierten PEC-Forschung.

In dem 2010 lancierten Call des seit 2008 laufenden Programms Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) konnten sich verschiedenste Schweizer Akteure beteiligen. Hauptthemen sind Grossdemonstrationsprojekte im Mobilitätsbereich inklusive Wasserstofflogistik. In der Industriegruppe des FCH JU mit 58 Firmen sind die Schweizer Firmen Hexis und HTceramix (SOFC Power) als Mitglieder dabei. Im European Research Grouping (NERGHI, www.nerghi.eu) ist die Schweiz durch die Empa und das PSI vertreten. Über die States Representatives Group (BFE) werden die Forschungsprogramme der einzelnen Länder in die europäische Initiative eingebunden. Die FCH JU versucht, die Zusammenarbeit mit einzelnen Regionen und Gemeinden zu verstärken, welche seit 2008 im Netzwerk HyRaMP Hydrogen Regions and Municipalities Partnership koordiniert sind (www.hy-ramp.eu). Aktuell gibt es hier noch keine Schweizer Beteiligung.

Schweizer Beteiligung im IEA Hydrogen Implementing Agreement Hydrogen (HIA)www.ieahia.org

Annex / Task	Schweizer Delegierter (Institution)
Advanced Materials for Hydrogen From Waterphotolysis	EPFL / Empa
Wind Energy and Hydrogen Integration	Industrie Haute Technology (IHT)
Fundamental and applied hydrogen storage materials development	Empa
Hydrogen Safety	Empa
High Temperature Production	PSI

Referenzen

[1] C. Pieper und H. Rubel «Electricity Storage: Making Large-Scale Adoption of Wind and Solar Energy a Reality», The Boston Consulting Group (2010) (www.bcg.de/documents/file41973.pdf).

[2] U. Albrecht et. al., «Potenziale der Wind-Wasserstoff-Technologie in der Freien und Hansestadt Hamburg und in Schleswig-Holstein» (2010) (www.h2hamburg.de).

[3] Bundesamt für Energie, Energieforschungsprogramme Brennstoffzellen und Wasserstoff für die Jahre 2008 bis 2011, Januar 2008 (www.energieforschung.ch).

[4] Bundesamt für Energie, Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 bis 2011 (www.energieforschung.ch).

[5] Clean Hydrogen In European Cities Project (CHIC) (chic-project.eu/).

[6] European Fuel Cell Forum 2011, 28 June–1 July 2011, Lucerne, Switzerland (www.efcf.com/).

[7] Maximal konnten Photostromdichten bis 4 mA/cm² gemessen, bevor ein Dunkelstrom detektiert wurde.

[8] S. Tilley, M. Cornuz, K. Sivula, M. Grätzel, *Angew. Chem. Int. Ed.* 49, 6405 (2010).

[9] *Nature* 466, 669 (2010).

[10] B. D. James, G. N. Baum, J. Perez, K. N. Baum, «Technoeconomic Analysis of Photoelectrochemical (PEC) Hydrogen Production», DOE Contract Number: GS-10F-009J, final report (2009).

[11] W. C. Chueh et al., «High-Flux Solar-Driven Thermochemical Dissociation of CO₂ and H₂O Using Nonstoichiometric Ceria», *Science* 330, 1791 (2010).

Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(* IEA-Klassifikation)

- **MOBYPOST – MOBILITY WITH HYDROGEN FOR POSTAL DELIVERY** R+D 5.1*
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | MES SA | Funding: | EU-FP7 |
| Contact: | Roberto Bianchi
bianchir@mes-dea.ch | Period: | 2011–2014 |
- Abstract: MobyPost proposes to develop the concept of electric vehicles powered by fuel cells for delivery application and a local hydrogen production and associated refuelling apparatus from a renewable primary energy source, using industrial buildings to produce hydrogen by electrolysis, roofs of the buildings being covered of photovoltaic solar cells able to supply electrolysis. In contrast to most of the development strategies existing so far, MobyPost will implement low pressure solutions for hydrogen storage.
- **ADEL – ADVANCED ELECTROLYSER FOR HYDROGEN PRODUCTION WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES** R+D 5.1.1
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | HTcermix, Empa | Funding: | EU-FP7 |
| Contact: | Olivier Bucheli
olivier.bucheli@htcermix.ch | Period: | 2011–2014 |
- Abstract: The ADEL project aims at developing a new steam electrolyser concept, the so-called Intermediate Temperature Steam Electrolysis (ITSE). The new concept will increase the electrolyser lifetime by decreasing its operation temperature while maintaining a satisfactory performance level. This will allow a significant part of the required energy to be provided as heat, the rest being provided as electricity.
- **NMAE-PILOT – BUILD UP OF A PILOT- AND DEMONSTRATION ELECTROLYZER FOR TESTING ADVANCED ION-SELECTIVE MEMBRANES** P+D 5.1.1
- | | | | |
|----------|------------------------------|----------|-----------|
| Lead: | Empa | Funding: | BFE / SER |
| Contact: | Uli Vogt
uli.vogt@empa.ch | Period: | 2010–2012 |
- Abstract: In dem Projekt wird auf Basis der Resultate aus dem KTI-Projekt am Standort der Firma IHT ein Semi-Industrieller Prototyp auf Basis des neuen asbestfreien Materials aufgebaut und getestet. Der Prototyp wird kleiner sein als die Anlagen mit 1.6m Durchmesser, ist aber ein notwendiger Zwischenschritt zur Aufskalierung. Weiter könnte dadurch allenfalls ein neues Marktsegment angepeilt werden im Leistungsbereich 1-5 kW.
- **DÉVELOPPEMENT D'UN ÉLECTROLYSEUR À HAUTE PRESSION** R+D 5.1.1
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | EIA-FR | Funding: | BFE |
| Contact: | Thierry Chappuis
Thierry.Chappuis@hefr.ch | Period: | 2009–2012 |
- Abstract: L'objectif de ce projet est de concevoir et de construire un appareil d'électrolyse, notamment à usage domestique, permettant la production sûre et efficace d'hydrogène et d'oxygène purs à des pressions élevées (>200 bar) à partir d'énergie électrique renouvelable produite localement ou provenant du réseau électrique existant. Le développement portera essentiellement sur le système électrode – électrolyte – diaphragme optimal permettant d'obtenir une installation simple, sûre et robuste.
- **SOLARH2 – EUROPEAN SOLAR-FUEL INITIATIVE – RENEWABLE HYDROGEN FROM SUN AND WATER** R+D 5.1.1
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | UNIGE | Funding: | EU-FP7 |
| Contact: | Jean-david Rochaix
Jean-David.Rochaix@unige.ch | Period: | 2008–2012 |
- Abstract: SOLAR-H2 brings together 12 world-leading European laboratories to carry out integrated, basic research aimed at achieving renewable hydrogen (H₂) production from environmentally safe resources. The vision is to develop novel routes for the production of a Solar-fuel, in our case H₂, from the very abundant, effectively inexhaustible resources, solar energy and water. Our multidisciplinary expertise spans from molecular biology, biotechnology, via biochemistry and biophysics to organo-metallic and physical chemistry.
- **SOLHYCARB – HIGH TEMPERATURE SOLAR CHEMICAL REACTOR FOR CO-PRODUCTION OF HYDROGEN AND CARBON BLACK FROM NATURAL GAS CRACKING** R+D 5.1.1
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | PSI / ETHZ | Funding: | EU-FP6 |
| Contact: | Aldo Steinfeld
aldo.steinfeld@ethz.ch | Period: | 2006–2010 |
- Abstract: Exploration of an unconventional route for potentially cost effective hydrogen production with solar energy. The novel process thermally decomposes natural gas (NG) in a high temperature chemical reactor heated by concentrated solar energy. This process results in two products: a H₂-rich gas and a high-value nano-material, carbon black (CB). H₂ is thus produced with renewable energy. Solar energy is stored as a transportable fuel.
- **HYCYCLES – MATERIALS AND COMPONENTS FOR HYDROGEN PRODUCTION BY SULPHUR BASED THERMOCHEMICAL CYCLES** R+D 5.1.1
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | PSI / ETHZ | Funding: | EU-FP7 |
| Contact: | Aldo Steinfeld
aldo.steinfeld@ethz.ch | Period: | 2008–2011 |
- Abstract: Project aimed at the development of materials and components for the sulfur-based water-splitting thermochemical cycles for hydrogen generation. Concentrated solar radiation is used as the energy source of high temperature process heat. The ultimate objective is to bring the technology closer to realization by improving efficiency, reliability, and costs.

- **METAL-OXIDE NANOPARTICLES AND FILMS FOR SOLAR PHOTO-ELECTROCHEMICAL HYDROGEN FUEL PRODUCTION** R+D 5.1.1
- | | | | |
|----------|------------------------------------|----------|-----------|
| Lead: | Empa | Funding: | BFE |
| Contact: | Braun Artur
artur.braun@empa.ch | Period: | 2008–2012 |
- Abstract: The objective of this project is to develop mixed metal-oxide narrow band-gap semiconductor nanoparticles with optimized redox potentials to produce hydrogen efficiently via photo-catalysis using visible light. Acetylene flame spray synthesis is a new method for nanoparticle and nanocomposite production from affordable inorganic precursor solutions with high crystallinity. Such particles are of high relevance for photoelectrochemical and photocatalytic (PEC, PC) applications.
- **NANOPEC – NANOSTRUCTURED PHOTOELECTRODES FOR ENERGY CONVERSION** R+D 5.1.1
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | EPFL / Empa | Funding: | EU-FP7 |
| Contact: | Massimiliano Capezzali
massimiliano.capezzali@epfl.ch | Period: | 2009–2011 |
- Abstract: We will investigate solar-driven hydrogen production via photoelectrochemical water splitting. Although the concept is extremely attractive as a method of sustainable fuel production, no single material with acceptable performance, stability, and cost has been found, despite decades of investigation. We will use new concepts and methods, afforded by nanotechnology, to design innovative composite nanostructures in which each component performs specialized functions.
- **NMAE2 – NEUE MEMBRANEN FÜR ALKALISCHE ELEKTROLYSEURE** R+D 5.1.1
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | Empa | Funding: | KTI |
| Contact: | Andreas Züttel
andreas.züttel@empa.ch | Period: | 2008–2011 |
- Abstract: Alkalische Druckelektrolyseure mit Leistungen über 1MW arbeiten heute ausschliesslich mit Asbestdiaphragmen. Asbest ist auf Grund des gesundheitsgefährdenden Potentials heute nur noch als Ersatzmaterial in bestehenden Elektrolyseuren erlaubt. Im diesem Projekt soll ein Ersatz für Asbestdiaphragmen gesucht werden. Dazu wird einerseits nach Materialien geforscht, welche Asbest ersetzen könnten und andererseits neue Arten von Membranen aus nicht fasrigen Materialien entwickelt und untersucht.
- **PECHOUSE – PHOTOELECTROCHEMICAL WATERSPLITTING FOR SOLAR PRODUCTION OF HYDROGEN** R+D 5.1.1
- | | | | |
|----------|----------------------------------|----------|-----------|
| Lead: | EPFL | Funding: | BFE |
| Contact: | Kevin Sivula
PECHouse@epfl.ch | Period: | 2007–2011 |
- Abstract: Photoelectrochemical cells (PEC directly split water into H₂ and O₂ thereby providing a basis for the renewable, clean production of hydrogen from sunlight. They rely on a photoactive material (a semiconductor) capable of harvesting and converting solar energy into stored chemical fuel, i.e. hydrogen. The PECHouse is a collaborative effort with defined goals for the stepwise development of an efficient hydrogen production system (<http://pechouse.epfl.ch/>)
- **SFERA – SOLAR FACILITIES FOR THE EUROPEAN RESEARCH AREA** R+D 5.1.1
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | PSI / ETHZ | Funding: | EU-FP7 |
| Contact: | Aldo Steinfeld
aldo.steinfeld@ethz.ch | Period: | 2009–2013 |
- Abstract: Concentrated solar energy is a very promising renewable source of energy. The solar resource in the Mediterranean countries of the EU and in North Africa is huge. The best known application so far is bulk electricity generation through thermodynamic cycles, but other applications have also been demonstrated, such as production of hydrogen and solar fuels, water treatment and research in advanced materials. Europe is a leader in research and development of this technology
- **SOLAR CO₂-SPLITTING USING REDOX REACTIONS** R+D 5.1.1
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | PSI / ETHZ | Funding: | SNF |
| Contact: | Aldo Steinfeld
aldo.steinfeld@ethz.ch | Period: | 2008–2011 |
- Abstract: The solar production of syngas from H₂O and CO₂ is examined via two-step thermochemical cycles based on redox reactions. The first is the thermal dissociation of a metal oxide using concentrated solar radiation. The second, non-solar, exothermic step is the reaction of the metal or reduced metal oxide with a mixture of H₂O and CO₂ yielding syngas (H₂ and CO), together with the initial form of the metal oxide that is recycled to the first step.
- **SOLAR PRODUCTION OF ZINC AND HYDROGEN – REACTOR OPTIMISATION FOR SCALE-UP** R+D 5.1.1
- | | | | |
|----------|-----------------------------------|----------|-----------|
| Lead: | PSI / ETHZ | Funding: | BFE |
| Contact: | Anton Meier
anton.meier@psi.ch | Period: | 2007–2012 |
- Abstract: In a two-step cycle based on the ZnO/Zn redox reactions, solar energy provides the process heat for the highly endothermic, high-temperature thermal dissociation of ZnO(s) into storable and transportable Zn metal. Depending on the desired application, the Zn(s) produced in turn can (1) be used as the fuel in a Zn-air battery to generate electricity, or (2) split water in an exothermic Zn hydrolysis reaction and convert the hydrogen to electricity in a H₂-O₂ fuel cell.

- **SOLHYDROMICS – NANODESIGNED ELECTROCHEMICAL CONVERTER OF SOLAR ENERGY INTO HYDROGEN HOSTING NATURAL ENZYMES OR THEIR MIMICS** R+D 5.1.1
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | Solaronix SA | Funding: | EU-FP7 |
| Contact: | Toby Meyer
toby.meyer@solaronix.com | Period: | 2009–2012 |
- Abstract: An artificial device will be developed to convert sun energy into H₂ with 10% efficiency by water splitting at ambient temperature, including: an electrode exposed to sunlight carrying PSII or a PSII-like chemical mimic deposited upon a suitable electrode; a membrane enabling transport of both electrons and protons via e.g. carbon nanotubes or TiO₂ connecting the two electrodes and ion-exchange resins like e.g. Nafion, respectively.
- **SOLRAD – SOLAR HYDROGEN VIA STEAM GASIFICATION** R+D 5.1.1
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | PSI / ETHZ | Funding: | SNF |
| Contact: | Aldo Steinfeld
aldo.steinfeld@ethz.ch | Period: | 2008–2010 |
- Abstract: The project aims at investigating the fundamentals of heat and mass transfer phenomena in high-temperature multiphase reactive flows exposed to high-flux irradiation. The application is focused on the development of solar reactor technology for the production of hydrogen via steam-gasification of carbonaceous materials using concentrated solar radiation.
- **SOLREF – SOLAR STEAM REFORMING OF METHANE RICH GAS FOR SYNTHESIS GAS PRODUCTION** R+D 5.1.1
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | PSI / ETHZ | Funding: | EU-FP6 |
| Contact: | Aldo Steinfeld
aldo.steinfeld@ethz.ch | Period: | 2005–2010 |
- Abstract: The use of concentrated solar power for supplying high-temperature process heat to the steam-reforming of natural gas has the potential of avoiding up to 35% of the CO₂ emissions derived from the conventional fossil-fuel-based method. The cost of hydrogen is estimated at 0.05 EUR/kWh (LHV-H₂). The project aims at developing the technology to a pre-commercial phase. ETH Zürich is responsible for the thermodynamic analysis and reactor/process dynamic modeling
- **SOLSYN – SOLAR FUELS FOR CEMENT MANUFACTURING** R+D 5.1.1
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | PSI / ETHZ | Funding: | KTI |
| Contact: | Aldo Steinfeld
aldo.steinfeld@ethz.ch | Period: | 2007–2010 |
- Abstract: Solar steam-gasification of carbonaceous materials makes use of concentrated solar energy to convert solid feedstocks such as coal, biomass, or carbon-containing wastes into high-quality synthesis gas (syngas) – mainly H₂ and CO. The synthetic gas could be used for substituting fossil fuels in the cement kiln.
- **SYNPET – SOLAR HYDROGEN PRODUCTION FROM PETCOKE** R+D 5.1.1
- | | | | |
|----------|--|----------|------------|
| Lead: | PSI / ETHZ | Funding: | Industrial |
| Contact: | Aldo Steinfeld
aldo.steinfeld@ethz.ch | Period: | 2003–2010 |
- Abstract: The solar steam-gasification of petroleum coke (petcoke) is a hybrid thermochemical process that converts intermittent solar energy into a storable and transportable chemical fuel. Petcoke is solar-upgraded to a cleaner fluid fuel for electricity generation in highly efficient combined cycles or fuel cells. In contrast to the gasification using process heat derived from the internal petcoke combustion, the solar-driven gasification produces high quality syngas.
- **TOWARDS INDUSTRIAL SOLAR PRODUCTION OF ZINC AND HYDROGEN – 100 KW SOLAR PILOT REACTOR FOR ZNO DISSOCIATION** P+D 5.1.1
- | | | | |
|----------|-----------------------------------|----------|-----------|
| Lead: | PSI / ETHZ | Funding: | BFE |
| Contact: | Anton Meier
anton.meier@psi.ch | Period: | 2010–2012 |
- Abstract: In a pilot phase, a 100 kW solar pilot reactor will be designed and constructed adapted to the functionality of an industrial solar plant. The reactor and peripherals (feeding and off-gas system) will be tested in the 1 MW solar furnace at CNRS-Odeillo, France. The performance of the solar pilot reactor integrated with the Zn/O₂ separation device will be experimentally evaluated. The experimental data will be used to validate the numerical models.
- **WELTEMP – WATER ELECTROLYSIS AT ELEVATED TEMPERATURES** R+D 5.1.1
- | | | | |
|----------|--------------------------------|----------|-----------|
| Lead: | IHT | Funding: | EU-FP7 |
| Contact: | Ernest Burkhalter
eb@iht.ch | Period: | 2008–2011 |
- Abstract: The strategic development of the WELTEMP project is an elevated operating temperature of the PEM electrolyser. In this way the energy efficiency will be significantly improved because of the decreased thermodynamic energy requirement, enhanced electrode kinetics, and the possible integration of the heat recovery. Key issues to achieve this strategic target are breakthroughs of fundamental materials developments, including catalysts, membranes, current collectors, bipolar plates, and other construction materials.

- **NANOMOF – NANOPOROUS METAL-ORGANIC FRAMEWORKS FOR PRODUCTION** R+D 5.1.1
- | | | | |
|----------|--------------------------------------|----------|-----------|
| Lead: | Norafin GmbH | Funding: | EU-FP7 |
| Contact: | André Lang
andre.lang@norafin.com | Period: | 2009–2013 |
- Abstract: The discovery of porous hybrid materials constructed from inorganic nodes and organic multifunctional linkers has established a new area of inorganic-organic hybrids (Metal-Organic Frameworks, MOFs). NanoMOF will focus beyond discovery and integrate MOFs into products with industrial impact within a strong cooperation of established MOF research institutions and industrial end users. For industrial and house-hold fuel cell reformer units novel MOF-based sulphur removal systems will be developed.
- **GENIUS – GENERIC DIAGNOSIS INSTRUMENT FOR SOFC SYSTEMS** R+D 5.1.1
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | HTceramix SA | Funding: | EU-FP7 |
| Contact: | Olivier Bucheli
olivier.bucheli@htceramix.ch | Period: | 2010–2012 |
- Abstract: The state of health of any SOFC system is currently difficult to evaluate, which makes it difficult to respond to a fault or degradation with the appropriate counter measure, to ensure the required reliability level. Therefore, the GENIUS project aims to develop a GENE-RIC tool that would only use process values (normal measurements and system control input parameters) and that would be based on a validated diagnostic algorithm.
- **ACH – ADVANCED COMPLEX HYDRIDES** R+D 5.1.2
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | Empa | Funding: | BFE |
| Contact: | Andreas Züttel
andreas.züttel@empa.ch | Period: | 2010–2014 |
- Abstract: The goal of the project is to explore all simple and binary complex borohydrides by means of the empirical model in order to identify interesting compounds for hydrogen storage which are less stable than required. Furthermore, a special focus will be on compounds which are liquids at room temperature. Finally the interesting compounds will be synthesized directly from the elements and investigated by means of spectroscopic methods for their local structure as well as for their thermodynamic properties.
- **COSY – CHARACTERIZATION AND OPTIMIZATION OF NOVEL LIGHT WEIGHT HYDRIDE COMPOSITES** R+D 5.1.2
- | | | | |
|----------|--|----------|--------------------|
| Lead: | Empa | Funding: | EU-FP6 Marie Curie |
| Contact: | Andreas Züttel
andreas.züttel@empa.ch | Period: | 2006–2010 |
- Abstract: Research topics included the production of metal hydride composites by different methods, their characterization with respect to the relevant application properties, e.g. hydrogen sorption kinetics and thermodynamics, the influence of additives as well as of the microstructure, as well as ab initio calculations of stable and hypothetical structures. One of the main tasks of COSY was the education of early stage researchers (ESR) and young more experienced researchers (ER) in the field of hydrogen storage materials.
- **DEMOYS – DENSE MEMBRANES FOR EFFICIENT OXYGEN AND HYDROGEN SEPARATION** R+D 5.1.2
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | ETHZ | Funding: | EU-FP7 |
| Contact: | Jennifer Rupp
jennifer.rupp@mat.ethz.ch | Period: | 2010–2014 |
- Abstract: The objective of this project is the development of thin mixed conducting membranes for O₂ and H₂ separation by using a new deposition technique Low Pressure Plasma Spraying Thin Film (LPPS-TF) in combination with nano-porous, highly catalytic layers. TF-LPPS is a technique based on a combination of thermal spray and Physical Vapour Deposition technology.
- **HYDROGEN – PRODUCTION AND STORAGE OF HYDROGEN** R+D 5.1.2
- | | | | |
|----------|---|----------|--------------------|
| Lead: | Empa / EPFL | Funding: | EU-FP6 Marie Curie |
| Contact: | Andreas Züttel, Michael Grätzel
andreas.züttel@empa.ch | Period: | 2006–2010 |
- Abstract: The Hydrogen network brings together leading researchers from different disciplines and sectors with a combined expertise that maximises the chance of achieving scientific breakthroughs in production and storage of hydrogen, while guaranteeing the successful training of a new generation of scientists for tackling scientific problems standing in the way of the hydrogen economy (www.mcrtn-hydrogen.eu).
- **HYDROGEN STORAGE IN FORMIC ACID** R+D 5.1.2
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | EPFL-GCEE | Funding: | KTI |
| Contact: | Gabor Laurenczy
gabor.laurenczy@epfl.ch | Period: | 2008–2010 |
- Abstract: This project aims at the development and verification of a technology to produce high pressure H₂ from formic acid and at the realisation of mobile, portable “stand-alone-unit” for this. The innovation is the catalytic production of H₂ of very high purity under mild conditions, which can directly be used in fuel cells, in combustion units, etc. Future perspectives are the CO₂ neutral production of formic acid to achieve a closed loop.

● **COMPHY – HYDROGEN STORAGE IN NEW COMPLEX HYDRIDES**

R+D 5.1.2

Lead:	Empa	Funding:	BFE
Contact:	Andreas Züttel andreas.züttel@empa.ch	Period:	2007–2010
Abstract:	In this project Complex hydrides i.e. boranates (e.g. Li[BH ₄]) are investigated as reversible hydrogen storage materials. The boranates offer a much greater gravimetric hydrogen density as compared to other materials i.e. the alanates. The hydrogen absorption and desorption mechanism as well as the role of the catalyst are still not known. The final goal of the project is to describe the mechanism of the hydrogen sorption reaction in great detail together with the physical properties of the compounds.		

● **PROTIUM – HYDROGEN CANAL BOAT**

P+D 5.1.2

Lead:	Empa	Funding:	div.
Contact:	Andreas Züttel andreas.züttel@empa.ch	Period:	2007–2011
Abstract:	Over the past one and a half years, the University of Birmingham, British Waterways, Tempus, Less Common Metals, and EMPA (Switzerland) have invested money and materials to the value of around £100k in the design, construction, and now operation of a canal boat of the future. This boat is powered by the combination of a metal hydride solidstate hydrogen store, a proton exchange membrane (PEM) fuel cell, a lead acid battery stack and a NdFeB permanent magnet electric motor.		

● **HY-FORM 1 : PRODUCTION ET OPÉRATION D'UN NOUVEAU SYSTÈME DE GÉNÉRATION D'HYDROGÈNE DÉCENTRALISÉ À**

P+D 5.1.2

Lead:	Granit SA	Funding:	BFE
Contact:	Maurice Jutz Maurice.jutz@granit.net	Period:	2010–2011
Abstract:	In diesem Pilotprojekt geht es allgemein darum, aufzuzeigen, wie ein bestehendes Wasserstofflogistiksystem für industrielle Anwendungen durch ein einfacheres und sicheres, ökonomisch wie ökologisch effizienteres System ersetzt werden könnte. Hierzu wird eine vorindustrielle Pilotanlage zur Vor-Ort- Produktion von Wasserstoff ausgehend von Formylsäure aufgebaut, an der die diversen Aspekte wie energetische, wirtschaftliche und Umwelt-Bilanz einer solchen Anlage für künftige Kunden demonstriert werden sollen.		

● **LA PRODUCTION D'HYDROGÈNE À PARTIR D'ACIDE FORMIQUE ET LA PRODUCTION D'ACIDE FORMIQUE À PARTIR DE CO₂**

R+D 5.1.2

Lead:	Granit SA	Funding:	BFE
Contact:	Maurice Jutz Maurice.jutz@granit.net	Period:	2010–2011
Abstract:	Les besoins du marché de la filière acide formique comme vecteur d'hydrogène doivent être identifiés et étudiés afin de sélectionner les partenaires tant du point de vue de la production d'acide formique par voie renouvelable que celle de la décomposition pour les besoins d'hydrogène pour son utilisation chimique ou énergétique dans les niches de marché correspondantes.		

● **NESSHY – NOVEL EFFICIENT SOLID STORAGE FOR HYDROGEN**

R+D 5.1.2

Lead:	Empa	Funding:	EU-FP6
Contact:	Andreas Züttel andreas.züttel@empa.ch	Period:	2006–2010
Abstract:	The proposed work programme will cover porous storage systems (particularly at reduced temperatures) , regenerative hydrogen stores (such as the borohydrides) and solid hydrides having reversible hydrogen storage and improved gravimetric storage performance. Initially, two categories of reversible stores will be investigated - light/complex hydrides, such as imides and intermetallic systems involving magnesium, although further categories may be included later.		

● **SAFESYST – RELEVANT PHYSICAL ASPECTS OF HYDRIDES FOR SYSTEM INTEGRATION AND SAFETY**

R+D 5.1.2

Lead:	Empa	Funding:	BFE
Contact:	Andreas Züttel andreas.züttel@empa.ch	Period:	2007–2010
Abstract:	Borohydrides as hydrogen storage materials can potentially desorb ammonia or diborane which are potentially harmful to humans or the environment. As Borohydrides show higher potential towards hydrogen storage, focus remained on these materials. Another issue is the reaction with H ₂ O and O ₂ . It is crucial to know, if these reactions are self-limiting by forming a passivation layer or if the reaction proceeds as long as these contributions are present.		

● **SOLARH2 – RENEWABLE HYDROGEN FROM SUN AND WATER**

R+D 5.1.1

Lead:	Uni Genève	Funding:	EU-FP7
Contact:	Jean-David Rochaix Jean-David.Rochaix@unige.ch	Period:	2008–2012
Abstract:	The vision is to develop novel routes for the production of a Solar-fuel, in our case H ₂ , from the very abundant, effectively inexhaustible resources, solar energy and water. Our multidisciplinary expertise spans from molecular biology, biotechnology, via biochemistry and biophysics to organo-metallic and physical chemistry.		

- **DANMC – DIHYDROGEN ACTIVATION AT NON-METALLIC CENTERS** R+D 5.1.4
- | | | | |
|----------|--|----------|---------------|
| Lead: | Uni Basel | Funding: | EU-FP7-people |
| Contact: | Andreas Pfaltz
Andreas.Pfaltz@unibas.ch | Period: | 2010–2011 |
- Abstract: Molecular hydrogen is widely used today in chemical reactions, such as the addition of H₂ to organic molecules, a process referred to as hydrogenation. These transformations are among the largest-volume industrial processes: for example, crude oil is treated with H₂, and 108 tons of ammonia-based fertilizers are produced each year via catalytic hydrogenation. Also, hydrogen is arguably one of the most promising and valuable future fuels.
- **CHIC – CLEAN HYDROGEN IN EUROPEAN CITIES** P+D 5.1.5
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | Postauto AG | Funding: | EU-FP7 |
| Contact: | Werner Blatter
werner.blatter@postauto.ch | Period: | 2010–2016 |
- Abstract: The Clean Hydrogen in European Cities (CHIC) Project is the essential next step to full commercialisation of hydrogen powered fuel cell (H₂FC) buses. CHIC will reduce the 'time to market' for the technology and support 'market lift off' 2 central objectives of the Joint Undertaking.
- **H2-IGCC – LOW EMISSION GAS TURBINE TECHNOLOGY FOR HYDROGEN-RICH SYNGAS** R+D 5.1.5
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | PSI Paul Scherrer Institut | Funding: | EU-FP7 |
| Contact: | Irene Walthert
irene.walthert@psi.ch | Period: | 2009–2013 |
- Abstract: The objective of this project is to provide technical solutions which allow the use of state-of-the-art highly efficient, reliable gas turbines in the next generation of IGCC plants, suitable for combusting undiluted hydrogen-rich syngas derived from a pre-combustion CO₂ capture process. The recognised challenge is to operate a stable gas turbine on hydrogen-rich syngas with emissions and process parameters similar to current state-of-the-art natural gas turbine engines.
- **HYDROGEN DETECTORS AND SENSORS FOR PEM FUEL CELL AND ELECTROLYSER SYSTEMS** R+D 5.1.5
- | | | | |
|----------|-----------------------------------|----------|-----------|
| Lead: | UNIGE | Funding: | KTI |
| Contact: | Klaus Yvon
klaus.yvon@unige.ch | Period: | 2010–2013 |
- Abstract: Mass markets of hydrogen powered vehicles and hydrogen production units for residential areas require hydrogen detectors and sensors on a very large scale. The devices must be cheap, sensitive and selective, and allow to detect hydrogen and to monitor hydrogen-oxygen reaction processes. This project aims at developing sensing by using thin films and novel materials undergoing hydrogen-induced metal-insulator transitions
- **NEXTHYLIGHTS – SUPPORTING ACTION TO PREPARE LARGE-SCALE HYDROGEN VEHICLE DEMONSTRATION IN EUROPE** R+D 5.1.5
- | | | | |
|----------|---------------------------------------|----------|-----------|
| Lead: | Bucher-Guyer AG | Funding: | EU-FP7 |
| Contact: | Alex Koch
alex.koch@bucherguyer.ch | Period: | 2009–2010 |
- Abstract: The concept of the project is to develop a strategy (Master Plan) on how to bridge the gap between today's demo projects and the start of market introduction by building upon existing knowledge from various activities including: HFP & FCH JU (implementation plans), HyWays, R2H, HyLights (methods, instruments and databases), HyFleet:CUTE, ZERO REGIO, HYCHAIN and other demo projects (hardware experience).
- **SELF – NACHHALTIGE H₂-SYNTHESE UND SPEICHERUNG FÜR EINE AUTARKE ENERGIEVERSORGUNG** P+D 5.1.5
- | | | | |
|----------|------------------------------|----------|-----------|
| Lead: | Empa | Funding: | BFE |
| Contact: | Uli Vogt
uli.vogt@empa.ch | Period: | 2009–2010 |
- Abstract: Im vorliegenden Demonstrationsprojekt wird die elektrische Energie der Photovoltaik Anlage zur Produktion von Wasserstoff eingesetzt und der Wasserstoff in einem Metallhydridspeicher sowohl Tag/Nacht als auch saisonal gespeichert. Dabei werden grundlegende Erkenntnisse für netzunabhängige Kleinsysteme (SAPS: Stand-Alone Power Systems) gewonnen und die Realisierung des Einsatzes von H₂ als Energieträger demonstriert (www.Empa.ch/self).
- **IEA HYDROGEN IMPLEMENTING AGREEMENT (IEA-HIA)** R+D 5.1
- | | | | |
|----------|---|----------|------|
| Lead: | BFE | Funding: | BFE |
| Contact: | Stefan Oberholzer
stefan.oberholzer@bfe.admin.ch | Period: | 2010 |
- Abstract: The International Energy Agency(IEA) Hydrogen Implementing Agreement(HIA) was established in 1977 to pursue collaborative hydrogen research and development and information exchange among its member countries. Through the creation and conduct of some thirty annexes or tasks, the HIA has facilitated and managed a comprehensive range of hydrogen R&D and analysis activities. The HIA is an IEA Implementing Agreement.

● **IEA HYDROGEN IMPLEMENTING AGREEMENT – ANNEX WIND AND HYDROGEN**

R+D 5.1.1

Lead:	IHT	Funding:	BFE / IHT
Contact:	Ernest Burkhalter eb@iht.ch	Period:	2009–2011
Abstract:	The objectives of the task 24 are to explore in all possible issues (technical, economical, social, environmental, market and legal) related to hydrogen production using electrolysis with wind energy, and to explore in detail possible applications for such hydrogen produced, with special emphasis on full wind & hydrogen integration by means of hydrogen storage and electrical conversion (task24. hidrogenoaragon.org/).		

● **IEA HYDROGEN IMPLEMENTING AGREEMENT – ANNEX ADVANCED MATERIALS FOR HYDROGEN FROM WATERPHOTOLYSIS**

R+D 5.1.1

Lead:	EPFL	Funding:	BFE
Contact:	Kevin Sivula PECHouse@epfl.ch	Period:	2007–2011
Abstract:	The main goal of the new Task 26 is to seamlessly extend the excellent R&D efforts made under previous PEC Tasks 14 and 20 toward practical material and systems solutions for water-photolysis. In this continued research, photon conversion efficiency and durability will be judged as the main measures of success in the development of new PEC materials.		

● **IEA HYDROGEN IMPLEMENTING AGREEMENT – ANNEX FUNDAMENTAL AND APPLIED HYDROGEN STORAGE MATERIALS DEVELOPMENT**

R+D 5.1.2

Lead:	Empa	Funding:	BFE
Contact:	Andreas Züttel andreas.züttel@empa.ch	Period:	2010
Abstract:	Task 22 addresses hydrogen storage in solid materials. Hydrogen storage is considered by many to be the greatest technological barrier to widespread introduction and use of hydrogen in global energy systems. Currently, no hydrogen storage system, including pressurized and liquefied hydrogen and hydrogen stored in solid compounds known, satisfies international targets for on-board hydrogen storage in mobile applications.		

● **IEA HYDROGEN IMPLEMENTING AGREEMENT – ANNEX HIGH TEMPERATURE HYDROGEN PRODUCTION PROCESS**

R+D 5.1.1

Lead:	PSI	Funding:	BFE / PSI
Contact:	Anton Meier anton.meier@psi.ch	Period:	2007–2012
Abstract:	The purpose of Task 25 is to support production of massive quantities of zero-emission H ₂ through use of high temperature processes (> 500 C) coupled with nuclear and solar heat sources. The overarching objective is to share existing worldwide knowledge on high temperature processes (HTPs) and further to develop expertise in global assessment of the HTPs that can be integrated in Hydrogen Production Road Mapping.		

● **IEA HYDROGEN IMPLEMENTING AGREEMENT – ANNEX HYDROGEN SAFETY**

R+D 5.1

Lead:	Empa	Funding:	BFE
Contact:	Michael Biemann michael.biemann@empa.ch	Period:	2010
Abstract:	In recent years, a significant international effort has been initiated to development codes and standards required for the introduction of these new systems. Such codes and standards are usually developed through operating experience in actual use that is accumulated over time. Without such long term experience, there is a tendency for early codes and standards to be more restrictive to ensure that an acceptable level of safety is maintained. One possible effect is to hinder the introduction of hydrogen systems.		

