



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Bundesamt für Energie BFE  
Office fédéral de l'énergie OFEN  
Ufficio federale dell'energia UFE  
Swiss Federal Office of Energy SFOE

# Energieforschung 2011 Überblicksberichte

## Recherche énergétique 2011 Rapports de synthèse



**Titelbild:**

Betankung eines Brennstoffzellen-Busses von PostAuto mit gasförmigem Wasserstoff bei 350 bar (<http://www.postauto.ch>, <http://chic-project.eu/>).

**Page de titre :**

*Ravitaillement d'un car postal à pile à combustible avec de l'hydrogène gazeux à 350 bar (<http://www.postauto.ch>, <http://chic-project.eu/>).*

Allgemeine Auskünfte über Forschung und Entwicklung (F&E) und Pilot- und Demonstrationsprojekte (P&D) im Energiebereich:

*Renseignements généraux sur la recherche et le développement (R&D) et sur les projets pilotes et démonstrations (P&D) dans le domaine de l'énergie :*

Dr. Rolf Schmitz, BFE, 3003 Bern / *OFEN*, 3003 Berne  
Tel. +41 (0)31 322 56 58 / Fax +41 (0)31 323 25 00

Edition & Layout: / Édition & mise en page :

Dr. Stefan Oberholzer, BFE, 3003 Bern / *OFEN*, 3003 Berne  
Tel. +41 (0)31 325 89 20 / Fax +41 (0)31 323 25 00

*Bezugsort für Berichte / Centre de distribution pour les rapports :*

BFE, Sektion Kommunikation, 3003 Bern /  
*OFEN*, Section Communication, 3003 Berne

[www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch) / [www.recherche-energetique.ch](http://www.recherche-energetique.ch)

31.05.2012

# Energieforschung 2011

## Recherche énergétique 2011

Vorwort / Avant-propos .....2

### Überblicksberichte / Rapports de synthèse

#### Effiziente Energienutzung/ Utilisation efficace de l'énergie

Energie in Gebäuden ( <i>Charles Filleux</i> ).....	5
Verkehr & Akkumulatoren .....	23
Elektrizitätstechnologien und -anwendungen ( <i>Roland Brüniger</i> ) .....	25
Netze ( <i>Michael Moser</i> ) .....	39
Wärmepumpen, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte ( <i>Thomas Kopp</i> ) .....	53
Verbrennung ( <i>Stephan Renz</i> ) .....	63
Kraftwerk 2020 und Carbon Capture & Storage ( <i>Peter Jansohn</i> ) .....	75
Brennstoffzellen ( <i>Stefan Oberholzer</i> ) .....	85
Industrielle Prozesse ( <i>Michael Spirig</i> ) .....	99

#### Erneuerbare Energien / Sources d'Énergie Renouvelables

Chaleur solaire et Stockage de chaleur ( <i>Jean-Christophe Hadorn</i> ).....	111
Photovoltaik ( <i>Stefan Nowak</i> ).....	123
Solaire industriel à haute température ( <i>Pierre Renaud, Stefano Giamboni</i> ).....	143
Wasserstoff ( <i>Stefan Oberholzer</i> ).....	157
Biomasse und Holzenergie ( <i>Sandra Hermle</i> ) .....	175
Wasserkraft ( <i>Klaus Jorde</i> ).....	189
Geothermie ( <i>Rudolf Minder</i> ) .....	201
Windenergie ( <i>Robert Horbaty</i> ) .....	213

#### Kernenergie / Énergie Nucléaire

Kerntechnik und Nukleare Sicherheit .....	227
Regulatorische Sicherheitsforschung ( <i>Reiner Mailänder</i> ) .....	229
Fusion thermonucléaire contrôlée ( <i>M. Q. Tran, L. Villard, L. Marot et C. Vaucher</i> ) .....	235
Radioaktive Abfälle ( <i>Simone Brander</i> ).....	245

#### Querschnittsprogramme / Programmes Transverseaux

Energie – Wirtschaft – Gesellschaft ( <i>Nicole Mathys</i> ).....	255
---	-----

### Anhang / Annexe

Energieforschungskommission / Commission pour la recherche énergétique (CORE) .....	267
BFE-Forschungs- und Marktbereiche / Domaines de l'OFEN pour la recherche et le marché .....	268
Adressen / Adresses .....	269

# Vorwort

Die Energieforschung der öffentlichen Hand der Schweiz richtet sich nach dem Konzept der Energieforschung des Bundes. Für die Umsetzung des Konzepts ist das Bundesamt für Energie (BFE) zuständig. Es verfügt dafür über eigene Fördermittel, die subsidiär zu den Anstrengungen der privaten und öffentlichen Forschungsstellen eingesetzt werden. Die Betreuung der verschiedenen Forschungs- und Entwicklungsprogramme sowie der Pilot- und Demonstrationsprogramme erfolgt durch die Bereichs- und Programmleiter des BFE. Für die Umsetzung der Ergebnisse in den Markt werden sie unterstützt durch das Forschungsprogramm Wissens- und Technologietransfer und die Bereichsleiter des Programms EnergieSchweiz.

Die im Mai 2011 erschienene Projektliste der Energieforschung des Bundes 2008/2009 gibt Auskunft über die Aufwendungen der mit öffentlichen Mitteln finanzierten Energieforschung sowie eine detaillierte Zusammenstellung der Geldflüsse. Zur Erinnerung: 2009 kamen rund 54 % der von der öffentlichen Hand aufgewendeten 213,5 Mio. Franken aus dem ETH-Bereich. Das BFE war mit einem Anteil von 16 % noch vor der EU (11 %) zweitgrösster Finanzgeber. Die meisten Geldmittel kamen dem Bereich Effiziente Energienutzung zugute (77,8 Mio. Franken), 54,3 Mio. flossen in den Bereich Kernenergie und 67,1 Mio. in den Bereich Erneuerbare Energien. Für den Bereich Energiewirtschaftliche Grundlagen wurden 14,4 Mio. Franken aufgewendet.

Die im vorliegenden Band publizierten Überblicksberichte der Programmleiter des BFE zeigen die Fortschritte derjenigen Projekte auf, die durch das BFE mitfinanziert worden sind. Daneben sind aber auch Hinweise auf andere, mit öffentlichen und privaten Mitteln durchgeführte Forschungsarbeiten aufgeführt. Eine Liste laufender und im Berichtsjahr abgeschlossener Projekte findet sich jeweils im Anhang der Überblicksberichte. Der detaillierte Fortschritt einzelner Projekte kann in den entsprechenden Jahres- und Schlussberichten verfolgt werden. Das Reproduzieren von einzelnen Beiträgen ist unter Angabe der Quelle gestattet.

Juni 2012

**Bundesamt für Energie (BFE)**

# Avant-propos

Le Plan directeur de la recherche énergétique de la Confédération est le fil conducteur de la recherche soutenue par les pouvoirs publics dans le domaine de l'énergie en Suisse. Sa mise en pratique incombe à l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) qui dispose, à cette fin, de moyens propres engagés de façon subsidiaire à ceux des institutions de recherche tant privées que publiques. L'accompagnement des divers programmes de recherche et de développement est pris en charge par les chefs de domaine et de programme à l'OFEN. Pour la transposition des résultats vers le marché, ceux-ci sont appuyés par le programme de Transfert scientifique et technologique et par les responsables de domaine du programme SuisseEnergie.

La Liste des projets de la recherche énergétique de la Confédération 2008/2009, parue en mai 2011, renseigne sur les dépenses des pouvoirs publics au titre de la recherche énergétique, ainsi que sur la composition des flux de financement. Rappelons que, en 2009, près de 54 % des 213,5 MCHF déployés par les collectivités publiques étaient issus du Domaine des EPF. Avec une part de 16 %, l'OFEN occupait encore le deuxième rang des bailleurs de fonds, devant l'UE (11 %). La plus grande part des moyens financiers étaient inscrits au titre de l'utilisation efficace de l'énergie (77,8 MCHF), alors que 54,3 MCHF étaient attribués à l'énergie nucléaire et 67,1 MCHF aux sources d'énergie renouvelables. 14,4 MCHF étaient consacrés aux fondements de l'économie énergétique

Le présent volume rassemble les rapports de synthèse annuels des chefs de programme de l'OFEN. On y trouvera décrits les progrès obtenus dans le cadre des divers projets cofinancés par l'OFEN. Il y est également fait mention des travaux de recherche accomplis grâce à d'autres moyens publics et/ou privés. Une liste des projets en cours et terminés dans l'année de référence se trouve dans l'annexe des rapports de synthèse. Le progrès détaillé des projets est documenté dans les rapports annuels et finaux spécifiques. La reproduction d'extraits est autorisée, à condition d'en indiquer la source.

Juni 2012

**Office fédéral de l'énergie (OFEN)**

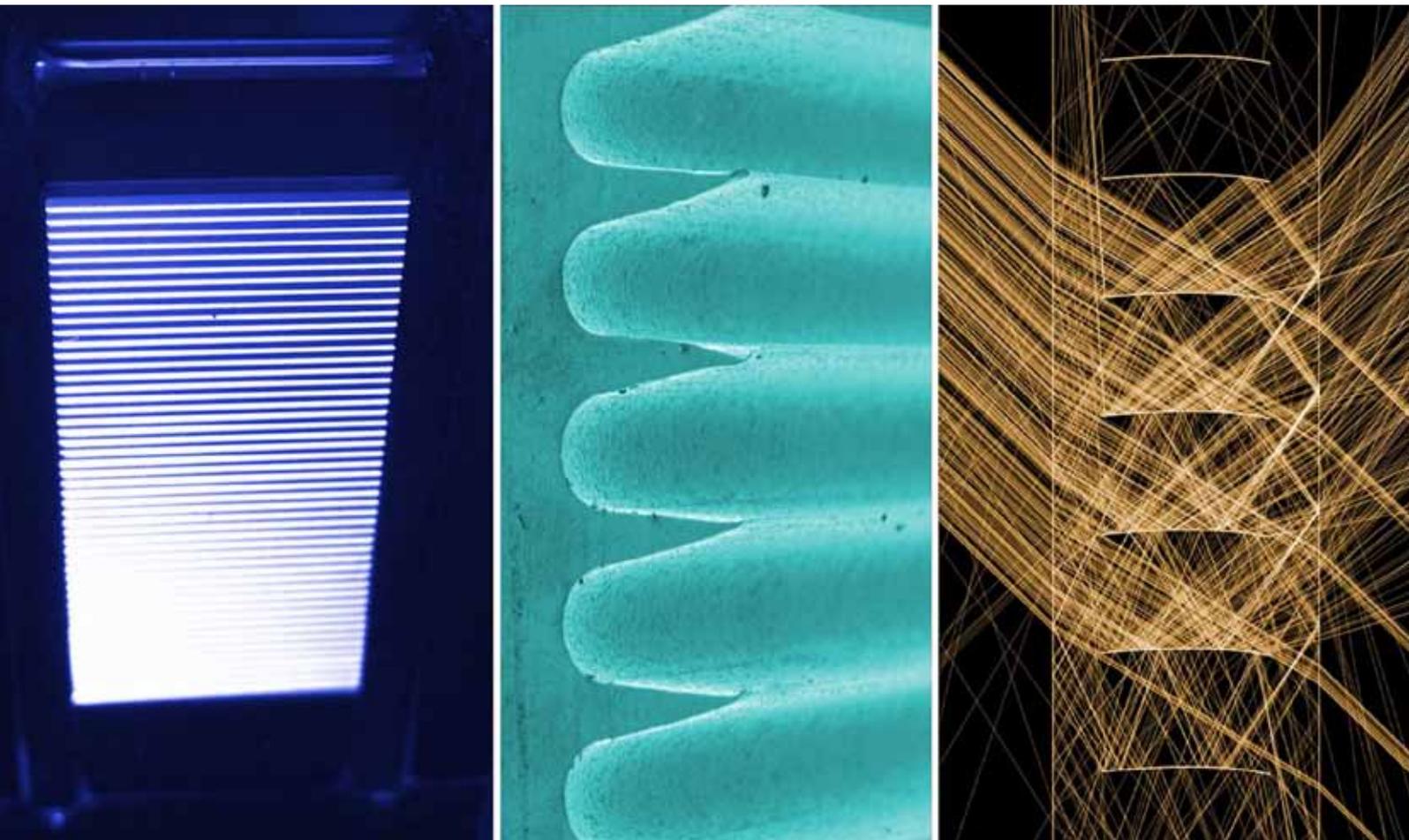


**Effiziente Energienutzung  
Utilisation efficace de l'énergie**



Charles Filleux

# Energie in Gebäuden



## **Titelbild:**

### **Mikrostrukturierte Gläser: Neue Möglichkeiten in der Tageslichtnutzung**

Am Labor für Sonnenenergie und Bauphysik der EPFL/LESO-PB wird an innovativen Verglasungen für verbesserte Fenster gearbeitet. Mit Mikrostrukturen, die für das Auge unsichtbar sind, wird es möglich, verschiedene Aspekte der Tageslichtnutzung zu kombinieren. Zur gleichmässigen Beleuchtung soll einfallendes Tageslicht in die Tiefe des Raumes umgeleitet werden. Dabei kann zusätzlich ein Blendschutz für Personen, die sich in der Nähe des Fensters befinden, erreicht werden. Weiterhin soll der Solarenergieeintrag den Bedürfnissen der Jahreszeit angepasst werden. Links: Optische Nahaufnahme eines mikrostrukturierten Labormusters, bei der das umgelenkte Licht gut erkennbar ist. Mitte: Elektronenmikroskopische Aufnahme der Form für die Herstellung der Mikrostruktur. Rechts: Computersimulation der optischen Eigenschaften mit Ray-Tracing.

## **BFE Forschungsprogramm Energie in Gebäuden**

Überblicksbericht 2011

### **Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
CH-3003 Bern

### **Programmleiter BFE (Autor):**

Dr. Charles Filleux, Basler & Hofmann AG, Ingenieure, Planer und Berater (charles.filleux@baslerhofmann.ch)

### **Bereichsleiter BFE:**

Andreas Eckmanns (andreas.eckmanns@bfe.admin.ch)

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

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

## Einleitung

Das vergangene Jahr war geprägt durch die Ereignisse in Fukushima und die wirtschaftliche Lage in Europa. Welche Auswirkungen haben diese Ereignisse auf die Forschung im Bereich Energie in Gebäuden gehabt? Das Thema Energiewende hat im Berichtsjahr keinen unmittelbaren Einfluss auf das Forschungsprogramm Energie in Gebäuden gehabt, dies wohl deshalb, weil keine zusätzlichen Mittel freigegeben wurden und die Umsetzung neuer Ergebnisse aus der Forschung erst mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung erfolgt und zweitens, weil der Gebädepark an sich etwas sehr Träges ist. Einen deutlicheren Einfluss hingegen hatten die innovationsfördernden Massnahmen der KTI zur Belebung der Wirtschaft. Diverse Projekte konnten in Angriff genommen werden, welche nicht im Rahmen des ordentlichen Budgets anderer Bundesstellen hätten realisiert werden können. Darunter gab es auch Eingaben zum Gebäudebereich.

Der vorliegende Überblicksbericht für das Jahr 2011 schliesst die 4-Jahresperiode des CORE-Forschungskonzepts 2008–2011 [1] ab. Die Ziele des Forschungsprogramms Energie in Gebäuden wurden frühzeitig festgelegt und blieben während der ganzen Laufzeit unverändert. Zur Belebung der Forschungsaktivitäten wurde 2009 eine Ausschreibung in der ganzen Themenbreite des Programms lanciert. Die Beteiligung war rege, ca. 35 Projekte (etwa die Hälfte der Eingaben) konnten

bewilligt werden. Nun, da die Mehrzahl dieser Projekte abgeschlossen ist, lässt sich eine Bilanz ziehen: Gesamthaft gesehen, war die Ausschreibung ein Erfolg. Substantielle Erkenntnisse wurden in folgenden Themenkreisen gewonnen: Nutzung erneuerbarer Energie in der Gebäudehülle, nachhaltige Erneuerung bestehender Bauten, Steigerung der Energieeffizienz gebäudetechnischer Anlagen, Optimierung von Tageslichtnutzung und Sonnenschutz, Erprobung neuer Dämmmaterialien und Entwicklung webbasierter Planungswerkzeuge. Des Weiteren konnte folgender viel versprechender Trend beobachtet werden: Weg von den Massnahmen an Einzelgebäuden hin zu systemischem Denken und Ausweitung auf das Quartier (vgl. Grafik im Abschnitt Programmschwerpunkte und Highlight 1).

Trotz guter Ergebnisse mit hohem Umsetzungspotenzial aus Forschungs- und Pilot- und Demonstrationsprojekten kann festgestellt werden, dass deren effektive Umsetzung nur zögerlich erfolgt. Insbesondere lässt die Erneuerungsdynamik zu wünschen übrig. In den vergangenen Jahren hat sich die Erneuerungsrate kaum verändert. Sie verharrt auf 1,5 % des Gebäudebestandes, wobei nur gerade die Hälfte der Renovationen energetisch wirksam ist. Für die kommende 4-Jahresperiode 2013–2016 müssen deshalb in Zusammenarbeit mit EnergieSchweiz vermehrt Anstrengungen unternommen werden.

IEA Klassifikation: 1.2 Residential and commercial

Schweizer Klassifikation: 1.1 Energie in Gebäuden

## Programmschwerpunkte

Für das Forschungsprogramm Energie in Gebäuden 2008 bis 2012 wurden fünf Schwerpunkte mit folgenden Zielsetzungen definiert [2]:

- Entwickeln einer ganzheitlichen, d. h. Disziplin übergreifende Strategie sowie eine technologische Basis für das «Gebäude als Gesamtsystem», unter besonderer Berücksichtigung der grauen Energie und der standortinduzierten Mobilität.
- In Zusammenarbeit mit Industriepartnern sollen Konzepte, Technologien und Planungswerkzeuge für Gebäudeerneuerungen entwickelt werden.
- Entwickeln einfacher Gebäudetechnikkonzepte für Neubauten sowie für die Erneuerung des Gebäudebestands, welche auf Verzicht fossiler Brennstoffe und Integration erneuerbarer Energien bauen.
- Es sind Technologien zu entwickeln, welche zu wesentlichen Verbesserungen der elektrischen Effizienz von Geräten in Gebäuden und der vermehrten Integration der Tageslichtnutzung im Gebäude führen.
- Nutzen von Synergien aus Materialwissenschaften, Chemie, Physik und Nanotechnologie, um neuartige Baustoffe und Komponenten zu entwickeln.

Pilot- und Demonstrationsprojekte: Demonstration von Schlüsseltechnologien mit Fokus auf die Gebäudesanierung sowie Erstanwendungen neuer Technologien und Systeme in Neubauten und Bestandsbauten.

### Rückblick und Bewertung 2011

Im Berichtsjahr wurden in allen fünf Forschungsschwerpunkten entscheidende Fortschritte erzielt. Im Bereich der Gebäude- und Siedlungskonzepte wurden Grundlagen für das MINERGIE-Eco-Nachweistool sowie ein Leitfaden für die Arealentwicklung für die 2000-Watt-Gesellschaft erarbeitet. Im Schwerpunkt Gebäudesanierung wurde ein Projekt im Rahmen der Internationalen Energieagentur (IEA) über energie- und treibhausgasoptimierte Sanierungslösungen gestartet. Der Gebäudetechnikbereich konnte eine Vielzahl effizienzverbessernder Projekte aufweisen, die von Konzepten der passiven Kühlung bis hin zur internetbasierten Optimierung von Haustechniksystemen reichten. Im Schwerpunkt Stromverbrauch konnten einige Projekte zur Effizienzsteigerung von Kleinlüftungsanlagen sowie zur Tageslichtnutzung gefördert werden. Im letzten Bereich, den innovativen Materialien, konnte ein Demonstrationsprojekt über die Anwendung von Aerogel-Dämmstoffen an schützenswerten Bauten unterstützt, sowie ein Deklarationsraster für Vakuumdämmungen im Baubereich entwickelt werden. Ergänzend zu den Forschungsschwerpunkten konnten diverse Pilot- und Demonstrationsprojekte gefördert werden.

### Ausblick

Längerfristiges energiepolitisches Ziel ist ein möglichst energieeffizienter und nahezu emissionsfreier Gebäudepark. Bezogen auf die Bestandsbauten und die Neubauten heisst dies:

### Bestehende Gebäude:

Diese sollen wirtschaftlich tragbar erneuert werden. Zur Bewertung des Nutzens von Energieeffizienzmassnahmen gegenüber Massnahmen zur CO<sub>2</sub>-Kompensation sind methodische Grundlagen als auch Anwendungsinstrumente zu entwickeln. Bei Wohnbauten soll die Forschung Lösungen bereitstellen, welche beispielsweise mit neuen, hoch effizienten Dämmstoffen den Anforderungen bei Sanierungen gerecht werden. In Nicht-Wohnbauten wie z. B. Büros, Schulen oder öffentlichen Gebäuden gilt es insbesondere, die von Bürogeräten, der Beleuchtung, aber auch von Menschen abgegebene Wärme zu nutzen. Für historisch erhaltenswerte Gebäude sind Sanierungslösungen gefragt, die das architektonische Bild von Fassade, Fenstern und anderen Bauteilen möglichst wenig beeinträchtigen. Schliesslich sollen nicht nur die einzelnen Gebäude betrachtet, sondern auch Lösungen erarbeitet werden, wie ganze Areale, Quartiere und Städte nachhaltig entwickelt werden können.

### Neubauten:

Bei Neubauten liegt der Fokus der Forschung auf Betrachtungen des Energieverbrauchs sowie der Schadstoff- und CO<sub>2</sub>-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes. Ein zentrales Anliegen bei Neubauten ist die Minimierung der grauen Energie und der grauen Emissionen.

### Gebäudetechnologien:

Gemäss den Konzepten des «Plusenergiehauses» sollen Gebäude in Zukunft vermehrt Energie bereitstellen. Die architektonische Integration erneuerbarer Energie ins Gebäude hat dabei einen hohen Stellenwert. Neben der technischen Machbarkeit ist die Wirtschaftlichkeit solcher Lösungen ein zentrales Kriterium.

### Areale und Siedlungen:

Schliesslich braucht es innovative Lösungen zur gebäudeübergreifenden Vernetzung, um das Energieerzeugungs- und Lastmanagement von Gebäuden, Arealen und Siedlungen zu optimieren.



Von Einzelmassnahmen zur Gesamtbetrachtung (Quelle: [2]).

## Highlights aus Forschung und Entwicklung

Laufende Aktivitäten in Forschung und Entwicklung beliefen sich im Berichtsjahr auf über 40 Projekte, wobei ein Grossteil davon Ende 2011 abgeschlossen werden konnten. Stellvertretend für die Vielzahl erfolgreich abgeschlossener Projekte wurden zwei völlig unterschiedliche Projekte ausgewählt.

### Arealentwicklung für die 2000-Watt-Gesellschaft

«Vom Gebäude zum Quartier» heisst heutzutage die Losung zur Erreichung eines nachhaltigen Gebäudeparks Schweiz. Vor diesem Hintergrund haben das Forschungsprogramm Energie in Gebäuden und das Amt für Hochbauten der Stadt Zürich die Erarbeitung eines Leitfadens und einer Rechenhilfe zur Arealentwicklung für die 2000-Watt-Gesellschaft ermöglicht.

Die 2000-Watt-Gesellschaft wurde Ende der 1990er-Jahre als Vision entwickelt und ist inzwischen zum offiziellen Entwicklungsleitbild zahlreicher Schweizer Städte und Gemeinden, aber auch des Bundes und mehrerer Kantone geworden. Der SIA hat mit dem SIA-Effizienzpfad Energie die Grundlagen für die Umsetzung der 2000-Watt-Gesellschaft für Einzelbauten gelegt.

Die 2000-Watt-Gesellschaft wird nun auch in zunehmendem Masse als Zielvorgabe zur Entwicklung ganzer Areale beigezogen. Im Rahmen des gegenständlichen Projekts wurde die Methodik des SIA-Effizienzpfades Energie auf die spezifischen Anforderungen von Arealentwicklungen erweitert. Der Bilanzperimeter wird dabei vom einzelnen Gebäude auf das gesamte Areal ausgedehnt und gegenüber den Nutzungen Wohnen, Büro und Schule werden zusätzlich die Nutzungen Hotel, Verkauf (Lebensmittel, Fachgeschäft, Einkaufszentrum) und Restaurant behandelt.

Die Methodik für die Beurteilung von Arealen basiert auf der Bewertung der im Areal geplanten Nutzungen. Analysiert werden die Bereiche Erstellung, Betrieb und Mobilität. Eine standardisierte Methodik zur Berechnung von Projektwerten zum Primärenergieverbrauch und zu den Treibhausgasemissionen und der Vergleich derselben mit

den bereitgestellten Richtwerten ermöglicht einem Arealentwickler, bereits in der Phase der strategischen Planung abzuschätzen, wo sein Projekt in Bezug auf die 2000-Watt-Ziele liegt. Zudem trägt das Arealentwicklungs-Tool dazu bei, die Einflussmöglichkeiten zur Projektoptimierung zu erkennen. Für die Gesamtbeurteilung des Areals werden schliesslich die nutzungsspezifischen Richtwerte aus Erstellung, Betrieb und Mobilität zu einem für das Gesamtareal zu erreichenden Zielwert addiert. Aufgrund des frühen Beurteilungszeitpunktes im Projektverlauf und um die Handhabung der Methodik so einfach wie möglich auszugestalten, wird die Anzahl der benötigten Eingabedaten tief gehalten.

Bei der Erstellung der Gebäude auf einem Areal werden einschneidende Voraussetzungen für die Zielerreichung des Areals gemäss der 2000-Watt-Gesellschaft festgelegt. Das gilt insbesondere für die Graue Energie (kumulierter Primärenergiebedarf, nicht erneuerbar, für die Herstellung der Baumaterialien von der Rohstoffentnahme bis zur Entsorgung) und die grauen Treibhausgasemissionen.

Für die Zielerreichung im Bereich Erstellung sind vor allem die Kompaktheit der Gebäude, der Umfang der unterirdischen Flächen und die gewählte Bauweise massgebend. Im Bereich Betrieb bietet sich bei der Arealentwicklung die einmalige Chance, ein vernetztes Energiekonzept über alle Baufelder zu entwickeln. Die Abwärme einer Nutzungskategorie kann dabei als Wärmequelle anderer Nutzungen dienen. Solaranlagen können am bestgeeigneten Standort konzentriert für alle Gebäude installiert werden. Zudem verfügen viele ehemalige Industriearale über Grundwasserbrunnen oder eigene Kraftwerksanlagen. Damit sind optimale Voraussetzungen für die wirtschaftliche Umsetzung der 2000-Watt-Gesellschaft geschaffen.

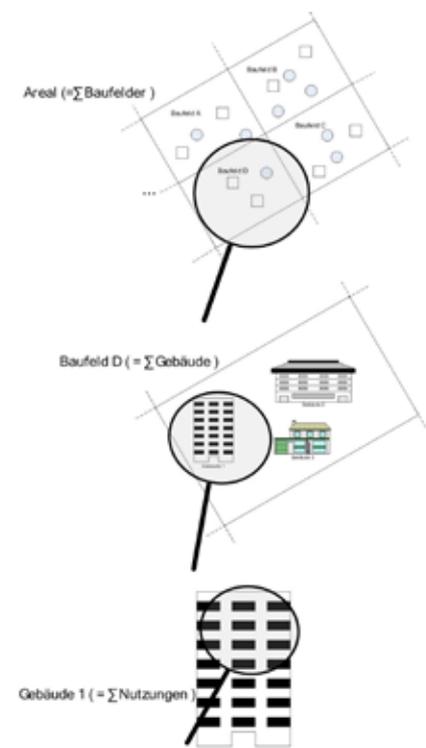
Das durch die im Areal geplanten Nutzungen ausgelöste Verkehrsaufkommen wird stark von projekt- und standortbezogenen Rahmenbedingungen geprägt. Auch innerhalb einzelner Nutzungen sind – je nach Ausprägung – unterschiedlichste Verkehrsaufkommen denkbar. Insbesondere bei der

Standortwahl und der damit verbundenen Erschliessung durch den öffentlichen Verkehr sowie bei der Parkplatzzahl bestehen Ansatzpunkte, mit denen der Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen reduziert werden können.

Die Umsetzung einer Arealentwicklung für die 2000-Watt-Gesellschaft stellt eine spannende Herausforderung dar. Fünf im Leitfaden dargestellte Fallbeispiele zeigen, wie mit dieser Herausforderung umgegangen werden kann. Gleichzeitig sollen die Fallbeispiele auch als Motivation und Anstoss für die Realisierung weiterer innovativer Konzepte und Projekte in der 2000-Watt-Arealentwicklung dienen.

### Produktwettbewerb energieeffizientes fensterbezogenes Einzelraumlüftungsgerät

Im Neubau hat sich die Komfortlüftung durchgesetzt und wird aktuell erfolgreich und in grosser Stückzahl einge-



Figur 1: Methodik Arealentwicklung für die 2000-Watt-Gesellschaft (Quelle: Intep).



Figur 2: Siegerprojekt PremiVent des Teams Zehnder Comfosystems Cesovent AG / Profine AG (Quelle: Hersteller).

baut. Bei der Instandsetzung hingegen sprengt der Aufwand für die Installation solcher Systeme oft das finanziell und baulich Machbare. Bei Instandsetzungen werden Gebäude gedämmt und dichter gemacht – insbesondere

durch den Fensterersatz. Entsprechend wird das Thema Luftwechsel auch bei Instandsetzungen wichtig. Einerseits, um Schimmel zu vermeiden, andererseits, um eine ausreichende Luftqualität für die Nutzer zu gewährleisten.

Obwohl das Potenzial von Lüftungssystemen in Instandsetzungsprojekten riesig ist, fehlen in vielen Situationen passende Produkte. Insbesondere bei der Modernisierung von Mehrfamilienhäusern gibt es oft keinen Platz für die Leitungsführung, resp. keine passenden, platzsparenden Luftverteilsysteme.

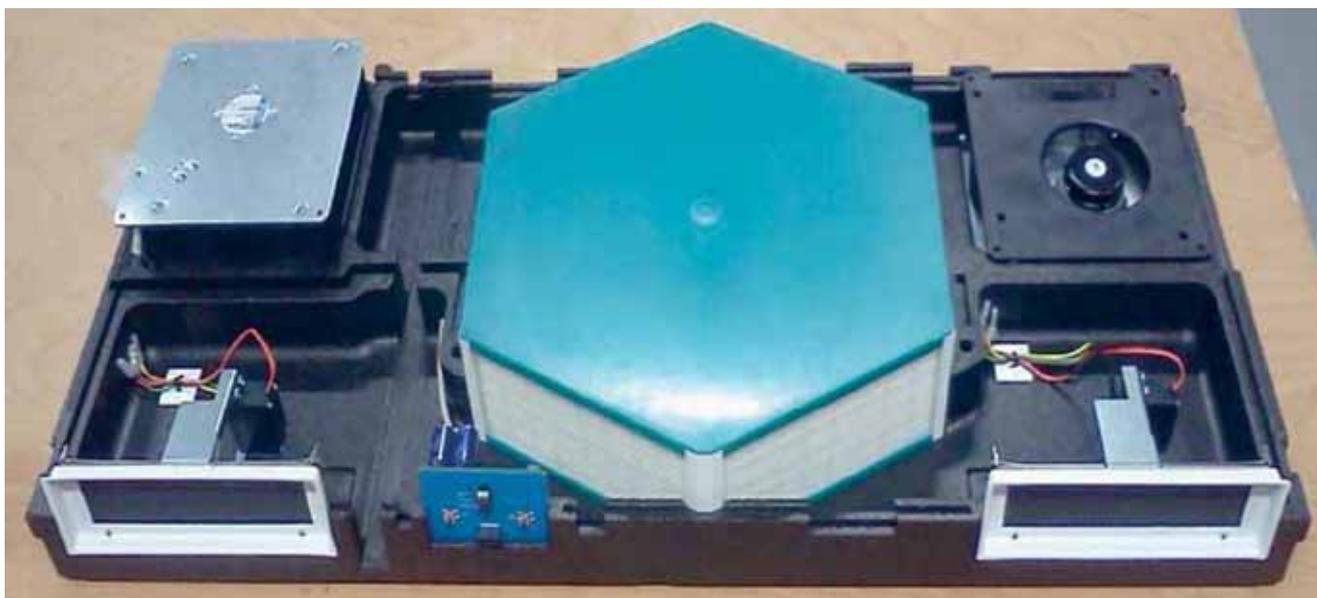
Eine Erkenntnis aus der Erfahrung vieler Lüftungsplaner ist, dass besonders bei Instandsetzungen der Einbau von Einzellüftungsgeräten in jedem Wohn- oder Schlafzimmer manchmal eine bessere und vor allem machbarere Lösung darstellt, als eine Komfortlüftung einzubauen. Einzelraumlüfter mit integrierter Wärmerückgewinnung sind schon seit längerem auf dem Markt erhältlich, wurden bis anhin aber nur sehr wenig eingesetzt. Gründe dafür sind ein meist unästhetisches Erscheinungsbild, der Preis, der ungenügende Schallschutz und, dass die Lüfter nicht zusammen mit den Fenstern angeboten werden.

Ein Produktwettbewerb soll der Fenster- und Lüftungsbranche neue Impulse zur Lösung des Lüftungsproblems verleihen. Dabei sollen zwischen

Fensterbauern und Lüftungsherstellern enge Kooperationen initiiert werden. Dies mit dem Ziel, den Bauherren eine baulich einfache, ästhetisch ansprechende und preislich günstige Variante für den Einbau von Komfortlüftungen bei Gebäudesanierungen anzubieten.

Der Produktwettbewerb wurde vom Ingenieurbüro hässig sustech vorgeschlagen und umgesetzt und wurde von der Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik des Amtes für Hochbauten (AHB) der Stadt Zürich und dem Bundesamt für Energie (BFE) finanziert. Der Produktwettbewerb wurde in zwei Phasen durchgeführt. Für die Teilnahme am Produkt-Wettbewerb waren Unternehmen und Forschungsinstitutionen mit Sitz in der Schweiz zugelassen. Die Teams sollten idealerweise aus einem Vertreter der Lüftungs- und einem der Fensterbranche bestehen. Eine Fensterfirma musste zwingend mit im Team sein. Die Jury bewertete die vier Kriterien Gestaltung / Baulicher Einbauaufwand / Erfüllung der technischen Vorgaben / Betrieb und Instandhaltung.

Das Siegerkonzept PremiVent vom Team Zehnder Comfosystems Cesovent AG / Profine AG überzeugte die Jury in den Kriterien baulicher Einbauaufwand, technische Leistungen sowie Betrieb am meisten. Aus technischer Sicht überzeugte insbesondere der Enthalpietauscher, der das Problem



Figur 3: Fensterlüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung PremiVent (Quelle: Zehnder Comfosystems).

des Kondensats und des Frostschutzes hervorragend löst, sowie die automatisch schliessenden Luftklappen. Die Schalldämmvorgaben konnten eingehalten werden. Der gemessene Stromverbrauch von 7,5 Watt erfüllte die anspruchsvollen Vorgaben. Mit geringem Gewicht und bescheidener Grösse kann das Gerät ohne grösseren Aufwand gut eingebaut werden. Es gibt zudem noch Varianten, die seitlich oder an der Decke oder im Rollladenkasten eingebaut werden können, was die Flexibilität der Lösung erhöht. Bei der – im Wettbewerb gezeigten – Einbauvariante in die Fensterbank wird das Fensterlicht nicht eingeschränkt, was gerade bei Modernisierungen sehr erwünscht ist

Die Jury empfiehlt dem Team an der Gestaltung weiter zu arbeiten, damit ihr Produkt ästhetischer aussieht und um weitere Klientel überzeugen zu können. Dies betrifft die Aussenseite wie auch die Innenseite. Gefragt ist ein Gerät, das entweder zu einem willkommenen Blickfang wird oder sonst möglichst unsichtbar ist. Von technischer Seite her wünscht sich die Jury einen weiter reduzierten Schalleistungspegel, damit das Gerät auch in Schlafzimmern ohne Einschränkungen gut eingesetzt werden kann. Die Spezialität, dass über das gleiche Gerät auch noch ein zweiter Raum belüftet werden kann, wird als positive Erweiterung des Einsatzes betrachtet. Von den Kosten her dürfte die Bauart des Geräts gutes Potenzial für eine wirtschaftliche Lösung aufweisen.



Figur 4: Luftaufnahme des Sanierungsobjekts im Zentrum von Morges (Quelle HEIG-VD)



Figur 5: Fassade des Mehrfamilienhauses in Morges vor der Sanierung (Quelle: HEIG-VD LESBAT).

## Pilot- und Demonstrationsprojekte

Im Berichtsjahr konnten erfreulicherweise wieder vermehrt Projekte zur Demonstration von Schlüsseltechnologien mit Fokus auf die Gebäudesanierung sowie als Erstanwendungen neuer Technologien und Systeme in Neubauten und Bestandsbauten ermöglicht werden.

### Reno-HP: Installation technique décentralisée pour la rénovation à haute performance de bâtiments

Ziel dieses Projektes ist die Erfolgskontrolle für ein mehrgeschossiges Wohnhaus mit 59 Wohnungen im Stadtzentrum von Morges im Anschluss an eine Gesamtanierung im Minergie-P-Standard. Die Sanierung des Gebäudes

zielte auf eine Reduktion des Heizwärmebedarfs um einen Faktor 10 und sah hauptsächlich folgende Massnahmen vor:

- Erneuerung der Gebäudehülle mittels vorgefertigter Elemente (GAP Solution) mit niedrigem U-Wert ( $< 0,1 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ).
- Ein einziger Warmwasserkreis zur Beschickung jeder einzelnen Woh-



Figur 6: Fassade des Mehrfamilienhauses in Morges nach der Sanierung (Quelle: HEIG-VD LESBAT).

nung. Heizungs- und Brauchwarmwasser werden über einen Plattenwärmetauscher gewonnen.

- Jede Wohnung ist mit einem Kompaktsystem (Varios) mit einer dezentralen Lüftung mit Wärmerückgewinnung und Verteilsystem für Raumheizung und Brauchwarmwasser ausgerüstet.
- In der Erfolgskontrolle wurden folgende Parameter entweder kontinuierlich oder durch einmalige Messungen analysiert: der Energieverbrauch für Raumheizung und Brauchwarmwasser, der Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung des

dezentralen Lüftungssystems, der Thermische Komfort während mehrerer jahreszeitlichen Perioden, der durch die dezentrale Lüftung verursachte Geräuschpegel in jedem Raum, und die Luftqualität durch kontinuierliche Aufzeichnung des CO<sub>2</sub>-Pegels, flüchtiger organischer Substanzen (VOC) und der relativen Feuchtigkeit.

Ausserdem wurde eine Umfrage unter den Bewohnern durchgeführt. Der Komfort und die Bedienungs-freundlichkeit wurden als gut bis sehr gut eingestuft. Einzig der Geräuschpegel im Badezimmer, wenn die Lüftung auf der

höchsten Stufe betrieben wird, übertrifft zeitweise die gemäss der Norm SIA 181 zulässigen Werte.

Beruhend auf den Berechnungen und den Messwerten ergab sich, dass der Endenergieverbrauch von 414 vor der Sanierung auf 53 MJ/m<sup>2</sup>/Jahr verringert werden konnte, also um einen Faktor 8, was ausgezeichnet ist.

Insgesamt zeigten die während der Messkampagne gewonnenen Erkenntnisse, dass die Massnahmen zu einer ansprechenden und sehr energieeffizienten Renovation geführt haben.

## Nationale Zusammenarbeit

Die Kontakte mit Forschungsteams sind sehr breit gestreut: An der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich sind es die Forschungsteams von Prof. Dr. H. Leibundgut, Prof. Dr. H. Wallbaum und Prof. Dr. L. Guzzella, an der École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) ist es das Forschungsteam von Prof. Dr. J. L. Scartezzini. Auch mit den Fachhochschulen wurde ein reger Austausch gepflegt: Das Team von Prof. Dr. St. Citherlet, LESBAT von der HEIG-VD in Yverdon, ist an zwei Forschungsprojekten beteiligt, eines davon auf dem Gebiet der Gebäudesanierung bzw. Bewertung und Vergleich der Treibhausgasemissionen bei Sanierungen und Ersatzbauten. Die Fachhochschule Nordwestschweiz (Teams von Prof. A. Binz und Prof. Dr. Th. Afjei) war ebenfalls mit mehreren Projekten beteiligt, u. a. zum Thema «Net Zero Energy Buildings». Die langjährige Zusammenarbeit mit der Hochschule Luzern (Zentrum für Integrale Gebäudetechnik von Prof. U.P. Menti) wurde weitergeführt und es konnten diverse Projekte erfolgreich abgeschlossen werden. An der HES-SO Valais (Prof. M. Bonvin und Dr. F. Bützberger Moghaddam) konnten die Projekte «RenovE» und «Stores intelligents» zu Ende geführt werden. Schliesslich bestehen auch gute Kontakte zur italienischsprachigen Schweiz, nämlich zu diversen Forschungsteams an der Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana (SUPSI).

Regelmässige Kontakte werden zum nationalen Kompetenznetzwerk Brenet (Building and Renewable Energies Network of Technology, [www.brenet.ch](http://www.brenet.ch)) wahrgenommen, insbesondere zum «Building Integrated Solar Network (BiSol)».

Das jährliche Koordinationstreffen mit den Programmleitern der Forschungsprogramme WP/Kälte/WKK und Solarwärme/Wärmespeicherung fand auch 2011 wie gewohnt im Dezember unter der Leitung von Andreas Eckmanns statt.

Eine erfolgreiche Zusammenarbeit besteht mit dem Verein Energie-Cluster ([www.energie-cluster.ch](http://www.energie-cluster.ch)) im Rahmen der Innovationsgruppen Hochleistungswärmedämmung und Komfortlüftung. Seit 2009 ist eine Innovationsgruppe Plusenergiehaus ins Leben gerufen worden, in deren Workshops die Programmleitung vertreten ist. Die Programmleitung vertritt das BFE in der Begleitgruppe des Projekts Use of Weather and Occupancy Forecasts for Optimal Building Climate Control (OptiControl) der ETHZ, MeteoSchweiz, der Empa und der Industrie, welches durch Swisselectric Research unterstützt wird.

Zur Sicherstellung der Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse wird eine enge Zusammenarbeit mit dem Programm EnergieSchweiz gepflegt. Auf Programmebene werden sporadische Kontakte zu KTI, BAFU und Swisselectric Research gepflegt.

## Internationale Zusammenarbeit

Die Projektnehmer des Forschungsprogramms Energie in Gebäuden sind international gut vernetzt und die Bereitschaft, in führenden Funktionen mitzuwirken, ist gross. Internationale Kontakte werden sowohl in direkter Zusammenarbeit in Projekten, in Netzwerken wie auch durch Teilnahme an internationalen Konferenzen wahrgenommen. Die bisherigen Erfahrungen und der Nutzen dieser Zusammenarbeit für die Schweiz können allgemein als sehr gut eingestuft werden.

Durch die Teilnahme an den Implementing Agreements «Energy Conservation in Buildings and Community Systems ECBCS» und «Solar Heating and Cooling SHC» der Internationalen Energieagentur (IEA) erfolgt eine intensive Zusammenarbeit mit diversen internationalen Partnern.

Das Forschungsprogramm war 2011 in mehreren Projekten engagiert: Empa Building Technologies und HSLU CCTP vertraten die Schweiz als Operating Agent im ECBCS Annex 50 «Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Residential Building» welches erfolgreich abgeschlossen werden konnte. Laufende Projekte sind: SHC Task 41 Solar Energy and Architecture, an welchem

die HSLU CCTP und das SUPSI ISAAC-DACD teilnehmen; die FHNW vertritt die Schweiz im kombinierten ECBCS Annex 52/SHC Task 40 «Nullenergie-Gebäude – die nächste Generation Energieeffizienter Bauten»; das LESO-PB vertritt die Schweiz im ECBCS Annex 51 «Energy Efficient Communities: Case Studies and Strategic Guidance for Urban Decision Makers». Neu startete der ECBCS Annex 56 «Cost Effective Energy and Carbon Emissions and Optimization in Building Renovation».

Das Forschungsprogramm ist im ERA-Net Eracobuild im Rahmen des EU Framework Programme 7 vertreten. Im Rahmen des Eracobuild ERA-Net-Calls «Sustainable Renovation of Buildings» beteiligt sich das Forschungsprogramm an zwei Projekten: INSPIRE «Integrated strategies and policy instruments for retrofitting buildings to reduce primary energy use and GHG emissions» und School vent cool «Ventilation, cooling and strategies for high performance school renovations». Ein weiteres Projekt mit Schweizer Beteiligung «RE\_CO\_RE: Resource Conserving Renovation & Energy efficient, resource conserving and differentiated renovation of historic European building stocks» wird vom BFE-Forschungsprogramm EWG gefördert.

## Referenzen

[1] Eidgenössische Energieforschungskommission CORE:  
*Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 bis 2011*,  
Bundesamt für Energie, 2007.

[2] Charles Filleux, Andreas Eckmanns: *Konzept des Energie-  
forschungsprogramms Energie in Gebäuden 2008–2011*,  
Bundesamt für Energie, 2008.

## Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(\* IEA-Klassifikation)

- 2000-WATT-KOMPATIBLE AREALENTWICKLUNG**

Lead: Intep/Lemon Consult	Funding: BFE
Contact: Kelleneberger Daniel kelleneberger@intep.com	Period: 2010–2011

Abstract: Dieses Projekt bezweckt den SIA Effizienzpfad Energie für die Entwicklung von 2000-Watt-kompatiblen Arealen zu erweitern

F+E 1.2\*
- 4-FAMILIENHAUS B35 IN ZERO-CARBON-LOWEX-TECHNOLOGIE**

Lead: HSLU	Funding: BFE
Contact: Leibundgut Hansjürg leibundgut@hbt.arch.ethz.ch	Period: 2011–2013

Abstract: Erfolgskontrolle des 4-Familienhaus B35 in Zero-Carbon-lowEx-Technologie

P+D 1.2
- 75%-AKTIV-SOLARHAUS (OHNE SAISONALE SPEICHERUNG)**

Lead: Stefan und Anna Katharina Mathez	Funding: BFE
Contact: Stefan Mathez stevie@solarcampus.ch	Period: 2011–2014

Abstract: Das ambitionierte 75%-Ziel soll dank modernster Gebäudetechnik, der Nutzung des betonierten Gebäudekerns als Wärmespeicher (ca. 50 % der Betonmasse), einer allseits verglasten Fassade, sowie eines durchdachten Solarkonzeptes erreicht werden.

F+E 1.2
- AIR-ON, MULTIFUNKTIONALES RAUMLÜFTUNGS- UND KLIMAGERÄT - FELDMESSUNGEN IN MEHRFAMILIENHAUS IN WETZIKON**

Lead: AirOn / HSLU	Funding: BFE
Contact: Adrian Peterhans adrian.peterhans@air-on.ch	Period: 2011–2013

Abstract: Ein neu entwickeltes Einzelraumklimagerät soll im Rahmen dieses P+D-Projektes im Labor einer unabhängigen Institution ausgemessen, in einer Musterwohnung eines realen Sanierungsprojektes detailliert ausgemessen, in zwei normal genutzten Wohnungen des oben genannten Sanierungsprojektes ausgemessen, mittels Simulationen auf das Energieeinsparpotenzial in weiteren Situationen (andere Gebäudetypen, andere Nutzungen) überprüft.

F+E 1.2
- ANFORDERUNGEN AN BEHÖRDENTAUGLICHE DYNAMISCHE SIMULATIONSPROGRAMME  
PROBLEMANALYSE UND EXEMPLARISCHER LÖSUNGSVORSCHLAG**

Lead: EMPA Abt. 118 Bautechnologie	Funding: BFE
Contact: Frank Thomas thomas.frank@empa.ch	Period: 2009–2011

Abstract: Mit dynamischen Simulationsprogrammen kann eine verbesserte integrale Planung des Gebäudes erreicht werden. Das Anforderungsprofil an behördentaugliche EDV-Programme der EnFK deckt zur Zeit nur die Rechenmethode nach SIA 380/1 mit dem Monatsbilanzverfahren ab. Für dynamische Gebäudesimulationsmodelle ist deshalb ein analoges und erweitertes Anforderungsprofil erforderlich.

F+E 1.2
- AUTOMATIC CONTROL OF AN ELECTROCHROMIC WINDOW**

Lead: EPFL/ENAC/ICARE/LESO-PBX	Funding: BFE
Contact: Morel Nicolas nicolas.morel@epfl.ch	Period: 2009–2012

Abstract: Le but du projet est le développement d'un algorithme de contrôle avancé pour un vitrage électrochromique, tenant compte à la fois d'une optimisation énergétique par rapport aux gains solaires directs et du confort (visuel et thermique) des utilisateurs.

F+E 1.2
- BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAICS (BIPV) - ASPECTS THERMIQUES**

Lead: SUPSI-DACD-ISAAC	Funding: BFE
Contact: Frontini Francesco francesco.frontini@supsi.ch	Period: 2009–2011

Abstract: Considering that in the near future PV will be used more and more often as a building material, the intentions of this project are to analyze building integrated PV products in order to define their electrical and thermal characteristics, to analyze the interaction between these materials and the building and to demonstrate what BiPV modules look like and how to integrate them into the building concept.

F+E 1.2

- **COP5 - SOURCE FROIDE SOLAIRE POUR POMPE À CHALEUR AVEC UN COP ANNUEL DE 5 GÉNÉRALISABLE DANS LE NEUF ET LA RÉNOVATION** F+E 1.2

Lead:	Université de Genève	Funding:	BFE
Contact:	Mermoud Floriane Floriane.Mermoud@unige.ch	Period:	2009–2012

Abstract: Ce projet étudie le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire à partir d'une installation solaire (capteurs solaires non couverts) utilisée hors ensoleillement comme absorbeurs sur air pour une pompe à chaleur, dans le but est d'atteindre un COP global annuel de 5.
- **ENERGETISCHE BEURTEILUNG VON GEBÄUDEN MITTELS INFRAROTBILDERN (QUALI-THERMO)** F+E 1.2

Lead:	QC-Expert AG, Dübendorf	Funding:	BFE
Contact:	Tanner Christoph bct@baucheck-tanner.ch	Period:	2008–2011

Abstract: Ziel des Projekts ist die Validierung und Weiterentwicklung der empirischen methode QualiThermo® welche in begrenztem Rahmen eine energetische Beurteilung von Gebäuden mittels Infrarotbildern zulässt.
- **ENERGY EFFICIENT COMMUNITIES: CASE STUDIES AND STRATEGIC GUIDANCE FOR URBAN DECISION MAKERS (IEA ECBCS ANNEX 51)** F+E 1.2

Lead:	EPFL/ENAC/ICARE/LESO-PBX	Funding:	BFE
Contact:	Jerome Kaempf jerome.kaempf@epfl.ch	Period:	2009–2012

Abstract: Our main aim in this is to disseminate the advances that have and are being made in Switzerland with respect to the planning, design and construction of relatively sustainable urban communities as well as planning and design tools to support these efforts.
- **ERACOBUILD: SCHOOL VENT COOL** F+E 1.2

Lead:	FHNW/HSLU	Funding:	BFE
Contact:	Kobler René L. rene.kobler@fhnw.ch	Period:	2010–2013

Abstract: Erarbeiten ganzheitlicher Sanierungsstrategien betreffend das gesamte System "Schulhaus" inklusive Energieversorgung, Lüftung und Kühlung, als auch die thermische Behaglichkeit.
- **ERFOLGSKONTROLLE PLUS-ENERGIE-MEHRFAMILIENHAUS IN BENNAU (SZ)** P+D 1.2

Lead:	amena ag	Funding:	BFE
Contact:	Gütermann Andreas ag@amena.ch	Period:	2008–2011

Abstract: Um die Zielerreichung des ersten Plus-Energie-MFH bezüglich Wärme- Elektrizitätsbilanz und Temperaturverhalten zu überprüfen (Erfolgskontrolle) wird ein Messprojekt durchgeführt. Dieses ermittelt alle wesentlichen Parameter des Gebäudes und des Anlageverhaltens (PV, Fassadenkollektoren, Speicherbewirtschaftung) über einen Zeitraum von 2 Jahren.
- **ERFOLGSKONTROLLE WOHNIEDLUNG BURGUNDER BERN MINERGIE®-P-ECO** P+D 1.2

Lead:	BSR Bürgi Schärer Raaflaub	Funding:	BFE
Contact:	Bürgi Hanspeter hanspeter.buergi@bsr-architekten.ch	Period:	2009–2011

Abstract: Die autofreie Wohnsiedlung Burgunder in Bern setzt mit seinen Zielen einen schweizweit neuen Massstab. In den drei Hauptbereichen der Nachhaltigkeit sind dies z. B.: Ökologie: Standard Minergie-P-ECO (Gebäude), Autofreies Wohnen (Mobilität), Ökonomie: Günstige Mietwohnungen und Gesellschaft: Autofreies Wohnen, Mitwirkung NutzerInnen.
- **ERHÖHUNG DER ENERGIEEFFIZIENZ VON KLEINLÜFTUNGSANLAGEN IN 2000W-GEBÄUDEN** F+E 1.2

Lead:	HSLU-ZIG	Funding:	BFE
Contact:	Frei Beat beat.frei@hslu.ch	Period:	2009–2011

Abstract: Interne Leckagen in Kompaktlüftungsgeräten und externe Leckagen in Luftverteilsystemen führen zur merklichen Minderung der Energieeffizienz und zu empfindlichen Komforteinbussen bei Geruchsübertragung. Bei zukünftig verstärktem Einsatz von Kleinlüftungsanlagen besteht somit ein grosses Effizienzsteigerungspotenzial.

- **G-BOX POUR LA MESURE IN SITU DES PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES DE FAÇADES TRANSPARENTES ET TRANSLUCIDES** F+E 1.2
- |          |                                      |          |           |
|----------|--------------------------------------|----------|-----------|
| Lead:    | École d'ingénieurs de Genève / SUPSI | Funding: | BFE       |
| Contact: | daniel.pahud@supsi.ch                | Period:  | 2009–2012 |
- Abstract: Il s'agit de développer un dispositif transportable appelé « g-box » pour la mesure in situ des propriétés thermiques de façades transparentes et translucides et en particulier de leur valeur g.
- 
- **GEBÄUDEINTEGRIERTE POLYVALENTE ENERGIEBEREITSTELLUNG (MICROPOLYGEN)** F+E 1.2
- |          |                               |          |           |
|----------|-------------------------------|----------|-----------|
| Lead:    | Ökozentrum Langenbruck / Empa | Funding: | BFE       |
| Contact: | gaegauf@oekozentrum.ch        | Period:  | 2009–2011 |
- Abstract: Das Projekt Gebäudeintegrierte polyvalente Energiebereitstellung (MicroPolygen), das von Partnern des Kompetenznetzwerkes Gebäudetechnik und Erneuerbare Energien (brenet) bearbeitet wird, strebt die Entwicklung von neuartigen Konzepten für eine nachhaltige, gebäudeintegrierte, polyvalente Energieversorgung an. Der Hauptakzent des Projekts liegt auf der Systemuntersuchung von Kraft-Wärme-Kopplungs-Systemen
- 
- **GESAMTERNEUERUNG WOHN- UND SCHULHAUS KRUMMBACH** F+E 1.2
- |          |                         |          |           |
|----------|-------------------------|----------|-----------|
| Lead:    | Aleaxander Ritz         | Funding: | BFE       |
| Contact: | mark.zimmermann@empa.ch | Period:  | 2011–2012 |
- Abstract: Das Projekt „Gesamterneuerung Schulhaus Krumbach“ ist ein Demonstrationsvorhaben, um die im Rahmen des CCEM-Retrofit Projekts entwickelten vorgefertigten Sanierungslösungen umzusetzen und zu demonstrieren.
- 
- **GRAUE ENERGIE VON SANITÄR- UND ELEKTROANLAGEN** F+E 1.2
- |          |                            |          |           |
|----------|----------------------------|----------|-----------|
| Lead:    | Büro für Umweltchemie      | Funding: | BFE       |
| Contact: | m.klingler@umweltchemie.ch | Period:  | 2010–2011 |
- Abstract: Die Sanitär- und Elektroanlagen von je 7 Gebäuden werden in diesem Projekt untersucht. Bestehende Daten werden überprüft und ergänzt.
- 
- **HEIZEN UND KÜHLEN ÜBER THERMISCH AKTIVIERTE AUSSENFLÄCHEN - POTENTIALSTUDIE** F+E 1.2
- |          |                                |          |           |
|----------|--------------------------------|----------|-----------|
| Lead:    | Fachhochschule Nordwestschweiz | Funding: | BFE       |
| Contact: | carsten.wemhoener@fhnw.ch      | Period:  | 2009–2011 |
- Abstract: Projektziel ist die Ermittlung und Bewertung des Potenzials, über aussenliegende Gebäudebauteile eine Kühlfunktion für das Gebäude bereitzustellen.
- 
- **IEA ECBCS, ANNEX 56 "ENERGY AND GHG OPTIMISED BUILDING RENOVATION"** F+E 1.2
- |          |                        |          |           |
|----------|------------------------|----------|-----------|
| Lead:    | econcept AG            | Funding: | BFE       |
| Contact: | walter.ott@econcept.ch | Period:  | 2010–2014 |
- Abstract: Die Vorbereitungsphase bis Juni 2011 besteht in der Konzeption der methodologie für Subtask A.
- 
- **IEA SHC TASK 37: 200PLUS - GUTE LÖSUNGEN IM FASSADENBREICH** F+E 1.2
- |          |             |          |           |
|----------|-------------|----------|-----------|
| Lead:    | amena ag    | Funding: | BFE       |
| Contact: | ag@amena.ch | Period:  | 2006–2011 |
- Abstract: Bei jeder Fassadenisolation im Sanierungsbereich mit Dämmstärken von 20 cm oder mehr stellen sich immer die gleichen "Anschlussprobleme". Ziel dieses Projekts ist es gute "Standard-Detaillösungen" mit bewährten, marktgängigen Produkten zu untersuchen und zu dokumentieren.

- IEA-TASK 41 "SOLAR ENERGY AND ARCHITECTURE"**

F+E 1.2

Lead:	HSLU Technik + Architektur , SUPSI	Funding:	BFE
Contact:	doris.ehrbar@hslu.ch	Period:	2009–2012

Abstract: Im Rahmen der IEA SHC Task 41 werden Prozesse und Hilfsmittel für Architekten im frühen Entwurfsstadium untersucht, mit dem Ziel, die Integration von solaren Strategien zu fördern.
- INSPIRE – INTEGRATED STRATEGIES AND POLICY INSTRUMENTS FOR RETROFITTING BUILDINGS TO REDUCE PRIMARY ENERGY USE UND GHG EMISSIONS**

F+E 1.2

Lead:	TEP Energy / econsult	Funding:	BFE
Contact:	martin.jakob@tep-energy.ch	Period:	2010–2013

Abstract: Die Ziele des Projekts sind Berechnung und Darstellung der spezifischen Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten und der CO<sub>2</sub>-Vermeidungspotenziale für einzelne repräsentative Gebäudetypen und Erneuerungssituationen, sowie das Erarbeiten von kosten- und nutzenoptimalen Strategien und Lösungspfaden, welche zu Leitlinien und Entscheidungsgrundlagen aufbereitet werden.
- INTEGRATED MULTIFUNCTIONAL GLAZING FOR DYNAMICAL DAYLIGHTING**

F+E 1.2

Lead:	EPFL/ENAC/ICARE/LESO-PBX	Funding:	BFE
Contact:	andreas.schueler@epfl.ch	Period:	2009–2012

Abstract: In this project, a novel integrated concept and the development of advanced glazing for dynamical daylighting are studied. The novel glazing will combine the functions of daylighting, glare protection, overheating protection in summer and thermal insulation in winter.
- INTERNETBASIERTES SYSTEM ZUR ENERGETISCHEN OPTIMIERUNG DER HAUSTECHNIK MIT FUNKTECHNOLOGIE IM ALTBAUBESTAND**

F+E 1.2

Lead:	Huber Energietechnik	Funding:	BFE
Contact:	michael.woodtli@hetag.ch	Period:	2009–2011

Abstract: In diesem Projekt soll ein internetbasiertes System entwickelt werden, das den Bewohnern ermöglicht, ihre Präsenzzeiten und die Sollwerte für die Raumtemperatur auf einer einfach zu bedienenden Webseite einzutragen. Das System soll keine Softwareinstallation voraussetzen, die Bedienung soll in einem Web Browser (z. B. Internet Explorer, Firefox etc.) erfolgen.
- JAHRESBEITRÄGE IEA : AIC U. EXCO ENERGY CONSERVATION IN BUILDINGS & COMMUNITY SYSTEMS**

F+E 1.2

Lead:	Oscar Faber Group UK Egin. Ltd, St Albans Herts	Funding:	BFE
Contact:	andreas.eckmanns@bfe.admin.ch	Period:	1989–2011

Abstract: Jahresbeiträge IEA : AIC u. ExCo Energy Conservation in Buildings & Community Systems
- KRAFTWERK HAUS IM LÄNDLICHEN RAUM**

F+E 1.2

Lead:	Ökozentrum Langenbruck / FHNW	Funding:	BFE
Contact:	michael.sattler@oekozentrum.ch	Period:	2009–2012

Abstract: Das Projekt Kraftwerk Haus im ländlichen Raum - Umsetzung von Biomasse Wärme-Kraft-Anlagen und Strom-Lastmanagement hat zum Ziel, den ersten Schritt in der sukzessiven Transformation des Gebäudes vom reinen Energiebezüger zum Energielieferanten, zum Kraftwerk Haus, in der Praxis zu erproben und zu erforschen.
- MEHRFAMILIENHAUS MIT ELEKTROMOBILITÄT IN RUPPERSWIL AG**

F+E 1.2

Lead:	FHNW	Funding:	BFE
Contact:	monika.hall@fhnw.ch	Period:	2011–2014

Abstract: Beschrieb von erfolgreichen Massnahmen zur Verbrauchsreduktion bei der Mieterschaft, insbesondere Anreizmodelle durch Verbrauchsinformation und detaillierte Energieabrechnung. Aufzeigen von rechtl. Einflüssen und Hindernissen bei der Bewirtschaftung von vermieteten MFH. Untersuchung zur Einbindung des Elektroautos in das System "Gebäude"

- **METHODIK ZUR UMSETZUNG VON SOLAREN STRATEGIEN IN DER ARCHITEKTUR** F+E 1.2
- |          |   |          |           |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead:    | Hochschule für Technik und Arc  | Funding: | BFE       |
| Contact: | Ehrbar Doris <a href="mailto:doris.ehrbar@hslu.ch">doris.ehrbar@hslu.ch</a> | Period:  | 2009–2011 |
- Abstract: Das Projekt untersucht anhand von zwei Fallstudien das Potential von aktiv- und passivsolaren Stragien für die Sanierung von Siedlungen und den Ersatzneubau im urbanen Kontext.
- **MONTE ROSA-HÜTTE: INTEGRIERTE HAUSSYSTEME FÜR OPTIMALE ENERGIE- UND STOFFBEWIRTSCHAFTUNG** P+D 1.2
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | ETHZ IMRT  | Funding: | BFE       |
| Contact: | Guzzella Lino <a href="mailto:lguzzella@ethz.ch">lguzzella@ethz.ch</a> | Period:  | 2009–2012 |
- Abstract: Das Ziel dieses Projektes ist darum die Entwicklung neuer Algorithmen für das optimale Management von Energie- und Stoffflüssen in Gebäuden. Die Neue Monte Rosa-Hütte wird als Demonstrationsobjekt verwendet, wobei das Hauptziel eine möglichst hohe Energieautarkie ist.
- **NACHHALTIGE ERNEUERUNG HISTORISCH WERTVOLLER BAUTEN** F+E 1.2
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | Empa Building Technologies / BFH   | Funding: | BFE       |
| Contact: | Carmeliet Jan <a href="mailto:Jan.Carmeliet@empa.ch">Jan.Carmeliet@empa.ch</a> | Period:  | 2009–2012 |
- Abstract: The aim of this project is to evaluate and to further develop sustainable renovation technologies for historical buildings (end 19th – beginning 20th century).
- **NACHHALTIGE MODERNISIERUNG EINES TYPISCHEN SCHWEIZER MEHRFAMILIENHAUSES DER 1950ER JAHRE** P+D 1.2
- |          |   |          |           |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead:    | Kämpfen Architektur   | Funding: | BFE       |
| Contact: | Kämpfen Beat <a href="mailto:beat@kaempfen.com">beat@kaempfen.com</a> | Period:  | 2009–2011 |
- Abstract: The purpose is to test prefabricated elements for building retrofit in an appartement house of the 1950's.
- **NULLENERGIE-GEBÄUDE - DIE NÄCHSTE GENERATION ENERGIEEFFIZIENTER BAUTEN (IEA ECBCS ANNEX 52 / IEA SHC TASK 40)** F+E 1.2
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | Fachhochschule Nordwestschweiz   | Funding: | BFE       |
| Contact: | Hall Monika <a href="mailto:monika.hall@fhnw.ch">monika.hall@fhnw.ch</a> | Period:  | 2009–2013 |
- Abstract: Ziel des Projektes ist es einen Standard für Nullenergie- Gebäude festzulegen. Da der Begriff Nullenergie-Gebäude momentan nicht klar definiert ist, müssen eindeutige Definitionen, Anforderungen und Systemgrenzen erarbeitet werden. Optimierung der Gebäudehülle und -technik gehen damit einher.
- **OPEN ABSORPTION SYSTEM FOR AIR CONDITIONING USING MEMBRANE CONTACTORS** F+E 1.2
- |          |   |          |           |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead:    | CONDE ENGINEERING   | Funding: | BFE       |
| Contact: | Conde-Petit Manuel <a href="mailto:mconde.petit@mrc-eng.com">mconde.petit@mrc-eng.com</a> | Period:  | 2010–2012 |
- Abstract: The objectives of Phase II of the MemProDEC Project are to demonstrate that an open absorption system combined with indirect evaporative cooling and limited chemical storage, can be advantagegely operated as an autonomous Air Handling Unit without need of any other refrigeration system.
- **OUTIL INFORMATIQUE DE CONCEPTION ET VISUALISATION DE SYSTÈMES D'ECLAIRAGE NATU-REL** F+E 1.2
- |          |   |          |           |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead:    | EPFL/ENAC/ICARE/LESO-PBX  | Funding: | BFE       |
| Contact: | Scartezzini Jean-Louis <a href="mailto:jean-louis.scartezzini@epfl.ch">jean-louis.scartezzini@epfl.ch</a> | Period:  | 2009–2011 |
- Abstract: Le projet vise à tirer profit d'un goniophotomètre bidirectionnel à imagerie numérique permettant de caractériser les propriétés bidirectionnelles de transmission lumineuse (Bidirectional Transmission Density Function) de ces systèmes.

- **PARAMETERUNTERSUCHUNG DES SOMMERLICHEN RAUMKLIMAS VON WOHNGEBÄUDEN IN HOLZBAUWEISE** F+E 1.2

Lead: Berner Fachhochschule	Funding: BFE
Contact: Müller Andreas <a href="mailto:andreas.mueller@bfh.ch">andreas.mueller@bfh.ch</a>	Period: 2009–2011

Abstract: Für Holzbauten mit ihren mittlerweile sehr unterschiedlichen Bauweisen (u. a. Holzrahmen-, Holzmassiv- und Holzbetonverbundbau) liegen nur vereinzelte Erkenntnisse zum sommerlichen Komfortklima vor. Diese Lücke zu schliessen, ist besonders von Bedeutung, da viele Minergie und Minergie P-Bauten in Holz errichtet werden.
- **PRAXISTEST LUFTDICHTIGKEITS-MESSUNGEN BEI MINERGIE-P-BAUTEN** F+E 1.2

Lead: HSLU-ZIG	Funding: BFE
Contact: Notter Gregor <a href="mailto:gregor.notter@hslu.ch">gregor.notter@hslu.ch</a>	Period: 2009–2010

Abstract: Damit die geforderten Grenzwerte betreffend Luftdichtigkeit begründet werden können und auch die die Messwerte beeinflussenden Faktoren bekannt sind, soll in einer Studie durch Recherche, Gespräche mit Fachleuten und durch eigene Messungen mehr Klarheit geschaffen werden.
- **PREFABRICATED RETROFIT OF BUILDINGS/ VORBEREITUNG IEA ECBCS ANNEX 50** F+E 1.2

Lead: EMPA Abt. 118 Bautechnologie	Funding: BFE
Contact: Zimmermann Markus <a href="mailto:mark.zimmermann@empa.ch">mark.zimmermann@empa.ch</a>	Period: 2006–2011

Abstract: Das Projekt entwickelt neue Lösungen für die Wohnbauerneuerung auf der Basis standardisierter Renovations-module, welche auf ein gesamtheitliches Renovationskonzept abgestimmt sind. Das Ziel sind Bauerneuerungen, die dem Stand von Neubauten entsprechen und energetisch mindestens den Minergie-Standard erreichen.
- **PRÉVISION ET JUSTIFICATION DES CONSOMMATIONS D'ÉLECTRICITÉ POUR 3 CATÉGORIES DE BÂTIMENT** F+E 1.2

Lead: Weinmann Energies SA	Funding: BFE
Contact: Wegmueller Francine <a href="mailto:francine.wegmueller@weinmann-energies.ch">francine.wegmueller@weinmann-energies.ch</a>	Period: 2008–2011

Abstract: Les travaux de recherche entrepris visent à comprendre la consommation d'électricité d'un bâtiment et de développer une méthode d'analyse simplifiée à partir des informations figurant sur la facture d'électricité.
- **PROJEKTWETTBEWERB ENERGIEEFFIZIENTES FENSTERBEZOGENES EINZELRAUMLÜFTUNGSGERÄT** F+E 1.2

Lead: haessig sustech	Funding: BFE
Contact: Werner Haessig <a href="mailto:haessig@sustech.ch">haessig@sustech.ch</a>	Period: 2011–2012

Abstract: In der Fensterbranche soll ein Impuls zur Lösung des Lüftungsproblems beim Fensterersatz ausgelöst, Prototypen für die Fensterlüftung mit WRG sollen im Rahmen eines Projektwettbewerbs erstellt und Kooperationen zwischen Fensterbauern und Lüftungsfirmen initiiert werden.
- **RENO\_HP: INSTALLATION TECHNIQUE DÉCENTRALISÉE POUR LA RÉNOVATION À HAUTE PERFORMANCE DE BÂTIMENT** P+D 1.2

Lead: HEIG-VD LESBAT	Funding: BFE
Contact: Citherlet Stéphane <a href="mailto:stephane.citherlet@heig-vd.ch">stephane.citherlet@heig-vd.ch</a>	Period: 2010–2011

Abstract: Ce projet vise à effectuer différentes mesures durant une année sur un bâtiment d'habitation rénové Minergie-P. Les performances d'un système compact, intégré et décentralisé pour la distribution de la ventilation et de l'eau chaude pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire est analysée.
- **RÉNOVATION À FAIBLES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DANS LE DOMAINE DE L'HABITATION (ECO-RENO)** F+E 1.2

Lead: HEIG-VD LESBAT	Funding: BFE
Contact: Citherlet Stéphane <a href="mailto:stephane.citherlet@heig-vd.ch">stephane.citherlet@heig-vd.ch</a>	Period: 2011–2014

Abstract: Ce projet vise à promouvoir la rénovation à hautes performances environnementales en ne tenant pas uniquement compte de l'énergie consommée, mais en ayant une vision plus globale en utilisant une approche par écobilan. Cette approche permet d'avoir une vision globale des impacts environnementaux d'un bâtiment rénové en tenant compte de l'énergie consommée, des matériaux de construction utilisés des installations techniques.

**● RENOVE RÉNOVATION DES BÂTIMENTS: ASPECTS ÉNERGÉTIQUES ET ÉCONOMIQUES** F+E 1.2

Lead: Ecole d'Ingénieurs du Valais

Funding: BFE

 Contact: Bonvin Michel [michel.bonvin@hevs.ch](mailto:michel.bonvin@hevs.ch)

Period: 2009–2011

Abstract: renovE consistera en un outil de communication accessible depuis n'importe quel navigateur Web et visant à motiver le grand public à entreprendre une rénovation énergétique de sa maison. Après une évaluation de l'état actuel du bâtiment au moyen d'un questionnaire dynamique clair et ludique, des améliorations énergétiques seront proposées de même que les investissements nécessaires correspondant.

**● SANIERUNG DER FASSADE DES DENKMALGESCHÜTZTEN MEHRFAMILIENHAUSES AUS DEM JAHR 1877 MIT VERPUTZTER AEROGEL-HOCHLEISTUNGSWÄRMEDÄMMUNG** F+E 1.2

Lead: Architekturbüro Vera Gloor AG

Funding: BFE

 Contact: Wenger Martin [wenger@veragloor.ch](mailto:wenger@veragloor.ch)

Period: 2010–2012

Abstract: Die Energiebilanz des denkmalgeschützten Gebäudes aus dem Jahr 1877 konnte dank der verputzten Aerogel-Hochleistungswärmedämmung unter Wahrung des Erscheinungsbildes stark verbessert werden.

**● SOLARE PLUS-ENERGIE SANIERUNG** F+E 1.2

Lead: Karin und Martin Stahl

Funding: BFE

 Contact: Peter Dransfeld [dransfeld@dransfeld.ch](mailto:dransfeld@dransfeld.ch)

Period: 2011–2013

Abstract: Sanierung eines EFH von 1963 als bilanziertes Plus-Energiehaus unter Berücksichtigung des Haushaltsstromes, der Grauen Energie, und der Mobilität gem. SIA 2040

**● STORES INTELLIGENTS: GESTION PIÈCE PAR PIÈCE DES STORES ÉLECTRIQUES** F+E 1.2

Lead: HES-SO Valais

Funding: BFE

 Contact: Bützberger Fariba [Fariba.Moghaddam@hevs.ch](mailto:Fariba.Moghaddam@hevs.ch)

Period: 2009–2011

Abstract: Le but du projet est d'optimiser la consommation d'énergie de chauffage ou de climatisation des bâtiments, en profitant au mieux des apports naturels par un pilotage intelligent des stores électriques.

**● SWISSWOODHOUSE - EIN GEBÄUDE FÜR DIE 2000-WATT-GESELLSCHAFT** P+D 1.2

Lead: Renggli AG

Funding: BFE

 Contact: Renggli Max [max.renggli@renggli-haus.ch](mailto:max.renggli@renggli-haus.ch)

Period: 2009–2012

Abstract: Das Pilotprojekt swisswoodhouse soll 1 zu 1 die Umsetzbarkeit der 2000-Watt-Gesellschaft im Gebäudebereich aufzeigen. Swisswoodhouse ist ein mehrgeschossiges Gebäude, welches an zukünftige Wohnformen angepasst werden kann. Es vereint verschiedene Materialien wie Holz, Stahl und Beton um damit das beste Material für die jeweilige Aufgabe einzusetzen.

**● SYSTEMNACHWEIS MINERGIE ECO 2001** F+E 1.2

Lead: Intep/E4Tech

Funding: BFE

 Contact: Kelleneberger Daniel [kelleneberger@intep.com](mailto:kelleneberger@intep.com)

Period: 2010–2011

Abstract: Die heute vorhandenen Produkte der erweiterten Erprobungsphase bestehen aus einem aktualisierten Tageslichterfüllungstool für Neubauten und Modernisierungen, dem Vorgehen zur Bestimmung der Pauschalgrenzwerte, aus einer überarbeiteten Fragen- und Anforderungsliste für den Schallschutz, aus einem Entwurf für die Ergänzung und Überarbeitung des Vorgabenkatalogs, aus einer überarbeiteten Bewertungsmatrix mit dazugehöriger Resultatdarstellung und aus einem überarbeiteten Nachweisinstrument.

**● UMNUTZUNG VON HEIZÖLTANKS ZU NIEDERTEMPÉRATURSPRICHERN FÜR DIE SOLAROTHERMISCHE ENERGIENUTZUNG IN GEBÄUDEN** F+E 1.2

Lead: Spörri Schmitter Architekten / HSR-SPF

Funding: BFE

 Contact: Spörri M. [m.spoerri@spoerri-schmitter.ch](mailto:m.spoerri@spoerri-schmitter.ch)

Period: 2010–2011

Abstract: Bei Renovation oder Umbau von Gebäuden mit Ölheizung, bei welchen diese durch ein anderes Heizsystem ersetzt werden soll, besteht die Optionen den Heizöltank als Wärmespeicher in das neue zu integrieren.

● **URBAN CLIMATE AND ENERGY DEMAND IN BUILDINGS** F+E 1.2

Lead:	EMPA Abt. 118 Building Technol	Funding:	BFE
Contact:	Dorer Viktor <a href="mailto:viktor.dorer@empa.ch">viktor.dorer@empa.ch</a>	Period:	2009–2012
Abstract:	The project deals with the modelling of urban microclimate in street canyons and urban neighbourhoods taking into account combined effects of wind and solar radiation.		

● **VAKUUMDÄMMUNG IM BAUBEREICH - DEKLARATION UND AUSLEGUNG** F+E 1.2

Lead:	Dr. Eicher + Pauli AG	Funding:	BFE
Contact:	Erb Markus <a href="mailto:markus.erb@eicher-pauli.ch">markus.erb@eicher-pauli.ch</a>	Period:	2007–2011
Abstract:	Mit diesem Projekt wird der Einsatz von Vakuum-Paneelen (VIP) im Baubereich auf ein sicheres Fundament gestellt.		

● **VAKUUMDÄMMUNG IN FASSADENANWENDUNGEN - MESSTECHNISCHE BEGLEITUNG UND LEISTUNGSUNTERSUCHUNG** F+E 1.2

Lead:	EMPA Abt. 118 Building Technol	Funding:	BFE
Contact:	Ghazi Wakili K. <a href="mailto:karim.ghazivakili@empa.ch">karim.ghazivakili@empa.ch</a>	Period:	2008–2011
Abstract:	Vakuumdämmung in Fassadenanwendungen - messtechnische Begleitung und Leistungsuntersuchung		

● **VERTRETUNG DES BUNDESAMTS FÜR ENERGIE IM ERA-NET ERACOBUILD** F+E 1.2

Lead:	Basler & Hofmann AG	Funding:	BFE
Contact:	Eric Langensjöld <a href="mailto:Eric.Langenskiold@baslerhofmann.ch">Eric.Langenskiold@baslerhofmann.ch</a>	Period:	2008–2011
Abstract:	Vertretung des Bundesamts für Energie im ERA-Net Eracobuild		

Martin Pulfer

# Verkehr & Akkumulatoren



**Titelbild:****AHEAD - Advanced Hybrid Electric Autobus Design**

Das Projekt ist eine Kooperation von HESS AG (Bellach, Solothurn) und ETH Zürich finanziert durch die KTI. Für eine neue Generation von Hybridbussen der Carrosserie Hess AG werden mit systemtheoretischen Methoden die Effizienz, die Kosten und die Lebensdauer dieser Antriebssysteme optimiert. Mit Hilfe von mathematischen Modellen und Optimierungsverfahren werden die Komponenten auf die Kundenbedürfnisse ausgelegt. Weiter werden für den Betrieb verbrauchsminimale Fahrstrategien berechnet, welche sowohl die Betriebskosten als auch die Umweltbelastung reduzieren ([http://www.idsc.ethz.ch/Research\\_Guzzella/Automotive\\_Applications/Hybrid\\_Powertrains/AHEAD](http://www.idsc.ethz.ch/Research_Guzzella/Automotive_Applications/Hybrid_Powertrains/AHEAD)).

**Eine ausführliche Darstellung der Aktivitäten und Forschungsprojekte in den Forschungsprogrammen Verkehr und Akkumulatoren findet sich auf den Webseiten [www.bfe.admin.ch/forschungakkumulatoren](http://www.bfe.admin.ch/forschungakkumulatoren) und [www.bfe.admin.ch/forschungsverkehr](http://www.bfe.admin.ch/forschungsverkehr).**

**BFE Forschungsprogramm Verkehr & Akkumulatoren**

Überblicksbericht 2011

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
CH-3003 Bern

**Programmleiter BFE (Autor):**

Martin Pulfer, Bundesamt für Energie ([martin.pulfer@bfe.admin.ch](mailto:martin.pulfer@bfe.admin.ch))

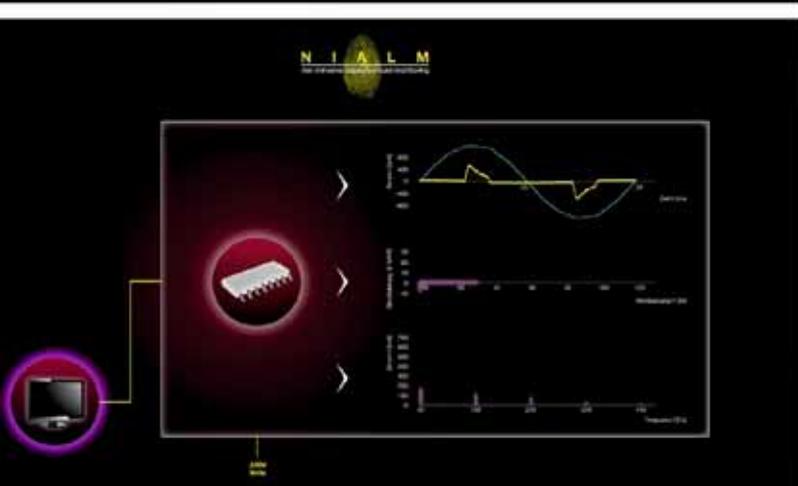
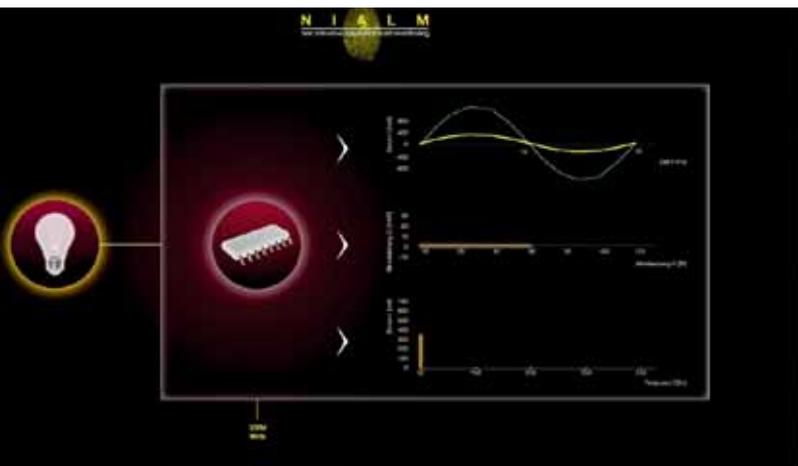
**Bereichsleiter BFE:**

Martin Pulfer ([martin.pulfer@bfe.admin.ch](mailto:martin.pulfer@bfe.admin.ch))

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

Roland Brüniger

# Elektrizitätstechnologien und -anwendungen



## **Titelbild:**

### **Testaufbau mit LoReMa-Steckdose/NIALM-Applikation und drei Verbrauchern (Ventilator, Glühlampe, Bildschirm)**

Im Projekt «LoReMa» (Load Recognizing Meter and Actor) wird der Stromverbrauch eines Verbrauchers durch dezentrale Aktoren erfasst. Um den Installationsaufwand und die erforderliche Anzahl Messpunkte in einem Haushalt zu minimieren, kann ergänzend mit einer intelligenten NIALM-Applikation der Stromverbrauch jedes einzelnen Gerätes in einem Haushalt identifiziert werden, ohne jedes Gerät einzeln messen zu müssen. NIALM steht für «Non-intrusive Appliance Load Monitoring» und bedeutet, dass mit einer Gesamtmessung aufgrund der einzigartigen elektr. Eigenschaften einzelner Geräte (speziell bezüglich Strom-, Spannungs- und Leistungsverlauf beim Ein-/Ausschalten) der gemessene Gesamtstromverbrauch auf die Verbraucher aufgeteilt und damit der Verbrauch jedes Gerätes mit lediglich einer Gesamtmessung bestimmt werden kann. Im Bild oben wird die Glühlampe und unten der Monitor durch den NIALM-Algorithmus identifiziert.

## **BFE Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien und -anwendungen**

Überblicksbericht 2011

### **Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
CH-3003 Bern

### **Programmleiter BFE (Autor):**

Roland Brüniger, R. Brüniger AG (roland.brueiniger@r-brueniger-ag.ch)

### **Bereichsleiter BFE:**

Dr. Michael Moser (michael.moser@bfe.admin.ch)

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

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

## Einleitung

Das Jahr 2011 darf aufgrund der dramatischen internationalen Ereignisse als wegweisend für die energetische Zukunft der Schweiz eingestuft werden. Ausgelöst durch die tragischen Ereignisse in Japan hat der Bundesrat am 25. Mai 2011 den stufenweisen Kernenergieausstieg initiiert, womit langfristig ca. 40 % der bisherigen Stromproduktion wegfallen. Dadurch wird auch die gesamte Energiepolitik neu ausgerichtet und die zukünftigen Forschungsaktivitäten dürften ebenfalls erheblich beeinflusst werden.

Im Gegensatz zu 2009, wo der Stromverbrauch gegenüber dem Vorjahr um 2,1 % sank, stieg er 2010 gegenüber 2009 erneut um 4 % an. Diese Tendenz entspricht – wie ein längerfristiger Rückblick der schweizerischen Elektrizitätsstatistik zeigt – dem grundsätzlich ungebrochenen Wachstumstrend, stieg doch der Verbrauch von etwa 52 TWh im Jahr 2000 auf knapp 60 TWh im Jahr 2010.

Im Jahr 2010 wurden in der Schweiz erstmals Verbrauchsvorschriften für Elektrogeräte erlassen. Dieser regulatorische Schritt ging weitgehend mit den seit einiger Zeit erlassenen EU-Vorschriften einher und stellt den Anfang eines andauernden Prozesses dar. Denn bereits per Januar 2012 erfolgte nach zwei Jahren eine erste Verschärfung der Verbrauchsvorschriften für Elektrogeräte. Weitere Schritte dürften sukzessive mit dem Fortschritt der technischen Möglichkeiten folgen.

Neben regulatorischen Massnahmen und diversen, in der Schweiz bestehenden und in Vorbereitung stehenden Anreiz- und Förderinstrumenten für die Erhöhung der Effizienz, sind auch verstärkte Anstrengungen in der For-

schung Richtung neue und effiziente Technologien unabdingbar. Erst die Verfügbarkeit von effizienten Technologien erlaubt dem Regulator wiederum, verschärfende Gesetzgebungen umzusetzen oder entsprechende Fördermassnahmen zu lancieren.

Gerade im Hinblick auf die enormen zukünftigen Herausforderungen ist es entscheidend, mit den verfügbaren finanziellen Mitteln in denjenigen Bereichen zu forschen, in denen das grösste Effizienzpotenzial steckt. Diesbezügliche Vorabklärungen und Grundlagenstudien sind deshalb wichtig, um die Forschungsanstrengungen möglichst zielgerichtet und ergebnisorientiert ausrichten zu können. Um diese Ausrichtung kontinuierlich prüfen und gegebenenfalls justieren zu können, hat die Programmleitung in relevanten Fachbereichen sogenannte Trendwatching-Gruppen etabliert, die sich aus anerkannten Fachpersonen aus Wirtschaft, Forschung, Hochschulen und vereinzelt auch Investoren zusammensetzen. In periodischen Treffen werden nationale und internationale Aktivitäten und Trends diskutiert und relevante Erkenntnisse fliessen soweit möglich und zweckmässig in zukünftige Forschungsaktivitäten mit ein. 2011 wurde einerseits die Trendwatching-Gruppe «Energieeffizienz durch Informations- und Kommunikationstechnik» neu ausgerichtet. Andererseits wurde aufgrund der in der Schweiz verstärkten Aktivitäten eine neue Trendwatching-Gruppe im Technologiebereich «Thermoelektrik» aufgebaut. Das erste Treffen wurde im Dezember 2011 durchgeführt, das ein hohes Interesse bei den eingeladenen Mitgliedern fand und zu interessanten Impulsen führte.

IEA Klassifikation:	1.1 Industry, 1.2 Residential and commercial, 6.1 Electric power conversion, 6.3 Energy storage
Schweizer Klassifikation:	1.4 Elektrizitätstechnologien und -anwendungen

## Programmschwerpunkte

Mit der Thermoelektrik kann Nieder-temperaturwärme direkt in Elektrizität umgewandelt werden. Da damit insbesondere die bei vielen Prozessen anfallende Abwärme in nutzbare Energie gewandelt werden kann, stellt die Thermoelektrizität einen wesentlichen Schwerpunkt im Programmbereich «Energiekonversion» dar.

Mit der magnetokalorischen Konversion und vor allem mit der Entdeckung des sogenannten «Giant Magnetocaloric Effect» Ende der 90-iger Jahre, wurden Hoffnungen auf eine effiziente, neuartige Kühltechnik geweckt. Diverse Untersuchungen haben aber zwischenzeitlich aufgezeigt, dass derzeit kein erhebliches Einsparpotenzial erschlossen werden kann. Der entsprechende Schwerpunkt entfällt deshalb.

Da dank der Hochtemperatursupraleitung Motoren, Generatoren, Kabel, etc. effizienter betrieben werden können, werden die entsprechenden internationalen Aktivitäten beobachtet und in spezifischen Anwendungen geprüft. Die Druckluftspeicherung als mögliche, effiziente Speichertechnologie wird noch weiter untersucht.

Motoren stellen die grösste Verbraucherkategorie dar. Gemeinsam mit der einschlägigen Industrie werden deshalb in diversen Anwendungsgebieten Optimierungen erforscht. Da bei motorischen Anwendungen der Einsatz von Umrichtern oft die Effizienz steigert, sind diese verstärkt in die Forschungsaktivitäten einbezogen. Haushaltsgeräte machen ebenfalls einen relevanten

Verbrauchsanteil aus, weshalb in diesem Bereich neuartige Technologien erforscht und Optimierungsarbeiten durchgeführt werden. Die Vakuum-Isolation stellt dazu beispielsweise eine Erfolg versprechende Einspartechnologie dar.

Durch die unvermindert rasant fortschreitende Technologieentwicklung werden im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik Grundlagen und Erkenntnisse bezüglich dem Thema Smart Metering und Smart Home bearbeitet. Schliesslich werden durch Fortführung der internationalen Aktivitäten im Rahmen des Implementing Agreements Energy Efficient End Use Equipment (4E) der Internationalen Energieagentur (IEA) neues und bestehendes Wissen zur Energieeffizienz aufbereitet und verbreitet.

### Rückblick und Bewertung 2011

Mit dem Aufbau der Trendwatching-Gruppe «Thermoelektrik» konnte ein reger Informationsaustausch zwischen Interessierten gestartet werden. Leider verzögerten sich die Arbeiten des isothermen Druckluftspeichers an der EPFL erneut und erste Ergebnisse sind erst im 2012 zu erwarten.

Die Resultate mehrerer Projekte im Bereich der Vakuum-Isolationstechnik sind sehr Erfolg versprechend, weshalb speziell für wärmeisolierende Geräte wie Boiler oder Kühlschränke fortführende Projekte initiiert wurden. Erfreulich ist ferner, dass aufgrund früherer

Forschungsarbeiten im Zusammenhang mit Elektroheizungen einerseits Graubünden im revidierten Energiegesetz die Fernein- und ausschaltung von Boiler/Heizung für Zweitwohnungen regulativ fordert und andererseits topten [1] energieeffiziente Fernsteuerungen für die Schaltung von Boiler und Heizung aufgenommen hat.

Im Bereich Motoren hat eine breit angelegte Studie gezeigt, dass sich mit dem Ausrüsten von Motoren mit Umrichtern im Netz keine nachteiligen Auswirkungen bezüglich Oberwellen und Verluste ergeben. Mit dem erfolgreichen Abschluss des Pumpenchecks steht ferner ein Instrument für die Identifikation des Einsparpotenzials bei Pumpen zur Verfügung.

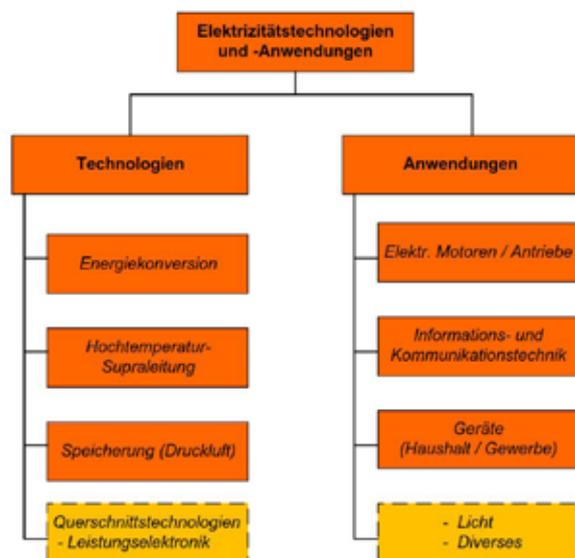
### Ausblick

Basierend auf den Ergebnissen der Eidgenössischen Energieforschungskonferenz Ende 2011 [2] und unter Einbezug der neuen Energiepolitik ist beabsichtigt, 2012 für das Programm ein strategisches Forschungskonzept für die kommenden vier Jahre auszuarbeiten. Der Abwärmennutzung wird auch zukünftig grosse Bedeutung beigemessen und die laufenden Projekte werden wesentliche Beiträge liefern können.

Auch die Trendwatching-Gruppe «Thermoelektrik» wird durch den Einbezug aller relevanten schweizerischen Interessensvertreter und laufenden Aktivitäten gefestigt.

Schliesslich wird erwartet, dass im Jahr 2012 ausreichende Erkenntnisse für die Einschätzung der isothermen Druckluftspeicherung vorliegen.

Nachdem spezifische Erkenntnisse der zukunftsorientierten Vakuumisolation für effiziente Kaffeemaschinen aus dem Jahr 2011 in die Marktumsetzung übergeführt wurden, sollten 2012 konkrete Ergebnisse für weitere Geräte (Boiler, Kühlschränke, etc.) vorliegen. Es bleibt abzuwarten, ob diese zu vertiefen sind, oder ob sie zur Marktumsetzung ausreichen. Der Ersatz von Elektroheizungen stellt noch lange ein erhebliches Einsparpotenzial dar. Mit einer geräuscharmen Einzelraumwärmepumpe wird eine Alternative erforscht und 2012 sollte ein entsprechender Prototyp vorliegen.



## Highlights aus Forschung und Entwicklung

### Energieeffizienz von und durch Informations- und Kommunikationstechnik

Das Bundesamt für Energie hat 1993 die ETH Zürich mit dem Aufbau und Führen des Kompetenzzentrums Energie und Informations- und Kommunikationstechnik beauftragt [3]. Der Schwerpunkt wurde auf das Sammeln, Aufbereiten und Verbreiten von relevanten Informationen im In- und Ausland gelegt. Daneben wurden umsetzungsorientierte Forschungsthemen analysiert und Forschungsprojekte evaluiert, konzipiert und teilweise selbst durchgeführt. Ende 2011 endeten die Aktivitäten des Kompetenzzentrums – zumindest in seiner heutigen Form. Personelle Veränderungen an der ETH einerseits und die gestärkte Kompetenz und internationale Vernetzung der Schweizer Akteure der Energieforschung im Bereich Informations- und Kommunikationstechnik andererseits haben das BFE zu diesem Entscheid bewogen. Parallel zur Schliessung des Kompetenzzentrums wurde aber die entsprechende Trendwatching-Gruppe im Jahr 2011 mit hochkarätigen Branchenvertretern erweitert und neu ausgerichtet. Von dieser Gruppe werden zukünftig ein Informationsaustausch aus erster Hand über laufende und geplante Aktivitäten sowie Vorschläge für gemeinsame Forschungsprojekte erwartet.

Die Informations- und Kommunikationstechnik stellt eine von verschiedenen Voraussetzungen für den flächendeckenden Einsatz von «Smart Metering» und «Smart Grids» dar. In einem umfassenden Impact Assessment prüft das BFE die volkswirtschaftlichen Folgen eines Einsatzes von intelligenten Zählern. Parallel dazu laufen mehrere begleitende Forschungsarbeiten. So wurde in Zusammenarbeit mit dem Forschungsprogramm «Netze» bei einem grossen Elektrizitätswerk, das derzeit ein «Smart Metering»-Pilotprojekt durchführt, ein unangekündigter, professioneller Hackerangriff («ethical attack») [4] vorgenommen. Damit konnten einerseits IT-Schwachstellen identifiziert und andererseits eine Sensibilisierung erzielt werden. Auch bei einer flächendeckenden Einführung von Smart Metering muss das Elektrizitätssystem mit höchster Priorität

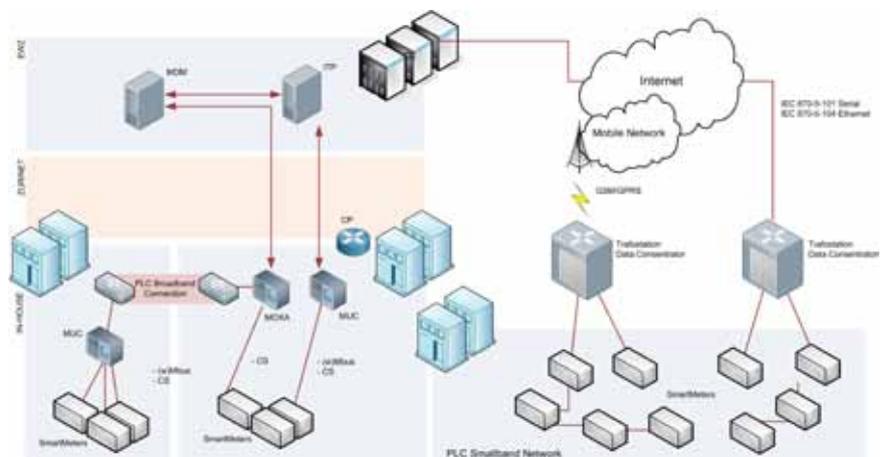
vor Hackerangriffen sicher bleiben.

Die Schweiz und Österreich finanzieren ein gemeinsames Projekt, in dem untersucht wird, wie gross der Eigenverbrauch von Smart Meter ist und mit welchem Zusatzverbrauch durch eine flächendeckende Smart Metering-Infrastruktur in der Schweiz und in Österreich zu rechnen ist. Die entsprechenden Ergebnisse werden 2012 vorliegen. Parallel dazu läuft in der Schweiz ein Forschungsprojekt, in dem neben anderem angestrebt wird, dank neusten Erkenntnissen die Thematik NIALM (Non-intrusive Appliance Load Monitoring) zu erforschen. Eine intelligente NIALM-Applikation soll aufgrund der charakteristischen, einzigartigen Eigenschaften von einzelnen Geräten (speziell bezüglich Strom-, Spannungs- und Leistungsverlauf beim Ein- und Ausschalten) den Gesamtstromverbrauch detailliert auf die einzelnen Verbraucher online aufteilen, und zwar ohne jeden Verbraucher einzeln messen zu müssen. Einen wesentlichen Durchbruch erhofft man sich in diesem seit über 20 Jahren bearbeiteten Forschungsgebiet durch die Tatsache, dass mit der Einführung von geeigneten Smart Meters ausgezeichnete Datengrundlagen in jedem Haushalt zur Verfügung stehen werden und sich die Haushalts-interne Geräteidentifikation dadurch auf die intelligente Auswertung verfügbarer Mess- und Zeitreihen konzentrieren kann. Da beide Themen auch international von Bedeutung sein dürften, entwickelte sich die Idee, diese Thematik

als neuen Annex im 4E Implementing Agreement vorzuschlagen. Auf Initiative der Schweiz und Österreichs wurde deshalb ein entsprechender Vorschlag in das Implementing Agreement 4E eingebracht und erfreulicherweise hat das Executive Committee im Oktober 2011 zugestimmt, dass die beiden Länder zu den Themen «Eigenverbrauch der «Smart Meter»-Infrastruktur und NIALM vertiefte Analysen auf internationaler Ebene durchführen können.

### Effizienz von Industrieräschetrocknern

Aktuelle Haushaltswäschetrockner erreichen Effizienzwerte zwischen 0,2 und 0,25 kWh/kg Trockenwäsche (Kondensationstrockner). Bei den heutigen industriellen Wäschetrocknern mit einer Kapazität von über 20 kg Wäsche pro Trocknungsgang werden diese sehr guten Werte hingegen bei weitem nicht erreicht. Übliche Abluft-Geräte mit Gas-, Strom- oder Dampfbefeuerung liegen bei einer Energieaufnahme über 0,5 kWh/kg. Gerade aber bei diesen grossen Geräten, die normalerweise sehr gut ausgelastet sein müssen, sind die zu erwartenden Energieeinsparungen beträchtlich, denn gemäss groben Abschätzungen werden in der Schweiz täglich zwischen 1'500 und 2'500 Tonnen Wäsche industriell gewaschen, wozu eine Energiemenge von 300 bis 500 GWh pro Jahr, meist in Form von Elektrizität, benötigt wird. Durch eine Technologieverbesserung



Figur 1: Versuchsaufbau und Struktur eines mit Smart Metering ausgerüsteten Verteilnetzes, das unangemeldet professionell gehackt wurde (Quelle: Compass Security AG).

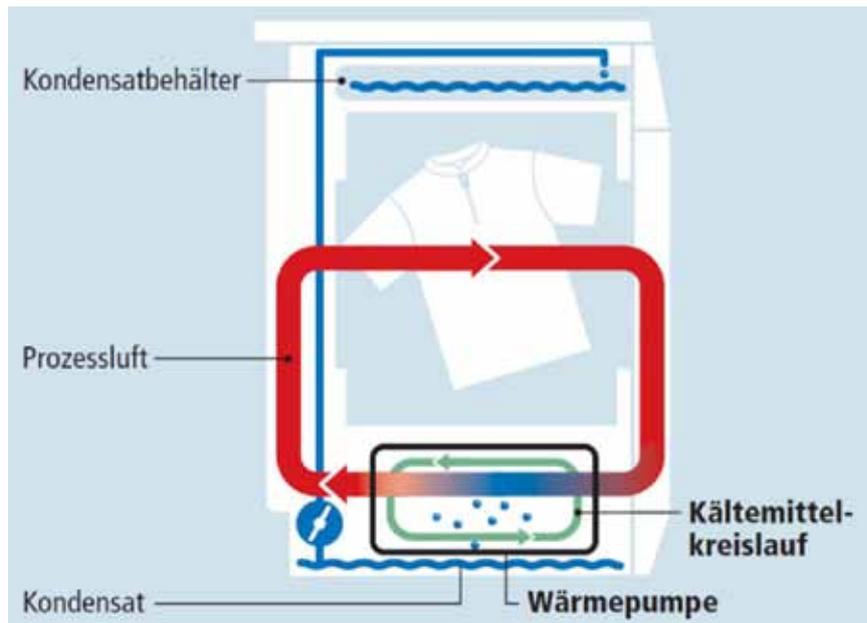


Figur 2: Messvorrichtung für den Eigenverbrauch eines Smart Meters (Quelle: Ecodesign).

analog dem Haushaltsbereich müsste also eine Halbierung des Verbrauchs möglich sein. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass im industriellen Bereich eine kurze Zykluszeit aufgrund der Wirtschaftlichkeit höher zu gewichten ist als bei Haushaltsgeräten und dies dementsprechend bei einer Technologieabklärung zu beachten ist.

Im Rahmen eines breiten Konzeptvergleiches [5] wurde ersichtlich, dass ein Wärmepumpentrocknerkonzept mit einem alternativen Kältemittel für die industrielle Anwendung ein grosses Potenzial aufweist und mit einem wohl beschränkten Entwicklungsaufwand zu einem effizienten und schnellen Industrie-Wäschetrockner umgesetzt werden könnte. Ein Vergleich von unterschiedlichen Kältemitteln hat zudem interessante Alternativen wie CO<sub>2</sub> oder R245fa aufgezeigt. Das heute verwendete Kältemittel R134a verhält sich bei einem grossen Temperaturhub nicht optimal. Deshalb sind die maximale Lufttemperatur und damit auch die Geschwindigkeit stark beschränkt. Ein Kältemittelwechsel z. B. mit CO<sub>2</sub> birgt damit ein erhebliches Potenzial.

Weiter wurde ein einfaches, thermodynamisches Modell erstellt, um die notwendigen Temperaturen für eine Verkürzung der Trocknungszeit abzuschätzen. Es zeigt sich, dass mit einer



Figur 3: Prinzipielle Funktionsweise eines Wärmepumpenwäschetrockners (Quelle: awtec AG für Technologie und Innovation).

Zuluft-Temperaturerhöhung von 70 °C auf 95 °C eine Halbierung der Waschzeit erreicht werden kann.

Die eigentliche Wärmepumpentechnologie ist vorhanden und seit längerem erprobt; das Entwicklungsrisiko ist damit klein und das Energiesparpotenzial beträchtlich. Unter diesen Voraussetzungen sollte es möglich sein, einen Hersteller zu finden, der dieses Konzept umsetzen und auf den Markt bringen kann. Im Jahr 2012 ist deshalb beabsichtigt, entsprechende Kontakte mit der Industrie aufzunehmen und diese für eine Fortführung der Arbeiten zu motivieren.

### Effizienzsteigerung elektrischer Antriebe mit Umrichter

Zur Erhöhung der Energieeffizienz von elektrischen Antriebssystemen werden zunehmend Frequenzumrichter eingesetzt. Diese Umrichter bewirken insbesondere im Teillastbereich ein effizientes Betreiben von elektrischen Motoren, wirken aber aufgrund ihrer Bauweise aufs Verteilnetz zurück. Wie gross diese Auswirkungen sind, falls sich die Anzahl Umrichter am Netz substantiell erhöhen würde, war bis anhin nicht bekannt. Zwar eliminieren Umrichter aus der Sicht des Netzes den Bedarf an Grundschwingungsblindleistung

des angetriebenen Motors, aber sie produzieren Oberschwingungsströme, die ihrerseits wieder Oberschwingungsblindströme verursachen. Der Wirkfaktor  $\cos \phi$  eines Umrichters beträgt damit zwar annähernd 1, der Leistungsfaktor PF hingegen kann abhängig von der Grösse der Oberschwingungsströme weit unter 1 liegen. Die Oberschwingungsströme von Frequenzumrichtern verursachen daher u. a. Verluste im Verteilnetz. In einem spezifischen Projekt [6] wurden diese Netzverluste in der Schweiz abgeschätzt und bewertet, um abzuklären, inwiefern sie von Relevanz sind. Zudem wurden Massnahmen zur Reduktion der Netzverluste aufgezeigt.

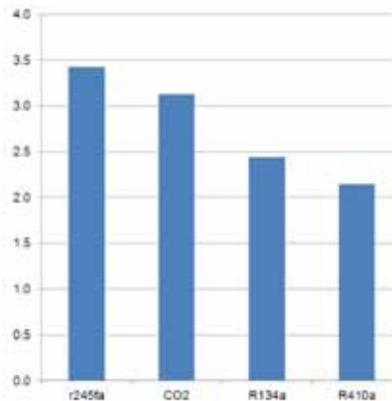
Im Rahmen von zwei Diplomarbeiten an einer Fachhochschule wurden theoretische Abschätzungen, Berechnungen und begleitende Simulationen durchgeführt. Daneben wurden ergänzende Messungen in einer industriellen Umgebung mit einer hohen Anzahl elektrischer Antriebe mit Umrichtern vorgenommen.

Basierend auf statistischen Daten und verschiedenen zusätzlichen Erhebungen kann abgeschätzt werden, dass der elektrische Energieverbrauch durch Motoren mit Frequenzumrichtern in der Schweiz zwischen 3'000 und 6'000 GWh pro Jahr liegt. Unter

Einbezug dieser Schätzung konnte berechnet werden, dass die durch die Oberschwingungsströme verursachten Netzverluste pro Jahr aktuell zwischen 15 GWh und 48 GWh liegen. Obwohl dies durchaus eine respektable Gröszenordnung von Verlusten darstellt, haben weitere Berechnungen gezeigt, dass wenn all diese Motoren ohne Umrichter und ohne Filter direkt am Netz betrieben würden, die Verluste aufgrund der dann vorherrschenden Grundschwingungsblindleistung etwa drei Mal höher ausfallen würden. Da die Grundschwingungsblindleistung von Motoren zu einem grossen Teil kompensiert wird, dürften die Netzverluste, die durch die Grundschwingungsblindleistung und durch die Oberschwingungsblindleistung verursacht werden, in etwa gleich gross sein. Zusammenfassend kann deshalb ausgesagt werden, dass Motoren mit Umrichtern im Vergleich zu Motoren ohne Umrichter keine zusätzlichen Netzverluste verursachen resp. die resultierenden Netzverluste sogar tiefer liegen.

Unabhängig davon ist es zweckmässig, die Entstehung von Oberschwingungen im Verteilnetz zu vermeiden. Im Falle eines Einsatzes von Umrichtern müssten primär die Oberschwingungsströme der 5. und 7. Ordnung gefiltert werden, wogegen dies bei Motoren ohne Umrichter primär die Grundschwingungsblindströme betrifft. Die Reduktion der Oberschwingungsströme von Umrichtern ist zudem nicht nur im Hinblick auf eine Reduktion der Netzverluste anzustreben, sondern liegt auch im Interesse des Endverbrauchers, um die Spannungsqualität des Netzanschlusses nicht zusätzlich zu beeinträchtigen.

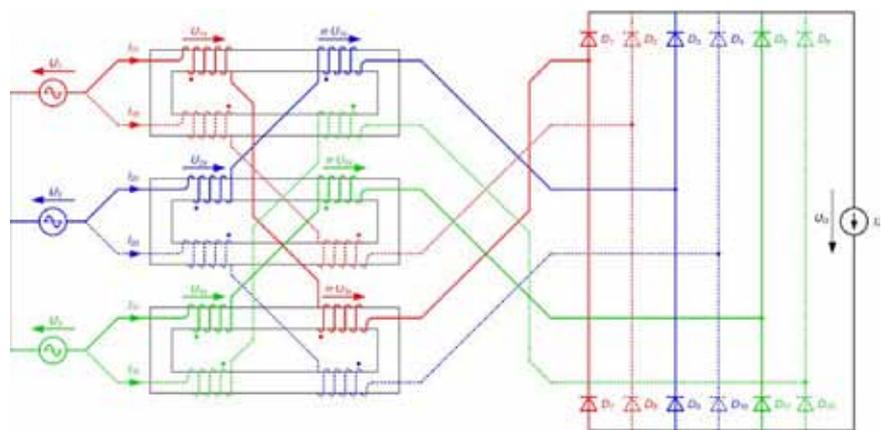
Gerade bei grösseren Leistungen sind für eine saubere Unterdrückung der Oberschwingungen Aktivfilter erforderlich. Diese sind immer noch relativ kostenintensiv und werden deshalb nur bei entsprechendem Bedarf resp. bei erheblichen Blindleistungskosten eingesetzt. Um die prinzipielle Verminderung der Netzverluste bei motorischen Antrieben zu unterstützen, werden in einem Forschungsprojekt neue Technologien für Netzfilter untersucht [7]. Nachdem in einem vorgelagerten Forschungsprojekt alternative Konzepte mit einem Strom-Splitter-



Figur 4: Vergleich der verschiedenen Kältemittel hinsichtlich thermodynamischer Effizienz / Nutzungsziffer (COP) eines Systems zur Erhitzung von Luft von 20 °C auf 90 °C (Quelle: awtec AG für Technologie und Innovation).

Multipuls-Gleichrichter (sogenannte VCSM-Technologie, Vectorial Current Splitter/Merger) entwickelt worden sind, galt es nun, diese zu vertiefen und in einem Prototypen zu prüfen. Die VCSM-Technologie ist deshalb sehr interessant, weil neben tieferen Kosten ein und dieselbe Komponente sowohl im Gleich- als auch im Wechselrichterbetrieb arbeiten kann. Dadurch ist sie auch für rückwärtspeisende Umrichter geeignet, zum Beispiel zur Rekupe-ration von Bremsenergie in Aufzügen, Bahnen, Werkzeugmaschinen, etc.

Die Erarbeitung von Berechnungsgrundlagen und Simulationsmodellen für VCSM-Komponenten erwies sich als sehr anspruchsvoll. Im Jahr 2012 soll damit eine 100-kW-Prototypanlage dimensioniert und gebaut werden.



Figur 6: Prinzip-Schema eines 12-pulsigen VCSM-Moduls (Quelle: NTB Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs).



Figur 5: Bild eines Funktionsmoduls eines 12-pulsigen VCSM-Moduls mit einer Leistung von 60 kW (Quelle: Schaffner EMV AG).

Die anschliessende Ausmessung auf einem Prüfstand wird dann gleichzeitig auch zur Verifikation der erarbeiteten Methoden und Modelle dienen. Es ist positiv zu vermerken, dass der federführende Industriepartner beabsichtigt, nach dem erfolgreichen Pilotprojekt die applikationsspezifische Vermarktung mit grossem Engagement anzugehen. Ebenfalls sehr erfreulich ist, dass sich die durch das BFE initiierte Zusammenarbeit zwischen der Industrie und zweier spezifischer Fachhochschulen sehr positiv entwickelt hat und durch die Industrie auch in Zukunft aufgrund des gemeinsamen Projekterfolgs beibehalten wird.

## Nationale Zusammenarbeit

Durch periodische Treffen der BFE-Trendwatching-Gruppen zu den Themen Informations- und Kommunikationstechnik (IKT), Motoren/elektrische Antriebe, Thermoelektrik sowie Hochtemperatursupraleitung (HTSL) werden nationale Diskussionsplattformen für Fachleute aus Industrie, Hochschule und Forschungsstätten durch die Programmleitung zur Verfügung gestellt, wo Ideen für zukünftige Forschungsaktivitäten generiert und diskutiert werden.

Beide Eidg. Technischen Hochschulen in Zürich und Lausanne sowie mehrere Fachhochschulen werden immer wieder in Forschungsvorhaben einbezogen. So haben die Fachhochschulen Westschweiz (Sion), Nordwestschweiz (Brugg), Chur und Luzern (iHomeLab) sowie die NTB Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs in den Bereichen Motoren, Leistungselektronik, Smart Home, Smart Metering und Thermoelektrik diverse Projektarbeiten geleistet.

Die Erforschung neuer Materialien im Bereich der Hochtemperatursupraleitung ist im dritten 4-Jahreszyklus des

Projekts Materials with Novel Electronic Properties (MANEP) des schweizerischen Nationalfonds miteingeschlossen. Die Aktivitäten haben im Juli 2009 begonnen und enden 2013.

Die Zusammenarbeit mit der Industrie wird intensiv gepflegt und es wird darauf geachtet, Industriepartner in umsetzungsnahe Projekte einzubeziehen. Durch die gemeinsame Finanzierung werden Kontakte zu Förderinstitutionen wie dem Energiesparfonds der Stadt Zürich, dem Stromsparfonds Basel-Stadt sowie der KTI gepflegt. Zudem bestehen gute Kontakte zu Swisselectric Research [8] und zu verschiedenen Elektrizitätswerken. In diversen Projekten wird ein enger Kontakt zu den schweizerischen Energieagenturen EnAW, eae und S.A.F.E [9] gepflegt und es werden, soweit zweckmässig, Verbände wie z. B. swissT.net, Swissmem, Swico, FEA oder Energiecluster eingebunden.

Zur Sicherstellung einer Umsetzung des gewonnenen Wissens wird ein enger Kontakt mit dem Programm EnergieSchweiz [10] gepflegt.

## Internationale Zusammenarbeit

Durch die Teilnahme am IEA Implementing Agreement «Assessing the Impact of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector» erfolgt ein periodischer, internationaler Informationsaustausch zwischen den 12 teilnehmenden Ländern. Auch die «European Society for Applied Superconductivity» (ESAS) trägt zum internationalen Wissenstransfer bei. Eine wichtige internationale Zusammenarbeit besteht im Rahmen des Fusionsprogramms ITER am PSI in Villigen, in dem man sich mit der Charakterisierung von Leitern für die 12-Tesla-SULTAN-Spulen beschäftigt. Im Rahmen des 7. Europäischen Forschungsrahmenprogramms (FP7) ist ferner ein Projekt im Gange, das unter der Führung des CERN und der Universität Genf als Partner den Bau von Hochfeldmagneten für Teilchenbeschleuniger zum Ziel hat.

Durch die führende Position der EMPA in der Entwicklung thermoelektrischer Materialien ergeben sich diverse Zusammenarbeiten mit internationalen Forschungsorganisationen. So bestehen spezielle Beziehungen zu den deutschen Universitäten Augsburg und Halle-Wittenberg sowie zum Fraunhofer-Institut. Daneben erfolgt ein reger Austausch mit der University of South Florida und dem japanischen National Institute for Materials Science (NIMS).

Die Schweiz ist durch das IEA Implementing Agreement Efficient Electrical End Use Equipment (4E) international stark vernetzt und hat mit der Leitung des Motoren-Annex zudem fachliche Verantwortung übernommen.

Wichtigster Anlass in diesem Zusammenhang war der Swissday im Mai 2011 in Zürich, bei dem einem ausgewählten, schweizerischen Fachpublikum die 4E-Aktivitäten präsentiert wurden. Bereits seit längerem laufen ferner Vorbereitungsarbeiten für eine enge Kooperation zwischen Forschern von Australien und der EPFL zur Lösung einer Reihe von technischen Fragen in Bezug auf Motorentest- und Effizienzklassenstandards. Es wird erwartet, dass 2012 eine enge fachliche Kooperation konkretisiert werden kann.

Im Rahmen der Umsetzung der europäischen ErP (Energy related Products)-Richtlinien führt die EU seit längerem umfangreiche Untersuchungen und Studien durch. Die Schweiz verfolgt diese Aktivitäten aktiv und es werden verschiedentlich Erkenntnisse und Erfahrungen bei Diskussionen (z. B. Stakeholder-Meetings) eingebracht.

Ende 2009 haben die drei Länder Deutschland, Österreich und Schweiz ein Memorandum of Understanding (MoU) zur Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Erforschung und Entwicklung von IKT-basierten Energiesystemen der Zukunft unterzeichnet (Kooperation D-A-CH Smart Grids). In diesem Rahmen läuft in Form eines Gemeinschaftsprojekts des BFE (Schweiz) und des BMVIT (Österreich) ein Projekt zur Ermittlung des Eigenenergiebedarfs von Smart Meters.

Persönliche Kontakte zu verschiedenen Energieagenturen (insbesondere Dänemark, Niederlande, Österreich und Frankreich) sowie zu Schlüsselpersonen internatio-

ner Programme wie z. B. dem UK Market Transformation Programme, ermöglichen immer wieder inspirierende Anregungen. Ferner werden die Kontakte mit der IEA, der Environmental Protection Agency (EPA) und der Europäischen Kommission zum Informationsaustausch genutzt.

Im Rahmen von punktuellen, unterstützenden Arbeiten und Treffen bezüglich den europäischen freiwilligen Vereinbarungen (Codes of Conduct) für USV-Anlagen, Settop-Boxen und Broadband Devices können interessante Kontakte zum europäischen Entwicklungszentrum

in Ispra und zur einschlägigen, europäischen Industrie aufgebaut und gepflegt werden. Speziell im USV-Bereich bringt sich die Schweiz aufgrund des bestehenden Fachwissens aktiv und kompetent ein, was interessante Kontakte zum europäischen Verband European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics (CEMEP) ermöglicht. Ferner werden mit der aktiven Beobachtung der Weiterentwicklung der freiwilligen Vereinbarungen für Settop-Boxen konkrete Anregungen für die diesbezüglichen, regulatorischen Arbeiten in der Schweiz möglich.

## Referenzen

[1] Internetseite von topten: [www.topten.ch](http://www.topten.ch)

[2] Internetseite Energieforschungskonferenz: [www.bfe.admin.ch/themen/00519/01219/index.html?lang=de](http://www.bfe.admin.ch/themen/00519/01219/index.html?lang=de)

[3] B. Aebischer: Kompetenzzentrum Energie und Informations- und Kommunikationstechnik, Schlussbericht (2011)

[4] M. Loher: IT-Sicherheit bei Smart Metering, Schlussbericht (2011)

[5] S. Stahl, A. Kaiser, J. Ganz: Konzeptstudie Industrie-Wäschetrockner, Schlussbericht (2011)

[6] P. Mauchle, G. Schnyder: Verluste von Frequenz-Umrichtern im Motorenbereich, Schlussbericht (2011)

[7] N. Häberle, A. Pietkiewicz, H.P. Biner, K. Schenk, M. Bünner: Advanced 3-Phase Multipulse Rectifiers and Inverters, Jahresbericht (2011)

[8] Internetseite von Swisselectric research: [www.swisselectric-research.ch](http://www.swisselectric-research.ch)

[9] Internetseite der Energieagenturen [www.energieagentur.ch](http://www.energieagentur.ch) und [www.energie-agentur.ch](http://www.energie-agentur.ch) und [www.eae-geraete.ch](http://www.eae-geraete.ch)

[10] Internetseite von EnergieSchweiz: [www.energie-schweiz.ch](http://www.energie-schweiz.ch)

## Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(\* IEA-Klassifikation)

- ADVANCED 3-PHASE MULTIPULSE RECTIFIERS AND INVERTERS**

Lead: Schaffner EMV AG

Contact: Häberle Norbert [norbert.haerberle@schaffner.com](mailto:norbert.haerberle@schaffner.com)

Abstract: Das Projektziel umfasst die Konzipierung, den Bau und den Test optimierter magnetischer Komponenten für Multipuls-Strom-Splitter-/Merger-Frontends. Die neuen Konzepte streben die Substitution von passiven harmonischen Filtern und Multipuls-Transformatoren an.

F+E

1.1\*

Funding:	BFE
Period:	2010–2012
- ANALYSE UND VORGEHEN ZUR ENERGETISCHEN OPTIMIERUNG VON PUMPEN BEI WASSERVERSORGUNGEN**

Lead: Ryser Ingenieure

Contact: Roth Yann [yann.roth@rysering.ch](mailto:yann.roth@rysering.ch)

Abstract: Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines zweistufigen Pumpenchecks. In einem ersten Schritt kann ein Betreiber eine erste Grobanalyse vornehmen und das Optimierungspotenzial seiner Pumpen abklären. In einem zweiten Schritt wird eine detaillierte Analyse der Wasserversorgung durchgeführt, in der die Wirtschaftlichkeit eines Pumpenersatzes aufgezeigt wird.

F+E

1.1

Funding:	BFE
Period:	2008–2011
- COST-EFFECTIVE AND RELIABLE THERMOELECTRIC CONVERTERS FOR INDUSTRIAL WASTE HEAT RECOVERY**

Lead: EMPA

Contact: Weidenkaff Anke [Anke.Weidenkaff@empa.ch](mailto:Anke.Weidenkaff@empa.ch)

Abstract: Thermoelectric converters (TEC) for power generation will be developed which aim at reducing electricity consumption via the conversion of a part of the low-grade waste heat generated by engines, industrial furnaces, gas pipes, etc. to electricity. The goal of the project is to demonstrate the feasibility of the efficient recovery of waste heat from industrial production processes.

P+D

6.1

Funding:	BFE
Period:	2010–2013
- EFFIZIENTE, DIREKTE UMWANDLUNG VON WÄRME IN STROM DURCH INNOVATIVE SCHICHTSTRUKTUREN (LTEC)**

Lead: EMPA

Contact: Weidenkaff Anke [Anke.Weidenkaff@empa.ch](mailto:Anke.Weidenkaff@empa.ch)

Abstract: Ziel des Projekts ist eine effiziente Abwärmernutzung mittels geschichteter thermoelektrischer (TE) Konversionssysteme. Die Neuentwicklung verbesserter TE-Materialien soll die optimale Nutzung unterschiedlicher Temperaturgradienten ermöglichen. Dazu werden neue Synthese- und Strukturierungsmethoden weiterentwickelt und eingesetzt.

F+E

6.1

Funding:	BFE
Period:	2008–2012
- EFFIZIENTER BETRIEB VON ASYNCHRONMASCHINEN**

Lead: FHNW

Contact: Jenni Felix [felix.jenni@fhnw.ch](mailto:felix.jenni@fhnw.ch)

Abstract: Der grösste Anteil der Verluste kann Käfigläufer-Asynchronmotoren (ASM) im mittleren Leistungsbereich zugeordnet werden. Das Verhalten der Maschinen mit einem Frequenzumrichter in verschiedenen Betriebsfällen wird mittels Simulationen untersucht und beschrieben.

F+E

1.1

Funding:	BFE
Period:	2009–2010
- EFFIZIENZSTEIGERUNG IM HAUSHALT DURCH DIGITALSTROM**

Lead: Encontrol GmbH

Contact: Huser Alois [alois.huser@encontrol.ch](mailto:alois.huser@encontrol.ch)

Abstract: Mit dem vorliegenden Projekt sollte untersucht werden, ob die DigitalSTROM-Initiative einen wesentlichen Einfluss auf den Strombezug der schweizerischen Haushalte haben könnte. Weil die Komponenten nicht geliefert werden konnten, hat das Bundesamt für Energie entschieden, das Projekt abzubrechen.

F+E

1.2

Funding:	BFE
Period:	2008–2012
- ERSTELLEN EINES THERMOELEKTRISCHEN DEMONSTRATORS**

Lead: EMPA

Contact: Weidenkaff Anke [Anke.Weidenkaff@empa.ch](mailto:Anke.Weidenkaff@empa.ch)

Abstract: Thermoelektrische Generatoren (TEG) dienen zur direkten Umwandlung von Sonnenwärme in Elektrizität. Mit Hilfe eines Sonnenlichtsimulators wurde untersucht, welche Parameter die Leistungsabgabe und den Wirkungsgrad der TEG beeinflussen.

F+E

6.1

Funding:	BFE
Period:	2007–2010

- **FERNSTEUERUNGEN FÜR RAUMHEIZUNGEN** F+E 1.2
- |          |                           |          |           |
|----------|---------------------------|----------|-----------|
| Lead:    | Bush Energie GmbH         | Funding: | BFE       |
| Contact: | eric.bush@bush-energie.ch | Period:  | 2009–2010 |
- Abstract: Eine ferngesteuerte Heizung ermöglicht es, in zeitweise bewohnten Wohnungen die Raumtemperatur bei Abwesenheit maximal abzusenken (Frostschutzbetrieb). In dieser Arbeit werden Fernsteuergeräte vorgestellt, die aktuell auf dem Markt erhältlich sind. Ihre Vor- und Nachteile, ihre technischen Eigenschaften sowie ihre Einsatzmöglichkeiten werden diskutiert.
- 
- **FUNKTIONSMUSTER EINES DRUCKLUFTSPEICHERS** F+E 6.3
- |          |                               |          |           |
|----------|-------------------------------|----------|-----------|
| Lead:    | Enairys Powertech Ltd         | Funding: | BFE       |
| Contact: | sylvain.lemofouet@enairys.com | Period:  | 2009–2010 |
- Abstract: Le but du présent projet est de réaliser une installation expérimentale permettant de prouver la faisabilité du piston liquide à eau pour une pression de l'ordre de 250bar et de démontrer l'efficacité d'un système de compression/détente qui minimise le contact direct entre l'air et l'eau.
- 
- **HOEFFIZIENTE ISOLATION FÜR HAUSHALTSGERÄTE** F+E 1.2
- |          |                              |          |           |
|----------|------------------------------|----------|-----------|
| Lead:    | Helbling Technik AG          | Funding: | BFE       |
| Contact: | hans.tischhauser@helbling.ch | Period:  | 2009–2010 |
- Abstract: An den beiden Beispielen „Kaffeemaschine“ und „Kühlschrank“ wurden Ansätze für eine hocheffiziente thermische Isolation von Haushaltsgeräten untersucht. Die Machbarkeitsstudie hat sich auf Strukturen mit Vakuum-Spalt ohne Kernmaterialien konzentriert.
- 
- **HOEFFIZIENTE ISOLATION FÜR HAUSHALTSGERÄTE - ZYLINDRISCHER KÜHLSCHRANK** F+E 1.2
- |          |                              |          |           |
|----------|------------------------------|----------|-----------|
| Lead:    | Helbling Technik AG          | Funding: | BFE       |
| Contact: | hans.tischhauser@helbling.ch | Period:  | 2010–2012 |
- Abstract: Im vorliegenden Projekt geht es darum, den Prototypen eines Vakuum-isolierten, zylindrischen Kühlschranks in Originalgrösse, d. h. beispielsweise mit Ø 600 mm und Höhe 1400 mm aufzubauen und zu testen.
- 
- **HOEFFIZIENTE ISOLATION IN HAUSHALTSGERÄTEN - KAFFEEMASCHINEN** F+E 1.2
- |          |                              |          |           |
|----------|------------------------------|----------|-----------|
| Lead:    | Helbling Technik AG          | Funding: | BFE       |
| Contact: | hans.tischhauser@helbling.ch | Period:  | 2010–2011 |
- Abstract: Das Projekt "Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte - Kaffeemaschine" hat zur Zielsetzung die Erstellung und Untersuchung von Prototypen einer Heisswasser-Aufbereitung mit hocheffizienter Isolation für Kaffeemaschinen, wobei Alternativen zur Heisswasser-Aufbereitung und zur Isolation mit Vakuum-Spalt geprüft werden.
- 
- **HOEFFIZIENTE ISOLATION FÜR HAUSHALTSGERÄTE - TECHNOLOGIEABKLÄRUNGEN FÜR VAKUUMPANEL** F+E 1.2
- |          |                              |          |           |
|----------|------------------------------|----------|-----------|
| Lead:    | Helbling Technik AG          | Funding: | BFE       |
| Contact: | hans.tischhauser@helbling.ch | Period:  | 2010–2011 |
- Abstract: Im vorliegenden Projekt wird untersucht, inwiefern bei kubischen Kühlschränken die Vakuum-Isolation mit Vakuum-Panels realisiert werden kann und zwar derart, dass die Resultate ganz allgemein auf Vakuum-Panels anwendbar sind und auch durch Drittanwendungen genutzt werden können.
- 
- **IEA 4E IMPLEMENTING AGREEMENT STANDBY ANNEX** Int. 1.2
- |          |                       |          |           |
|----------|-----------------------|----------|-----------|
| Lead:    | Australian Government | Funding: | BFE       |
| Contact: | shane.holt@iea.org    | Period:  | 2009–2011 |
- Abstract: Im Rahmen des IEA Implementing Agreements 4E (Efficient Electrical End Use Equipment) laufen mehrere Annexes, die den sparsamen und effizienten Umgang der Elektrizität anstreben. Standby ist dabei ein wichtiges Thema und die Schweiz nimmt in diesem Agreement eine aktive Rolle ein.

- IEA 4E IMPLEMENTING AGREEMENT: MOTOR ANNEX**

Lead: **A+B International**

Contact: **Brunner Conrad U.** [cub@cub.ch](mailto:cub@cub.ch)

Abstract: Der Electric Motor Systems Annex (EMSA) versucht, das international bekannte Wissen über energieeffiziente elektrische Antriebssysteme zu sammeln, zu koordinieren und in geeigneter globaler Form zu verbreiten. Ebenfalls werden verschiedene Untersuchungen im Motorenbereich durchgeführt.

Int. 1.1

Funding: **BFE**

Period: **2008–2011**
- IEA 4E EXCO-VERTRETER IMPLEMENTING AGREEMENT 4E**

Lead: **R. Brüniger AG**

Contact: **Brüniger Roland** [roland.brueeniger@r-brueniger-ag.ch](mailto:roland.brueeniger@r-brueniger-ag.ch)

Abstract: Im Rahmen des IEA Implementing Agreements 4E (Efficient Electrical End Use Equipment) laufen mehrere Annexes, die den sparsamen und effizienten Umgang der Elektrizität anstreben. Die Themen Motoren, Standby, Mapping & Benchmarking und LED stehen dabei im Vordergrund.

Int. 1.2

Funding: **BFE**

Period: **2008–2013**
- IEA-HTSL-IMPLEMENTING AGREEMENT EXCO**

Lead: **R. Flükiger**

Contact: **Flükiger René** [Rene.Flukiger@unige.ch](mailto:Rene.Flukiger@unige.ch)

Abstract: Das Implementing Agreement "Assessing the impact of High Temperature Superconductivity Electric power sector" verfolgt das Ziel, eine möglichst umfassende Information über die wichtigsten nationalen und internationalen Aktivitäten auf dem Gebiet der Hoch-Tc -Supraleitung zu geben, mit Hauptinteresse auf den Entwicklungen im Energiesektor.

Int. 7.2

Funding: **BFE**

Period: **2006–2013**
- KOMPETENZZENTRUM ENERGIE UND INFORMATIONSTECHNIK**

Lead: **CEPE**

Contact: **Aebischer Bernard** [baebischer@ethz.ch](mailto:baebischer@ethz.ch)

Abstract: Das Kompetenzzentrum Energie und Informationstechnik leistet einen Beitrag zu einem rationelleren Energieeinsatz bei Informationstechnik/Unterhaltungselektronik. Dazu werden in erster Linie die relevanten Informationen im In- und Ausland gesammelt, aufbereitet und verbreitet. Daneben werden umsetzungsorientierte Forschungsthemen analysiert.

F+E 1.2

Funding: **BFE**

Period: **2008–2011**
- LOREMA LOAD RECOGNISED METER AND ACTOR**

Lead: **lhomeLab**

Contact: **Klapproth Alexander** [alexander.klapproth@hslu.ch](mailto:alexander.klapproth@hslu.ch)

Abstract: Mit dem Projekt soll die Hard- und Firmware für eine funkferngesteuerte, intelligente Steckdose mit einzigartigen Merkmalen entwickelt werden. Eine präzise Energiemessung mit schneller Abtastung und mit intelligenten Lastaufschlüsselungsalgorithmen soll ergänzend die Erkennung der Last mittels Signatur ermöglichen.

F+E 1.2

Funding: **BFE**

Period: **2010–2012**
- MACHBARKEIT / PROTOTYP EINZELRAUM-WÄRMEPUMPE**

Lead: **awtech AG**

Contact: **Kaiser Andreas** [andreas.kaiser@awtec.ch](mailto:andreas.kaiser@awtec.ch)

Abstract: In der Schweiz verbrauchen die installierten Elektrospeicheröfen ca. 1'000GWh Strom pro Jahr. Bei einer angestrebten Jahresarbeitszahl (JAZ) einer Einzelraumwärmepumpe von 3,0 ergibt sich somit ein Energiesparpotenzial von 2/3 des aktuellen Verbrauchs. Mit einem Industriepartner wird deshalb ein Prototyp einer Einzelraumwärmepumpe entwickelt.

F+E 1.2

Funding: **BFE**

Period: **2010–2011**
- MEGA - MEHR ENERGIEEFFIZIENZ DURCH GEZIELTE ANWENDERINFORMATIONEN**

Lead: **Hochschule Luzern, CEESAR**

Contact: **Rold Kistler** [rolf.kistler@hslu.ch](mailto:rolf.kistler@hslu.ch)

Abstract: Personen sind eher motiviert Energie zu sparen, wenn ihnen Informationen über ihren persönlichen Energieverbrauch zur Verfügung gestellt werden. Mit diesem Projekt wurde der Aufbau von technisch und wirtschaftlich realisierbaren Möglichkeiten aufgezeigt, die das Bewusstsein für Energie und diesbezügliche Sparmöglichkeiten fördern.

F+E 1.2

Funding: **BFE**

Period: **2008–2010**

- **MIKROSTRUKTURIERUNG VON HOCHLEISTUNGSPOLYMEREN FÜR THERMOELEKTRISCHE GENERATOREN MITTELS LASER** F+E 6.1
- |          |   |          |           |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead:    | Fachhochschule Nordwestschweiz /GreenTEG GmbH                               | Funding: | BFE       |
| Contact: | Armin Stumpp <a href="mailto:armin.stumpp@fhnw.ch">armin.stumpp@fhnw.ch</a> | Period:  | 2010–2011 |
- Abstract: Die grossflächige Mikrostrukturierung von Polymerfolien ist ein essentieller Schritt zur wirtschaftlichen Produktion neuartiger, thermoelektrischer Generatoren (TEGs). In diesem Projekt wird die Eignung der Picosekunden-Lasertechnologie zur Strukturierung der Folien untersucht.
- 
- **MODIFIZIERTER A+++KÜHLSCHRANK MIT HALBEM ENERGIEVERBRAUCH** F+E 1.2
- |          |   |          |           |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead:    | awtech AG   | Funding: | BFE       |
| Contact: | Stahl Stefan <a href="mailto:stefan.stahl@awtec.ch">stefan.stahl@awtec.ch</a> | Period:  | 2009–2010 |
- Abstract: Kühlschränke verbrauchen in Europa je nach Quelle 14–20 % der elektrischen Energie in Haushalten. Die ca. 6 Millionen Kühlgeräte in der Schweiz verbrauchen etwa 2500 GWh/a. In diesem Projekt wird gezeigt, dass durch einfache Modifikationen an einem handelsüblichen Kühlschrank der zurzeit besten Energieklasse A++ bis zu 27 % der elektrischen Energie eingespart werden kann.
- 
- **NOVEL HARMONICS 3-PHASE RECTIFIER FOR EFFICIENT MOTOR SYSTEMS** F+E 1.1
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | Schaffner EMV AG   | Funding: | BFE       |
| Contact: | Häberle Norbert <a href="mailto:norbert.haeberle@schaffner.com">norbert.haeberle@schaffner.com</a> | Period:  | 2009–2010 |
- Abstract: Zur effizienten Nutzung elektrischer Energie müssen Netzoverschwingungen minimiert werden. Im Projekt wurde eine Machbarkeitsstudie durchgeführt, welche nachweist, dass neue passive Multipuls-Strom-Splitter kostengünstige, kompakte und hoch zuverlässige Oberwellen-Kompensatoren für dreiphasige Lasten sind.
- 
- **PROTOTYP EINES VAKUUM-WÄSCHETROCKNERS** F+E 1.2
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | innostarter AG   | Funding: | BFE       |
| Contact: | Ganz Jochen <a href="mailto:jochen.ganz@awtec.ch">jochen.ganz@awtec.ch</a> | Period:  | 2010–2013 |
- Abstract: Wäschetrockner alleine verursachen in der Schweiz etwa 550 GWh pro Jahr. Das Projekt "Vakuum-Wäschetrockner" hat zum Ziel, einen Wäschetrockner zu entwickeln, der nur die Hälfte der Energie eines Trockners der Energieeffizienzklasse A braucht und somit mindestens so gut wie ein heutiger Wärmepumpen-Wäschetrockner ist.
- 
- **SMART METERING CONSUMPTION** F+E, Int 1.4
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | Ecodesign Company, Wien  | Funding: | BFE       |
| Contact: | Wimmer Wolfgang <a href="mailto:wimmer@ecodesign-company.com">wimmer@ecodesign-company.com</a> | Period:  | 2010–2012 |
- Abstract: Das Projekt Smart Metering consumption beschäftigt sich mit dem Eigenenergieverbrauch von Smart Metering Hardware. In Zusammenarbeit mit den Akteuren der Branche werden die nach Stand der Technik verfügbaren Lösungen auf eine Vergleichsbasis gebracht und messtechnisch untersucht.
- 
- **SMART METERING POUR ÉCO-CITÉ** F+E 1.4
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | HES-SO Valais  | Funding: | BFE       |
| Contact: | Gabioud Dominique <a href="mailto:dominique.gabioud@hevs.ch">dominique.gabioud@hevs.ch</a> | Period:  | 2009–2011 |
- Abstract: Le projet Smart metering pour éco-cités a pour but de fournir aux gestionnaires de réseau de distribution un accompagnement scientifique pour le déploiement du smart metering. Le projet traite les éléments contribution au développement durable, modèles de financement, tarification dynamique, modélisation du système d'information, gestion de la charge, technologie et normalisation.
- 
- **STANDBY-OPTIMIERUNG BESTEHENDER AUFZUGSANLAGEN** F+E 1.2
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | Inventio AG / Schindler AG   | Funding: | BFE       |
| Contact: | Lindegger Urs <a href="mailto:urs.lindegger@ch.schindler.com">urs.lindegger@ch.schindler.com</a> | Period:  | 2009–2010 |
- Abstract: Dieses Projekt hat als Ziel die Standby-Optimierung bestehender Aufzugsanlagen. Mittels einem speziell in diesem Projekt entwickelten Standby-Reduktions-Gerät werden Aufzüge automatisch vom Netz getrennt und bei Bedarf wieder eingeschaltet.

● **THERMOELEKTRISCHER GENERATOR FÜR STROMERZEUGUNG AUS NIEDERTEMPERATURWÄRME** P+D 6.1

Lead: ETH Zürich

Funding: BFE

Contact: Bitschi Andreas

abitschi@eeh.ee.ethz.ch

Period: 2009–2011

Abstract: Im vorliegenden Projekt wird ein thermoelektrisches Energieerzeugungssystem entwickelt und realisiert, mit welchem die grundsätzliche Realisierung der Stromerzeugung aus Niedertemperaturenergie aufgezeigt wird und somit auch als Demonstrationsobjekt eingesetzt werden kann.

● **ÜBERBLICK DEUTSCHSPRACHIGER FORSCHUNGSAKTIVITÄTEN IM BEREICH HOME AUTOMATION** F+E 1.2

Lead: Bus House

Funding: BFE

Contact: Staub Richard

richard.staub@bus-house.ch

Period: 2009–2010

Abstract: In diesem Projekt wurde untersucht, welche Forschungsstellen in Deutschland und Österreich im Zeitraum von 2004–2009 Projekte zum Thema Home Automation / Smart Home durchgeführt haben. Daraus wurden die besonders relevanten identifiziert sowie eine Kategorisierung von Untersuchungsgebieten festgelegt.

● **VERLUSTE VON FREQUENZUMFORMERN IM MOTORENBEREICH** F+E 1.1

Lead: Schnyder Ingenieure AG

Funding: BFE

Contact: Schnyder Gilbert

gilbert.schnyder@sing.ch

Period: 2009–2010

Abstract: Zur Erhöhung der Effizienz von Antriebssystemen mit elektrischen Motoren werden Frequenzumrichter eingesetzt. Die heute eingesetzten Frequenzumrichter (FU) sind Quellen von Oberschwingungen. Diese bewirken im speisenden elektrischen Verteilnetz Verluste. Diese gilt es zu quantifizieren.

● **ZENTRALE MAGNETISCHE KÜHL- UND KÄLTEMASCHINE (CHILLER) UND IHRE BEWERTUNG** F+E 6.1

Lead: HEIG-VD

Funding: BFE

Contact: Egolf Peter

peter.egolf@heig-vd.ch

Period: 2008–2010

Abstract: Diese Arbeit stellt eine thermodynamische und ökonomische Analyse von Anwendungen von rotativen magnetischen Kältemaschinen (Chillern) dar.

● **IT-SICHERHEIT BEI SMART METERING** F+E 6.1

Lead: Compass Security AG

Funding: BFE, Privat

Contact: Erwin Moro

erwin.moro@csnc.ch

Period: 2011

Abstract: The local distribution grid operator of Zürich (ewz) has implemented a smart metering test set-up based on various technologies. Compass Security has been assigned to verify the IT-safety of this pilot project. Based on the test results a number of recommendations were formulated and a catalogue of requirements for smart metering infrastructures was compiled.

Michael Moser

# Netze



**Titelbild:****Optimierung des Betriebes von Freileitungen aus meteorologischer Sicht**

Vereiste 380-kV-Lukmanierleitung nach dem Sturm «Andrea» vom 5. Januar 2012. Im Rahmen eines 2011 vorbereiteten Projekts soll die Eisbildung an Freileitungen modelliert werden, um Netzplanung und -betrieb optimal gestalten zu können (Quelle: Alpiq EnerTrans AG).

**BFE Forschungsprogramm Netze**

Überblicksbericht 2011

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
CH-3003 Bern

**Programmleiter BFE (Autor):**

Dr. Michael Moser, Bundesamt für Energie BFE (michael.moser@bfe.admin.ch)

**Bereichsleiter BFE:**

Dr. Michael Moser (michael.moser@bfe.admin.ch)

<http://www.bfe.admin.ch/forschungnetze>

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

## Einleitung

Am 11. März 2011 ereignet sich im Pazifischen Ozean vor Japan ein folgenschweres Seebeben, dessen direkte und indirekte Auswirkungen die Energie-debatte in vielen Regionen der Welt im Jahre 2011 vollständig dominieren sollte. Der ausgelöste Tsunami trifft unter anderem das Kernkraftwerk Fukushima Daiichi und markiert den Beginn einer ganzen Reihe schwerster Störfälle. In der Folge werden grosse Landstriche um das Kernkraftwerk radioaktiv kontaminiert und auf lange Sicht unbewohnbar gemacht. Die Versorgung mit ausreichenden Mengen an Elektrizität wird wegen der Schäden zum anhaltenden Problem.

Auch in der Schweiz führt kein Weg an einer Diskussion über die Zukunft unserer Energieversorgung vorbei, vor allem im Elektrizitätsbereich. Am 25. Mai 2011 spricht sich der Bundesrat für eine saubere, sichere, weitgehend autonome und wirtschaftliche Elektrizitätsversorgung aus und beschliesst, die bestehenden Kernkraftwerke am Ende ihrer sicherheitstechnischen Betriebszeit vom Netz zu nehmen und nicht mehr durch neue Kernkraftwerke zu ersetzen. Das Parlament schliesst sich im Verlauf des Jahres im Wesentlichen dem Bundesratsbeschluss an.

Verschiedene alternative Energiequellen bieten sich für die Energiezukunft der Schweiz an, allem voran die Steigerung der Energieeffizienz, der Ausbau der Wasserkraft sowie neue erneu-

erbare Energiequellen. Zur Deckung des Restbedarfs können Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlagen oder Gas-Kombi-kraftwerke beisteuern, oder aber auch Importe.

Die immense Herausforderung, diese Energiequellen innert nützlicher Frist zu erschliessen, wird durch eine weitere nicht zu unterschätzende ergänzt – den Aus- und Umbau des Elektrizitätsnetzes. Vor allem die vermehrte Nutzung dezentraler Energiequellen und deren teilweise stark fluktuierende Einspeisecharakteristik, sowie die Steigerung der Elektrizitätsnachfrage durch die Ablösung fossiler Energieträger stellen das gesamte Energiesystem vor grosse Herausforderungen. Sie verstärken die bisherigen Treiber, zum Beispiel die Elektrizitätsmarktliberalisierung, um ein Vielfaches. Ein grosser Teil entfällt auf die Umsetzung, namentlich auf den Bau neuer Leitungen und die Schaffung von ausreichend Speicherkapazitäten.

Aber auch intelligente Netze – «Smart Grids» – stellen ein zentrales Instrument zur Erreichung der Ziele dar. Genau in diesem Bereich besteht aber derzeit noch grosser Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsbedarf. Die intelligente Nutzung aller zur Verfügung stehenden Ressourcen, sowie die Optimierung und Integration des Systems sind entscheidend. Sowohl der im Entstehen begriffene «Aktionsplan koordinierte Energieforschung»

der interdepartementalen Arbeitsgruppe Energie, als auch das sich in der Vernehmlassung befindliche «Energieforschungskonzept des Bundes 2013–2016» haben die Wichtigkeit des Themas aufgegriffen und die zugehörigen Forschungsanstrengungen prioritär eingestuft. Das vorliegende Forschungsprogramm Netze des Bundesamts für Energie nimmt dadurch bei der subsidiären öffentlichen Förderung angewandter Forschung künftig eine noch wichtigere Rolle ein. Ausserdem unterstützt es das Bundesamt weiterhin bei der Erfüllung seiner Aufgaben, beispielsweise durch die kürzliche Lancierung einer «Folgeabschätzung einer Einführung von Smart Metering in der Schweiz» oder durch den Einsitz in verschiedensten internationalen Gremien zur Forschungskoordination und damit zum optimalen Einsatz der – nach wie vor – verhältnismässig geringen finanziellen Mittel.

Nichtsdestotrotz haben verschiedene in diesem Jahr unterstützte Arbeiten wieder ein signifikantes Umsetzungspotenzial, sei es im Rahmen eines Pilot- oder Demonstrationsprojekts oder gar in Form eines «Leuchtturms».

IEA Klassifikation: 6.2 Electricity transmission and distribution  
Schweizer Klassifikation: 1.5 Netze und Systeme

## Programmschwerpunkte

Dem schweizerischen Elektrizitätsnetz kommt sowohl hinsichtlich seiner zentralen Lage in Mitteleuropa als auch der Vermaschung mit den Nachbarstaaten die Funktion einer Stromdrehscheibe zu. Ändernde gesetzliche Bestimmungen innerhalb der Schweiz aber auch der von der EU getriebene europäische Energiebinnenmarkt beeinflussen die Rahmenbedingungen für die Elektrizitätserzeugung, -übertragung und -verteilung nachhaltig und stellen weit reichende Ansprüche insbesondere im Netzbereich. Komplementär zum Wandel des legislativen Umfelds tragen auch technologische Entwicklungen sowie die drohende Verknappung einzelner Energieträger zu verschiedenen Entwicklungen im Netzinfrastrukturbereich bei:

- Fortschreitende Durchdringung dezentraler und/oder fluktuierender Einspeisungen in Netze;
- Zunahme der Energieflüsse in den Übertragungsnetzen infolge grenzüberschreitenden Stromhandels und daraus resultierende verstärkte Engpasshäufigkeit;
- Zunehmende Alterung der bestehenden Infrastruktur;
- Wechselseitige Abhängigkeit von Netzbetrieb und Ausgestaltung liberalisierter Märkte;
- Übertragung, Verteilung und Konversion verschiedener Energieträger in Multienergieträgernetzen;
- Vermehrter Einsatz verschiedener dezentraler Energiespeicher;
- Erhöhte Sensibilisierung verschiedener Interessensvertreter für interdisziplinäre Aspekte.

Im Zusammenhang mit diesen Entwicklungen werden nicht nur die Auswirkungen des sich verändernden technologischen, ökonomischen und legislativen Umfelds auf Netzbetrieb und Versorgungszuverlässigkeit untersucht, sondern es wird auch die Konzeption von neuartigen Netzinfrastrukturen, sogenannte «Smart Grids», unter Einbezug vermehrter dezentraler Erzeugung und Energiespeicher unterstützt. Einen weiteren Schwerpunkt bildet die Erarbeitung von Konzepten zu effizientem Design und Management der Energiedrehscheibe Schweiz. Dabei werden Fragen zu Netzregulierung,

Engpassmanagement, langfristigem Netzausbau und der Abhängigkeit von Strom-, Gas- und Wärmenetzen bearbeitet. Die Forschung ist generell an den Kriterien Versorgungszuverlässigkeit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit ausgerichtet, wobei auch sozio-ökonomische Fragestellungen wie Preisgerechtigkeit berücksichtigt werden. Das Forschungsprogramm ist international gut vernetzt (IEA [1], EU [2,3] etc.).

### Rückblick und Bewertung 2011

Die Projekte und Aktivitäten im Forschungsprogramm Netze haben auch im Jahr 2011 dazu beigetragen, verschiedenste Aspekte bestehender und künftiger Energiesysteme erforschen und entsprechende Kompetenzen in der Schweiz aufbauen und fördern zu können. Im Bereich «Elektrizitätsnetze» bestand die Zielsetzung darin, verschiedene Konzepte für die erfolgreiche Systemintegration dezentraler Erzeugungsanlagen und Speichertechnologien zu erarbeiten, zu evaluieren und in der Praxis anzuwenden. Dazu wurden verschiedene Forschungs- und Pilotprojekte gestartet resp. weitergeführt. Ausserdem wurde vermehrt der Rolle der Endkunden in intelligenten Systemen, sogenannte «Prosumer», Aufmerksamkeit geschenkt. Im Hinblick auf den notwendigen Ausbau der Übertragungsnetzinfrastruktur konnten ebenfalls erste wichtige Erkenntnisse zu einem möglichen künftigen gemeinsamen Betrieb von Wechselstrom- und Gleichstromübertragungsnetzen erzielt werden. Im Themenbereich «Multienergieträgernetze» konnten langjährige Forschungsaktivitäten der ETHZ zu neuen Konzepten für gekoppelte Netze und deren Umsetzungsstrategien erfolgreich beendet werden. Im Bereich «Technologie» stand – nebst der Spezifikation eines bi-direktionalen Ladegerätes für Elektrofahrzeuge – die Untersuchung der Auswirkungen von Fehlerfällen in Gleichstromübertragungsnetzen auf die relevanten Netzelemente im Vordergrund. Die internationalen Aktivitäten haben diese Schwerpunkte ergänzt und die Koordination der Forschungsaktivitäten unterstützt. Im Rahmen einer zweiten internationalen Ausschreibung des «SmartGrids ERA-Net» [3]

wurde denn auch ein weiteres länderübergreifendes Projekt mit Schweizer Beteiligung bewilligt.

### Ausblick

Die Aktivitäten in den verschiedenen technischen Bereichen sowie im internationalen Bereich werden 2012 mit unveränderter Schwerpunktsetzung weiter fortgesetzt. Eine im BFE-Positionspapier zu «Smart Grids» [4] identifizierte Wissenslücke kann durch das gestartete Projekt zur volkswirtschaftlichen Folgeabschätzung einer Einführung von «Smart Metering» in der ersten Jahreshälfte 2012 geschlossen werden. Zusätzlich zu dieser erfolgreichen Zusammenarbeit mit dem Programm Energie-Wirtschaft-Gesellschaft werden weitere interdisziplinäre Projekte mit den Programmen Elektrizitätstechnologien & -anwendungen (Datenschutz), Akkumulatoren & Supercaps (Integration grösserer Netzspeicher) sowie Kraftwerk 2020 (Beitrag von Gaskraftwerken zur Netzstabilität) weitergeführt oder gestartet. Ausserdem können 2012 Projekte u. a. zum Einsatz von Wärmepools (Anergienetze, Industrien, Einkaufszentren etc.) zur elektrischen Netzregelung sowie zur optimierten Auslegung und Betriebsauslastung von Hoch- und Höchstspannungsnetzen durch umgebungsangepasste Grenzwerte (siehe Titelbild) gestartet werden. Auch weiterhin besteht dringender Bedarf an grösseren Demonstrationsprojekten, in denen verschiedenste Aspekte untersucht und entsprechende Lösungsansätze entwickelt werden können. Aufgrund der beschränkten Möglichkeiten des Forschungsprogramms können weiterhin nur Teilaspekte im Rahmen kleinerer Projekte betrachtet werden. Es ist deshalb umso wichtiger, die bestehenden internationalen Beziehungen, z. B. zum SET-Plan der EU [6] oder innerhalb der Kooperation D-A-CH Smart Grids [7] weiter auszubauen und Synergien zu nutzen. Die 2010 gegründete «Forschungsstelle Energienetze» an der ETH Zürich wird zum Jahresbeginn 2012 über die notwendigen Ressourcen verfügen, um erste Projekte bearbeiten und ihre interdisziplinären Kompetenzen ausbauen zu können.

## Highlights aus Forschung und Entwicklung

### Vision of Future Energy Networks (VoFEN)

Traditionell waren Energieversorgungssysteme von «zentralistischen» Strukturen geprägt; Elektrizität wurde in Grosskraftwerken (Kern-, Wasserkraftwerke etc.) produziert, dann über das Übertragungsnetz transportiert, um dann in Verteilnetzen bis zum Endkunden verteilt zu werden. Für das Entstehen einer solchen Topologie sind vor allem sogenannte Skaleneffekte verantwortlich gewesen – je grösser das Kraftwerk desto geringer auch die mittleren spezifischen Erzeugungskosten. Im Gegenzug haben die Endlichkeit fossiler Ressourcen, Klimawandel und ein höheres öffentliches Bewusstsein für Nachhaltigkeit die dezentrale Stromerzeugung aus kleinen, erneuerbaren Quellen vorangetrieben. Die Anlagengrösse ist allerdings nicht das einzige Kriterium, das sich auf die bisherigen Strukturen im Energieversorgungsbereich auswirkt. Oft erlauben diese Technologien nicht nur die Erzeugung von Elektrizität, sondern auch die gleichzeitige Bereitstellung von Wärme oder auch Kälte. Zusammen mit dem Einsatz dezentraler Speichertechnologien und einer möglicherweise stärkeren Verbreitung von Elektrofahrzeugen ergeben sich komplexe Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Energieträgern und Infrastrukturen. Der

traditionelle Aufbau des Netzes mit einem Lastfluss von höheren zu tieferen Spannungsebenen ist zunehmenden Veränderungen ausgesetzt. Kleine, erneuerbare Erzeugungsanlagen werden oft auch im Verteilnetz eingebunden, genau da, wo früher im Grunde nur passive Verbraucher zu versorgen waren. Diese vormals passive Nachfrageseite wird durch den Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien in ein aktives Element umgestaltet. Endkunden haben durch Eigenerzeugung und intelligente Haushaltgeräte Anreize, ihren Energieverbrauch zu optimieren, zum Beispiel Elektrizität und Wärme dann nachzufragen, wenn Eigenerzeugung möglich oder der Bezug vom Netz aus technischen oder finanziellen Gründen effizient ist. Durch diesen Paradigmenwechsel weg von zentralistischen hin zu dezentralen Strukturen und durch die stärkere Kopplung von Energieträgern wird das Gesamtsystem komplexer; es entstehen allerdings auch mehr Freiheitsgrade für einen technisch, ökonomisch und ökologisch effizienten Netzbetrieb. Unter diesen Prämissen wurde zwischen 2002 und 2011 das Projekt «Vision of Future Energy Networks» (VoFEN) am Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnologie der ETH Zürich bearbeitet.

### Das Projekt «Vision of Future Energy Network»

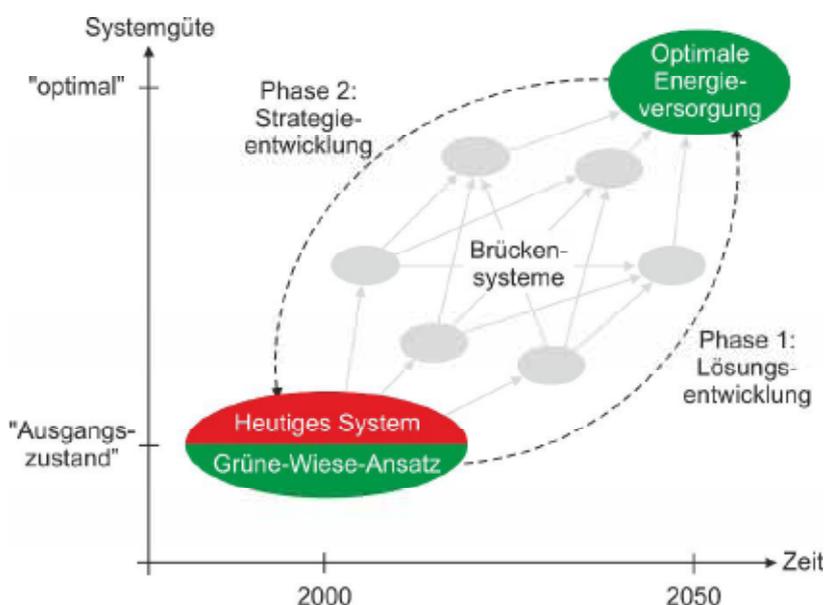
Das Projekt verfolgte mit Unterstützung der Industrie und des BFE von Anfang an einen Grüne-Wiese-Ansatz. Idee war es, auf Basis der heute verfügbaren Erzeugungs- und Netztechnologien ein optimales System der Zukunft zu entwerfen, ohne das aktuelle System in Betracht zu ziehen. Mit diesem Ansatz sollte ein fiktives Optimalsystem gefunden werden, wobei dieses im Umkehrschluss zulies, Strategien abzuleiten, wie das heutige System umzugestalten ist, um technischen, ökonomischen und ökologischen Kriterien gleichermaßen zu genügen. Figur 1 veranschaulicht diesen Projektansatz.

### Kopplung mehrerer Energieträger

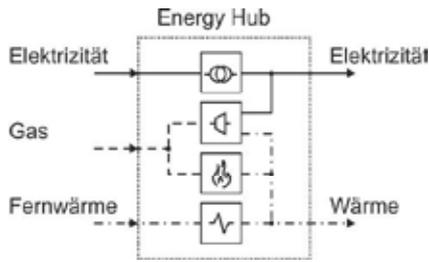
VoFEN zeichnete sich durch zwei Hauptmerkmale aus: den Fokus auf multiple Energieträger (Elektrizität, Wärme, Kälte, Gas, Biomasse etc.) und den Grüne-Wiese-Ansatz. Typischerweise benötigen Industrie- und Haushaltskunden nicht nur Elektrizität, sondern auch Wärme, diverse chemische Energieträger (Gas, Benzin, Öl) bis hin zu Biomasse. Dieser diversifizierte Energiebedarf wird allerdings in bisher gebräuchlichen Planungswerkzeugen nicht in Betracht gezogen. Die jeweiligen Energieträger und die verbundenen Infrastrukturen werden zu Planungszwecken getrennt betrachtet. Ein solches Vorgehen dürfte den wachsenden Anforderungen hinsichtlich effizientem, sicherem und nachhaltigem Betrieb nicht gerecht werden können. Durch die stärkere Kopplung der einzelnen Netze zur Übertragung von Elektrizität, Gas und auch Fernwärme scheint es sinnvoll, integrierte Planungstools zu entwerfen, die ermöglichen, die Synergien der einzelnen Energieträger auszunutzen. Zu diesem Zweck wurde im Rahmen des Projekts der sogenannte Energy Hub als Modellierungskonzept entwickelt.

### Energy Hub

Grundsätzlich kann der Energy Hub als Schnittstelle zwischen Energieproduzenten, Konsumenten und der Übertragungsinfrastruktur aufgefasst



Figur 1: Grüne-Wiese-Ansatz zum Aufbau von Multienergieträgernetzen (Quelle: ETHZ).



Figur 2: Beispiel eines Energy Hub bestehend aus Transformator, Gasturbine, Gasofen und Wärmetauscher (Quelle: ETHZ).

werden. Von einem systemischen Standpunkt aus deckt der Energy Hub verschiedene Funktionen ab. Dazu gehören Einspeisung und Bezug von Energie, sowie Umwandlung und Speicherung. Figur 2 zeigt einen exemplarischen Energy Hub.

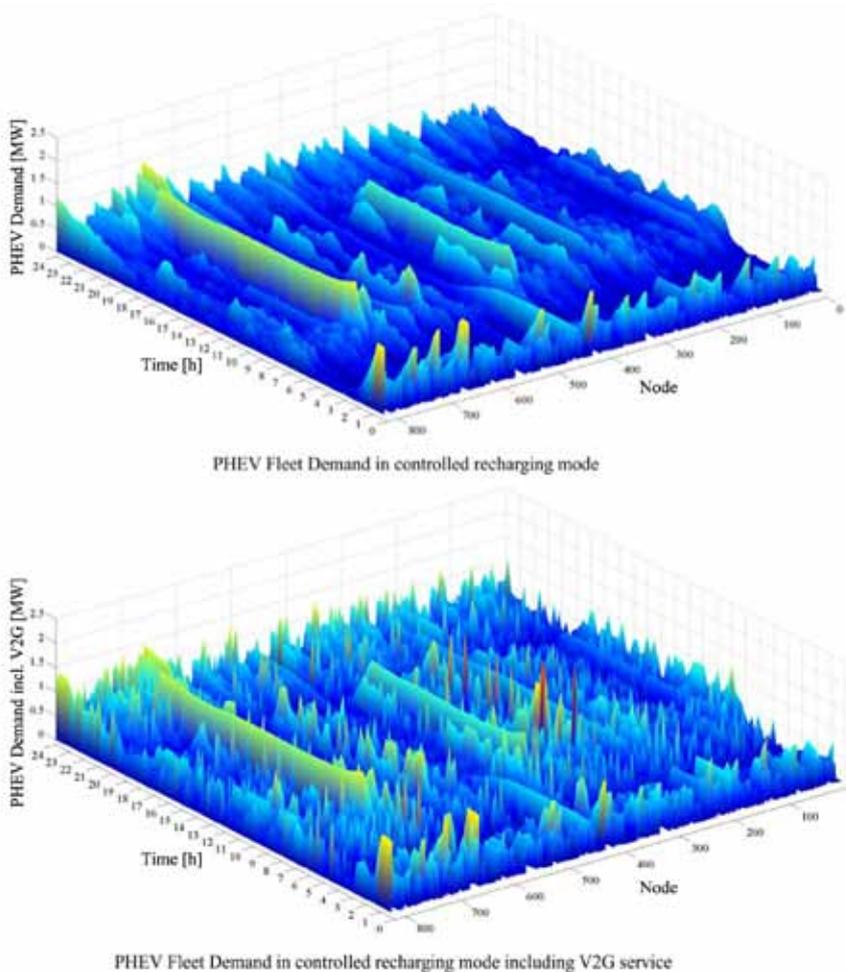
Im Energy Hub in Figur 2 sind folgende Elemente enthalten: ein Transformator, eine Gasturbine, ein Gasofen und ein Wärmetauscher. Am Ausgang liefert der Energy Hub Elektrizität und Wärme; am Eingang ist das Elektrizitäts-, Gas- und Fernwärmenetz angeschlossen. Reale Beispiele, die als Energy Hub aufgefasst werden können, sind Industriebetriebe (Stahl- und Papierfabriken), grosse Gebäudekomplexe (Flughäfen, Krankenhäuser, Einkaufszentren), aber auch Einfamilienhäuser oder kleine, isolierte Systeme (Züge, Schiffe, Flugzeuge). Für den Energy Hub wurde im Projekt eine mathematische Repräsentation erarbeitet, die es erlaubt, verschiedenste Anwendungen exakt zu formulieren. Das Modellierungskonzept ermöglicht es, klassische Probleme aus dem Bereich der elektrischen Energieversorgung auf multiple Energieträger, d. h. auf gekoppelte Infrastrukturen zu übertragen.

**VoFEN als Werkzeugkiste**

Schon bei der Betrachtung von nur einem Energy Hub ergeben sich verschiedenste teils komplexe Problemstellungen. Durch die inhärente Flexibilität des Energy Hubs lassen sich Fragestellungen zu optimalen Betriebsstrategien lösen. Ein praktisches Beispiel ist ein Einfamilienhaus, das mit einer Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlage (WKK) sowie Sonnenkollektoren ausgestattet ist und zusätzlich über Netzanschlüsse für Fernwärme und Elektrizität verfügt. Fasst man dieses Haus als Energy Hub auf, können Fragen [10] betrachtet werden wie: Wie kann man Netzbezug und Eigenerzeugung elektrischer Energie optimieren? Kann man durch den Einsatz von Speichern einen Bezug von Fernwärme vermeiden? Welchen Grad von Energieautonomie kann man überhaupt erreichen?

Gibt man die isolierte Betrachtung eines einzelnen Energy Hubs auf, kann das System auf eine Menge vernetzter Hubs erweitert werden, zum Beispiel ein ganzes Wohn- und Geschäftsviertel mit einzelnen Verbrauchertypen. Für ein solches System sind ähnliche Fragestellungen relevant. Ganz generell stehen optimale Betriebsstrategien im Mittelpunkt, die unter Ausnutzung der Synergien zwischen den einzelnen Hubs zu Kosten- und/oder Energieeinsparungen führen oder auch die Emissionen des Gesamtsystems minimieren [9]. Entsprechende Werkzeuge sind in zwei Fallstudien in Zusammenarbeit mit den Regionalwerken Baden sowie Energie und Wasser Bern (ewb) zum Einsatz gekommen. Für den Stadtteil Baden-Dättwil wurde untersucht, inwieweit zur Wärmeversorgung eines neu erschlossenen Wohngebiets das bereits bestehende Fernwärmenetz erweitert werden soll, oder ob man Erdwärme bevorzugen sollte. Für die Stadt Bern wurden Strategien zur Emissionsvermeidung entwickelt, bis hin zu einem fast vollkommen emissionsfreien Szenario. Die beiden Fallstudien [11,12] haben gezeigt, dass die theoretischen Werkzeuge in die Praxis übertragen werden können und dass sie bei der Entscheidungsfindung einen wichtigen Beitrag leisten.

Durch die Kopplung einer Vielzahl von kleinen, dezentralen Erzeugungsanlagen, sowie mehrerer Energieträger



Figur 3: Unterschiedliche Netzbelastungen durch Elektrofahrzeuge: betrieben als passive Last (oben) oder verteilte Speicher zum Ausgleich von Windeinspeisungen (unten) (Quelle: ETHZ).

stellt sich die Frage, wie sich Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit im Vergleich zu bisherigen Strukturen verändern [8]. Mit dem entworfenen Modell kann eine solche Analyse vorgenommen werden. Speziell lassen sich Indizes wie «Expected Energy Not Served» oder die erwartete Zuverlässigkeit berechnen. Dabei hat sich gezeigt, dass auch neuartige, dezentrale Netzstrukturen sicher und zuverlässig sind.

Durch die Flexibilität des Energy Hubs ist es allerdings auch möglich, nebst operativen Aspekten planerische Aufgaben zu bewältigen, zum Beispiel die Investitionsbewertung. Heutzutage ist man in der Energieversorgungs- und Energieerzeugungsinfrastruktur mit verschiedenen Unsicherheitsquellen konfrontiert. Die entwickelten Methoden [13] erlauben eine adäquate Berücksichtigung von Unsicherheiten bei der Investitionsbewertung und tragen gleichzeitig potenziellen Vorteilen von Investitionen, die mit mehreren Energieträgern verbunden sind, Rechnung. Unter Zuhilfenahme von Methoden aus der Finanzwirtschaft lassen sich Technologieportfolios finden, die einem bestimmten Versorgungsgebiet – beispielsweise Zürich [14] – auf optimale Weise alle benötigten Energieträger liefern.

Über die bisherigen Anwendungen hinaus wurden auch Regelungstheorie und Elektromobilität betrachtet. Im Gegensatz zu zentral gesteuerten Betriebskonzepten werden dabei verteilte Algorithmen genutzt, wobei die verschiedenen Energy Hubs autonome Ziele verfolgen, sich aber trotzdem mit den umliegenden Netzknotten koordinieren [15]. Eine derartige Sichtweise auf den Netzbetrieb repräsentiert den Wechsel von zentralistischen, unidirektionalen hin zu verteilten Systemen.

Im Fokus des Themas Elektromobilität stand die Integration von sogenannten Plug-in Hybrid Electric Vehicles in das Verteilnetz der Stadt Zürich, wobei die Frage zu klären war, ob bei einer hohen Verbreitung von solchen Fahrzeugen zusätzliche Netzinvestitionen nötig sind. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass durch intelligente Ladestrategien Zusatzinvestitionen vermieden werden können. Das setzt allerdings den Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien voraus.

Die Algorithmen zur Steuerung der Ladeleistung der Fahrzeuge berücksichtigen die Mobilitätspräferenzen des Kunden. Figur 3 zeigt die unterschiedlichen Netzbelastungen wenn die Fahrzeuge nur eine passive Last darstellen (oben) oder wenn sie als kleine, verteilte Speicher genutzt werden, um eine fluktuierende Windeinspeisung zu kompensieren (unten).

### Zusammenfassung

Über die Laufzeit hat das Projekt wichtige Impulse geliefert, um neue Perspektiven auf Energienetze zu eröffnen. Das Energy-Hub-Konzept hat in der akademischen Welt gleichermassen Verbreitung gefunden wie in der Energiebranche. Verschiedene internationale Gruppen und Institute beschäftigen sich weiterhin mit gekoppelten Infrastrukturen auf der Basis des Energy Hubs. Die konkreten Fallstudien haben erfolgreich demonstriert, dass die theoretischen Werkzeuge in der Praxis erfolgreich Anwendung finden. Es bleibt zu hoffen, dass diese Arbeiten einen nachhaltigen Beitrag zu einer sicheren, kostengünstigen und nachhaltigen Energiezukunft leisten konnten.

### IEA ENARD Annex II: Distributed Generation – System Integration in Distribution Networks

Ziel dieses abgeschlossenen Annex von ENARD (siehe auch «Internationale Zusammenarbeit») war es, die aktuellen regulatorischen, wirtschaftlichen und technischen Barrieren auf dem Weg zum «Smart Grid» in den verschiedensten Bereichen (Figur 4) zu identifizieren und geeignete Massnahmen und Empfehlungen zur Überwindung der Barrieren zu empfehlen [6]:

Für die Langzeitplanung von effizienten Verteilnetzen werden nationale Elektrizitätserzeugungs- und -verbrauchsszenarien und deren politische Bewertung benötigt. Mit ihnen werden die für die Versorgungssicherheit nötigen Investitionen in Elektrizitätsnetze und intelligente Systeme (Smart Grids) für alle Netzbetreiber, aber auch die neuen Energieservice-Dienstleister besser planbar. Um Unsicherheiten

bei Langzeitinvestitionen zu minimieren, ist aber auch die Kontinuität der Netzkostenregulierung unerlässlich. Rasch ändernde Regulierungen führen bei den Netzbetreibern zu Ängsten über die Sicherheit des erlaubten, regulierten Einkommens. Dies bremst die Bereitschaft für neue Innovationen stark. Beispielsweise fordern sie, dass Forschungsprojektkosten der Verteilnetzbetreiber rechtlich vom Regulator als anrechenbar behandelt werden sollten.

Tageszeitlich feste Einspeisetarife fördern zwar generell die Einspeisung von erneuerbarer Energie, sie verhindern jedoch sowohl eine zeitlich optimale Bilanzierung als auch ein optimales Netzlastmanagement. Die tageszeitliche Flexibilisierung der Einspeisetarife hin in Richtung dynamische Preise kann zu einer wesentlichen Unterstützung betrieblicher Herausforderungen wie Spitzenlastmanagement oder Netzüberlastmanagement auch im Verteilnetz führen.

Bei grossen Mengen eingespeister erneuerbarer Energie und bei vielen aktiven Elektrizitätsbezüglern reichen Smart Meter, die lediglich den Verbrauch alle 15 Minuten messen und abrechenbar machen, nicht; es braucht eine intelligente Verteilnetzüberwachung, die auch die Netzqualität und den Netzzustand beobachten und steuern kann. Idealerweise soll das über Smart Metering hinausgehende Netzmonitoring zu einer aktiven Netzsicherheitsunterstützung durch die Verteilnetzbetreiber bzw. der Endkunden-Dienstleister oder gar der Endkunden selber führen. Neue Smart Monitoring- und Steuerungstechnologien sollen dazu führen, dass aktive Eingriffe im Verteilnetz auch im Minutenbereich, allenfalls sogar im Sekundenbereich möglich werden. Diese sollen kompatibel sein mit den heute üblichen Massnahmen der Übertragungsnetzbetreiber, d. h. swissgrid, als Hauptverantwortliche für die jederzeitige betriebliche Versorgungssicherheit, und diese wesentlich ergänzen.

Entsprechend müssen auch die Geschäftsmodelle der Verteilnetzbetreiber angepasst werden: Neue Hilfsdienste für die Frequenz-, Leistungs- und Spannungsregelung sollen marktbasierend auch durch Verteilnetzteilnehmer bereitgestellt werden können. Für die



Figur 4: Herausforderungen des aktiven Verteilnetzes im Überblick (Quelle: Bacher Energie AG).

Verteilnetzbetreiber ergeben sich als Koordinatoren interessante Geschäftsmöglichkeiten.

Die fluktuierende Elektrizitätserzeugung und die Notwendigkeit von weniger CO<sub>2</sub>-Ausstoss beim Heizen und in der Mobilität (z. B. durch Wärmepumpen und Elektroautos) verlangen eine

Regulierung des Gesamtenergiesystems mit einem starken Elektrizitätssystem im Zentrum. Es reicht nicht mehr, nur eine Regulierung des netzbasierten Elektrizitätssystems gleichzeitig mit einem Elektrizitätsmarkt für alle Elektrizitätskunden einzuführen. Da die Elektrizitätsversorgung integriert mit der

Wärmeversorgung erfolgen wird – sei dies über Wärmekraft-Kopplung oder über Wärmepumpen und entsprechende Wärmespeicher – werden auch die gesetzlichen Rahmenbedingungen beider Bereiche gekoppelt betrachten müssen. Entkoppelte gesetzliche Rahmenbedingungen für Wärme und Elektrizität können zu Fehlinvestitionen führen.

Genauso müssen die Energieanforderungen im Mobilitätsbereich integriert betrachtet werden: Sollten sich Elektroautos durchsetzen, kommt die Energie für diese Autos «aus der Steckdose». Wärme- und Mobilitätsbedürfnisse tendieren dazu, künftig durch Elektrizität gedeckt zu werden. Die bisherigen konventionellen, durch Elektrizität gedeckten Bedürfnisse (Licht, Information, Kommunikation, Kochen etc.) werden also durch neue ergänzt. Das bedingt neue gesetzliche Rahmenbedingungen für das Energiesystem als Ganzes mit einem noch stärkeren Elektrizitätssystem im Zentrum.

## Nationale Zusammenarbeit

Durch die aktive Zusammenarbeit zwischen der «Schweizerischen Gesellschaft für Netzinfrastrukturforschung» (SGN) und der ETH Zürich konnte 2011 die Geschäftsstelle der neugeschaffenen «Forschungsstelle Energienetze» (FEN) ihren operativen Betrieb aufnehmen. Die Anstellung zweier weiterer wissenschaftlicher Mitarbeiter konnte bis Ende Jahr abgeschlossen werden. Die initiale wissenschaftliche Arbeit hat sich darauf konzentriert, die notwendigen Grundlagen (Infrastruktur, Datenbanken, Modelle) bereitzustellen, um künftig verschiedenste Fragen im Netzbereich – nicht nur rein technischer sondern auch ökologischer, ökonomischer und gesellschaftlicher Natur – bearbeiten zu können. Nach der Genehmigung erster Projektanträge sollen 2012 die ersten Forschungsarbeiten im Auftrag der Mitglieder der SGN und Dritter aufgenommen werden.

In der Berichtsperiode wurde ein weiterer Workshop der «Interessensgemeinschaft Vehicle-to-Grid» (IG V2G) [17] unter aktiver Mitwirkung zahlreicher Vertreter von Energieversorgern, Behörden, NGOs, Investoren, Dienst-

leistern und Forschungsinstitutionen durchgeführt. Schwerpunktartig behandelt wurden Fragen zu wirtschaftlichen Aspekten sowie der Informationsaustausch mit Pilot- und Demonstrationsprojekten. Im Rahmen der eintägigen Abschlussveranstaltung wurden die Erkenntnisse der vergangenen drei Jahre verarbeitet und es konnten entsprechende Empfehlungen formuliert werden. Um diese auch umsetzen zu können, wurde mit EnergieSchweiz vereinbart, die IG V2G sowie deren Arbeiten in das Konzept der Aktivitäten rund um «Smart Cities» aufzunehmen.

Im Rahmen verschiedener Veranstaltungen und zahlreicher direkter Kontakte und Besuche wurde das Forschungsprogramm Netze vorgestellt und versucht, die verschiedenen Forschungsinstitutionen weiter zu vernetzen, z. B. im Rahmen des laufenden Pilotprojekts «Verteilte Einspeisung in Niederspannungsnetze» (VEiN) [18] oder des vom BFE und von Swisselectric Research [19] unterstützten Projekts «Swiss2G» [20].

## Internationale Zusammenarbeit

Die Schweizer Aktivitäten im Rahmen des IEA Implementing Agreement on Electricity Networks, Analysis, Research and Development (Enard) [21] wurden weitergeführt. Insbesondere in Annex II «Distributed Generation – System Integration in Distribution Networks» wurde eine entsprechende europaweite Analyse durchgeführt und es wurden verschiedene Handlungsoptionen abgeleitet ([16], siehe Highlights). Zur Erarbeitung einer langfristigen Vision für die Entwicklung der Übertragungsnetze hat Annex IV «Transmission Systems» [22] seine Arbeit mit Fokus auf Netzausbau und -erneuerung, Integration erneuerbarer Energien und Ausfallsicherheit abgeschlossen. Aufgrund der Tatsache aber, dass sich Enard in den vergangenen Jahren zu keinem anerkannten Expertengremium entwickeln konnte und wenig aktuelle Trends und Themen aufgegriffen wurden, haben sich die Schweiz und weitere Länder entschlossen, ihre Teilnahme zu beenden.

Bereits 2010 wurde mit der Bildung des «Implementing Agreement for a co-operative programme on Smart Grids» (ISGAN) [23] im Rahmen des «Clean Energy Ministerial» (CEM) begonnen, wobei auch einzelne Vertreter aus Enard federführend mitgewirkt haben. Bedeutend mehr Staaten als bei Enard haben das Vorhaben unterstützt und gemeinsam zu einem Implementing Agreement im Sinne der IEA weiter entwickelt, das 2011 verabschiedet und gestartet wurde. In seinem Fokus stehen übergeordnete Themen wie z. B. Regulierung,

Standardisierung, Finanzierung oder auch die Rolle der Endnutzer. Insbesondere die beiden Annexes «Global Smart Grid Inventory» und «Benefit-Cost Analyses and Toolkits» sind von besonderem Schweizer Interesse, insbesondere im Sinne des BFE-Positionspapiers zu Smart Grids oder der neuen Energiestrategie 2050. Aus diesem Grund hat die Schweiz ihre Teilnahme an ISGAN erklärt und die entsprechenden Vorarbeiten zu den Annexes aufgenommen. Ein wesentlicher Bestandteil ist dabei die Überführung des Know-hows aus Enard zu ISGAN.

Die Arbeiten zur Umsetzung des SET-Plans [2] der EU wurden fortgesetzt. Im Bereich der Netze fanden diese vorwiegend innerhalb der «European Electricity Grid Initiative» (EEGI) [24] und der «Smart Cities Initiative» (SCI) statt. Innerhalb des «EII-Teams» der EEGI wurde vor allem die Frage behandelt, wie laufende Aktivitäten in den einzelnen EU-Mitgliedstaaten und den assoziierten Ländern zu so genannten funktionalen Projekten kombiniert werden können, um ein Maximum aus den knapp vorhandenen Forschungsmitteln herausholen zu können. Entsprechende Vorarbeiten des «Joint Research Centers» (JRC) und des «Austria Institute of Technology» (AIT) wurden massgeblich ergänzt durch Beiträge der nationalen Experten, des «SmartGrids ERA-Net» [3], der «Kooperation D-A-CH Smart Grids» [5], des FP7-Projektes «GRID+» und von ISGAN. Dabei hat sich auch die Schweiz aktiv beteiligt. Zur Deckung des bereits dabei identifizierten Forschungsbedarfs wurde das FP7-

Arbeitsprogramm 2012 entsprechend angepasst und es konnten verschiedene Themen zur Unterstützung der EEGI ausgeschrieben werden.

Im Rahmen des «SmartGrids ERA-Net» wurde im Frühjahr 2011 eine eigene zweite Ausschreibung durchgeführt, wobei ein weiteres Schweizer Projekt genehmigt werden konnte. Aufgrund der positiven Evaluation des ERA-Nets durch die EU konnten die strategischen Arbeiten zur Verlängerung der Laufzeit in Angriff genommen werden. Das ERA-Net soll sich künftig klar in den Aktivitäten rund um den SET-Plan positionieren und eine einzigartige, komplementäre Rolle einnehmen. Die Möglichkeit zur Bildung eines oder mehrerer ERA-Net+ wird dabei geprüft.

Die 2009 geschlossene «Kooperation D-A-CH Smart Grids» wurde in der Berichtsperiode entscheidend weiter entwickelt. Insbesondere konnten drei länderübergreifende «Task Forces» zu den wichtigen Querschnittsthemen Normierung und Standardisierung, Geschäftsmodelle sowie Daten aufgebaut und etabliert werden. Die Federführung der «Task Force Daten» obliegt Schweizer Branchenvertretern; die Teilnahme in den Task Forces steht nach wie vor allen Interessierten offen. Zwei länderübergreifende Workshops haben im Rahmen der «Smart Grids Week 2011 Linz» [25] sowie des «Smart Grid Day» in Baden stattgefunden. Zu beiden Anlässen konnten zahlreiche Schweizer Teilnehmer begrüsst werden.

## Referenzen

- [1] IEA: [www.iea.org](http://www.iea.org)
- [2] EU SET-Plan: [ec.europa.eu/energy/technology/set\\_plan](http://ec.europa.eu/energy/technology/set_plan)
- [3] SmartGrids ERA-Net: [www.eranet-smartgrids.eu](http://www.eranet-smartgrids.eu)
- [4] BFE: Positionspapier zu Smart Grids, 2010
- [5] Kooperation DACH Smart Grids: [www.smartgrids-dach.eu](http://www.smartgrids-dach.eu)
- [6] Forschungsstelle Energienetze: [www.fen.ethz.ch](http://www.fen.ethz.ch)
- [7] T. Krause et al.: *Multiple-Energy Carriers: Modeling of Production, Delivery, and Consumption*, IEEE Proceedings, Vol. 99, No. 1, January 2011, pp 15 – 27
- [8] G. Koeppel: *Reliability Considerations of Future Energy Systems: Multi-Carrier Systems and the Effect of Energy Storage*, Diss. ETH No. 17058, 2007
- [9] M. Geidl: *Integrated Modeling and Optimization of Multi-Carrier Energy Systems*, Diss. ETH No. 17141, 2007
- [10] F. Adamek: *Demand Response and Energy Storage for a Cost Optimal Residential Energy Supply with Renewable Generation*, Diss ETH No. 19784, 2011
- [11] M. Berger: *Validierung des Energie-Hub Konzepts mittels einer Fallstudie in Baden-Dättwil*, Diss. ETH No. 19707, 2011
- [12] P. Ahcin: *Planning heating systems and building renovation with emissions targets*, Diss. ETH No. 20002, 2011
- [13] F. Kienzle: *Evaluation of Investments in Multi-Carrier Energy Systems under Uncertainty*, Diss. ETH No. 19332, 2010
- [14] B. Künzli: *Anwendung des Multi-Energie-Portfoliomodells auf das Erzeugungsportfolio der Stadt Zürich*, Diplomarbeit ETHZ, 2008
- [15] M. Arnold: *On Predictive Control for Coordination in Multi-Carrier Energy Systems*, Diss. ETH No. 19693, 2011
- [16] Bacher Energie AG: [aktivesverteilnetz.bacherenergie.ch](http://aktivesverteilnetz.bacherenergie.ch)
- [17] ENCO AG: IG V2G, SB, 2011
- [18] Konsortium VEiN: *VEiN – Verteile Einspeisung in Niederspannungsnetze*, JB, 2011
- [19] SER: [www.swisselectric-research.ch](http://www.swisselectric-research.ch)
- [20] SUPSI, Bacher Energie AG: *Swiss2G*, JB, 2011
- [21] IEA Enard: [www.iea-enard.org](http://www.iea-enard.org)
- [22] IEA Enard Annex 4, SB, 2011
- [23] IEA ISGAN: [www.iea-isgan.org](http://www.iea-isgan.org)
- [24] EEGI: [www.smart-grids.eu/?q=node/170](http://www.smart-grids.eu/?q=node/170)
- [25] Smart Grids Week 2011 Linz: [www.energiesystemeder-zukunft.at/results.html/id6310](http://www.energiesystemeder-zukunft.at/results.html/id6310)

## Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(\* IEA-Klassifikation)

- |  |  |          |                  |
|--|--|----------|------------------|
| <b>●</b>   | <b>ALPENERGY - VIRTUAL POWER SYSTEMS AS AN INSTRUMENT TO PROMOTE TRANSNATIONAL COOPERATION AND SUSTAINABLE ENERGY SUPPLY IN THE ALPINE SPACE</b> | R+D, Int | 6.2*             |
| Lead:  | Università della Svizzera Italiana   | Funding: | BFE, ARE, Kt. TI |
| Contact:   | Umberto Bondi <span style="float: right;">bondi@alari.ch</span>  | Period:  | 2008–2012        |
| Abstract: AlpEnergy addresses the need of balancing increased production of renewable energy sources. A concept introduced by the project, Virtual Power System (VPS), offers a solution by using ICT for an intelligent energy management. It focuses on both technical and economical aspects to introduce an efficient operational model that aims at a standardization of both technologies and procedures. It intends to provide new business opportunities to enterprises. |  |          |                  |
- |   |   |          |           |
|---|---|----------|-----------|
| <b>●</b>  | <b>ANALYSE DES FORSCHUNGSUMFELDS "SMART GRIDS" IN DER SCHWEIZ UND IN EUROPA</b> | R+D, Int | 6.2       |
| Lead:   | Bacher Energie AG   | Funding: | BFE       |
| Contact:  | Rainer Bacher <span style="float: right;">rainer.bacher@bacherenergie.ch</span> | Period:  | 2009–2012 |
| Abstract: In this project a Smart Grids information base is built in cooperation with European SmartGrids re-search institutions from universities and other research organizations to facilitate the European Smart Grids research, deployment and demonstration and its coordination. On the way from our actual electricity grid to the Smart Grids challenging regulatory, economic, social and technical challenges must be solved and scientific system questions answered. |   |          |           |
- |   |  |          |                  |
|---|--|----------|------------------|
| <b>●</b>  | <b>BI-DIRECTIONAL CHARGER FOR SWISS2G</b>                                  | R+D      | 6.2              |
| Lead:   | Drivetek AG  | Funding: | BFE, SER, Privat |
| Contact:  | Peter Baumann <span style="float: right;">peter.baumann@drivetek.ch</span> | Period:  | 2009–2011        |
| Abstract: The future integration of more renewable energy sources to the public AC grid will be a big challenge. With so called vehicle to grid (V2G) concepts energy from the traction batteries of electric cars can be used for grid regulation. The Swiss2G project studies a new approach to control this regulation concept locally in every electric car based on measured AC grid parameters. To realize the Swiss2G project a bidirectional charger is needed, a prototype is being developed in this project. |  |          |                  |
- |  |  |          |             |
|--|--|----------|-------------|
| <b>●</b>   | <b>BOOSTERCAP - DYNAMIC EXCITATION MODULE (DEM) TECHNOLOGY</b>                     | R+D      | 6.2         |
| Lead:  | Alstom Switzerland Ltd.  | Funding: | BFE, Privat |
| Contact:   | Stefan Keller <span style="float: right;">stefan.sk.keller@power.alstom.com</span> | Period:  | 2011–2013   |
| Abstract: With respect to low voltage ride-through requirements, the Critical Clearing Time (CCT) defines the maximum duration of a given voltage dip a generator can sustain without losing synchronism. In order to achieve higher CCT, a capacitor bank ("Dynamic Excitation Module") is proposed as a buffer system. |  |          |             |
- |   |   |          |             |
|---|---|----------|-------------|
| <b>●</b>  | <b>BPES - OPTIMAL SIZING AND CONTROL OF BALANCING POWER IN THE FUTURE EUROPEAN POWER SYSTEM INCLUDING TRANSMISSION SYSTEM CONSTRAINTS</b> | R+D, Int | 6.2         |
| Lead:   | ETH Zürich  | Funding: | BFE, Privat |
| Contact:  | Göran Andersson <span style="float: right;">andersson@eeh.ee.ethz.ch</span>   | Period:  | 2011–2014   |
| Abstract: The aim of the project is to determine optimal sizing and control of balance power in the future European power system considering transmission system constraints. |   |          |             |
- |  |  |          |             |
|--|--|----------|-------------|
| <b>●</b>   | <b>ENTWICKLUNG EINER KOSTENOPTIMIERTEN SALZ-BATTERIE-ZELLE FÜR DIE NETZANWENDUNG</b> | R+D      | 6.2         |
| Lead:  | Battery Consult Sagl   | Funding: | BFE, Privat |
| Contact:   | Cord-Henrich Dustmann <span style="float: right;">cdustmann@bluewin.ch</span>        | Period:  | 2011–2012   |
| Abstract: The project aims at developing a cost-optimized Na/NiCl <sub>2</sub> salt battery design for the direct use in electricity distribution grids. At present only concepts for mobile application are existing. |  |          |             |
- |   |  |          |           |
|---|--|----------|-----------|
| <b>●</b>  | <b>FOLGEABSCHÄTZUNG EINER EINFÜHRUNG VON «SMART METERING» IM ZUSAMMENHANG MIT «SMART GRIDS» IN DER SCHWEIZ</b> | R+D      | 6.2       |
| Lead:   | ETH Zürich; CONSENTEC GmbH; VISCHER AG   | Funding: | BFE       |
| Contact:  | Thorsten Staake <span style="float: right;">tstaake@ethz.ch</span>   | Period:  | 2011–2012 |
| Abstract: The project goal is to define different smart metering roll-out scenarios for Switzerland and to rate them with respect to economic, social and ecologic costs and benefits. It will be derived to which (market) player role costs and benefits are related. |  |          |           |

- **GEOGREEN - OPTIMIZING GREEN ENERGY AND GRID LOAD BY GEOGRAPHICAL STEERING OF ENERGY CONSUMPTION** R+D, Int 6.2

Lead:	Università della Svizzera Italiana, ALaRI	Funding:	BFE
Contact:	Umberto Bondi <a href="mailto:bondi@alari.ch">bondi@alari.ch</a>	Period:	2010–2013

Abstract: The project aims at bringing another approach to energy balance and overall power system stability. Introducing a concept of mobile consumer, it considers consumption and mobility, both in terms of time and space. In particular, electric vehicles and data centers processing tasks as typical cases of mobile consumers are considered.
- **HVDC NETWORKS** R+D, Int 6.2

Lead:	ETH Zürich	Funding:	BFE, Privat
Contact:	Christian Franck <a href="mailto:cfranck@ethz.ch">cfranck@ethz.ch</a>	Period:	2011–2015

Abstract: The primary aim of the project is to contribute to answer the question: “Under which conditions is a true HVDC network of advantage compared to a strengthened AC network and what would be the preferred scheme?”
- **IEA IA ENARD ANNEX II: DG SYSTEM INTEGRATION IN DISTRIBUTION NETWORKS** R+D, Int 6.2

Lead:	Bacher Energie AG	Funding:	BFE
Contact:	Rainer Bacher <a href="mailto:rainer.bacher@bacherenergie.ch">rainer.bacher@bacherenergie.ch</a>	Period:	2008–2011

Abstract: IEA ENARD Annex II addresses key policy making questions around distributed generation systems integration into low and medium voltage. First, a detailed actual distribution network analysis regarding technical, economical and regulatory aspects has been made. Secondly, barriers on the way from the actual distribution grid to the Smart Grids have been identified. Finally recommendations were worked out during the project how to overcome these barriers.
- **IEA IA ENARD ANNEX IV: TRANSMISSION SYSTEMS** R+D, Int 6.2

Lead:	Swissgrid AG	Funding:	BFE, Privat
Contact:	Christof Duthaler <a href="mailto:christof.duthaler@swissgrid.ch">christof.duthaler@swissgrid.ch</a>	Period:	2009–2011

Abstract: The aim of the IEA ENARD Annex IV is to establish a long term vision for developments in transmission systems beyond 2020. The scope of the work includes addressing the main barriers towards a necessary development of transmission capacity and to identify the most promising solutions and challenges in terms of expansion planning and market analysis, secure operation of the transmission networks and the need for new transmission technology.
- **IMPROSUME - THE IMPACT OF PROSUMERS IN A SMART GRID BASED ENERGY MARKET** R+D, Int 6.2

Lead:	Universität St. Gallen; Bacher Energie AG	Funding:	BFE
Contact:	Moritz Look <a href="mailto:moritz.look@unisg.ch">moritz.look@unisg.ch</a>	Period:	2010–2012

Abstract: “Prosumer” is an emerging concept in the power market that applies to consumers of energy that can also be producers. In a Smart Grid a prosumer can be a new and active participant in balancing the electricity system. An important requirement is acceptance and active adoption of the new possibility by the prosumer. This project focuses on prosumers and their role and influence on the future energy market, and the role’s impact on established structures will be highlighted.
- **IT-SICHERHEIT BEI SMART METERING** R+D 0

Lead:	Compass Security AG	Funding:	BFE, Privat
Contact:	Martin Loher <a href="mailto:martin.loher@csnc.ch">martin.loher@csnc.ch</a>	Period:	2011

Abstract: The local distribution grid operator of Zürich (ewz) has implemented a smart metering test set-up based on various technologies. Compass Security has been assigned to verify the IT-safety of this pilot project. Based on the test results a number of recommendations were formulated and a catalogue of requirements for smart metering infrastructures was compiled.
- **KONZEPTSTUDIE «GRIDBOX»** R+D 6.2

Lead:	Super Computing Systems AG; Bacher Energie AG	Funding:	BFE, Privat
Contact:	Anton Gunzinger <a href="mailto:toni.gunzinger@scs.ch">toni.gunzinger@scs.ch</a>	Period:	2011–2012

Abstract: A monitoring and control infrastructure for the future electricity grids will be defined and tested. It consists of intelligent low-cost “GridBoxes”. The goal is high operational grid stability with masses of decentralized electricity infeeds and flexible consumer equipment in an automated end-consumer market considering minimization of costs.

- **LEITUNG UND KOORDINATION DER SCHWEIZER TASK FORCES DER «KOOPERATION D-A-CH SMART GRIDS»** Int 6.2
- |          |  |          |             |
|----------|--|----------|-------------|
| Lead:    | Swissgrid, VSE, Electrosuisse, SWICO               | Funding: | BFE, Privat |
| Contact: | Alexander Küster<br>alexander.kuester@swissgrid.ch | Period:  | 2011        |
- Abstract: The «Kooperation D-A-CH Smart Grids» is based on a Memorandum of Understanding between the three neighboring European countries Germany, Austria and Switzerland. The main goal of this MoU is to closely collaborate in the field of R&D and dissemination in the emerging smart grids area. In order to coordinate the work of specific cross-cutting topics four task forces has been established.
- **POTENTIAL DER SCHWEIZER INFRASTRUKTURANLAGEN ZUR LASTVERSCHIEBUNG** R+D 6.2
- |          |   |          |           |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead:    | InfraWatt                               | Funding: | BFE       |
| Contact: | Ernst A. Müller<br>mueller@infrawatt.ch | Period:  | 2011–2012 |
- Abstract: In future, the infrastructure plants, so the wastewater treatment plants, water industries and waste incineration plants have an installed electrical power of approximately 1 GWel. The aim of this research is the investigation of the real capacities for the supply of (positive and negative) operating reserve / controlling power range for Switzerland.
- **PROJEKTLEITUNG «KOOPERATION D-A-CH SMART GRIDS»** Int 6.2
- |          |   |          |           |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead:    | Encontrol AG                            | Funding: | BFE       |
| Contact: | Alois Huser<br>alois.huser@encontrol.ch | Period:  | 2009–2012 |
- Abstract: The «Kooperation D-A-CH Smart Grids» is based on a Memorandum of Understanding between the three neighboring European countries Germany, Austria and Switzerland. The main goal of this MoU is to closely collaborate in the field of R&D and dissemination in the emerging smart grids area. Encontrol AG is mandated by SFOE to coordinate the Swiss activities and contributions.
- **SMARTGEN - EFFICIENT IDENTIFICATION OF OPPORTUNITIES FOR DISTRIBUTED GENERATION BASED ON SMART GRID TECHNOLOGY** R+D, Int 6.2
- |          |   |          |             |
|----------|---|----------|-------------|
| Lead:    | Bacher Energie AG                               | Funding: | BFE, Privat |
| Contact: | Rainer Bacher<br>rainer.bacher@bacherenergie.ch | Period:  | 2010–2013   |
- Abstract: SmartGen develops prototype tools for the identification of optimal distribution grids and the connection of distributed generation stations. An indirect goal of the project is to speed up the introduction of SmartGrids Technologies in Europe by modern ICT (Information and Communication Technology) based tools. SmartGen is a cooperative project within the so-called SmartGrids ERA-Net (European Research Area Network) of partners in NO, DK, Latvia and CH.
- **SMART GRID-POLYSUN – DESIGNTOOL FÜR LOKALES LASTMANAGEMENT** R+D, Int 6.2
- |          |   |          |             |
|----------|---|----------|-------------|
| Lead:    | ETH Zürich                                  | Funding: | BFE, Privat |
| Contact: | Göran Andersson<br>andersson@eeh.ee.ethz.ch | Period:  | 2011–2014   |
- Abstract: In this project, the software tool Polysun is extended to support the planning and evaluation of local load management and energy optimization. The goal is to improve the concurrency of PV and wind power with electrical loads and to use thermal masses in buildings (e.g. hot water storage tanks or refrigerators) for the load balancing of the power grid.
- **SWISS2G** P+D 6.2
- |          |                                     |          |                  |
|----------|-------------------------------------|----------|------------------|
| Lead:    | SUPSI; Bacher Energie AG            | Funding: | BFE, SER, Privat |
| Contact: | Roman Rudel<br>roman.rudel@supsi.ch | Period:  | 2009–2013        |
- Abstract: Field test and simulations with distributed generation units and electric vehicles in order to investigate their impacts on the electrical distribution grid. In a first step the influence of distributed generation units and electric vehicles to the grid will be measured with highly accurate phasor, frequency and voltage measurement devices. In a second step simulation specialists will “try” to reproduce these measured phenomena with help of load flow simulation software programmes.
- **TOWARDS FUTURE ELECTRICITY NETWORKS** R+D, Int 6.2
- |          |   |          |             |
|----------|---|----------|-------------|
| Lead:    | ETH Zürich                                  | Funding: | BFE, Privat |
| Contact: | Göran Andersson<br>andersson@eeh.ee.ethz.ch | Period:  | 2007–2011   |
- Abstract: The overall goal of this project is to develop an analysis and planning tool for electricity transmission systems taking into account economic, environmental and social requirements. Based on studies and investigations using the tool, sustainable transmission investment plans supporting the transition to future grids are being developed. In addition to standard power planning tools, it embraces future power plants, power transmission system, indirect costs caused by the electric power system as well as environmental and societal standards.

● **VEIN - VERTEILTE EINSPEISUNGEN IN NIEDERSPANNUNGSNETZE** R+D, P+D 6.2

Lead:	Konsortium VEiN	Funding:	BFE, Privat
Contact:	Gilbert Schnyder <a href="mailto:gilbert.schnyder@sing.ch">gilbert.schnyder@sing.ch</a>	Period:	2009–2013

Abstract: In the future renewable energy sources as well as heat power cogeneration will be used more and more for decentralized energy production. The system operators have therefore an interest to detect their effects on the operation of distribution grids as well as the new challenges in planning and dimensioning of assets and any necessary adjustments in the standards. By means of a pilot project the aim is to prepare the accordingly necessary knowledge and to gain the experience.

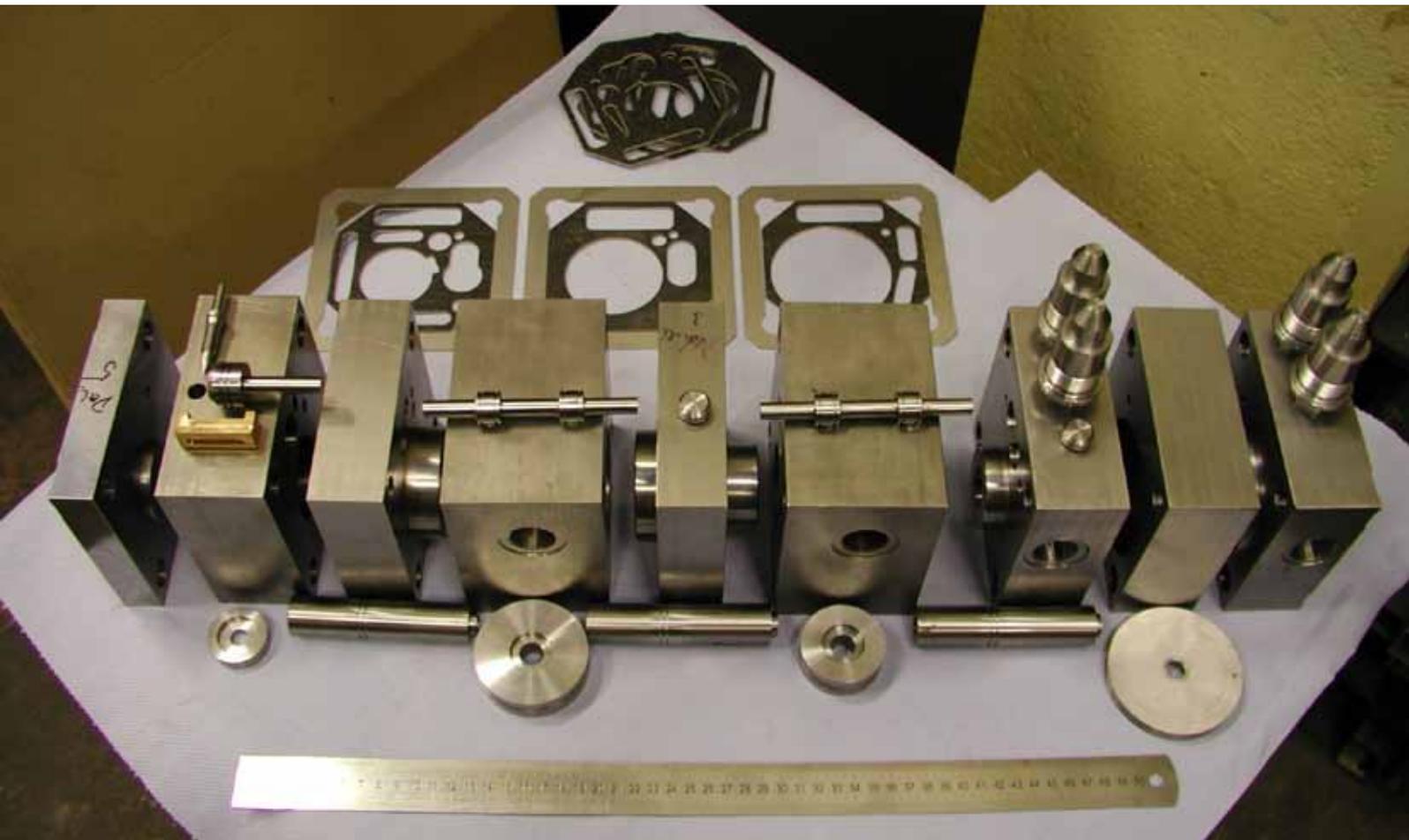
● **VOFEN - VISION OF FUTURE ENERGY NETWORKS** R+D, Int 6.2

Lead:	ETH Zürich	Funding:	BFE, Privat
Contact:	Göran Andersson <a href="mailto:andersson@eeh.ee.ethz.ch">andersson@eeh.ee.ethz.ch</a>	Period:	2004–2011

Abstract: The objective of the Vision of Future Energy Networks (VoFEN) project is to develop scenarios how the systems for transmission and distribution of (electrical) energy should look like in 30 to 50 years for the improvement of ecology, economy and functionality. The idea is to build a fictitious optimum system from scratch neglecting the current system structure and to identify the differences between the present situation and the desirable system (backcast).

Thomas Kopp

# Wärmepumpen, Wärme- Kraft-Kopplung, Kälte



**Titelbild:**

Einzelteile der Expansionsmaschine zur Nutzung der Druckdifferenz zwischen Hoch- und Niederdruck in einer weltweit ersten kommerziellen Pluskühlanlage mit CO<sub>2</sub> als Arbeitsmedium (R. Gerber, Frigo-Consulting AG Gümligen; Zusammenarbeit Frigo-Consulting AG, Gümligen und TU Dresden).

**BFE Forschungsprogramm Wärmepumpen, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte**

Überblicksbericht 2011

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
CH-3003 Bern

**Programmleiter BFE (Autor):**

Prof. Dr. Thomas Kopp, HSR Hochschule für Technik Rapperswil (tkopp@hsr.ch)

**Bereichsleiter BFE:**

Andreas Eckmanns (andreas.eckmanns@bfe.admin.ch)

[www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)

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

## Einleitung

Das Forschungsprogramm Wärmepumpen, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte fördert gemäss dem Energieforschungskonzept des Bundes [1] und dem dazugehörigen Detailkonzept [2] die Entwicklung von modernen Heiz- und Kühlsystemen. Eine kurzfristige Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstosses um 50 % im Bereich Gebäudeheizung ist möglich, indem der von mittleren und grösseren Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK-Anlagen) produzierte Strom in dezentralen Wärmepumpen aller Leistungsklassen eingesetzt wird, die dann in den Gebäuden Niedertemperaturheizwärme erzeugen. Mittelfristig soll keine fossile Energie mehr direkt für Heizzwecke eingesetzt werden. Heute wird im Sektor Haushalte immer noch rund 60 % fossile Energie eingesetzt, die vor allem für Heizzwecke dient [3]. Erst ca 15 % des Energieverbrauches der Haushalte stammt aus erneuerbarer Energie. In der Kälteerzeugung und -anwendung ist eine Energieeinsparung von ca. 25 % möglich [4]. Diese Ziele können über eine verbesserte Effizienz der Komponenten und eine optimierte Systemintegration erreicht werden. Kostenreduktionen sind Voraussetzungen um eine rasche Marktpenetration zu erreichen. Diese können durch Standardisierung der Komponenten und Systeme erreicht werden.

Die Forschungsschwerpunkte 2008 bis 2011 des Programmes sind:

- Verbesserung der Komponenten und der thermodynamischen Kreisprozesse bei Wärmepumpen und Kälteanlagen;
- Effizienzverbesserungen bei WKK-Anlagen und Reduktion der Schadstoffemissionen;
- Ganzheitliche Systemoptimierung von Wärmepumpen – WKK – Kälte – Speicherung;
- Hoch effiziente Systeme für Warmwasseraufbereitung;
- Miniaturisierung und neue Wege für den Einbau von Heiz- und Kühlsystemen mit Wärmepumpen (plug and play);
- Umweltverträgliche Arbeitsmedien für Wärmepumpen und Kältemaschinen.

IEA Klassifikation: 3.7 Other Renewables

Schweizer Klassifikation: 2.3 Umgebungswärme

## Programmschwerpunkte

Gemäss den Programmschwerpunkten wurden im Berichtsjahr fünf Projekte abgeschlossen, sieben sind weiter in Bearbeitung und zwei neue Projekte konnten gestartet werden.

Im Bereich «Verbesserung der Komponenten und der thermodynamischen Kreisprozesse bei Wärmepumpen und Kälteanlagen» wurden Untersuchungen an drehzahlgeregelten Kompressoren und Ventilatoren [5] durchgeführt (siehe Highlights). Im Sektor Kälteanlagen konnte an einer gewerblichen Kälteanlage mit CO<sub>2</sub> als Kältemittel eine mechanische Expansionsmaschine [6] ausgemessen werden, die in den Highlights dargestellt wird.

Im Bereich «Effizienzverbesserungen bei WKK-Anlagen und Reduktion der Schadstoffemission» wurde die Erhöhung des Wirkungsgrades eines Gasmotors durch Erzeugung eines Unterdruckes im Abgasstrang untersucht und das Projekt abgeschlossen [7].

Unter dem Arbeitstitel «Ganzheitliche Systemoptimierung von Wärmepumpen – WKK – Kälte – Speicherung» laufen die Arbeiten im IEA-HPP Annex «Solar and Heat Pump Systems» [8], siehe Highlights. Zur erfolgreichen internationalen Kooperation tragen auch die beiden Projekte «SOFOWA – Kombination von Solarthermie, Fotovoltaik und Wärmepumpen» [9] und «Optimierung der Einbindung eines 28-m<sup>3</sup>-Wasserspeichers in die Beheizung und Warmwasserversorgung eines Einfamilienhauses mit Wasser/Wasser-Wärmepumpe und Solarkollektoren» [10] bei.

Im Zuge der Erneuerung des Gebädeparks mit besser isolierten Gebäuden erhält der Bereich «Hoch effiziente Systeme für Warmwasseraufbereitung» eine erhöhte Wichtigkeit, die mit dem Projekt «Warmwasserbereitstellung mittels Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern» [11] bearbeitet wurde. Nach Durchführung eines Workshops mit Branchenvertreter konnte das Projekt abgeschlossen werden.

Unter dem Arbeitstitel «Umweltverträgliche Arbeitsmedien für Wärmepumpen und Kältemaschinen» wurde ein Turbokompressor für eine Trinkwasser-Wärmepumpe mit CO<sub>2</sub> und einer Leistung im Bereich von 100 kW entwickelt [12].

### Rückblick und Bewertung 2011

Im Berichtsjahr 2011 konnten interessante Projekte erfolgreich abgeschlossen werden. Speziell zu erwähnen sind die Projekte «Integration einer Expansionsmaschine in ein CO<sub>2</sub>-Kältesystem» [6] und «Xhost Harvester – mehr Effizienz mit dem gleichen Motor» [7]. Obwohl die Entwicklung des ölfreien Turbokompressors für Warmwasser-Wärmepumpen weitergeht, wurde die erste vom BFE unterstützte Entwicklungsphase «Ölfreier CO<sub>2</sub>-Kompressor für Grosswärmepumpen zur Warmwassererzeugung» [12] abgeschlossen. Auch das Projekt «Thermally Driven Heat Pump Based on Double Rankine Cycle» [13] wurde abgeschlossen und die Wirkungsweise des kleinen Turboverdichters/-expanders konnte mit Messungen nachgewiesen werden. Schlussendlich wurde im Berichtsjahr der Schlussreport des IEA-HPP Annex 32 «Economical Heating and Cooling Systems for Low Energy Houses» [14] mit allen internationalen Beiträgen veröffentlicht.

### Ausblick

Das Projekt «Effiziente LW-Wärmepumpen durch kontrollierte Leistungsregelung» [5] soll anfangs 2012 nach Auswertung der zusätzlichen Messungen mit einem von Emerson gelieferten Inverter-Scroll-Kompressor der 2. Generation abgeschlossen werden. Die Jahresarbeitszahl konnte in Abhängigkeit der Heizkurven um 10 bis 40 % gegenüber Luft/Wasser-Wärmepumpen mit EIN/AUS-Regelung verbessert werden. Mit einem leider nicht am Markt erhältlichen Kompressor-Prototyp wurden sogar Verbesserungen von 20 bis 50 % erreicht. In der nahen Zukunft soll das Verbesserungspotenzial von drehzahlgeregelten Wärmepumpen auch für Sole/Wasser-Wärmepumpen untersucht werden.

Auch aus dem Projekt «Warmwasserbereitstellung mittels Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern» [11] sind praxisgerechte Resultate entstanden. Verschiedene bekannte, aber auch neuartige Methoden wurden untersucht. Da die Warmwasser-Bereitung einen zunehmenden Anteil des Energiebedarfs

von modernen Gebäuden einnehmen wird, sollen die Erkenntnisse experimentell verifiziert werden.

Die im Rahmen des IEA Heat Pump Programme laufenden Annex-Projekte 37 «Demonstration of Field Measurements on Heat Pump Systems in Buildings» [15], 38 «Solar and Heat Pump Systems» [8] und 39 «A Common Method for Testing and Rating of Residential Heat Pumps and Air Conditioners Annual/Seasonal Performance (SPF)» [16] werden die ersten Resultate generieren und diese in internationalen Workshops präsentieren.

Ab 2012 wird der Bereich WKK vom Forschungsprogramm Verbrennung betreut werden, weshalb der Name des bisherigen Programms «Wärmepumpen, WKK, Kälte» auf «Wärmepumpen und Kälte» geändert wird.

## Highlights aus Forschung und Entwicklung

Wärmepumpen mit Drehzahlregelung: Wärmepumpen sollen immer die momentan erforderliche Heizleistung an ein Gebäude abgeben. Arbeiten sie im Ein/Aus-Betrieb produzieren sie in der Arbeitsphase eine zu grosse Leistung, die mit höheren Temperaturgefällen ans Gebäude übertragen wird, wobei höhere Verluste entstehen. Dieser Nachteil kann mit drehzahlgeregelten Kompressoren und Ventilatoren vermieden werden.

Kombination von Solarthermie und Wärmepumpen: Die Kombination von Solarthermie und Wärmepumpe wird von umweltbewussten Bauherrschaften häufig nachgefragt. Die Kombination ist aber technisch nicht einfach und erfordert einen erhöhten Regelbedarf und auch eine systemische Gesamtoptimierung. Da die Fragestellung nicht nur in der Schweiz aktuell ist, hat sich eine von der IEA koordinierte internationale Arbeitsgemeinschaft gebildet.

Turbokompressor und Expansionsmaschine für Wärmepumpen und Kältemaschinen mit CO<sub>2</sub>: Das Arbeitsmedium CO<sub>2</sub> ist ein natürliches, umweltfreundliches Kältemittel. Es benötigt aber für Anwendungen im Bereich Wärmepumpen und teilweise auch für Kälteerzeugung sehr hohe Arbeitsdrücke.

### Wärmepumpen mit Drehzahlregelung

Moderne Wärmepumpen sollten immer die gefragte aussentemperaturabhängige Heizleistung abgeben. Wärmepumpen mit Ein/Aus-Regelung können das aber aus technischen Gründen nicht. Wenn eine Wärmepumpe im Ein-Modus arbeitet, dreht der Kompressor mit einer Fixdrehzahl. Das angesaugte Arbeitsmedium hat dabei eine Dichte, die von der Verdampfer-temperatur abhängt. Diese wiederum hängt bei Luft/Wasser-Wärmepumpen von der Aussentemperatur ab. Je tiefer die Aussentemperatur, desto tiefer der Verdampferdruck und damit desto tiefer die Dichte. Damit fördert der Kompressor weniger Arbeitsmedium. Zudem wird das Fördervolumen bei Kolbenkompressoren auch durch höhere Rückexpansion verkleinert. Die



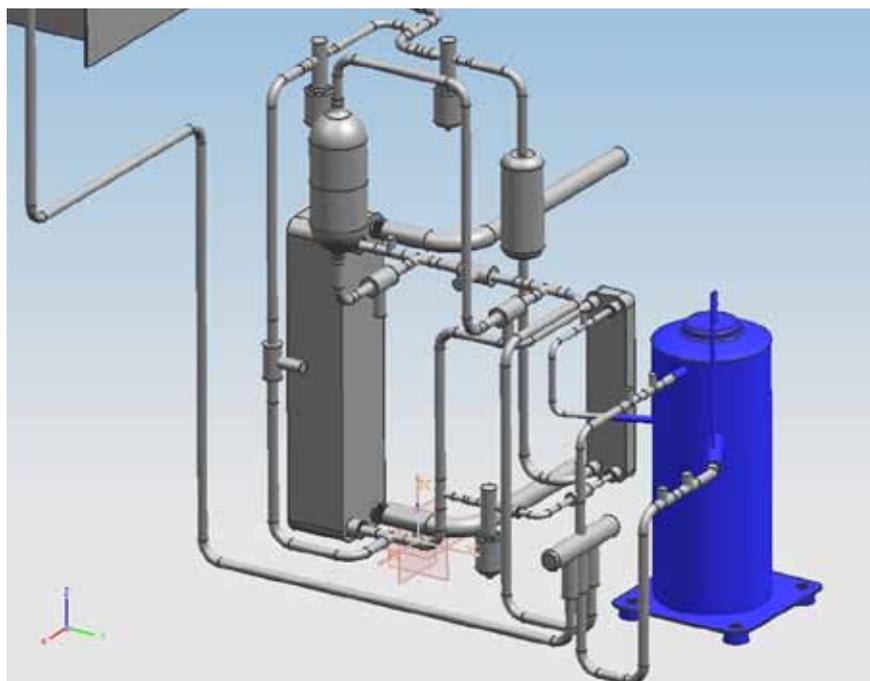
Figur 1: Versuchsanlage der HTA Luzern zur Untersuchung von drehzahlvariablen Luft/Wasser-Wärmepumpen [5]. Sowohl der Kompressor wie auch der Ventilator werden drehzahlgeregelt.

Wärmepumpe kann also bei tieferen Aussentemperaturen und konstanter Drehzahl weniger Wärme abgeben. Das Gebäude, das sich wie ein grosser Wärmetauscher verhält, benötigt aber bei tieferen Aussentemperaturen eine höhere Heizleistung. Dieses Dilemma wurde bisher so gelöst, dass die Wärmepumpe auf die tiefste Aussentemperatur dimensioniert wurde und bei höheren Aussentemperaturen im Ein/Aus-Modus taktweise arbeitete. Dadurch fördert sie aber im Teillastbereich immer höhere Wärmeströme, als das Gebäude effektiv im Zeitmoment verlangt. Diese höheren Wärmeströme führen zu höheren Temperaturdifferenzen in den Wärmetauschern und verringern dadurch die Effizienz. Eine technisch saubere Lösung liegt in der Regelung der Drehzahl des Kompressors und bei Luft/Wasser-Wärmepumpen (LW-WP) auch des Ventilator, der die Aussenluft durch den Verdampfer fördert. Die Umsetzung dieses Konzepts wird im Projekt «Effiziente Luft/Wasser-Wärmepumpe durch kontinuierliche Leistungsregelung» [5] untersucht. Bei der Verwendung effizient regelbarer Kompressoren und Ventilatoren liegen die erreichbaren Jahresarbeitszahlen leistungsgeregelter LW-WP im Bereich von heutigen Ein/Aus-geregelten Sole/Wasser-Wärmepumpen. Durch die ermutigenden Resultate bei LW-WP sollen die Un-

tersuchungen von drehzahlgeregelten Wärmepumpen in einem Folgeprojekt auch auf Sole/Wasser-Wärmepumpen ausgedehnt werden.

### Kombination von Solarthermienutzung und Wärmepumpe

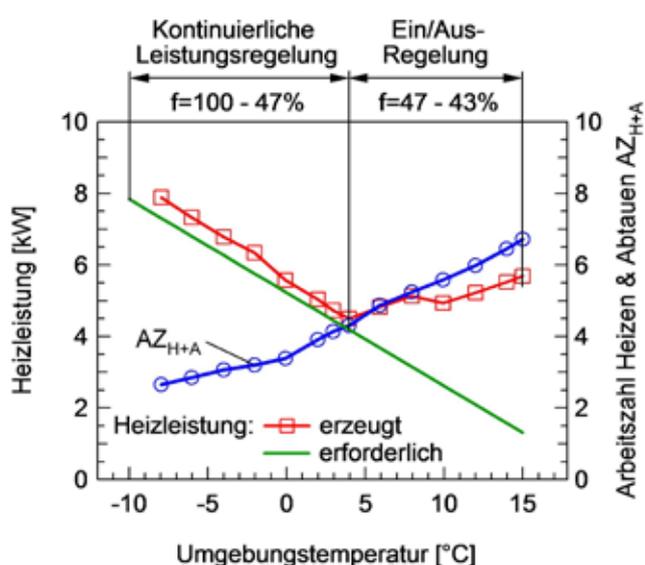
Die Kombination von Solarthermie und Wärmepumpe wird von umweltbewussten Bauherrschaften häufig nachgefragt. Die Kombination ist aber technisch nicht einfach umsetzbar. So wurden in Einzelfällen auch ineffiziente Anlagen gebaut, die wegen einer schlechten Regelung in der Nacht mit der Wärmepumpe Wärme auf die Solarkollektoren geführt hatten, die dann den Nachthimmel «erwärmte». Selbstverständlich wurden auch gut funktionierende Anlage-Kombinationen gebaut. Die Problematik stiess international auf grosses Interesse. Deshalb wurde in den beiden IEA-Implementing Agreements SHC (Solar Heating and Cooling) und HPP (Heat Pump Programme) ein gemeinsames internationales Projekt «Solar + Heat Pump Systems» [8] gestartet, welches bis 2014 läuft. Daran beteiligen sich mehr als 10 Länder mit 30 Forschungsteams. Aus der Schweiz werden im Forschungsprogramm Wärmepumpen, WKK, Kälte zwei Projekte beigesteuert.



Figur 2: 3-D-Ansicht des CAD-Modells des Luft/Wasser-Wärmepumpen-Prototyps mit Digital-Scroll-Kompressor [5]

Das Projekt «Optimierung der Einbindung eines 28-m<sup>3</sup>-Wasser-Speichers in die Beheizung und die Warmwasserversorgung eines Einfamilienhauses mit Wasser/Wasser-Wärmepumpe und Solarkollektoren» [10] untersucht die Kombination Wärmepumpe und Solarthermie unter Einbezug einer Wär-

mespeicherung in einem gossen Tank. Der Tank stammt in dieser Anlage von einem ausrangierten Sattelschlepper-Auflieger, der für Milchtransporte eingesetzt wurde. Er wurde vom Auflieger abmontiert und noch während der Rohbauphase im Keller des Hauses installiert. Es entstehen durch die Anzahl



Figur 3: Erforderliche (grün) und erzeugte (rot) Heizleistung sowie Arbeitszahl Heizen & Abtauen (in blau) des Luft/Wasser-Wärmepumpen-Prototypen mit Inverter-Scroll Kompressor mit Dampfeinspritzung für die Heizkurve «hochwertig sanierter Altbau» (35 °C Rücklauftemperatur, 41 °C Vorlauftemperatur bei -10 °C Umgebungstemperatur) ohne Berücksichtigung der Eis- und Frostbildung.

der Komponenten dieser Anlage nun natürlich viele Regelungsmöglichkeiten, die im Projekt optimiert wurden. Auch wenn das Grundkonzept dieser Anlage etwas aussergewöhnlich ist, werden doch klare Aussagen zum Wiederholungspotenzial dieses Konzepts erwartet. Die Kernfrage ist, in wie weit sich grössere Speichermöglichkeiten energetisch aber auch kommerziell lohnen. Das Projekt soll in der ersten Hälfte 2012 abgeschlossen werden, es werden gemäss einer Zwischenbilanz Einsparungen von 17 % Stromkosten und 6,5 % Primärenergie erwartet.

Der andere Beitrag aus der Schweiz stellt das Projekt «SOFOWA – Kombination von Solarthermie, Fotovoltaik und Wärmepumpen» [9] dar. Es ist auf Gebäude mit geringem Energiebedarf ausgerichtet, untersucht aber generell die Vor- und Nachteile von Kombinationen verschiedener Energiesysteme. Es ist zum Beispiel schon lange bekannt, dass gekühlte PV-Kollektoren einen besseren Wirkungsgrad aufweisen. Welches ist nun die geschickteste Art der Kühlung und wohin soll die Kühlwärme optimal geleitet werden?

### Turbokompressor und Expansionsmaschine für Wärmepumpen und Kältemaschinen mit CO<sub>2</sub>

Im neuen Projekt «Effizienzsteigerung von transkritischen CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen» [17] sollen Methoden zur Effizienzsteigerung von transkritischen Kälteanlagen eruiert werden. Dabei werden 3 Prinzipien in kommerziell ausgeführten Anlagen bewertet:

- Integration einer Expansionsmaschine in eine CO<sub>2</sub>-Kälteanlage
- Kombination von CO<sub>2</sub>-Kälteanlage und Adsorptionskälteanlage
- Transkritische CO<sub>2</sub>-Kälteanlage mit Parallelkompression

Im Jahr 2012 sollen dann auch noch nicht umgesetzte Potenziale und Methoden untersucht und an einem konkreten P&D-Objekt ausgemessen werden. Dabei sollen natürlich auch Vergleiche mit den bekannten Prinzipien angestellt werden.

## Nationale Zusammenarbeit

Durch die Mitarbeit von privaten Firmen in den meist sehr anwendungsnahe Projekten beteiligt sich die Privatwirtschaft intensiv an der Forschungstätigkeit. Das Engagement reicht dabei von der Mitarbeit in einer Begleitgruppe bis zur Beisteuerung erheblicher finanzieller und personeller Beiträge. Da die Projektleiter häufig in einer Hochschule oder Fachhochschule tätig sind, besteht zu diesen Institutionen eine besonders intensive Beziehung. Die Projektthemen wirken sich dabei auch auf den Unterricht aus, denn innerhalb der Projekte können auch kostengünstige Studienarbeiten integriert werden. Viele Institute an den Fachhochschulen bilden eigentliche Kompetenzzentren, auch wenn sie im Sinne der offiziellen Bezeichnung für Kompetenzzentren zu klein sind. Dafür wird an diesen Instituten ohne grossen Overhead sehr effizient gearbeitet.

Nebst dem BFE engagieren sich im Programmbereich Wärmepumpen, WKK, Kälte auch andere Förderorganisationen. So bestehen Kontakte zum Forschungsfonds der Gaswirtschaft (Foga, [www.erdgas.ch](http://www.erdgas.ch)), dem Axpo

Naturstromfonds ([www.axpo.ch](http://www.axpo.ch)), zu SwisselectricResearch ([www.swisselectric-research.ch](http://www.swisselectric-research.ch)) und zu verschiedenen kantonalen und städtischen Ämtern. Mit den Branchenverbänden besteht ein institutionalisierter Informationsaustausch, denn alle wesentlichen Verbände sind in der Programm-Begleitgruppe vertreten. Dies sind der FWS (Fachverband Wärmepumpen Schweiz), der WKK-Fachverband der SVK (Schweizerischer Verein für Kältetechnik) und der SWKI (Schweizerischer Verein der Gebäudetechnik). Kontakt besteht auch zu V3E (Verein Effiziente Energie-Erzeugung).

Mit den BFE-Programmen «Solarwärme und Wärmespeicherung» sowie «Energie in Gebäuden» besteht eine intensive Zusammenarbeit, da diese Programme ebenfalls vom gleichen Bereichsleiter (Andreas Eckmanns) geleitet werden. Mit den Programmen «Verbrennung», «Biomasse (ohne Holz)», «Holzenergie», «Geothermie» und «Elektrizitätstechnologien und -anwendungen» wird auf Projektebene ebenfalls zusammengearbeitet.

## Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit erfolgt vor allem durch eine aktive Mitarbeit im Heat Pump Programme HPP ([www.heatpumpcentre.org](http://www.heatpumpcentre.org)) der IEA. 2010 konnte der IEA-HPP-Annex 38 «Solar and Heat Pump Systems» als gemeinsamer Annex der Implementing Agreements «Heat Pumping Technologies HPP» und «Solar Heating and Cooling SHC» [8] gestartet werden, der nun im Jahr 2011 in vier Sub-Projects die Arbeiten weiterführt. Operating Agent für diesen Joint-Annex ist der Forschungsprogrammleiter Jean-Christophe Hadorn. Im HPP-Annex arbeiten die Länder Deutschland, Finnland, United Kingdom und die Schweiz zusammen. Die Schweiz steuert je ein Projekt der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) und der FH Fribourg bei. Im Gemeinschaftsprojekt IEA-HPP-Annex 32 «Economic Heating and Cooling for Low Energy Houses» [14] stellt die FHNW ebenfalls den Operating Agent (Carsten Wemhöner) und steuert ein nationales Projekt bei. In diesem Annex bearbeiteten Forscherteams aus 10 Ländern die Entwicklung von multifunktionalen Wärmepumpen mit einer Leistung zwischen 3 und 5 kW, den dazugehörigen Feldtests und der Ableitung von Empfehlungen für die Praxis ([www.annex32.org](http://www.annex32.org)). Ende 2011 konnten alle erarbeiteten Abschluss-Dokumente auf der Webseite des BFE aufgeschaltet werden.

Das IEA Heat Pump Programme organisiert verschiedene internationale, gemeinsame Aktivitäten im Rahmen von Annexen. Ende 2010 konnten die Annexe IEA-HPP-An-

nex 37 «Demonstration of Field Measurements on Heat Pump Systems in Buildings» [15] und IEA-HPP-Annex 39 «A Common Method for Testing and Rating of Residential Heat Pumps and Air Conditioners Annual and Seasonal Performance (SPF)» [16] mit aktiver Beteiligung der Schweiz gestartet werden. 2011 lieferten die Forscher aus der Schweiz zahlreiche Beiträge an Workshops.

Im Berichtsjahr 2011 wurden auch die letzten Vorbereitungen für die 10<sup>th</sup> International Heat Pump Conference vom 17. bis 19. Mai 2011 in Tokyo vom Programmleiter koordiniert, der die Funktion des Chairman des internationalen Konferenzkomitees IOC einnahm. Leider musste die Konferenz infolge des Tsunami vom 11. März 2011 in einer Web-Konferenz durchgeführt werden. Trotzdem wurden 7 Grussadressen, 14 Keynotes und 191 Papers präsentiert. 377 Teilnehmer nahmen an der Web-Konferenz teil. Die Schweiz hat diese Konferenz als Country-Sponsor unterstützt. Von Forschern aus der Schweiz wurden 16 Papers und eine Keynote-Präsentation publiziert. Obwohl eine Web-Konferenz natürlich wegen wegfallendem Reiseaufwand eine sehr umweltfreundliche Durchführungsart ist, fehlen leider doch die individuellen Gespräche und Diskussionen mit den Vortragenden und unter den Teilnehmern. Die nächste, 11. IEA Heat Pump Konferenz wird im Mai 2014 in Montreal stattfinden.

## Referenzen

- [1] Eidgenössische Energieforschungskommission CORE: Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 bis 2011, Bundesamt für Energie (2007).
- [2] Th. Kopp und A. Eckmanns: Detailkonzept des Forschungsprogramms Wärmepumpen, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte für die Jahre 2008 bis 2011, BFE (2009).
- [3] Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2010: Bundesamt für Energie (2011).
- [4] Thomas Lang, Basler&Hofmann, Zürich: Workshop Lücken zwischen den Gewerken, Kälte-Forum 2008.
- [5] L. Gasser, M. Albert, M. Häusermann und B. Wellig: Effiziente Luft/Wasser-Wärmepumpen durch kontinuierliche Leistungsregelung, BFE-Schlussbericht (2012).
- [6] R. Gerber: Effiziente Kälteerzeugung – Integration einer Expansionsmaschine in ein CO<sub>2</sub>-Kältesystem, BFE-Schlussbericht (2011).
- [7] M. Schmid, M. Vögeli: Xhost Harvester – Mehr Effizienz mit dem gleichen Motor, BFE-Schlussbericht (2011).
- [8] IEA-HPP-Annex 38 «Solar and Heat Pump Systems», ([www.heatpumpcentre.org](http://www.heatpumpcentre.org) and [www.iea-shc.org/task44](http://www.iea-shc.org/task44) ).
- [9] R. Dott, Th. Afjei: SOFOWA – Kombination von Solarthermie, Fotovoltaik und Wärmepumpen, BFE-Jahresbericht (2011).
- [10] P. Kurmann, T. Mesot, T. Ursenbacher: Optimierung der Einbindung eines 28-m<sup>3</sup>-Wasserspeichers in die Beheizung und die WW-Versorgung eines EFH mit W/W-Wärmepumpe und Solarkollektoren, BFE-Schlussbericht (2011).
- [11] B. Vetsch, A. Gschwend, St. Bertsch: Warmwasserbereitstellung mittels Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern, BFE-Schlussbericht (2011).
- [12] D. Uhlenhaut, J. Vega Völk: Ölfreier CO<sub>2</sub>-Kompressor für Grosswärmepumpen zur Warmwassererzeugung, BFE-Schlussbericht (2011).
- [13] J. Demierre, D. Favrat: Thermally Driven Heat Pump Based on double Rankine Cycle, BFE-Schlussbericht (2011).
- [14] C. Wemhöner et al.: Economical Heating and Cooling Systems for Low Energy Houses, BFE-Schlussbericht (2011) und international Reports und Factsheets, [www.annex32.net](http://www.annex32.net) und [www.heatpumpcentre.org](http://www.heatpumpcentre.org) .
- [15] IEA-HPP-Annex 37, «Demonstration of Field Measurements on Heat Pump Systems in Buildings», ([www.heatpumpcentre.org](http://www.heatpumpcentre.org) ).
- [16] IEA-HPP-Annex 39 «A common method for testing and rating of residential heat pumps and air conditioners annual/seasonal performance (SPF)», ([www.heatpumpcentre.org](http://www.heatpumpcentre.org) ).
- [17] R. Gerber, J. Schönenberger: Effizienzsteigerungen von transkritischen CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen, BFE-Jahresbericht (2011).

## Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(\* IEA-Klassifikation)

- EFFIZIENTE LUFT/WASSER-WÄRMEPUMPEN DURCH KONTINUIERLICHE LEISTUNGSREGELUNG** R+D 7.2\*

Lead: Hochschule Luzern – Technik und Architektur	Funding: BFE
Contact: Beat Wellig <a href="mailto:beat.wellig@hslu.ch">beat.wellig@hslu.ch</a>	Period: 2008–2011

Abstract: Als Ziel sollen Auslegungs- und Planungsgrundlagen für LW-WP mit kontinuierlicher Leistungsregelung erarbeitet werden. Das Potenzial der Leistungsregelung wurde durch drei verschiedene Prototypen leistungsgeregelter LW-WP bestätigt. Bei der Verwendung effizient regelbarer Kompressoren und Ventilatoren liegen die erreichbaren Jahresarbeitszahlen leistungsgeregelter LW-WP im Bereich von heutigen Ein/Aus-geregelten Sole/Wasser-Wärmepumpen.
- EFFIZIENTE KÄLTEERZEUGUNG – INTEGRATION EINER EXPANSIONSMASCHINE IN EIN CO<sub>2</sub>-KÄLTESYSTEM** R+D 7.2

Lead: Frigo-Consulting AG	Funding: BFE
Contact: Raphael Gerber <a href="mailto:r.gerber@frigoconsulting.ch">r.gerber@frigoconsulting.ch</a>	Period: 2009–2011

Abstract: Das Kältemittel CO<sub>2</sub> kommt in stationären Kälteanlagen vermehrt zum Einsatz. Die relativ schlechte Leistungszahl des Kaltdampfprozesses mit CO<sub>2</sub> kann mit einer arbeitsleistenden Entspannung thermodynamisch verbessert werden. In einer realen Anlage im Feld ist eine Expansions-Kompressions-Maschine in Betrieb genommen worden. Die Hubkolbenmaschine mit Verdichtungs- und Expansionsteilen und variabler Förderleistung wurde in Zusammenarbeit mit der TU Dresden entwickelt.
- XHOST HARVESTER – MEHR EFFIZIENZ MIT DEM GLEICHEN MOTOR** R+D 7.2

Lead: Ökozentrum Langenbruck	Funding: BFE
Contact: Martin Schmid, Markus Vögeli <a href="mailto:martin.schmid@oekozentrum.ch">martin.schmid@oekozentrum.ch</a>	Period: 2010–2011

Abstract: Xhost Harvester ist eine patentierte Vorrichtung, welche einen kleinen Teil der Abgas-Abwärme eines thermischen Prozesses benutzt, um einen Unterdruck im Abgasstrang zu erzeugen. Dieser Unterdruck bewirkt eine Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades. In diesem Projekt wird dieses Konzept an einem Erdgas-BHKW getestet. Die gemessene Effizienzsteigerung betrug 2.6 % bei 16 hPa Unterdruck. Erwartet waren 6 % bei einem Unterdruck von bis zu 65 hPa. Theorie und Praxis korrespondieren dennoch gut.
- IEA-HPP-ANNEX 38: SOLAR AND HEAT PUMP SYSTEMS** R+D 7.2

Lead: IEA Heat Pump Programme	Funding: BFE
Contact: <a href="http://www.heatpumpcentre.org">www.heatpumpcentre.org</a>	Period: 2010–2014

Abstract: Das internationale Gemeinschaftsprojekt IEA-HPP Annex 38 hat das Ziel, die Einsatzmöglichkeiten der Kombination von Wärmepumpen und Solarthermie zu evaluieren und zu optimieren. Dazu werden existierende Systeme bewertet und heutige Testmethoden verglichen. Simulationen von heutigen Systemen und ergänzenden neuen Komponenten sollen das erreichbare Potenzial aufzeigen. Die Resultate werden den Herstellern offengelegt und die aufgezeigten Verbesserungen sollen in der Praxis umgesetzt werden.
- SOFOWA – KOMBINATION VON SOLAROTHERMIE, FOTOVOLTAIK UND WÄRMEPUMPEN** R+D 7.2

Lead: Fachhochschule Nordwestschweiz	Funding: BFE
Contact: Ralf Dott, Thomas Afjei <a href="mailto:thomas.afjei@fhnw.ch">thomas.afjei@fhnw.ch</a>	Period: 2010–2014

Abstract: Niedrigenergiehäuser sind durch die Verschärfung der Energievorschriften zum Standard für Neubauten geworden. Nach gängiger Definition gehen Netto-Nullenergiehäuser meist mit einer gebäudeintegrierten Solartechnik einher. Ziel des Projekts ist mittels Simulation erfolgversprechende Kombinationen von Wärmepumpe und Solartechnik zu identifizieren, die Praxistauglichkeit mit einem Feldtest zu verifizieren und einen Leitfaden zu erstellen.
- OPTIMIERUNG DER EINBINDUNG EINES 28 M<sup>3</sup> WASSER SPEICHERS IN DIE BEHEIZUNG UND DIE WW-VERSORGUNG EINES EFH MIT W/W-WÄRMEPUMPE UND SOLARKOLLEKTOREN** R+D 7.2

Lead: EIA-FR Ecole d'ingénieurs et d'architectes	Funding: BFE
Contact: Peter Kurmann <a href="mailto:peter.kurmann@hefr.ch">peter.kurmann@hefr.ch</a>	Period: 2010–2012

Abstract: Simulationen und Messungen in einem EFH mit 185m<sup>2</sup> EBF, gebaut nach SIA380/1:2009, mit Solarkollektoren (40m<sup>2</sup>), einer W/W Wärmepumpe (6.4kW) mit einer Erdsonde (150m) sowie zwei thermischen Speicher mit Wasser (1: ungeschichtet, 28m<sup>3</sup>, 2: geschichtet, 1.65m<sup>3</sup>) sollen das Potenzial des Gesamtsystems aufzeigen. Bisher wurden die technischen Einrichtungen während mehreren Tagen mit und ohne Heizlast simuliert und mit realen Messdaten validiert.
- WARMWASSERBEREITSTELLUNG MITTELS WÄRMEPUMPEN IN MEHRFAMILIENHÄUSERN** R+D 7.2

Lead: Hochschule für Technik Buchs	Funding: BFE
Contact: Stefan Bertsch <a href="mailto:stefan.bertsch@ntb.ch">stefan.bertsch@ntb.ch</a>	Period: 2010–2011

Abstract: Das Ziel ist die Untersuchung der Zirkulationsverluste in Wohnanlagen mit zentraler Brauchwarmwasser-Aufbereitung. Die Zirkulation wird vornehmlich in Mehrfamilien-Überbauungen, Hotels und Spitälern eingesetzt, um die geforderte Mindesttemperatur an der Zapfstelle garantieren zu können. Diese Mindesttemperatur wiederum wird benötigt, um einen wirkungsvollen Legionellenschutz zu gewährleisten. Es werden die optimalsten technischen Möglichkeiten evaluiert und mehrdimensional bewertet.

- ÖLFREIER CO<sub>2</sub>-KOMPRESSOR FÜR GROSSWÄRMEPUMPEN ZUR WARMWASSERERZEUGUNG**

R+D 7.2

Lead:	awtec AG	Funding:	BFE
Contact:	Dirk Uhlenhaut, Josephine Vega Völk Dirk.Uhlenhaut@awtec.ch	Period:	2009–2011

Abstract: Das Projektziel ist die Entwicklung eines Verdichters für das natürliche Kältemittel CO<sub>2</sub> für Grosswärmepumpen, v.a. für Warmwasserbereitung. Aus Gründen der erforderlichen Lebensdauer soll der Kompressor schmierstofffrei ausgeführt werden, wozu sich ein Turbokompressor aufgrund der geringen Querkräfte in den Rotorlagern anbietet. Weitere Vorteile der Ölfreiheit sind die daraus resultierende Vereinfachung des Systems sowie die potentiell höheren Wirkungsgrade in den Wärmetauschern.
- THERMALLY DRIVEN HEAT PUMP BASED ON DOUBLE RANKINE CYCLE**

R+D 7.2

Lead:	LENI-EPFL	Funding:	BFE
Contact:	Jonathan Demierre, Daniel Favrat daniel.favrat@leni.epfl.ch	Period:	2008–2011

Abstract: Eine thermisch angetriebene Wärmepumpe wurde theoretisch und experimentell untersucht. Das ORC-ORC-System beinhaltet einen einstufigen Radialkompressor, der durch eine einstufige Radialturbine angetrieben wird. Die Drehzahlen liegen im maximum bei 170'000 rpm. Es wurden Leistungszahlen zwischen 1.3 und 2.19 erreicht.
- UTILISATION DE GÉOTHERMIE PROFONDE POUR LE CHAUFFAGE DE GRANDS BÂTIMENTS AVEC DES POMPES À CHALEUR À TRÈS HAUTES PERFORMANCES**

R+D 7.2

Lead:	Planair SA	Funding:	BFE
Contact:	Fabrice Rognon fabrice.rognon@planair.ch	Period:	2010–2012

Abstract: Das Projekt hat das Ziel, Sonden mit Längen zwischen 300 und 800 m zu beurteilen und mit klassischen Sonden und Sondenfeldern zu vergleichen. Untersucht wird das Leistungsvermögen und die Wirtschaftlichkeit. Das Projekt läuft in Zusammenarbeit mit dem BFE-Programm Geothermie.
- MEU - INSTRUMENTS INNOVANTS DE PLANIFICATION ET DE MANAGEMENT DE SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES EN ZONES URBAINES**

R+D 7.2

Lead:	EPFL	Funding:	BFE, FOGA
Contact:	Capezzali Massimiliano massimiliano.capezzali@epfl.ch	Period:	2008–2012

Abstract: Das Ziel des Projektes ist eine Software, die die Planung von Energienetzen vereinfachen soll. Vier Städte, Lausanne, Martigny, Neuchâtel und La-Chaux-de-Fonds unterstützen das Projekt durch aktive Mitarbeit und durch Analyse von konkreten Situationen. Das Projekt soll anfangs 2012 abgeschlossen werden.
- ZWEPHASENKOMPRESSOR FÜR WÄRMEPUMPEN - PHASE 1: KONZEPT**

R+D 7.2

Lead:	IPEK-HSR	Funding:	BFE
Contact:	Theodor Wüst, Markus Friedl twuest@hsr.ch	Period:	2011–2012

Abstract: In diesem Projekt soll ein Kompressionsvorgang untersucht werden, der mit einem zweiphasigen Gas-Flüssigkeits-Gemisch startet und möglichst in der Nähe des Satttdampf-Grenzlinie endet. Damit soll eine Ueberhitzung des Mediums vermieden werden. Ein Konzept für einen realen Prototyp wird erarbeitet.
- IEA-HPP-ANNEX 37: DEMONSTRATION OF FIELD MEASUREMENTS ON HEAT PUMP SYSTEMS IN BUILDINGS**

R+D 7.2

Lead:	IEA Heat Pump Programme	Funding:	BFE
Contact:	www.heatpumpcentre.org	Period:	2011–2013

Abstract: Das internationale Gemeinschaftsprojekt IEA-HPP Annex 37 hat das Ziel, das Potenzial von Wärmepumpen für den Einsatz in verschiedenen Gebäuden ausgehend von existierenden Feldmessungen aufzuzeigen. Es sollen nur die besten technischen Lösungen einbezogen werden. Die berücksichtigten Feldmessungen werden auf gleichartige Auswertungsmethodik verglichen und Unterschiede sollen quantifiziert werden. Hier wird auch ein Vergleich zum SEPOMO-Projekt gemacht.
- IEA-HPP-ANNEX 39: A COMMON METHOD FOR TESTING AND RATING OF RESIDENTIAL HEAT PUMPS AND AIR CONDITIONERS ANNUAL/SEASONAL PERFORMANCE (SPF)**

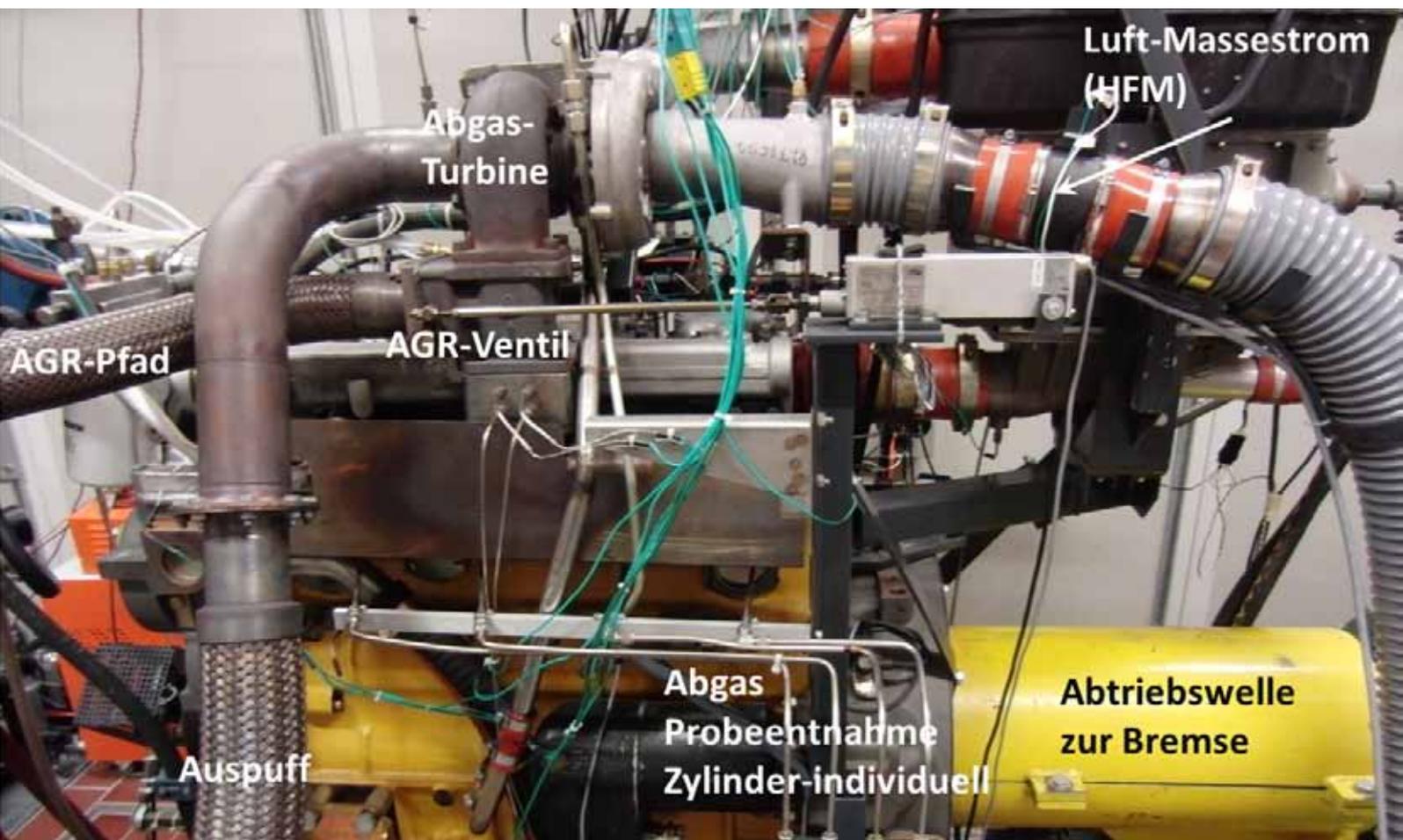
R+D 7.2

Lead:	IEA Heat Pump Programme	Funding:	BFE
Contact:	www.heatpumpcentre.org	Period:	2010–2013

Abstract: Das internationale Gemeinschaftsprojekt IEA-HPP Annex 39 hat das Ziel, eine international anerkannte Methode zur Berechnung von SPF (Seasonal Performance Factor) aus gemessenen Momentanwerten COP (Coefficient of performance) für verschiedene Wärmepumpentypen zu evaluieren. Bisher angewendete Methoden können neuere Wärmepumpen, wie zum Beispiel frequenzgeregelt Wärmepumpen oder CO<sub>2</sub>-Wärmepumpen nicht genügend abbilden.

Stephan Renz

# Verbrennung



**Titelbild:****Messeinrichtungen am 4-Zylinder-Dieselmotor mit 6,6 Liter Hubraum**

Für die Entwicklung von schnellen Mess- und Rechenverfahren zur Steuerung der Abgasnachbehandlungssysteme sind genaue Kenntnisse der Rohemissionen (Russ und  $\text{NO}_x$ ) des Motors erforderlich. Es wurde festgestellt, dass die Emissionen pro Zylinder unterschiedlich sind und die Abgasnachbehandlung entsprechend beeinflussen. Neben den Untersuchungen an vereinfachten Versuchsträgern wie Brennkammern oder Einhubtriebwerke sind auch Messungen am konkreten Motor erforderlich. Dafür sind umfangreiche Messeinrichtungen für die zylinderindividuelle Gasentnahme, die Erfassung der Luftzufuhr mittels Heissfilmsensor (HFM), die Rate der Abgasrückführung (AGR) oder die Gesamtemissionen im Auspuff erforderlich.

**BFE Forschungsprogramm Verbrennung**

Überblicksbericht 2011

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
CH-3003 Bern

**Programmleiter BFE (Autor):**

Stephan Renz, Beratung Renz Consulting (renz.btr@swissonline.ch)

**Bereichsleiter BFE:**

Dr. Sandra Hermle (sandra.hermle@bfe.admin.ch)

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

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

## Einleitung

Die Verbrennung ist ein Oxidationsprozess von Kohlen- oder Wasserstoff, der durch die Zugabe von Sauerstoff und der Abgabe von Wärme und Licht abläuft. Die chemisch mit einer einfachen Formel beschreibbare Reaktion ist in der Praxis hoch komplex, läuft über zahlreiche Zwischenverbindungen ab und ist nicht ideal und vollständig. Hinzu kommen weitere Inhaltsstoffe wie Stickstoff oder Schwefel, die sich am Reaktionsgemisch beteiligen. So werden zusätzliche Produkte gebildet wie  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , HC und Partikel. Die numerische Simulation der Abläufe erfordert die Kombination verschiedener Modelle für die Darstellung der kinetischen, thermischen und chemischen Vorgänge. Für die Nutzung der freiwerdenden Energie werden Maschinen wie Verbrennungsmotoren oder Gasturbinen eingesetzt, die das Temperaturgefälle zur Umgebung nutzen, um Kraft für den Antrieb von Fahrzeugen oder von Generatoren zu erzeugen. Mit den besten Systemen gelingt es heute über 60 % des Energieinhalts des eingesetzten Energieträgers in Strom umzuwandeln. Die restlichen 40 % sind Abwärme mit geringem Temperaturniveau, die allenfalls noch für die Beheizung von Wohnräumen genutzt werden kann.

Das Ziel der Verbrennungsforschung ist, Voraussetzungen zu schaffen, damit der Verbrennungsprozess möglichst ideal abläuft und in Wärmekraftmaschinen in allen Betriebszuständen ein Maximum an Exergie ohne Schadstoffe gewonnen werden kann. Dafür

müssen die thermochemischen Vorgänge im Verbrennungsprozess noch besser verstanden und die Umsetzung in den technischen Systemen optimiert werden.

Die Verbrennung war über Jahrhunderte der wichtigste Energieumwandlungsprozess für die Menschheit und wird auch weiterhin bedeutend bleiben. Die heute vorwiegend eingesetzten fossilen Energieträgern Erdgas, Erdöl und Kohle haben den Nachteil der langfristig begrenzten Verfügbarkeit sowie der Klima schädigenden  $\text{CO}_2$ -Emissionen. Auf Biomasse basierende Energieträger sowie aus verschiedenen Stoffen künstlich erzeugte, sogenannte synthetische Brennstoffe werden in der Zukunft an Bedeutung gewinnen. Hintergrund dieser Entwicklung sind die hohe Energiedichte und die gute Speicherfähigkeit der flüssigen Brennstoffe. Diese sind für viele Anwendungen wie die Mobilität über grosse Distanzen (Transportwesen) oder Produktionsmaschinen mit langer Betriebsdauer (Baumaschinen) im Vergleich zu anderen Energieträgern von grossem Vorteil.

Die Schweiz verfügt über international anerkannte Kompetenzen in der Verbrennungsforschung. Dazu gehören Forschungsinstitute im ETH-Bereich und an Fachhochschulen, aber auch von zahlreichen global agierenden Herstellern von Verbrennungsmotoren und Gasturbinen. Dies ist durch die lange Tradition der Schweizer Industrie in diesem Bereich, die seit den Anfängen der Entwicklung der Verbren-

nungskraftmaschinen bahnbrechende Erfindungen hervorgebracht hat, begründet. Auch zahlreiche Entwickler und Hersteller von peripheren Komponenten wie Turbolader, Einspritzsysteme, Katalysatoren, Partikelfilter, Mess- und Steuersysteme sind in der Schweiz aktiv.

Die Ziele der vom Bund mitfinanzierten Verbrennungsforschung sind die Erhöhung des (exergetischen) Wirkungsgrads von Verbrennungssystemen, die Verminderung des Verbrauchs an fossilen Brennstoffen und damit der  $\text{CO}_2$ -Emissionen sowie die Reduktion der Schadstoffe wie Russ, Feinstaub, Stickoxid oder Kohlenwasserstoffe und die Optimierung von Verbrennungssystemen für alternative Energieträger. Die Forschungsziele stimmen auch gut mit den internationalen Bestrebungen überein. Dies wird beispielsweise in den Forschungsschwerpunkten der Arbeitsgruppe, die sich innerhalb der Aktivitäten der Internationalen Energieagentur (IEA) mit der Verbrennung befasst [1], bestätigt. An deren jährlich stattfindenden Task Leader Meeting konnten im Berichtsjahr vier vom BFE mitfinanzierte Projekte vorgestellt werden wobei ein Schweizer Referent für einen Vortrag in der spezial Session «Combustion Diagnostics» eingeladen wurde. Auch in Forschungsprojekten der deutschen Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) [2] sind mehrere Industrieunternehmen und Schweizer Hochschulforscher engagiert.

IEA Klassifikation: 2.1.4 Oil and gas combustion  
Schweizer Klassifikation: 1.8 Verbrennung

## Programmschwerpunkte

Die Verbrennung ist eine Querschnittstechnologie mit zahlreichen Verbindungen zu anderen Forschungsprogrammen des BFE. Die Zielsetzungen richten sich nach den Vorgaben des Konzepts der Energieforschung des Bundes [3].

**Verbesserte Forschungsmethoden und -instrumente:** Die Instrumente der Forschung wie physikalische Grundlagen, numerische Simulation, Messmethoden und Versuchsträger sind weiter zu entwickeln und an neue Anforderungen anzupassen.

**Erhöhung des Systemwirkungsgrads:** Mit der Erhöhung des Wirkungsgrads werden der Brennstoffverbrauch und die Schadstoffemissionen reduziert. Wichtig ist der Einbezug des Gesamtsystems und der unterschiedlichen Lastzustände.

**Reduktion der Schadstoffemissionen:** International werden die Emissionsvorschriften für Stickoxide, Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxide sowie Russ und Feinstaub weiter verschärft. Zudem wird die Verminderung von Kohlendioxid gefordert.

**Nutzung verschiedener Energieträger:** Zur Verbesserung des Wirkungsgrads und zur Reduktion der Schadstoffe wird auch die Zusammensetzung der Brennstoffe geändert. Hinzu kommt die zunehmende Nutzung von biogenen Brennstoffen.

Schwerpunkte der Periode 2008–2012:

- Weiterentwicklung der Forschungsmethoden und -instrumente für konventionelle und biogene Energieträger.
- Verbesserung und stärkere Vernetzung der experimentellen und numerischen Methoden für die Optimierung des Gesamtsystems «Motor», welches die Prozesskette Gemischbildung–Zündung–Verbrennung–Abgasnachbehandlung umfasst.
- Darstellung von «Null-Emission-Systemen» für die kleinskalige (10 kWh bis 100 kWh) kombinierte Strom-Wärme-Kälte-Erzeugung.
- Optimierung von Gemischaufbereitung, Verbrennung und Abgasnachbehandlung sowie Minimierung von Schadstoffemissionen beim (Teil-) Einsatz von biogenen Kraftstoffen.
- Optimierung von Gemischaufbereitung und Verbrennung sowie Minimierung von Schadstoffemissionen beim Einsatz von konventionellen und biogenen Kraftstoffen in der atmosphärischen Verbrennung im kleinskaligen Bereich.
- Stärkere Vernetzung und Auftritt der Akteure in der Schweizer Verbrennungsforschung und -industrie inkl. Leistungserbringern von Komponenten.

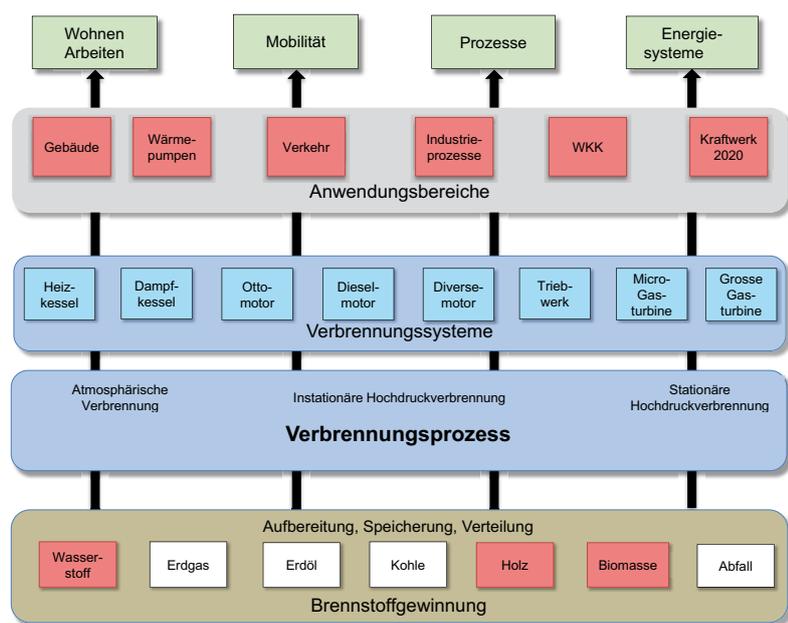
## Rückblick und Bewertung 2011

Die im letztjährigen Ausblick vorgesehenen Vorhaben konnten umgesetzt werden. Dazu gehörte die Tagung «Verbrennungsforschung in der Schweiz», die rund 100 in der Schweiz in der Verbrennungsforschung engagierte Personen zusammenbrachte. Die Referate [4] zeigten die Herausforderungen für die Forschung und Ergebnisse aus der Industrie. Mit dem neuen Projekt *Molecular data of combustion relevant radicals* konnte die Erforschung der Reaktionsmechanismen im Zündprozess fortgesetzt werden. Dank der Unterstützung durch die Industrie konnte am LAV ETHZ [5] ein Projekt zur Entwicklung kleinskaliger Verbrennungsmotoren für den Einsatz in WKK-Anlagen gestartet werden. Das abgeschlossene Projekt *BioExDi* liefert umfangreiches Datenmaterial über die Auswirkungen von Biodiesel auf die Abgasnachbehandlung. Die Ergebnisse dienen Herstellern von Katalysatoren und Dieselpartikelfilter zur Weiterentwicklung ihrer Produkte. Im Projekt *Vorverdampfertechnik für Öl-brenner* wurden die Vorgaben für eine rückstandsfreie Verbrennung von biogenen Brennstoffen in einem Brenner mit Vorverdampfung eruiert.

## Ausblick

Von Interesse ist, ob im Projekt *Kleinskalige WKK-Anlagen* ein Wirkungsgrad von 35 % bei minimalen Emissionen erreicht wird. Vorgesehen ist der Abschluss von 4 grösseren Projekten, deren Zielerreichung auf gutem Wege ist. Das IEA Implementing Agreement Combustion [1] wurde verlängert und startet 2012 eine weitere 4-Jahresperiode.

Neue Projekte sollen die Grundlagen der numerischen Simulation für neuartige Brennverfahren und Brennstoffe verbessern, die Entwicklung von Versuchsträgern für grosse Dieselmotoren erweitern sowie die Zusammenarbeit mit der Industrie weiterentwickeln. Die Kontakte zwischen den Schweizer Verbrennungsforschern – wie diese durch die Verbrennungstagung manifest wurden – sollen gepflegt, verstärkt und ausgebaut werden.



Querschnittstechnologie Verbrennung: Vernetzung mit Forschungsprogrammen des BFE (rot) und den Schwerpunkten des Forschungskonzepts des Bundes (grün).

## Highlights aus Forschung und Entwicklung

Die Forschungsausgaben der Schweizer Industrie zur Verbesserung von Verbrennungssystemen belaufen sich auf rund 150 Mio. CHF. Die Arbeiten erfolgen vorwiegend im Wettbewerb und haben das Ziel, die Verbrennungssysteme an künftige Emissionsvorschriften anzupassen und deren Effizienz zu verbessern. Ein Beispiel ist die Euro VI Norm [6], die ab 2013/14 bei schweren Motorfahrzeugen den Grenzwert für Stickoxidemissionen gegenüber 2008/09 um den Faktor 5 tiefer vorschreibt. Um diesen Wert zu erreichen, werden unterschiedliche Vorgehen gewählt. Bei kleineren Motoren wählt die Industrie vermehrt den Weg über die Abgasnachbehandlung mit Katalysator und Partikelfilter. Bei grossen Systemen werden innermotorische Massnahmen wie z. B. die Abgasrückführung zur Emissionsminderung weiter entwickelt.

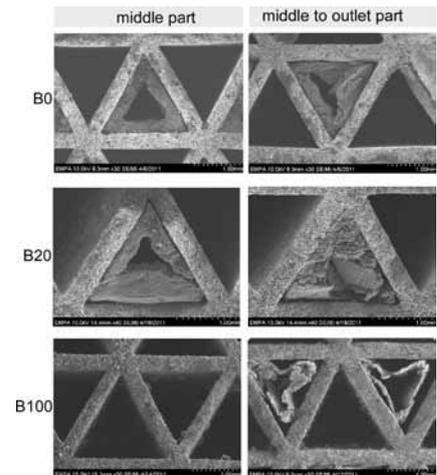
Mit der Förderung durch das BFE können Projekte angegangen werden, die auch grundlegende oder neuartige Aspekte der Verbrennungsforschung betreffen. Dazu gehören die Untersuchung der Energiefreigabe der Moleküle im Zündprozess, die Entwicklung von numerischen Simulationsmodellen für biogene Brennstoffe und von Versuchsständen für deren Validation, aber auch die Verbesserung von einzelnen Komponenten bis zum gesamten System. Projekte haben oft mehrere Themen zum Inhalt und fokussieren nicht nur auf eine Zielsetzung. Dies, weil beispielsweise die Verbesserung des Wirkungsgrads und die Reduktion der Schadstoffe gegenläufige Bestrebungen sind.

### Positive und negative Einflüsse von biogenen Brennstoffen

Ersatzbrennstoffe für fossile Energieträger werden auch für motorische Anwendungen in unterschiedlicher Ausprägung untersucht. Noch in den Anfängen steckt die Entwicklung von synthetischen Brennstoffen, die neben der Gewinnung aus Abfällen auch Varianten mit der solarchemischen Herstellung von Benzin [7] untersucht. Vielerorts bereits im Einsatz sind Biogas, das direkt in Motoren verbrannt wird oder Ethanol, das in zahlreichen Ländern dem Benzin beigemischt wird. Weniger verbreitet ist die Nutzung von Bio-

diesel, der dem konventionellen Diesel beigemischt oder auch direkt genutzt werden kann. Durch den höheren Anteil an Zusatzstoffen sowie sauerstoffhaltigen Verbindungen hat er einen Einfluss auf die Verbrennung im Motor sowie auf die Abgasnachbehandlungssysteme. Probleme entstehen durch die teilweise unterschiedliche Zusammensetzung und die Alterung des Biodiesels.

Die Auswirkungen von Brennstoffmischungen aus Diesel und FAME (Fatty Acid Methyl Ester) auf den Betrieb von Abgasreinigungssystemen mit Katalysator (SCR) und Dieselpartikelfilter (DPF) wurde im nun abgeschlossenen Projekt BioExDi untersucht. Abgeklärt wurde der Einfluss der Biokomponenten auf die Wirkung des SCR und des DPF sowie auf die Regenerationsvorgänge und die Ablagerungen im DPF. Das Projekt wurde unter der Leitung des AFHB [8] zusammen mit der Empa [9] und Industriepartnern bearbeitet. Es wurden zahlreiche Versuche mit verschiedenen Anteilen an FAME (B0, B7, B20, B100) durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass der Zündverzug durch die reaktiveren Bestandteile des Biodiesels leicht verkürzt wird und mit zunehmendem Anteil an FAME die Wärmeabgabe und dadurch das Stickoxid etwas höher sind als bei reinem Diesel. Die CO- und HC-Emissionen werden reduziert und die Partikel-Emissionen werden bei hoher Last vermindert und bei geringer Last angehoben. Mit einer Abgasrückführung (AGR) von 10–20 % kann die durch B100 verursachte Zunahme von  $\text{NO}_x$  in gleichem Umfang reduziert werden. Mit AGR wird aber auch eine deutliche Zunahme der Nanopartikel-Emission festgestellt. Die Reduktion der  $\text{NO}_x$ -Bildung durch die Verzögerung des Einspritzzeitpunkts hat eine Erhöhung des Brennstoffverbrauchs zur Folge. Die Wirkung des DPF und des SCR sind weitgehend ähnlich und erfüllen die Reduktionsziele. Die Zugabe von Harnstoff im nachgeschalteten SCR verursacht die Bildung von Nanopartikeln was bei höheren  $\text{NO}_x$ -Emissionen eine Zunahme bewirkt. Reiner Biodiesel (B100) bewirkt eine Verminderung des Filtereffekts im DPF. Dies ist auf nachträgliche Kondensationseffekte und ein Durchschlüpfen von kleinsten Partikeln zurückzuführen.



Figur 1: Bilder des Dieselpartikelfilters mit unterschiedlicher Beimischung von Biodiesel. Im Einlasskanal sind bei B0 und B20 Ablagerungen sichtbar, bei B100 keine. B100 verursacht jedoch auf der Auslass-Seite eine ca. 60  $\mu\text{m}$  dicke graue Schicht.

ren. Mit zunehmendem FAME-Anteil im Brennstoff wird die Dauer, bis der katalytisch beschichtete DPF wegen zu hohem Gegendruck regeneriert werden muss, verlängert. Dies ist auf die geringeren PM-Emissionen (particulate matter) sowie die höhere Reaktivität der Biokomponenten zurückzuführen. Die Regeneration beginnt bei tieferen Temperaturen und ist intensiver. Bei Filtern mit aktiver Regeneration (Brenner) sind keine wesentlichen Unterschiede im Regenerationsprozess zu erkennen. Gegenüber den geringeren Russablagerungen wurde jedoch eine starke Zunahme der Aschemenge bei höherem Biodieselanteil festgestellt (Figur 1). Bei allen Ergebnissen ist zu berücksichtigen, dass die Qualität von Biodiesel sehr unterschiedlich ist und Additive, welche zur Verbesserung der Eigenschaften (Kälte- und Wärmeverhalten, Alterung) beigefügt werden, Probleme im Abgas verursachen können.

Die ausschliessliche Verwendung von hochwertigen Energieträgern wie Erdgas, Erdöl oder auch Biogas oder Biodiesel für die Erzeugung von Wärme zur Beheizung von Gebäuden entspricht nicht den Zielen des BFE für die zukünftige Energienutzung. Weil nicht alle bestehenden Gebäude auf den Betrieb mit Wärmepumpen umgerüstet werden können und kleine Wärmekraftkopplungsanlagen noch



Figur 2: Prüfstand für die Untersuchung der Verdampfung eines Brennstofffilms nach dem CatVap-Verfahren. Im realen System reagiert ein Teilstrom des verdampften Brennstoffs mit einer katalytisch wirkenden Oberfläche und erzeugt die Strahlungswärme zur Beheizung der Fläche. Für die Versuche wurde ein elektrisch beheizter Strahler eingesetzt.

kaum verfügbar sind, werden jedoch noch über eine längere Zeit Heizkessel im Einsatz sein. Dazu gehören auch Anlagen mit geringer Leistung, die kostengünstig als additive oder bivalente Systeme zur solarthermischen Wärmeerzeugung oder zu (Luft-)Wärmepumpen eingesetzt werden können. Die untere Leistungsgrenze von Ölheizkesseln liegt bei 10 kWh. Um bei kleineren Leistungen betrieben werden zu können, müssen die Anlagen laufend ein-/ausgeschaltet werden. Dies verringert den Wirkungsgrad.

Anstelle einer Düse, die den Brennstoff versprüht, muss dieser für kleinere Leistungen vor der Verbrennung verdampft werden. Interessant ist es, wenn solche Systeme mit biogenen Brennstoffen CO<sub>2</sub>-neutral betrieben werden können. Das BFE unterstützte deshalb das 2011 abgeschlossene Projekt *Vorverdampfertechnik für Ölbrenner* an der FHNW [10]. Dabei wurden zwei verschiedene Verdampfungssysteme (CatVap und ThermMix) für die Verwendung von Biodiesel (bestehend hauptsächlich aus FAME) untersucht.



Figur 3: 1 Zylinder Motor von Wenko. Montage auf dem Prüfstand mit einer Wirbelstrombremse im Labor des LAV an der ETH in Zürich.

Der Unterschied der beiden Verfahren liegt in der Quelle und Regelbarkeit der Verdampfungswärme und in der Art, wie der Brennstoff auf die Verdampferfläche aufgebracht wird.

Im ThermMix-System wird der Brennstoff mit einem Rotationszerstäuber verteilt und auf einer mit Rauchgasrückführung beheizten Wand verdampft. Im Prüfstand konnte gezeigt werden, dass die Rückstandsbildung stark von der Art der Oberflächenbenetzung und somit von der Temperatur der Wand abhängt. In einem Temperaturbereich unterhalb der Leidenfrosttemperatur (430–440 °C) findet Blasen-Übergangssieden statt, so dass der flüssige Tropfen die Oberfläche ganz oder partiell benetzt. Die Rückstandsbildung ist dabei vorwiegend von der Flächenbelastung abhängig. Oberhalb der Leidenfrosttemperatur findet keine Benetzung mehr statt, der Tropfen prallt auf die Oberfläche, um je nach Weberzahl wieder von ihr abzuprallen oder unter Sekundärtropfenbildung zu zerfallen. Hier findet keine Rückstandsbildung mehr statt, und die Verdampfung erfolgt in der heissen Luft. Kleinere Tropfen verdampfen dabei schneller und lassen so eine höhere Flächenbelastung zu. Um der Bildung von Rückständen vorzubeugen, muss bei höherer Leistung die Tropfengrösse verringert und der FAME-Anteil reduziert werden.

Die Erkenntnisse aus den Prüfstandsversuchen wurden im realen System getestet und es konnte eine rückstandsfreie Verdampfung erreicht werden. Aus den Tropfenverdampfungsversuchen konnte ein einfaches Rechenmodell erstellt werden, das eine Voraussage der Rückstandsbildung bei sich ändernden Leistungen und/oder Auslegungen erlaubt.

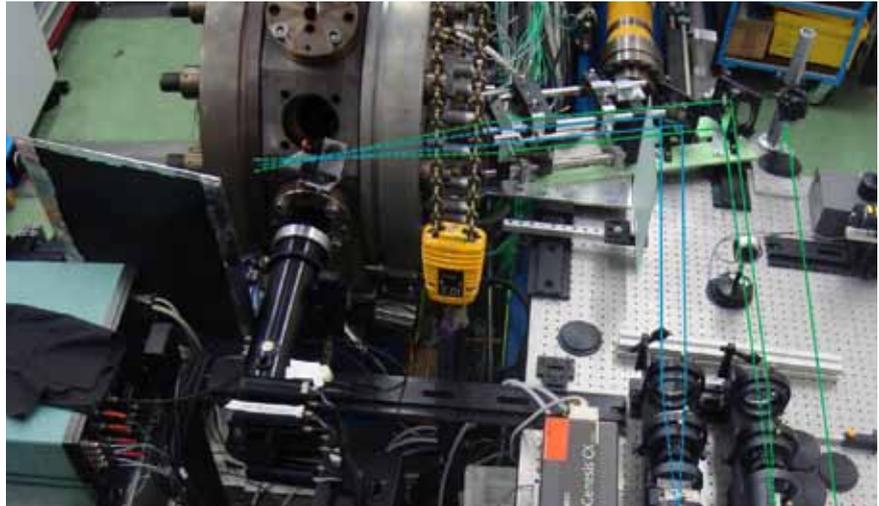
Das Vorverdampfersystem CatVap basiert auf der Verdampfung eines Brennstofffilms mittels Strahlung. Dabei soll die Verdampferflächen-Temperatur unterhalb der Siedetemperatur bleiben. Dies soll unerwünschten Ablagerungen auf der Verdampferfläche vorbeugen. In einem speziell für die Filmverdampfung erstellten Prüfstand wurde der Einfluss der Strahlerleistung, der Brennstoffzusammensetzung und der Verdampferflächen-Beschaffenheit auf die Rückstandsbildung un-

tersucht (Figur 2). Es konnte kein Zustand gefunden werden, bei dem der Film austrocknete (gesamter Brennstoff verdampft) und gleichzeitig keine Rückstände auftraten. Nur wenn mehr Brennstoff gefördert wird, als verdampft werden kann, findet keine Rückstandsbildung aber auch keine Austrocknung statt. Im realen System würde das zur diffusionsartigen Verbrennung von Tropfen und damit verbundenen erhöhten Emissionen führen. Stofftransportberechnungen haben gezeigt, dass im CatVap-Grunddesign die Brennstoffdiffusion nicht ausreicht, um genügend Brennstoff an den Katalysator zu transportieren. Der notwendige Stofftransport funktioniert nur durch Verwirbelungen der Luft, bedingt durch die geometrische Anordnung des Lufteintritts.

### Kleine und grosse Motoren aus der Schweiz

In der Schweiz sind mehrere international tätige Motorenhersteller aktiv. So fabriziert der weltweit tätige Baumaschinenhersteller Liebherr seine Motoren seit 1984 in der Schweiz und Fiat Power Train (Iveco) betreibt in Arbon sein Entwicklungszentrum für Dieselmotoren mit 30 Prüfständen. In Winterthur entwickelt Wärtsilä Schweiz AG Schiffsdieselmotoren mit einem Hubraum von 25'000 Litern und einer Leistung von 80'000 kWh, die weltweit zu den grössten zählen. Interessant ist jedoch auch die Firma Wenko [11] aus Burgdorf, die ihre kleinen Motoren – bisher für den Einsatz in Freizeitfahrzeugen hergestellt – für die Nutzung als Rangeextender in Elektrofahrzeugen weiterentwickelt. Ein solcher 1 Zylindermotor mit 0,325 Litern Hubraum (Figur 3) wird im Projekt *Klein-WKK-Anlage* am LAV ETHZ für den stationären Einsatz und die Nutzung von Biogas als Brennstoff eingesetzt. Die Herausforderung ist, ein kostengünstiges Energieumwandlungssystem mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 35 % und einem Gesamtwirkungsgrad (inkl. Wärmenutzung) von 90 % bei minimalen Stickoxiden (kleiner 50 mg/Nm<sup>3</sup>) zu erreichen.

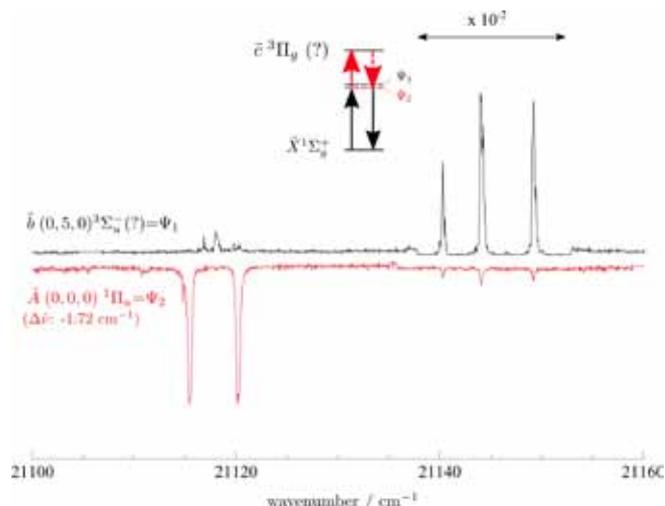
Untersuchungen an grossen 2-Takt-Schiffsdieselmotoren erfolgen im Projekt *Weiterentwicklung einer Spray*



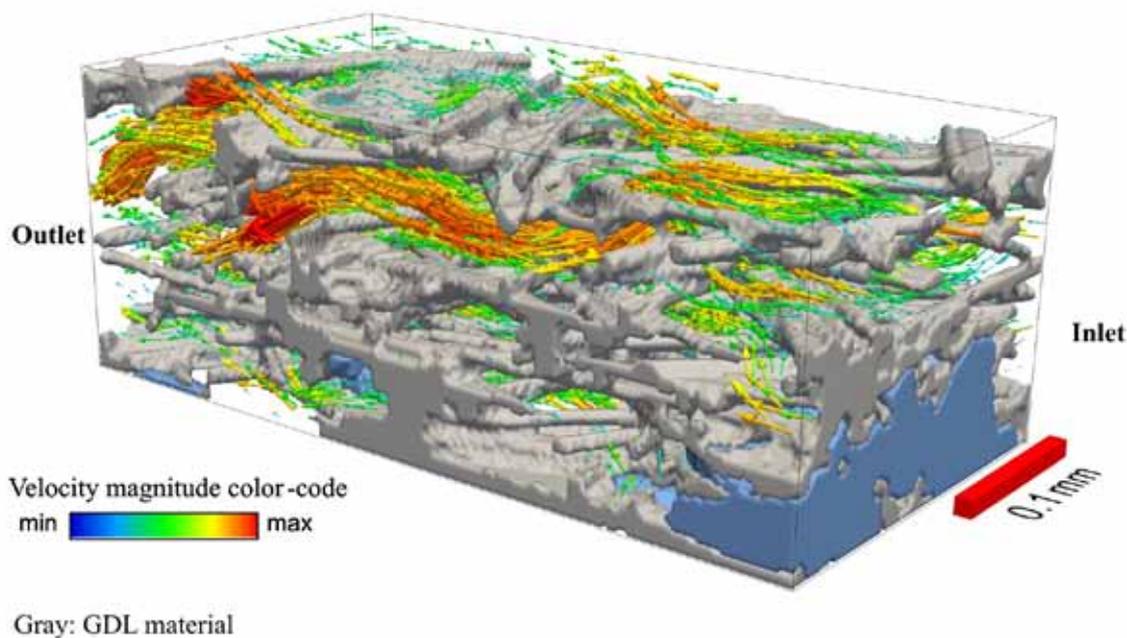
Figur 4: Aufbau der Phasen Doppler Anemometrie zur Messung der Tropfengrösse und -geschwindigkeit in der Spray Combustion Chamber bei Wärtsilä (Schweiz) AG in Winterthur.

Combustion Chamber von Grossdieselmotoren von Wärtsilä [12]. Dafür wurde ein Versuchsträger, der den Brennraum eines Zylinders mit einer Bohrung von 500 mm repräsentiert, entwickelt. Projektinhalte sind das Zündverhalten verschiedener Brennstoffe (von Schweröl bis handelsüblichem Dieselkraftstoff), die Erweiterung der Anlage durch neuartige Komponenten wie Probenahmesonde und Schaugläser, die Verbesserung der Einspritzdüsen und die Weiterentwick-

lung der optischen Messtechniken. Für die Einspritzung von Schweröl wurde eine komplett neue Einspritzanlage aufgebaut. Unter der Variation der Gasdichte wurden mit Hilfe von Schattenbildern die räumliche Ausbreitung, die Eindringtiefe und der Winkel des Sprays vermessen. Die Messtechnik wurde erweitert, um mit schmalbandigem UV-Filter das Zündverhalten zu erfassen. Um die Messresultate nicht zu verfälschen, muss bei der Schwerölverbrennung das Inkandeszenzsignal des



Figur 5: Mit TC-FWM-Spektroskopie können Übergänge aus dem Grundzustand von  $C_2$  in einen Triplet Zustand über 2 Zustände  $\Psi_1$  und  $\Psi_2$  vermessen werden. Diese sind Überlagerungen von energetisch nahen Singlet- und Triplet-Zuständen mit unterschiedlichem Singlet-Anteil. Dementsprechend erscheinen, je nach Anregungskonzept, einige Übergänge mit grösserer Intensität als andere. Eine genaue Evaluation aller gemessener Intensitäten erlaubt den Grad der Triplet-Singlet-Mischung zu bestimmen. Daraus kann auf die Energie der nicht direkt anregbaren Triplet-Zustände geschlossen werden.



Figur 6: Simulation der Strömungsgeschwindigkeiten eines reaktiven Gases durch eine Gasdiffusionsschicht.

Russes mitbestimmt werden. Mit der Phasen-Doppler-Anemometrie konnte die Tropfengrösse und -geschwindigkeit im Spray vermessen werden. Trotz der langen Wege bei dieser Motorengrösse und der dicken Saphirgläser konnten sinnvolle Resultate erzielt werden (Figur 4). Das Projekt ist eingebettet ins EU-Projekt *HERCULES* [13], in dem neue Technologien für die Reduktion der Schadstoffemissionen und die Erhöhung des Wirkungsgrads grosser Schiffsdieselmotoren entwickelt werden. Die Schweizer Projektteilnehmer Wärtsilä Schweiz AG, ABB Turbosystems AG, das LAV der ETHZ, das PSI und die Empa befassen sich in einem Teilprojekt mit der Anwendung und der Erweiterung von Verbrennungsprozess-Simulationsmodellen, für deren Entwicklung und Validierung experimentelle Daten benötigt werden.

### Reaktionen und Strömungen im Mikrobereich

Die Reaktionsmechanismen der Verbrennung finden im Mikrobereich statt. Dazu gehören die Strömung, die Verwirbelung und die Durchmischung der Moleküle vor der Zündung und die Energiefreigabe im Zündprozess. Der Zündvorgang hat einen grundlegenden Einfluss auf den Verlauf der

Verbrennung und damit auf die Entwicklung von Schadstoffen, insbesondere von Russ. Das Zündverhalten wird weitgehend durch Peroxy-Radikale bestimmt. Sie beeinflussen die Art und die Zusammensetzung der anfänglich vorhandenen Zwischenprodukte und somit die Entwicklung der nachfolgenden Reaktionen.

Die thermochemischen Daten von Radikalen erreichen bisher eine zu geringe «chemische» Genauigkeit. Diese schlägt sich in der Berechnung der Reaktionsgeschwindigkeit nieder, die innerhalb eines Faktors 10 liegen kann. Damit ist beispielsweise die Entstehung von Stickoxid kaum verlässlich modellierbar. Zur genauen Bestimmung der energetischen und molekularen Zustände (Spinrotationen) der Radikale werden im Projekt *Molecular Data of Combustion relevant Radicals* am PSI [14] spektroskopische Methoden eingesetzt. Diese müssen empfindlich genug sein, um im Nanosekunden-Bereich die Radikale zu detektieren. Mit der Femtosecond-Two-Colour-Four-Wave-Mixing-Technique ist es nun gelungen, die verschiedenen Varianten und Kombinationen der Spinrotationen des  $C_2$ -Radikals zu bestimmen. Dabei wurden auch die energiereichen Dunkelzustände aufgedeckt (Figur 5). Diese liegen in einem chemisch relevanten Energiebereich und müssen

genau bekannt sein, weil sie eine entscheidende Rolle auf die Reaktionsgeschwindigkeit haben. So stört  $C_2$  die Messungen nach der CARS-Methode, was jedoch von vielen Forschern nicht berücksichtigt wird. Die  $C_2$ -Bildung hat einen starken Einfluss auf die Russentstehung und sollte deshalb möglichst genau bekannt sein.

Im Projekt *Modelling of Energy conversion at microscale* wird ein neues numerisches Berechnungsmodell auf der Basis der Lattice-Boltzmann-Methode entwickelt. Dieses soll chemisch reaktive Strömungen mit verschiedenen Molekulararten bei nicht isothermen Bedingungen in komplexen Geometrien im Microbereich darstellen können. Die Thematik ist für künftige Verbrennungssysteme (mit katalytischen Reaktoren) und für Brennstoffzellen relevant und wird deshalb von den zwei BFE Forschungsprogrammen «Brennstoffzellen» und «Verbrennung» unterstützt. In Figur 6 wird die Visualisierung der Strömungsgeschwindigkeit eines Gases in einem komplexen Körper gezeigt. Die Berechnungen werden mit Stockes-Berechnungen und Röntgenstrahl-Tomographie validiert und erreichen eine sehr gute Übereinstimmung.

## Nationale Zusammenarbeit

Die Forscherteams der Schweizer Verbrennungsforschung pflegen über zahlreiche gemeinsame Projekte gute Kontakte und dies auch zwischen Hochschulen und Industrie. Dies gilt auch für die vom BFE mit finanzierten Arbeiten. Zu nennen sind das Projekt HERCULES, in dem die ETHZ, das PSI sowie Wärtsilä Schweiz AG und ABB Turbosystems AG Partner sind. Zahlreiche Industriepartner sind auch im Projekt *Schnelle Mess- und Rechenverfahren für die Charakterisierung energieeffizienter Dieselmotoren an der Nahtstelle zur Abgasnachbehandlung* direkt oder indirekt involviert. Dazu gehören Kistler Instrumente AG, Iveco Motorenforschungs AG, Liebherr Machines Bulle SA und Hug Engineering AG. Das Projekt *CRFD-Simulation für neue motorische Brennverfahren und Kraftstoffe* ist Teil des vom CCEM geführten Projekts Clean Efficient Large Diesel Engine (CELaDE) [15] in dem eine Zusammenarbeit zwischen der ETHZ, dem PSI und der Empa erfolgt. Im Projekt *Klein-WKK-Anlage* arbeiten das LAV ETHZ, Wenko AG und Bucher AG Motorex zusammen. Das Projekt BioExDi wurde unter der Leitung der AFHB mit der Empa bearbeitet und von Hug-Engineering, Huss Umwelttechnik GmbH (Deutschland) und Dinex Group (Dänemark) unterstützt. Es wurde vom BFE-Forschungsprogramm Biomasse, dem Bundesamt für Umwelt und von der Erdölvereinigung mitfinanziert. Das an der Fachhochschule Nordwestschweiz bearbeitete Projekt *Grundlagen zur Erweiterung*

*des Leistungsbereichs und der Brennstoff-Flexibilitäten von Ölbrennern mit Vorverdampfertechnik (VVT)* stützt sich auf die Zusammenarbeit mit der Firma Toby AG als Lieferant der Brenner und dem Verein Bio-Fuel als Lieferant der Bio-Brennstoffe. Das Projekt wird ebenfalls von der Erdölvereinigung mitfinanziert.

Jährlich wird an der ETHZ die *Conference on Combustion Generated Nanoparticles* [16] die Problematik der durch die Verbrennung erzeugten Partikel interdisziplinär behandelt. Die Themen der Referate spannten den Bogen von der Partikelentstehung in der Verbrennung, über die Abgasnachbehandlung, zur Messtechnik sowie zu den atmosphärischen Vorgängen und zu den biologisch-medizinischen Wirkungsaspekten. Die vom LAV ETHZ mit TTM A. Mayer organisierte Veranstaltung findet national und international bei technisch wie auch medizinisch orientierten Fachleuten grosses Interesse.

An der alle zwei Jahre stattfindenden Tagung Verbrennungsforschung in der Schweiz trafen sich im Oktober 2011 rund 100 Forscher und Entwickler aus den Bereichen Hochschulen und Industrie. Der vom BFE, LAV ETHZ und PSI organisierte Anlass ist eine Plattform mit Informationsaustausch über aktuelle Themen der Verbrennungsforschung in der Schweiz und auch zwischen jungen Forschern und Verantwortlichen aus der Industrie.

## Internationale Zusammenarbeit

In mehreren vom BFE unterstützten Projekten erfolgt eine internationale Zusammenarbeit mit Hochschulen und Industriepartnern. Dazu gehört das von der EU im Rahmen des Forschungsprogramms FP7 mit finanzierte Projekt HERCULES: Neben den bereits erwähnten Schweizer Forschungsinstitutionen und Industriepartnern sind auch die Abo Akademi University (FIN), die Helsinki University of Technology (FIN), die National Technical University of Athens (GR) sowie die Wärtsilä Corporation Finnland beteiligt. Das Projekt *Klein-WKK-Anlage* enthält ein Arbeitspaket *AGR bei Gasmotoren mit extremen Steuerzeiten*, das im Auftrag der FVV erfolgt und zusammen mit dem LVK der TU München bearbeitet wird. Auch das Projekt *CRFD-Simulation für neue motorische Brennverfahren und Kraftstoffe* wird parallel zu Projekten der FVV bearbeitet, mit entsprechender Zusammenarbeit mit anderen Forschungsstellen in Deutschland. Im Projekt *Molecular data of combustion relevant radicals* bestehen gute Kontakte zu Forschergruppen an der ETHZ, an den Universitäten Basel und Bern. Ein Austausch findet zudem mit den Universitäten Würzburg (D), Birmingham (GB), Iceland (IS) und der University Of The Pacific (US) statt, die ebenfalls an der VUV Beamline des SLS arbei-

ten. Mit der Universität Konstanz werden gemeinsam Messungen durchgeführt. Das Projekt ist in der COST Action 901 [18] der EU in der sich Gruppen aus mehr als 20 Ländern austauschen, aufgenommen. Im NCCRMUST [18] wird in Zusammenarbeit mit der Universität Zürich an den ultraschnellen Messtechniken gearbeitet.

Ein wichtiger Informationsaustausch und die Gelegenheit, die Schwerpunkte der Verbrennungsforschung international mitzugestalten, erfolgt in der Mitarbeit in Arbeitsgruppen der Internationalen Energieagentur (IEA). Für die Verbrennung relevant sind das Implementing Agreement Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion (IEA Combustion) [1], die Working Party for Fossil Fuels (WPFF) [19] und das Implementing Agreement Advanced Motor Fuels [20]. Die Schweiz ist in diesen Arbeitsgruppen vertreten.

Grössere Aktivitäten von Schweizer Vertretern erfolgen im IEA Combustion. Deren Ziel ist, die Entwicklung von Verbrennungstechnologien, die einen verminderten Brennstoffverbrauch und geringere Emissionen aufweisen, voranzutreiben. Die Forschungsthemen werden in sogenannten Collaborative Tasks bearbeitet. Dazu ge-

hören Gas Turbines, Sprays in Combustion, Alternative Fuels in Combustion und Nanoparticle Diagnostics, zu denen Schweizer Forschende Beiträge leisten, sowie Hydrogen Internal Combustion Engines und Homogeneous Charge Compression Ignition. Die Mitarbeit der Schweiz sichert eine Vertretung der Interessen im Bereich Verbrennung, eine Mitwirkung bei der Festlegung zukünftiger Schwerpunkte, die Vermittlung schweizerischer Forschungsergebnisse, die Bekanntmachung der Firmen aus der Schweiz sowie die Weitergabe der Informationen über internationale Aktivitäten an Interessierte in der Schweiz. Im IEA Combustion sind 12 Mitgliedsländer vertreten.

Im IEA AMF Agreement ist die Schweiz im Executive Committee und in Arbeitsgruppen vertreten. Das IEA AMF will die internationale Forschungsnetzwerke bei der Erforschung und Entwicklung, bei der Implementierung und Verbreitung von sauberen, energieeffizienten und nachhaltigen Treibstoffen und den damit zusammenhängenden Fahrzeugtechnologien fördern. Die Schweiz hat 2010 den Annex Toxicity of Exhaust Gases and Particles from IC Engines – International Activities Survey (EngToxIn) initiiert und die Leitung übernommen.

Bei den Implementing Agreements *Greenhouse Gas R&D Programme*, *Enhanced Oil Recovery* und *IEA Clean Coal Centre* (IEA WPPF) sind die Verbesserung des Wirkungsgrads von grossen mit fossilen Brennstoffen befeuerten Kraftwerken und in diesem Kontext Verfahren zur Elimination des CO<sub>2</sub> wichtige Themen. In neueren Überlegungen fliessen auch Aspekte der Nutzung von CO<sub>2</sub> mit ein.

Schweizer Forschende nahmen auch an zahlreichen internationalen Symposien und Tagungen mit Referaten und Posterpräsentationen im Kontext mit vom BFE mitfinanzierten Projekten teil. Dazu gehörten: International Symposium on Marine Engineering (ISME) in Japan, die FVV-Tagungen, 24rd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ILASS) in Estoril, 8th ICMES conference, Lyon, France, 13th International Conference on Numerical Combustion, Greece, 64th Annual meeting of the American Physical Society, division of fluid dynamics, Baltimore, USA, Conference on Discrete Simulation of Fluid Dynamics, North Dakota, USA. Zudem wurden diverse Berichte beispielsweise als SAE-Paper publiziert.

## Referenzen

[1] International Energy Agency Implementing (IEA) Agreement for Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion ([www.ieacombustion.net](http://www.ieacombustion.net))

[2] Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen ([www.fvw-net.eu/](http://www.fvw-net.eu/))

[3] Eidgenössische Energieforschungskommission CORE, Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 bis 2011

[4] BFE, LAV, PSI, Tagung «Verbrennungsforschung in der Schweiz 2011» ([www.bfe.admin.ch/forschungverbrennung](http://www.bfe.admin.ch/forschungverbrennung))

[5] LAV ETHZ, Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich ([www.lav.ethz.ch](http://www.lav.ethz.ch))

[6] EU Emission Standards for HD Diesel Engines: VERORDNUNG (EG) Nr. 595/2009

[7] A. Steinfeld et al: «Syngas production by simultaneous splitting of H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> via ceria redox reactions in a high-temperature solar reactor», Institut für Energietechnik ETHZ, 2011

[8] Berner Fachhochschule Technik und Informatik, Abgasprüfstelle (AFHB), Nidau ([labs.hti.bfh.ch](http://labs.hti.bfh.ch))

[9] Empa, Abteilung Verbrennungsmotoren ([www.empa.ch](http://www.empa.ch))

[10] FHNW Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut für Thermo- und Fluid-Engineering (ITFE) ([www.fhnw.ch/technik/itfe](http://www.fhnw.ch/technik/itfe))

[11] Wenko AG Swissauto, Burgdorf ([www.swissauto.com/](http://www.swissauto.com/))

[12] Wärtsilä (Schweiz) AG, Winterthur ([www.wartsila.com](http://www.wartsila.com))

[13] High-efficiency Engine R&D on Combustion with Ultra-low Emissions for Ships, EU-FP7 ([http://cordis.europa.eu/projects/rcn/89926\\_en.html](http://cordis.europa.eu/projects/rcn/89926_en.html))

[14] Paul Scherrer Institut ([www.psi.ch](http://www.psi.ch))

[15] Competence Center Energy and Mobility (CCEM) Project Clean Efficient Large Diesel Engine ([www.ccem.ch](http://www.ccem.ch))

[16] Conference on Combustion Generated Nanoparticles ([www.nanoparticles.ethz.ch](http://www.nanoparticles.ethz.ch))

[17] COST European Cooperation in Science and Technology Action CM 901 Detailed Chemical Kinetic Models for Cleaner Combustion ([www.ensic.inpl-nancy.fr/cost/](http://www.ensic.inpl-nancy.fr/cost/))

[18] NCCR-MUST, National Centre of Competence in Research ([www.nccr-must.ch/home.html](http://www.nccr-must.ch/home.html))

[19] IEA Working Party on Fossil Fuels ([www.iea.org](http://www.iea.org))

[20] IEA Implementing Agreement on Advanced Motor Fuels ([www.iea-amf.vtt.fi/](http://www.iea-amf.vtt.fi/))

## Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(\* IEA-Klassifikation)

- GRUNDLAGEN ZUR ERWEITERUNG DES LEISTUNGSBEREICHS UN DER BRENNSTOFF-FLEXIBILITÄT VON ÖLBRENNERN MIT VORVERDAMPFERTECHNIK (VVT)** R+D 2.1.4\*

Lead: FHNW	Funding: BFE
Contact: Griffin Timothy <a href="mailto:timothy.griffin@fhnw.ch">timothy.griffin@fhnw.ch</a>	Period: 2008–2011

Abstract: Untersuchung der rückstandsfreien Verdampfung von biogenen Brennstoffen wie FAME, FMEE, RME oder AME in zwei verschiedene Verfahren der VVT. Toby-Verfahren: Zentrifugalzerstäubung mit einem rotierenden Becher und Oberflächenverdampfung durch Wärmeleitung. CatVap Verfahren: Katalytischen Reaktion an einer beschichteten Oberfläche eines kleinen Teils des Brennstoffs und Nutzung der entstandenen Wärme zur Verdampfung des übrigen Brennstoffs.
- ERWEITERUNG UND VALIDIERUNG DER CRFD-SIMULATION FÜR NEUE MOTORISCHE BRENNVERFAHREN UND KRAFTSTOFFE** R+D 2.1.4

Lead: ETHZ-LAV	Funding: BFE
Contact: Boulouchos Konstantinos <a href="mailto:boulouchos@lav.mavt.ethz.ch">boulouchos@lav.mavt.ethz.ch</a>	Period: 2008–2012

Abstract: Erweiterung von Simulationswerkzeugen und deren experimentellen Validierung für neue Kraftstoffe und entsprechend ausgelegte Brennverfahren. Motorischen Experimente werden an einem neuen Versuchsträger zur Validierung der Simulation für grössere Dieselmotoren durchgeführt. Optische Experimente an Modellbrennkammern liefern zusätzlich Daten zum grundlegenden Verständnis des Zünd-, Verbrennungs- und Emissionsverhaltens neuer, synthetische Kraftstoffe.
- ERWEITERUNG UND VALIDIERUNG DER CRFD-SIMULATION FÜR NEUE MOTORISCHE BRENNVERFAHREN UND KRAFTSTOFFE** R+D 2.1.4

Lead: ETHZ-LAV	Funding: BFE
Contact: Boulouchos Konstantinos <a href="mailto:boulouchos@lav.mavt.ethz.ch">boulouchos@lav.mavt.ethz.ch</a>	Period: 2008–2012

Abstract: Erweiterung von Simulationswerkzeugen und deren experimentellen Validierung für neue Kraftstoffe und entsprechend ausgelegte Brennverfahren. Motorischen Experimente werden an einem neuen Versuchsträger zur Validierung der Simulation für grössere Dieselmotoren durchgeführt. Optische Experimente an Modellbrennkammern liefern zusätzlich Daten zum grundlegenden Verständnis des Zünd-, Verbrennungs- und Emissionsverhaltens neuer, synthetische Kraftstoffe.
- ENTWICKLUNG SCHNELLER MESS- UND RECHENVERFAHREN FÜR ENERGIEEFFIZIENTE DIESELBRENNVERFAHREN AN DER NAHTSTELLE ZUR ABGASNACHBEHANDLUNG** R+D 2.1.4

Lead: ETHZ-LAV	Funding: BFE
Contact: Boulouchos Konstantinos <a href="mailto:boulouchos@lav.mavt.ethz.ch">boulouchos@lav.mavt.ethz.ch</a>	Period: 2008–2012

Abstract: Entwicklung schneller messtechnischer und Modellierungsmethoden zur Optimierung des Zusammenspiels zwischen motorischem Brennverfahren und Abgasnachbehandlung, insbesondere der SCR-basierten Entstickung von „medium“- und „heavy-duty“ Dieselmotoren. Ziel ist die Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften (z. B. EURO 6) möglichst mit einer Erhöhung des Gesamtwirkungsgrads (CO<sub>2</sub>-Reduktion).
- INFLUENCES OF BIOCOMPONENTS (FAME) ON EMISSIONS AND ON EXHAUST SYSTEMS OF HD-DIESEL ENGINES (BIOEXDI)** R+D 2.1.4

Lead: BFH TI - AFHB	Funding: BFE
Contact: Czerwinski Jan <a href="mailto:Jan.Czerwinski@bfh.ch">Jan.Czerwinski@bfh.ch</a>	Period: 2009–2011

Abstract: Untersuchung der Auswirkungen von Kraftstoffen mit zugemischten Biokomponenten (RME) auf die Abgasnachbehandlungssysteme von Dieselmotoren. Versuche und Messungen mit B0, B7, B20, B30, B100 mit/ ohne Katalysator (SCR) und Dieselpartikelfilter (DPF). Untersuchung der Regenerationsvorgänge und Ablagerungen im DPF.
- WEITERENTWICKLUNG EINES REFERENZEXPERIMENTS ("SPRAY COMBUSTION CHAMBER") IN BEZUG AUF DIE OPTIMIERUNG DES VERBRENNUNGSSY (HERCULES)** R+D 2.1.4

Lead: Wärtsilä Schweiz AG	Funding: BFE
Contact: Herrmann Kai <a href="mailto:kai.herrmann@wartsila.com">kai.herrmann@wartsila.com</a>	Period: 2009–2012

Abstract: Weiterentwicklung eines neuartigen Versuchsträgers mit optischer Zugänglichkeit, der die Brennkammer eines grossen Zweitakt-Schiffsdieselmotors nachbildet und die Untersuchung innermotorischer Vorgänge unter typischen Bedingungen ermöglicht. Verbessern des Verständnisses von verbrennungsrelevanten Prozessen für die Validierung und weitere Entwicklung von Simulationsmodellen. Anwendung (laser-)optischer Diagnoseverfahren sowie Erprobung von Komponenten zur Unterstützung der Produktentwicklung.
- MODELING OF ENERGY CONVERSION PROCESSES AT THE MICROSCALE** R+D 2.1.4

Lead: PSI-Combustion	Funding: BFE
Contact: Mantzaras Ioannis <a href="mailto:ioannis.mantzaras@psi.ch">ioannis.mantzaras@psi.ch</a>	Period: 2009–2012

Abstract: Entwicklung numerischer Modelle zur Darstellung der wichtigsten Prozesse von thermochemischer und elektrochemischer Energieumwandlung in Mikrokanälen. Entwicklung neuer Lattice Boltzmann Modelle für Multispezies, nicht isotherme, reaktive und komplexe dreidimensionale Mikroströmungen. Das resultierende Berechnungsmodell wird auch für die Simulation von chemisch reaktiven Strömungen genutzt werden können.

● **AUSLEGUNG UND REALISIERUNG VON WKK-ANLAGEN MIT „NULL“-SCHADSTOFF-POTENTIAL UNTER BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG BIOGENER ENERGIETRÄGER**

R+D 2.1.4

Lead: ETHZ-LAV

Funding: BFE

Contact: Boulouchos Konstantinos [boulouchos@lav.mavt.ethz.ch](mailto:boulouchos@lav.mavt.ethz.ch)

Period: 2011–2013

Abstract: Klein-WKK-Anlage ( $\leq 10$  kW<sub>thel.</sub>) mit el. Wirkungsgrad 35 % und „Null“-Schadstoff-Potential mit Erdgas. Erweiterung auf Biogase geplant. Für die optimale Auslegung des 1 Zylindermotors werden reaktionskinetische und strömungstechnische Grundlagen, insbesondere für den Einsatz gekühlter Abgasrückführung, erarbeitet. Nutzung dieser Grundlagen für Gasmotoren auch im Rahmen eines Projekts mit der FVV.

● **MOLECULAR DATA OF COMBUSTION RELEVANT RADICALS**

R+D 2.1.4

Lead: PSI-Combustion

Funding: BFE

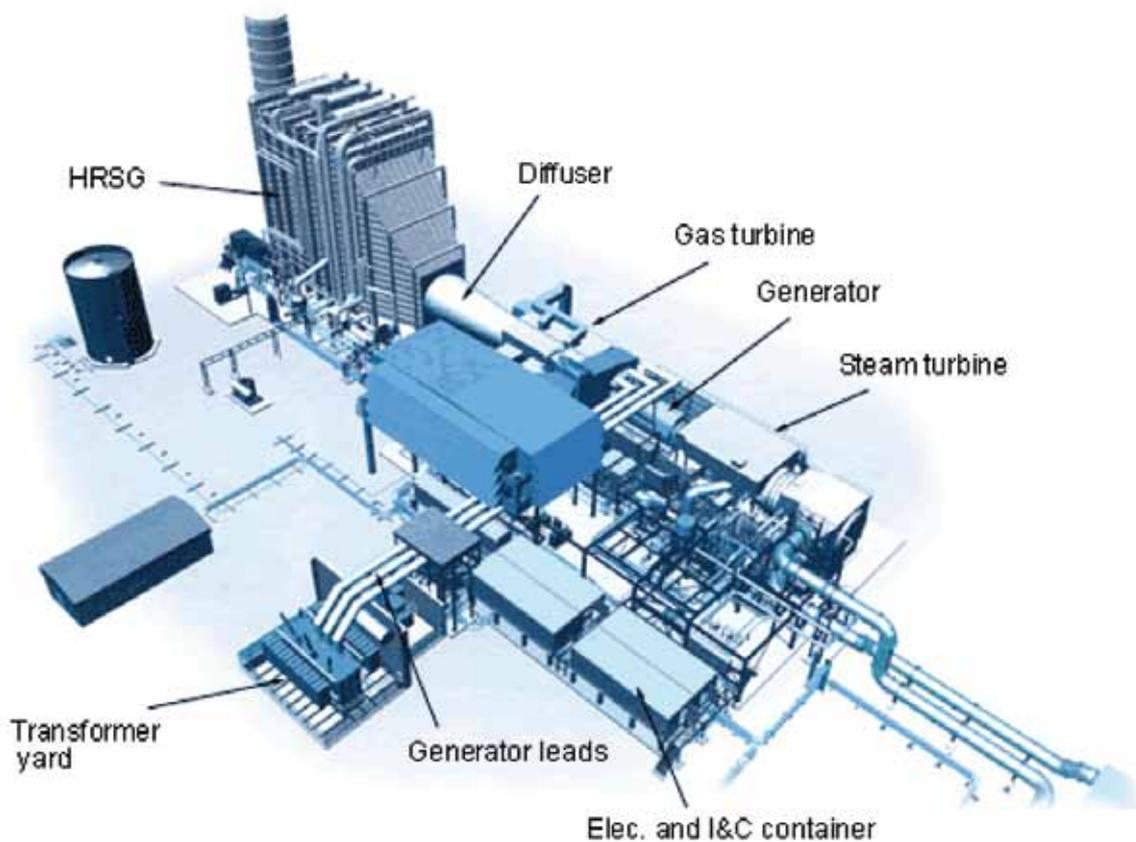
Contact: Thomas Gerber [thomas.gerber@psi.ch](mailto:thomas.gerber@psi.ch)

Period: 2011–2014

Abstract: Der Zündvorgang hat einen grundlegenden Einfluss auf den Verlauf der Verbrennung und damit die Entwicklung von Schadstoffen, insbesondere von Russ. Die thermochemischen Daten der Radikale im Zündprozess sollen mit spektroskopischen Messungen im ns -  $\mu$ s-Bereich genauer als bisher bestimmt werden. Problematisch ist die Erzeugung der Radikale. Zusammenarbeit mit EU-COST-Action 901 und NCCR-MUST.

Peter Jansohn

# Kraftwerk 2020 und Carbon Capture & Storage (CCS)



**Titelbild:**

Die Projekte des Programms Kraftwerk 2020 (inkl. CCS) sind schwerpunktmässig den Themenbereichen *Effizienzsteigerung* und *CO<sub>2</sub>-Minderung* zuzuordnen. Der Bearbeitung von Projekten im Bereich *flexible Betriebsweise* (zur Kompensation der schwankenden Stromproduktion aus fluktuierenden, erneuerbaren Energieträgern) kommt aber zunehmende Bedeutung zu.

**BFE Forschungsprogramm Kraftwerk 2020 und Carbon Capture & Storage (CCS)**

Überblicksbericht 2011

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
CH-3003 Bern

**Programmleiter BFE (Autor):**

Dr. Peter Jansohn, Paul Scherrer Institut (PSI) (peter.jansohn@psi.ch)

**Bereichsleiter BFE:**

Dr. Gunter Siddiqi (gunter.siddiqi@bfe.admin.ch)

<http://www.bfe.admin.ch/forschungskraftwerk>

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

## Einleitung

Durch den steigenden Strombedarf, das Auslaufen von Stromimportverträgen und das Erreichen der maximalen Betriebsdauer bestehender Kraftwerksanlagen zeichnet sich für den Zeitraum um das Jahr 2020 ein Engpass in der Stromversorgung der Schweiz ab. Um diese prognostizierte Versorgungslücke zu schliessen, sind Anstrengungen auf unterschiedlichen Ebenen (rationelle Stromverwendung, Ersatz von Stromerzeugungskapazitäten usw.) zu leisten. Eine Option für die Elektrizitätserzeugung in der Schweiz stellen Kombi-Kraftwerke auf Erdgas-Basis dar, die aufgrund ihrer für thermische Kraftwerke hohen Effizienz und ihres niedrigen Schadstoffausstosses mittelfristig in der Stromerzeugung von Bedeutung sind. Diese Technik ist auch deshalb für die Schweiz von besonderem Interesse, weil Schweizer Industriefirmen und Forschungsorganisationen führend in der Weiterentwicklung dieser Technologie tätig sind und sich somit ein hohes Umsetzungspotenzial sowohl in der Schweiz als auch weltweit bietet.

Um auch die klimapolitischen Zielsetzungen der Schweiz zu erfüllen, sind bei einem zusätzlichen Einsatz von Erdgas für die Stromerzeugung flankierende Massnahmen zu ergreifen, die gewährleisten, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem gesamten schweizerischen Energiesystem wie beabsichtigt gesenkt werden können. Die Prozessführung des Kraftwerks ist z. B. so zu gestalten, dass alternative (kohlenstoffarme) Brennstoffe eingesetzt werden können und CO<sub>2</sub> ganz oder teilweise abgeschieden werden kann und nicht in die Atmosphäre gelangt. Auch die Strategie der Kombination von

modernen, effizienten Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen mit Wärmepumpen muss weiterhin verfolgt und umgesetzt werden. Prozesse ausserhalb des eigentlichen Kraftwerks, wie z. B. externe Brennstoffaufbereitung oder CO<sub>2</sub>-Abtrennung und -Lagerung sind integraler Bestandteil des Programms. Aufgrund des begrenzten finanziellen Rahmens kann das Programm aber nur einen signifikanten Beitrag leisten, indem eine starke Fokussierung auf Schlüsselkomponenten erfolgt.

Um der zeitlichen Zielsetzung des Forschungsprogramms gerecht zu werden, im Jahre 2020 die notwendigen Technologien einsatzbereit entwickelt zu haben, müssen die dazu erforderlichen Basis-Technologien spätestens im Jahr 2016 verfügbar sein. Deshalb ist das Programm vorerst auf einen Zeitraum von ca. 10 Jahren (d.h. bis Ende 2016) ausgerichtet. Dieser Programmperiode können sich geeignete Fortsetzungsphasen mit erweiterten, angepassten Zielsetzungen anschliessen. Die Konzentration der Programmaktivitäten auf Schlüsselgebiete der Dampf- und Gasturbinentechnik inkl. Generatoren ist auch aus diesen zeitlichen Aspekten heraus erforderlich.

IEA Klassifikation: 2.1.4 Oil and gas combustion, 2.3 CO<sub>2</sub> Capture and storage (CCS)  
Schweizer Klassifikation: 1.9 Kraftwerk 2020 und CCS

## Programmschwerpunkte

Ein wesentliches Ziel des Programms ist es, durch Bündelung der Aktivitäten und durch Koordination der Ausrichtung individueller Projekte zu einer Stärkung des Forschungs- und Industriestandortes Schweiz im Bereich fortschrittlicher Gaskraftwerke zu gelangen. Dadurch soll sichergestellt werden, dass die bestgeeigneten Technologien bzw. Systeme für die Stromerzeugung in der Schweiz zum Einsatz kommen. Die schweizerische Kraftwerksindustrie inklusive der Zulieferfirmen und dem unterstützenden, akademischen Umfeld ist international führend, hat eine starke Marktstellung und ein grosses Umsetzungspotenzial.

Zentrales technisches Ziel des Programms ist die Maximierung des elektrischen Wirkungsgrads eines kombinierten Gas- und Dampfturbinenprozesses. Ein Wert von deutlich über 60 % (Zielbereich: 62–63 %) auf Basis Erdgas soll erreicht werden. Dies wird erwartungsgemäss dem im Jahr 2020 weltweit besten Standard entsprechen.

Weiteres Ziel ist die Steigerung des Einsatzes von erneuerbaren, CO<sub>2</sub>-neutralen Brennstoffen (insbesondere Biomasse-basierenden Vergasungsprodukten) auf 15 % im produktiven Betrieb. Ferner sollen mit dem Einbezug von prozesstechnischen Varianten für die erleichterte Abscheidung und Rückhaltung von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) darüber hinausgehende CO<sub>2</sub>-Emissionsminderungs-Potenziale ausgenutzt werden.

Durch den zukünftig verstärkten Einsatz fluktuierender, erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien wie Wind und Photovoltaik werden Stromversorgungsnetzwerke stärkeren, kurzfristigeren Produktionsschwankungen unterworfen sein, die durch die anderen Stromerzeuger kompensiert werden müssen. Ein weiteres Ziel des Programms ist es deshalb, Gasturbi-

nen-Kraftwerke noch besser zu befähigen, die Stabilisierung des Stromversorgungsnetzes zu übernehmen. Dazu müssen Techniken entwickelt werden, die höhere Lastgradienten (+/-3 % Last pro Sekunde) oder gar eine Netzfrequenz unabhängige Betriebsweise erlauben.

Die Umsetzung dieser Schwerpunkte geht mit einer entsprechenden Gewichtung der einzusetzenden Programmmittel (Wirkungsgradsteigerung: 45 %; CO<sub>2</sub>-Minderung: 40 %; Netzzunterstützung: 15 %) einher.

Neben der Förderung durch das Bundesamt für Energie (BFE) werden die für dieses Forschungsprogramm relevanten Projekte durch finanzielle Mittel der Förderagentur für Innovation (KTI), sowie des Forschungsfond der schweizerischen Elektrizitätswirtschaft (Swisselectric Research) und der Europäischen Gemeinschaft im Zusammenhang mit dem 7. Forschungsrahmenprogramm (FP7) unterstützt.

### Rückblick und Bewertung 2011

Nach dem offiziellen Start des Programms Anfang 2006 und der Initiierung einer ersten Welle von Projekten, die den Rahmenbedingungen des Programmkonzeptes [1] gerecht wurden, und der Erweiterung des Programmrahmens 2009 auf Themen im Bereich «Abscheidung und Rückhaltung von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)» (Carbon Dioxide Capture and Storage, CCS), dokumentiert in der Fortschreibung des Programmkonzeptes [2], spiegelt das Projekt-Portfolio des Programms im Jahr 2011 diese Schwerpunktsetzungen wieder.

Nach dem Übergangsjahr 2009, in dem fast alle Projekte der Programm-Anfangsphase abgeschlossen wurden, sind im Jahr 2011 nun entweder thematisch ähnliche Folgeprojekte etabliert oder aber thematisch neu-

orientierte Projekte gestartet, die bisher vorhandene Lücken im Projekt-Spektrum schliessen. Das Programm befindet sich nun in einer Phase der kontinuierlichen Erneuerung des Projekt-Portfolios, welches die modifizierte Ausrichtung (stärkere Betonung von CCS-Themen) deutlich zeigt. Mit den neu lancierten Projekten wurde wieder eine thematische Lücke geschlossen (im Bereich «dynamische Netzstabilisierung») und die Bearbeitung der Schwerpunkt-Themenfelder abgerundet. Der zur Verfügung gestellte Finanzrahmen aus BFE-Mitteln war 2011 durch laufende Projekte bereits sehr weitgehend ausgeschöpft und erlaubte dementsprechend nur eine mässige Erweiterung des Projektumfangs. Die 2010 erfolgte Ankündigung von 20 von zu erwartenden Budget-Kürzungen führte dazu, dass 2011 keine neuen Projekt-Vorschläge aktiv eingeworben wurden und potenzielle Projektnehmer auf spätere Finanzierungszeiträume (2012 ff.) vertröstet werden mussten.

### Ausblick

Die neue Energiepolitik (und Energiestrategie), die nach den Ereignissen im Kernkraftwerk in Fukushima initiiert wurde, hat noch keine (deutliche) Änderung dieser Finanzierungssituation bewirkt. Aufgrund der Sistierung der Neubaupläne für Kernkraftwerke in der Schweiz ist allerdings das Thema «Gaskraftwerke in der Schweiz» wieder viel stärker in den Fokus der Energiediskussion gerückt.

## Highlights aus Forschung und Entwicklung

### Elektrischer Wirkungsgrad von Gasturbinen-Kraftwerken über 60 %

Im Jahr 2011 wurde weltweit erstmals für ein erdgasbefeuertes Gasturbinen-Kombi-Kraftwerk ein elektrischer Wirkungsgrad von über 60 % erreicht und mit 60,75 % durch ein unabhängiges Gutachten offiziell bestätigt. Die von Siemens erstellte Anlage in Irsching (bei München) mit einer Gesamtleistung von 575 MW (Gasturbine: 375 MW; Dampfturbine: 200 MW) setzt damit einen neuen Standard für die gasturbinen-basierende Kraftwerkstechnologie. Erreicht wird dieser neue Wirkungsgradrekordwert durch eine Reihe von Massnahmen, die auch im Wirkungsgrad-Entwicklungspfad (Figur 1) des Programms Kraftwerk 2020 enthalten sind und in verschiedenen KW2020-Projekten bearbeitet werden. Diese Massnahmen umfassen aerodynamische Verbesserungen am Luftverdichter, die Reduktion von parasitären Leakage-Strömungsverlusten (im Ringspalt zwischen rotierenden Schaufelkomponenten und stationären Strömungskanalwänden), die Reduktion des Kühlluftbedarfs von Komponenten im Heissgaspfad (Brennkammer und Turbinenschaufeln) sowie die Steigerung der thermodynamischen Prozessparameter (Druck über 20 bar und Temperatur des Heissgases am Turbineneintritt von nahezu 1300 °C).

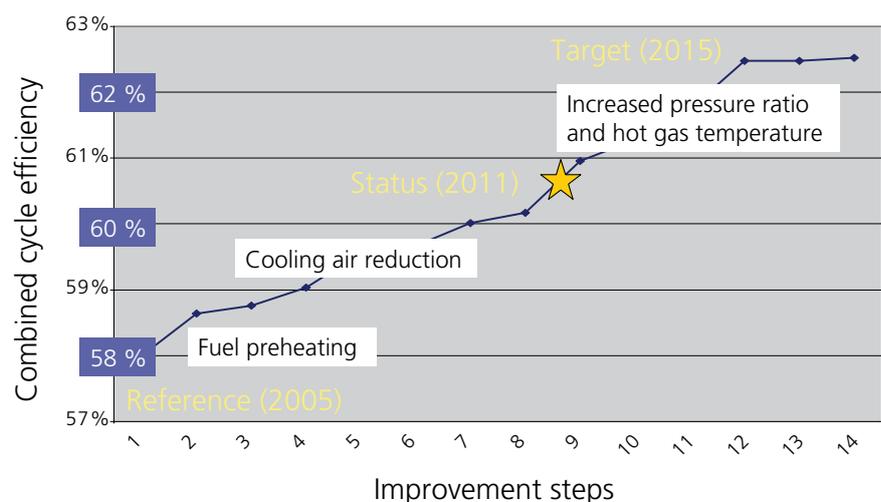
Neben Siemens haben alle anderen Hersteller von grossen Gasturbinen (> 200 MW) – General Electric, Mitsubishi Heavy Industries, ALSTOM – mittlerweile ebenfalls angekündigt Anlagen mit elektrischen Wirkungsgraden von über 60 % anbieten und realisieren zu können. Je nach Firmen-Philosophie und Geschäftsmodell werden dabei jeweils unterschiedliche technologische Entwicklungswege beschritten und Schwerpunkte (Alleinstellungsmerkmale) gesetzt. Während General Electric sich stark in der Technik Dampf-gekühlter Turbinenschaufeln engagiert hat, setzt Mitsubishi die Hauptbetonung auf die Steigerung der Prozessparameter (und Grössenskalen-Effekte) und ALSTOM verfolgt den Weg der Reheat-Prozesstechnik (mit sequentieller Verbrennung in zwei hintereinander geschalteten Brennkammern) konsequent weiter.

Auf Basis dieser eingeschlagenen Entwicklungspfade und der – nach wie vor – vorhandenen Entwicklungspotenziale in Bezug auf die Komponentenwirkungsgrade, die Reduktion von Kühlungsverlusten und der weiteren Steigerung der Prozessparameter, ist mit hoher Wahrscheinlichkeit damit zu rechnen, dass die Effizienz von Gasturbinen-Kombi-Kraftwerken sich im diesem Jahrzehnt (bis 2020) auf 63–65 % weiter entwickeln wird.

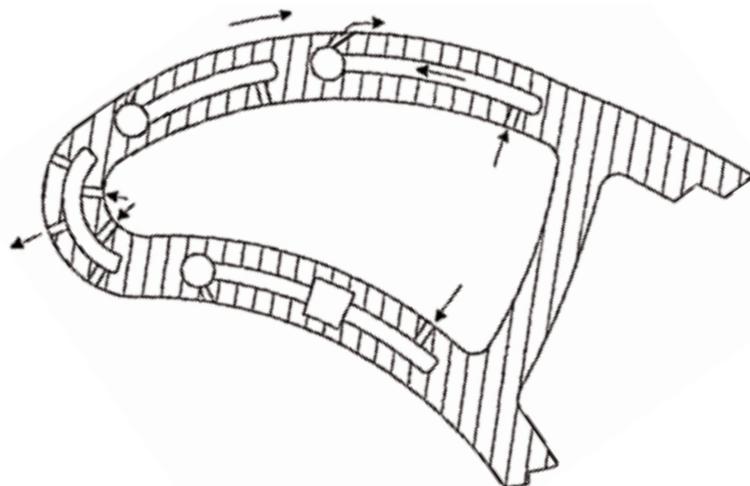
### (Prall-)Kühlung von Gasturbinenschaufeln

Die Komponenten des Heissgaspfades einer modernen, hoch effizienten Gasturbine müssen intensiv gekühlt werden, um kritische Materialtemperaturen (ca. 900 °C) nicht zu überschreiten und den mechanischen Belastungen über viele tausend Betriebsstunden (z. B. 24'000/48'000 OH = operating hours) standzuhalten. Dazu wird das Kühlmedium (i.d.R. Luft aus dem Luftverdichter der Gasturbine) mit Hilfe aufwendiger Geometrien durch die hohl ausgeführten Gasturbinenschaufeln geleitet, um bei möglichst geringem Massenstrom und Druckverlust trotzdem die notwendige Kühlleistung auch an thermisch besonders stark belasteten Teilen der Schaufeloberfläche

(An-/Abströmkante, Schaufelspitze) zu gewährleisten. Der zur Kühlung der Heissgaskomponenten notwendige Kühlluftmassenstrom beträgt bis zu 20 % des gesamten Luftverdichter-Massenstroms und trägt immens zu den Effizienzverlusten in einer Gasturbine bei. Im Projekt *Advanced Cooling Systems for Turbine Vanes* werden Prallkühlungsgeometrien untersucht (die Kühlluft wird in Form eines Strahls senkrecht auf die zu kühlende Fläche geblasen), und zwar speziell unter Bedingungen, wie sie in engen Passagen und Kanälen vorliegen (Verhältnis von Kanalhöhe Z zu Kühlluft-Strahldurchmesser D nur zwischen 1 und 3). Diese beengten Platzverhältnisse sind typisch für Gasturbinen-Schaufelgeometrien, die möglichst material-sparend d.h. dünnwandig ausgeführt werden (siehe Figur 2). Für solch enge Passagen ist bisher nicht ausreichend erforscht, wie sich die einzelnen Strahlen und die sich entwickelnde Querströmung (entlang der Kanalwand) gegenseitig beeinflussen. Um für diese speziellen geometrischen Verhältnisse verlässliche Auslegungsdaten zu erhalten, auf Basis derer Korrelationen erarbeitet werden, die bei der Auslegung zukünftiger Schaufelgeometrien zum Einsatz kommen, wurde beim akademischen Projektpartner (EPFL) ein Versuchstand entworfen und aufgebaut. Die



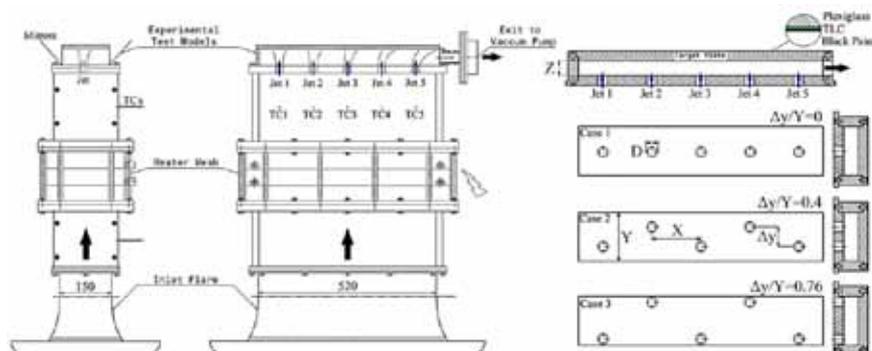
Figur 1: Entwicklungspfad für die Steigerung des elektrischen Wirkungsgrads von Gas-Kombikraftwerken. Um den Wirkungsgrad auf über 60 % zu steigern, ist eine Vielzahl von Massnahmen zu realisieren. Durch die Steigerung des Komponenten-Wirkungsgrads (von Luftverdichter und Turbine), durch die Reduktion des Kühlluftbedarfs und Steigerung der thermodynamischen Betriebsparameter (Druck, Temperatur) ist es 2011 gelungen, den elektrischen Wirkungsgrad auf über 60 % zu steigern.



Figur 2: Typische Geometrien für wand-integrierte Kühlkanäle in Gasturbinenschaufeln. Die Dimensionen der Strukturen (Kanalhöhe, Lochdurchmesser, Wandstärke) bewegen sich im mm-Bereich (0,5 bis 5 mm). Der gezeigte Bereich stellt die Schaufelspitze (Anströmkannte) der Gasturbinenschaufel dar, die durch das vorbeiströmende heisse Gas aus der Brennkammer besonders stark thermisch belastet ist.

Versuchseinrichtung (Figur 3) erlaubt die Untersuchung variabler Geometrien, sowohl betreffend unterschiedlicher Strahlanordnungen (in einer Linie – inline – oder versetzt – staggered), als auch unterschiedlicher Kanalhöhen. Die lokalen Wärmeübertragungsverhältnisse (d.h. die Kühlwirkung der Luftstrahlen) werden durch die lokalen Wärmeübergangskoeffizienten beschrieben, die sich aus dem lokalen Oberflächentemperaturverlauf berechnen lassen, wenn die Temperatur der Kühlluftstrahlen (annähernd) sprungartig verändert wird. Die Oberflächentemperatur der Prallplatte, auf die die

Kühlluftstrahlen auftreffen, wird über eine berührungslose, optische Messtechnik ermittelt, die auf dem Einsatz von temperaturempfindlichen Flüssigkristallen beruht. Die auf die Prallplatte in Form einer dünnen Schicht aufgetragenen Flüssigkristalle sind in ihren temperaturempfindlichen Eigenschaften so konzipiert, dass sie innerhalb eines relativ engen vorgegebenen Temperaturbereichs (hier: 38,5 °C bis 39,8 °C) ihre Farbe über das gesamte sichtbare Farbenspektrum hinweg verändern. Mit einer Kamera können die Farbänderungen einfach aufgezeichnet und den entsprechenden lokalen



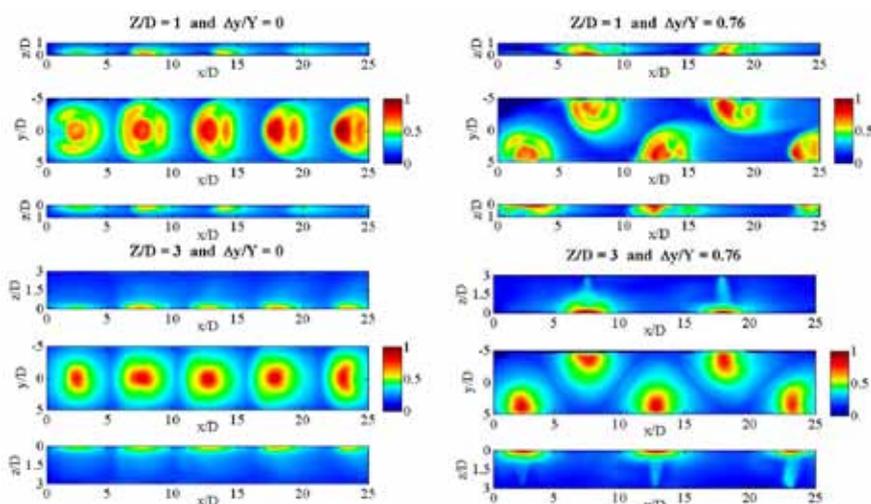
Figur 3: Versuchsanordnung für die Untersuchung von Prallkühlungs-Konfigurationen. Die zu testende Geometrie befindet sich oben auf der Versuchsanordnung (Bild links/ Bild Mitte: Längs- und Seitenansicht der Versuchsanordnung) und wird von unten mit Luft angeströmt, die sprungartig aufgeheizt werden kann. Kanalhöhe und Lochdurchmesser bzw. Lochanordnung können variiert werden (verwendete Ausführungsformen; rechte Bildhälfte). Die Prallplatte (target plate) ist aus Plexiglas und innen mit temperaturempfindlichen Flüssigkristallen beschichtet, deren Farbänderungen über eine Kamera aufgezeichnet werden.

Temperaturen zugewiesen werden, woraus sich dann in einem weiteren Rechenschritt die lokalen Wärmeübergangskoeffizienten berechnen lassen. Die Ergebnisse (Figur 4) zeigen relativ stark gestörte Strömungs- (und damit Wärmeübertragungs-) Verhältnisse für die sehr geringe Kanalhöhe ( $Z/D=1$ ); die Anordnung der Strahlen in einer Linie (nicht versetzt) ergibt eine bessere Abdeckung der gesamten mit erhöhten Wärmeübergangskoeffizienten; die Beeinflussung der Kühlluftstrahlen durch die sich entwickelnde Querströmung ist spürbar, hat aber keinen nachteiligen Effekt auf die insgesamt Kühlleistung. Zusammenfassend kann konstatiert werden, dass die beste (integrale) Kühlleistung durch in Linie angeordnete Kühlluftstrahlen in einem relativ hohen Kanal ( $Z/D=3$ ) erreicht wird.

### Verfügbarkeit von CCS-Technologien beeinflusst die zukünftige Energieversorgungs- und Nutzungsstruktur

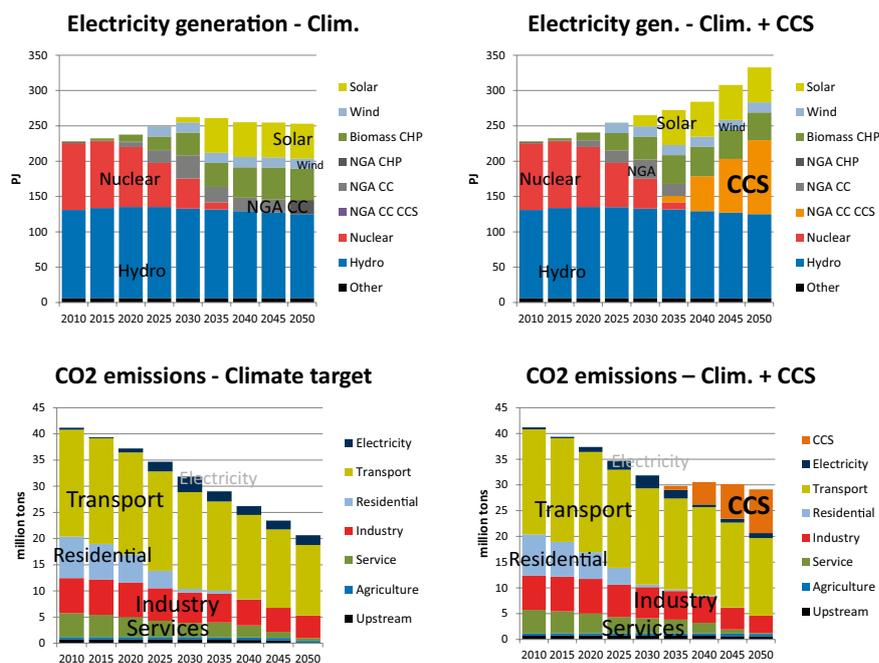
Die Aktivitäten des Themenbereichs CARMA – Carbon Management in Swiss Power Generation decken ein breites Spektrum von Fragestellungen ab, wie z. B. die Erforschung und Entwicklung technischer Lösungsansätze für die Verbrennung wasserstoffreicher Brenngase (wie sie bei der  $CO_2$ -Abscheidung vor der Verbrennung anfallen) und die mineralische Einbindung von  $CO_2$  aus Kraftwerksabgasen (entspricht der  $CO_2$ -Abscheidung nach der Verbrennung). Neben technischen Arbeiten im Labormassstab kommen im Projektverbund CARMA aber auch Methoden zur Erstellung von Energieszenarien zum Einsatz und gesellschaftliche Fragestellungen zur Akzeptanz diverser technischer Lösungen werden behandelt. Aufgrund der Breite und des Volumens der Aktivitäten werde die Arbeiten nicht nur vom BFE sondern von verschiedenen Förderinstitutionen unterstützt, u. a. von Swiss Electric Research und den Kompetenzzentren des ETH-Bereichs (Competence Center Energy and Mobility, CCEM; Competence Center Environment and Sustainability, CCES).

Unter Berücksichtigung der Energiestrategie des Bundes (keine neuen Atomkraftwerke, Stärkung erneuerbarer Energien, Gaskraftwerke als Brückentechnologie) und unter Einhaltung der Klimaziele (CO<sub>2</sub>-Minderung um 20 % bis 2020 bzw. 60 % bis 2050) ergeben sich bei den berechneten Energieszenarien für die Jahre 2010 bis 2050 signifikante Unterschiede, falls CCS-Technologien für Gaskraftwerke (und Industrieanlagen) ab 2030 verfügbar sind oder nicht. Sind CCS-Technologien grosstechnisch verfügbar, sagen die Szenarien-Modelle voraus, dass sie auch zum Einsatz kommen werden und damit das Elektrizitätsangebot durch Gaskraftwerke mit CCS signifikant erhöht wird. Ohne Gaskraftwerke mit CCS bleibt das Elektrizitätsangebot auf das Potenzial der CO<sub>2</sub>-freien, erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien beschränkt. Die zusätzliche CO<sub>2</sub>-arme Stromerzeugung durch Gaskraftwerke mit CCS hat auch Auswirkungen auf Energieverbrauchssektoren wie die Mobilität, deren Technologie-Mix 2050 dann deutlich unterschiedlich ausfallen würde. Die volkswirtschaftlichen Kosten würden durch die Einführung von CCS-Technologien ebenfalls beeinflusst und um ca. 44 Mrd. SFr. (Summe über die Jahre 2010–2050) niedriger ausfallen.

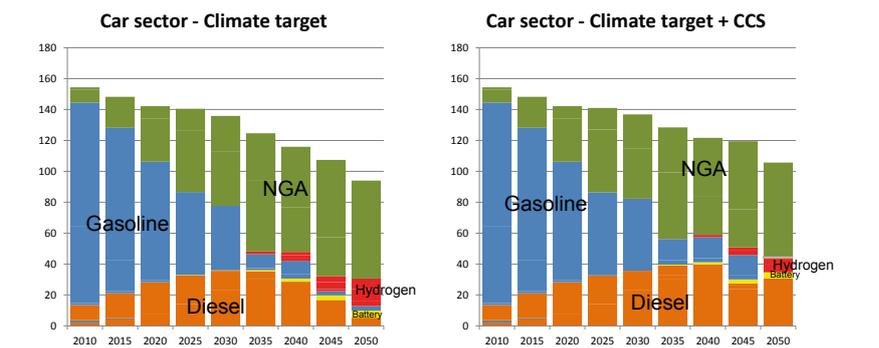


Figur 4: Verteilung der lokalen Wärmeübergangskoeffizienten für verschiedene Geometrien: kleine Kanalhöhe: obere Bildreihe; grosse Kanalhöhe: untere Bildreihe; Anordnung der Kühlluftstrahlen auf einer Linie: linke Bildhälfte; versetzte Anordnung der Kühlluftstrahlen: rechte Bildhälfte. rot: hoher Wärmeübergang, gute Kühlleistung; blau: keine Kühlwirkung.

Figur 5: Produktionstechnologien und CO<sub>2</sub>-Emissionen für Szenarien der Stromproduktion in der Schweiz auf Basis des Swiss MARKAL-Modells. Alle Szenarien führen zu einer starken Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen (-60 %) bis 2050. (links) Ohne CCS-Technologien. (rechts) Mit CCS-Technologien (verfügbar ab 2030).



Figur 6: Szenarien verwendeter Fahrzeug-Antriebstechnologien (auf Basis des Swiss MARKAL-Modells). Beide Szenarien – ohne (links) und mit CCS (rechts) – führen zu einer starken Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen (-60%) bis 2050. Wenn CO<sub>2</sub>-arme Stromerzeugungstechnologien zur Verfügung stehen, hat dies voraussichtlich auch Konsequenzen für die Struktur der eingesetzten Fahrzeug-Antriebstechnologien.



## Nationale Zusammenarbeit

Die Programmziele sind anwendungs- und umsetzungsorientiert ausgerichtet, woraus sich eine starke Integration und Beteiligung der im angesprochenen Kraftwerksbereich tätigen Herstellerfirmen und Zulieferbetriebe ergibt. Ein zentrales Element stellen dabei die Hersteller von Turbomaschinen und Kraftwerksanlagen dar (Alstom, MAN Turbo, Turbomach), die mit ihren in der Schweiz angesiedelten Entwicklungs- und Produktionszentren den Garant für die Umsetzung der Programmergebnisse bieten und zusammen mit den in der Schweiz angesiedelten Zulieferfirmen (u. a. Sulzer, Precicast, Stellba, von Roll) sicherstellen, dass die Programmaufwendungen vorwiegend in der Schweiz wirksam werden. Daneben wird auch eine aktive Beteiligung der Strom- und der Gaswirtschaft in der Schweiz (Swisselectric, VSG) angestrebt, die als Anwender bzw. Versorger ebenfalls einen wesentlichen Nutzen aus der zu entwickelnden fortschrittlichen Technik ziehen sollen. Die äusserst anspruchsvollen technischen Ziele sind nur mit einem verbesserten Verständnis der technischen Zusammenhänge und auf einer erweiterten Basis von Grundlagenkenntnissen erreichbar. Diesen Beitrag zum Programmerfolg liefern die akademischen Institutionen der Schweizer Hochschul- und Forschungslandschaft (ETHZ, EPFL, Empa, PSI, FHNW, HSR, ZHW). Sie werden dabei auch ihrem Anspruch gerecht, neueste technische Erkenntnisse schnell in marktgerechte Produkte umsetzen zu helfen. Durch die hohe technische Kompetenz der im ETH-Bereich angesiedelten Forschungsinstitute – zusammen mit praxisnaher Unterstützung aus den Fachhochschulen – sind die Voraussetzungen, einen signifikanten Beitrag zum Programmerfolg beizutragen, in nahezu idealer Weise gegeben.

Enge Verbindungen werden zum *Competence Center Energy & Mobility (CCEM-CH)* [3] des ETH-Bereichs un-

terhalten. Im Themenbereich Elektrizität im CCEM-CH besteht eine weitgehende Übereinstimmung der Zielsetzungen mit der Ausrichtung des Programms Kraftwerk 2020. Besonders hervorzuheben sind hier die Projekte *Gasturbinenprozess optimiert für CO<sub>2</sub>-Minderung (GT-CO<sub>2</sub>)* und *Carbon dioxide management in Swiss power generation (CARMA)*, die direkt im CCEM-CH eingebunden sind und eine finanzielle Förderung aus ETH-Bereichsmitteln erhalten. Sowohl das Projekt CARMA, als auch GT-CO<sub>2</sub>, welche einen breiten Bereich von Fragestellungen im Bereich der CO<sub>2</sub>-Problematik bearbeiten (Gesamtsystemanalysen, Pre-Combustion Decarbonization, CO<sub>2</sub>-Abscheidungstechniken, CO<sub>2</sub>-Sequestrierung, sozio-ökonomische Fragen/gesellschaftliche Akzeptanz), und Antworten und Lösungen für die Schweiz suchen, aber auch Resultate von internationaler Bedeutung bereitstellen, sind mit finanziellen Mitteln aus der Forschungsförderungsorganisation von Swisselectric Research ausgestattet. Es ist gewünscht und beabsichtigt diese Verbindungen weiter auszubauen und damit das Programm Kraftwerk 2020 breit in der Förderlandschaft der Schweiz abzustützen.

Das nationale Netzwerk des Programms Kraftwerk 2020 wird regelmässig in einer Jahresveranstaltung gepflegt (nächster Termin: August 2012), bei der ein Überblick über den Stand der Programmaktivitäten geboten wird und die Gelegenheit besteht, sich über die Zielsetzungen und Rahmenbedingungen des Programms im Detail zu informieren und mit potenziellen Projektpartnern in Kontakt zu kommen. 2011 wurde gemeinsam mit Swisselectric Research ein 1-tägiger Workshop zum Themenbereich Carbon Capture and Storage veranstaltet, in dem der Entwicklungsstand der massgeblichen Technologien und ihre zukünftigen Perspektiven und Potenziale aufgezeigt wurden.

## Internationale Zusammenarbeit

Weltweit werden sehr grosse Anstrengungen unternommen, um den Wirkungsgrad von gasbefeuerten Kombi-Kraftwerken zu verbessern und um auf Systemebene die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu senken resp. durch Abscheiden und Lagern ganz zu vermeiden. Deshalb existieren in vielen Ländern (Deutschland, England, Norwegen, USA, Australien, Japan) und Regionen (z. B. Forschungsinitiative «Kraftwerke des 21. Jahrhunderts» [4] der Länder Bayern und Baden-Württemberg) ähnliche (inter-)nationale/regionale Programme wie das Programm Kraftwerk 2020, mit deren Ausrichtung und aktuellem Fortschritt ein regelmässiger Abgleich stattfindet. Durch gegenseitige Berichterstattung bei jährlich stattfindenden Programmkonferenzen wird ein regelmässiger Informa-

tionsaustausch gepflegt. Gemeinsame Projekte sind aufgrund nationaler Finanzierungsregeln und komplizierter Konstellationen bezüglich Eigentumsrechten an Projektergebnissen bisher nicht konkret in Betracht gezogen worden.

Die europäische Integration wird durch die Einbettung von Projekten aus dem Forschungsprogramm Kraftwerk 2020 im derzeit laufenden 7. Forschungsrahmenprogramm (FP7) der EU verfolgt. Die bisherige Erfahrung mit bereits erfolgten FP7-Projektausschreibungen zeigt, dass i.d.R. nur grosse Projektkonsortien (10–20 Partner) mit Projektanträgen erfolgreich sind. Daher ist es für Schweizer Partner essentiell, ein gut funktionierendes, weit gespanntes europäisches Netzwerk aufzubauen,

um damit die Chance zu haben, schon im Frühstadium der Projektentwicklung miteinbezogen zu werden. Dies ist im Rahmen des European Turbine Network (ETN) [5] durch aktive Beteiligung an einem erfolgreichen Projektantrag (H2-IGCC) gelungen. Die Zielsetzung des Projektes (Gesamt-Budget: 17,8 M€, Laufzeit 2009–2013), an dem das Labor für Verbrennungsforschung des Paul Scherrer Instituts (PSI) einen wesentlichen Anteil hat, ist es, wichtige Technologien und Komponenten eines «Null-Emissions»-Kraftwerks auf Basis eines integrierten Vergasungs-Kombikraftwerks (Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC) mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung zu demonstrieren.

Durch die Beobachtung und aktive Teilnahme am Arbeitsprozess der EU Technology Platform «Zero Emission Fossil Fuel Power Plants» [6] erfolgt sowohl eine regelmässige Abstimmung der Aktivitäten mit anderen nationalen Programmen (der Programm- bzw. der Bereichsleiter haben Einsitz in der begleitenden Länderarbeitsgruppe (Government Group)), als auch die Möglichkeit der Mitgestaltung von gemeinsamen Entwicklungszielen und EU-Arbeitsprogrammen (der Programmleiter ist Mitglied der Arbeitsgruppe Taskforce Technology). Diese Aktivi-

täten sind unabdingbar, um die Entwicklungen im europäischen Umfeld frühzeitig zu erkennen, und Chancen für die Schweiz und Schweizer Partner identifizieren und ausschöpfen zu können. Da eine Realisierung von neuen Kraftwerkskonzepten im Pilot- und Demonstrations-Massstab erheblicher Finanzierungsmittel bedarf, sind solche Entwicklungsschritte nur auf internationaler/europäischer Ebene denkbar (dies kann auch im Rahmen bi- oder multi-lateraler Zusammenarbeit zweier oder mehrerer Länder erfolgen).

Über Kontakte zu themenrelevanten Initiativen der Internationalen Energie Agentur (IEA) [7] wie der Working Party for Fossil Fuels (WPFF), des Implementing Agreement for Energy Conservation and Emission Reduction in Combustion, des Greenhouse Gas R&D Programme sowie des Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF) wird die internationale Vernetzung der Programmaktivitäten noch weiter verstärkt und damit Möglichkeiten eröffnet, durch gemeinsame Aktionen Projekte zu verwirklichen, die eine wesentlich grössere (internationale) Breitenwirkung entfalten und für die Schweiz allein sonst grundsätzlich gar nicht zu realisieren wären.

## Referenzen

[1] Konzept für das Forschungsprogramm «Kraftwerk 2020», BFE, Bundesamt für Energie BFE-Forschungsprogramm Kraftwerk 2020.

[2] Forschungsprogramm «Kraftwerk 2020»: Ergänzung und Aktualisierung des Programmkonzepts für den Zeitraum 2008–2011, Bundesamt für Energie BFE-Forschungsprogramm Kraftwerk 2020

[3] Competence Center Energy and Mobility (CCEM-CH), CCEM-CH

[4] Forschungsinitiative «Kraftwerke des 21. Jahrhunderts», KW21

[5] European Turbine Network (ETN), [www.eu-gasturbine.org/](http://www.eu-gasturbine.org/)

[6] Technology Platform «Zero Emission Fossil Fuel Power Plants», [www.zero-emissionplatform.eu/website/](http://www.zero-emissionplatform.eu/website/)

[7] Internationale Energie Agentur (IEA), [www.iea.org](http://www.iea.org)

## Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(\* IEA-Klassifikation)

- ENTWICKLUNG VON VERDICHTERN FÜR DIE ERZEUGUNG VON BRENNGAS AUS BIOMASSE**

R+D 2.3\*

Lead:	MAN Turbo AG	Funding:	BFE
Contact:	Lauber Uwe uwe.lauber@man.eu	Period:	2006–2010

Abstract: Für die Förderung der Produktgase aus Vergasungsprozessen von Biomasse (aber auch von fossilen, nicht gasförmigen Energieträgern und kohlenwasserstoffhaltigen Prozessrückständen) werden hocheffiziente Verdichter benötigt, die auf die speziellen Gaseigenschaften hin optimiert sind
- TURBOGENERATOR MIT ELEKTRISCHEM WIRKUNGSGRAD VON > 99 %**

R+D 2.3

Lead:	Alstom (Schweiz) AG, Baden	Funding:	BFE
Contact:	Keller Stefan stefan.sk.keller@power.alstom.com	Period:	2006–2010

Abstract: Heutige grosse Kraftwerks-Generatoren erreichen knapp 99% elektrischen Wirkungsgrad. Ventilationsverluste stellen dabei den Hauptanteil an den Gesamt-Verlusten. Durch Optimierung der Ventilator-Geometrie und der Kühlluft-Führung am Eintritt in den Generator sollen diese Verluste drastisch reduziert werden. Neue Isolationsmaterialien, die eine effektivere Kühlwirkung erlauben, tragen ebenfalls zur Wirkungsgrad-Steigerung bei.
- CARMA – CARBON DIOXIDE MANAGEMENT IN POWER GENERATION**

R+D 2.3

Lead:	ETH Zürich	Funding:	BFE
Contact:	Mazzotti Marco marcon.mazzotti@ipe.mavt.ethz.ch	Period:	2009–2012

Abstract: Im CARMA-Projekt wird eine breite Themen-Palette im Zusammenhang mit der Abscheidung und Einlagerung von Kohlendioxid (Carbon Capture and Storage) behandelt. Neben Gesamt-Systemanalysen und techno-ökonomischen Bewertungen unter länderspezifischen Bedingungen und Akzeptanzstudien zur Einführung von CCS, werden auch eine Vielzahl von technisch-wissenschaftliche Fragestellungen bearbeitet.
- WANDINTEGRIERTE KÜHLUNGSSYSTEME: PRALLKÜHLUNG MIT KOMPLEXEN GEOMETRIEN**

R+D 2.3

Lead:	EPFL/STI/ISE/LTT	Funding:	BFE
Contact:	Ott Peter peter.ott@epfl.ch	Period:	2009–2013

Abstract: Im Projekt werden neuartige Kühlungsgeometrien für Gasturbinen-Schaufeln entwickelt und untersucht. Die innovativen Designs sollen bereits im Giess-Prozess der Schaufelherstellung mit integriert werden und den Kühlluftbedarf signifikant reduzieren und damit den Wirkungsgrad der Turbinen deutlich steigern.
- COOLING OF NEXT GENERATION TURBOGENERATORS**

R+D 2.3

Lead:	ALSTOM Schweiz Ltd.	Funding:	BFE
Contact:	Diestel-Feddersen Lennart lennart.diestel-feddersen@power.alstom.com	Period:	2009–2013

Abstract: Turbogeneratoren, Synchronmaschinen die im 50/60Hz-Netz und mit 3000/3600 U/min rotieren, können mit H<sub>2</sub> oder mit Luft gekühlt werden. Luft ist auf Grund der einfachen Handhabung bevorzugt, erzeugt jedoch grössere interne Ventilationsverluste. Durch optimierte Kühlluft-Führung innerhalb der rotierenden und statischen Bauteile eines Generators sollen diese aerodynamischen Verluste reduziert werden bzw. durch Vergleichsmässigung der lokalen Kühlwirkung "hot spots" vermieden werden.
- ENTWICKLUNG VON INTEGRIERTEN MOTORVERDICHTERN FÜR DIE ERZEUGUNG VON BRENNGAS AUS BIOMASSE, TEIL 2**

R+D 2.3

Lead:	MAN Turbo AG	Funding:	BFE
Contact:	Lauber Uwe uwe.lauber@man.eu	Period:	2009–2013

Abstract: Die Erzeugung gasförmiger Brennstoffe aus fester Biomasse erfolgt durch Vergasungsprozesse, bestehend aus der Erzeugung des für die Vergasung benötigten Sauerstoffs, und dem Vergasungsprozess der festen Einsatzstoffes (Biomasse, Kohle, Raffinerie-Rückstände). Für die Verwendung der Vergasungsprodukte in Gasturbinen-Kraftwerken müssen diese Produktgase auf ein höheres Druckniveau gebracht werden.
- BOOSTERCAP – DYNAMIC EXCITATION MODULE**

R+D 2.3

Lead:	ALSTOM Schweiz Ltd.	Funding:	BFE
Contact:	Menzel Johannes johannes.menzel@power.alstom.com	Period:	2011–2012

Abstract: Die Überbrückung von Spannungseinbrüchen im Stromversorgungsnetz (Hochspannungsebene) gewinnt zunehmend an Bedeutung mit der verstärkten Einspeisung fluktuierender Stromerzeugungstechnologien. Generatoren mit konventioneller Technik müssen bisher bei entsprechenden Spannungsschwankungen (bzw. Frequenzschwankungen) vom Netz getrennt werden, und verschärfen damit die Problematik einer sicheren, unterbrechungsfreien Stromversorgung.

Stefan Oberholzer

# Brennstoffzellen



## **Titelbild:**

### **Postauto mit Brennstoffzellenantrieb**

Seit dem Fahrplanwechsel vom Dezember 2011 setzt PostAuto zum ersten Mal in der Schweiz Busse mit Brennstoffzellenantrieb ein. Die Fahrzeuge verkehren ab Brugg (AG) in einer Versuchsphase über fünf Jahre. Der Feldversuch von PostAuto ist Teil des europäischen Grossprojektes «CHIC – the Clean Hydrogen In European Cities», welches zu einer kommerziellen Markteinführung von Wasserstoff-Bussen mit Brennstoffzellenantrieben beitragen soll. Gesamteuropäisch werden dazu 26 Wasserstoff-Busse in den Alltagsbetrieb auf regulären Busstrecken integriert. Anders, als an den anderen Standorten, wo die Busse meist in eher flachem städtischen Gelände unterwegs sind, liegt dabei der Schwerpunkt im Schweizer Teilprojekt im Erfahrungsgewinn auf hügeligen Überlandstrecken. Das CHIC-Projekt ist eine Weiterführung der erfolgreichen Feldtestversuchen der ersten und zweiten Generation von Brennstoffzellen-Bussen innerhalb der Projekten CUTE und HyFLEET:CUTE.

## **BFE Forschungsprogramm Brennstoffzellen**

Überblicksbericht 2011

### **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)

<http://www.bfe.admin.ch/forschungbrennstoffzellen>

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

## Einleitung

Brennstoffzellen sind Energiewandler, welche die in chemischen Energieträgern gespeicherte Energie direkt in elektrische Energie umwandeln. Hierzu wird kontinuierlich ein gasförmiger Brennstoff (Wasserstoff oder Kohlenwasserstoffe) und ein Oxidationsmittel (Sauerstoff oder Luft) zugeführt. Brennstoff und Oxidationsmittel sind dabei durch den Elektrolyten räumlich voneinander getrennt. Der Elektrolyt ist charakteristisch für die verschiedenen Typen von Brennstoffzellen. Durch die räumliche Trennung erfolgt der bei einer Redoxreaktion stattfindende Elektronenaustausch zwischen den Reaktionspartnern nicht lokal statt – so wie etwa bei einem Verbrennungsprozess –, sondern über einen äusseren Stromkreis. Im Unterschied zu Batterien liefert eine Brennstoffzelle kontinuierlich elektrische Energie, solange die externe Gasversorgung aufrecht erhalten bleibt.

Bemerkenswerte Merkmale von Brennstoffzellen sind der im Vergleich zu einer Wärmekraftmaschine (Carnot-Maschine) hohe Wirkungsgrad sowie die geringe Schadstoffemission. Im Falle von reinem Wasserstoff als Brenngas fällt als Reaktionsprodukt nur Wasser an. Weitere Vorteile sind die geringe Lärmemission, die Abwesenheit beweglicher Bauteile, das gute Teillastverhalten, eine modulare Bauweise, die Brennstoffzellensysteme in verschiedenen Leistungskategorien ermöglicht, sowie die Bereitstellung von sowohl elektrischer Energie als auch von Wärme.

Die Anwendungen von Brennstoffzellen sind sehr vielfältig. Gewisse Brennstoffzellensysteme sind interessant für die dezentralisierte Versorgung von

Gebäuden mit Elektrizität und Wärme, andere für Fahrzeugantriebe oder auch für die Energieversorgung portabler elektrischer Geräte.

Im Bereich der stationären Anwendung sind insbesondere im Bereich Mikro-WKK-Anwendung (micro-CHP) hohe Marktpotenziale vorhanden. Der Ersatz von Boilersystemen durch entsprechende Brennstoffzellen mit Wirkungsgraden von mehr als 95 % (bis 60 % elektrisch und 35 % thermisch) kann einen enormen Beitrag zur Effizienzsteigerung leisten. Durch die dezentrale Stromproduktion sind solche Systeme weiter wichtig im Zusammenspiel von verschiedenen Komponenten in Smart-Grids. Grosse Förderpromesse laufen hierzu insbesondere in Deutschland – bis 2020 sollen dort micro-CHP-Systeme 140 TWh Strom liefern, was einem Marktpotenzial von 3,5 Millionen Systemen bis 2020 entspricht – und in Japan, wo eine dezentrale Stromversorgung einen besonders grossen Beitrag zur Versorgungssicherheit leisten kann.

Zielgrössen sind nach wie vor \$ 5'000 bis \$10'000 für ein im Gebäude eingesetztes CHP-System mit einer Lebenszeit der Brennstoffzelle von mehr als 40'000 Stunden.

Für die Mobilitätsanwendung von Brennstoffzellen wurde 2010 eine ausführliche Studie erstellt, wozu 31 Firmen und Organisationen ihre Daten für eine Studie zur Verfügung stellten, welche von McKinsey & Company anonymisiert und ausgewertet wurden [1]. Gemäss der Studie wird es in der Elektromobilität keine einzelne Technologie geben, welche die andern gänzlich verdrängen wird. Batterieelektrische Fahrzeuge zeichnen

sich durch einen hohen Wirkungsgrad aus, Brennstoffzellenfahrzeuge dafür durch eine höhere Reichweite, grössere Fahrzeugtypen, sowie eine effizientere Betankung. Je nach Anwendung werden unterschiedliche Technologien eingesetzt. Bis 2020 wird eine Kostensenkung von 90 % für Brennstoffzellensysteme prognostiziert (80 % für Batteriesysteme), so dass es 2025 hier für den Endkunden keine grossen Unterschiede geben sollte. Die Studie betrachtete ausserdem den Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur, welche für eine Million Brennstoffzellenfahrzeuge bis 2020 mit drei Milliarden € angegeben wird. Langfristig wären die Kosten sehr viel geringer.

Nicht zuletzt wegen des weiterhin ausbleibenden Booms bei der reinen Batterie-Elektromobilität sind Brennstoffzellenfahrzeuge in letzter Zeit wieder stärker ins öffentliche Interesse gerückt. Verschiedene grosse Fahrzeughersteller wollen spätestens 2015 Brennstoffzellenfahrzeuge in Serie produzieren, Daimler sogar bereits 2014. Parallel dazu soll, zumindest in Deutschland, eine passende Tankstelleninfrastruktur aufgebaut werden, damit diese Fahrzeuge an Privatpersonen abgegeben werden können.

In der Schweiz sind einige wenige industrielle Akteure vorhanden, welche sich in diesem Umfeld sehr gut positioniert haben. Die Verknüpfung mit Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen an verschiedensten Institutionen ist dabei sehr eng.

In dem vorliegenden Bericht werden die herausragendsten Resultate 2011 aus Forschung und Entwicklung in diesem Bereich vorgestellt.

IEA Klassifikation: 5.2 Fuel Cells, 6.1 Electric power conversion  
Schweizer Klassifikation: 1.7 Brennstoffzellen

## Programmschwerpunkte

In der Schweiz befasst sich die Energieforschung seit mehreren Jahrzehnten mit dem Thema Brennstoffzellen. Es bestehen hierzulande weltweit führende Kompetenzen in Forschung und Entwicklung, sowohl an den eidgenössischen Hochschulen, Universitäten und Fachhochschulen, als auch in kleineren und mittleren Unternehmen. Die in der Schweiz laufende Forschung ist dabei in einem hohen Mass in internationale Projekte eingebunden. Das Forschungsprogramm Brennstoffzellen des Bundesamtes für Energie versucht, nationale und internationale Aktivitäten zu koordinieren und die Zusammenarbeit zwischen Universitäten, Fachhochschulen und der Industrie zu fördern. Die hierzu zur Verfügung stehenden Gelder werden subsidiär eingesetzt, zusätzlich zu den übrigen Mitteln der öffentlichen Hand und der Industrie. Die Schwerpunkte des Forschungsprogramms Brennstoffzellen liegen in der materialorientierten Grundlagenforschung, in der Systementwicklung, sowie in der Demonstration und Erprobung in Pilotprojekten [2, 3].

*Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen für mobile Anwendungen:* Bei Polymer-Elektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEFC) stehen die Reduzierung der Kosten, die Robustheit im Betrieb, sowie die Verfügbarkeit der Komponenten im Vordergrund. Es bestehen hier neuere und Erfolg verpre-

chende Ansätze mit Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzellen. Die Analyse von diversen Degradationsphänomenen werden durch experimentelle Messungen an Teilkomponenten und ganzen Systemen, sowie mittels deren theoretischer Modellierung eingehend untersucht. Die Systemintegration von PEM-Brennstoffzellen und die Anwendung in Nischenmärkten bilden weitere Themen.

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

### Rückblick und Bewertung 2011

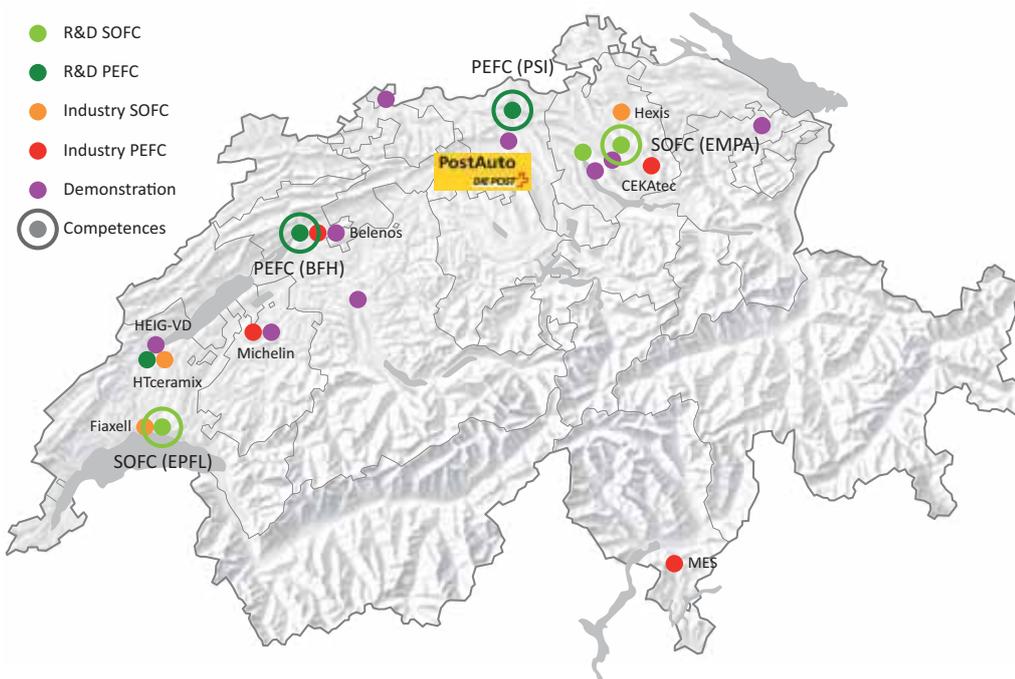
Im Jahr 2011 wurden verschiedene grössere Forschungsprojekte erfolgreich abgeschlossen. Das gemeinsam von Swisselectric Research und BFE getragene Industrieprojekt um die Weiterentwicklung der SOFC-Technologie wurde in zwei neuen eng miteinander verknüpften Projekten weitergeführt. .

Im Bereich Umsetzung, Pilot und Demonstration erfolgte durch die Inbetriebnahme von Brennstoffzellen-Bussen bei PostAuto ein grosser Durchbruch. Der Aufbau der dazu notwendigen Infrastruktur erfolgte in Rekordzeit. Leichte Verzögerungen traten dagegen bei dem ursprünglich für 2011 angesetzten Praxistest für die von der Firma CEKAtec AG ([www.ceka.ch](http://www.ceka.ch)) entwickelte luftgekühlte PEFC-Brennstoffzelle, welche in mobilen Minibars von Elvetino integriert wurde. Es ist vorgesehen, diesen Feldtest im Jahr 2012 weiterzuführen.

### Ausblick

Das Programm versucht weiterhin auch mit nach wie vor bescheidenen Forschungsmitteln die Schwerpunktbereiche gezielt zu unterstützen und dadurch ein Maximum an Wirkung zu erzielen. Hierzu findet eine enge Zusammenarbeit mit weiteren Förderstellen statt. Auf Projektebene werden von der Belenos Clean Power Holding AG neue Impulse erwartet bei der Integration und Weiterentwicklung der Brennstoffzellen-Systemen.

Ein wichtiges Ereignis wird 2012 das jährlich in Luzern stattfindende European Fuel Cell Forum bilden ([www.efcf.com](http://www.efcf.com)).



## Highlights aus Forschung und Entwicklung

### Ultraschnelle Röntgentomographie (XTM) an Polymer-elektrolyt-Brennstoffzellen

Das effiziente Entfernen von Produktwasser und das Feuchtigkeits-Management sind äusserst wichtige Elemente für den Betrieb von Polymer-elektrolyt-Brennstoffzellen (PEFC), speziell bei hohen Lasten. Produktwasser beeinflusst die Transporteigenschaften der Reaktanten in der mikroporösen Gasdiffusionsschicht (GDL) und kann dazu führen, dass weniger Gas an die Membran gelangt. Die Feuchtigkeit der Membran beeinflusst stark deren ionische Leitfähigkeit.

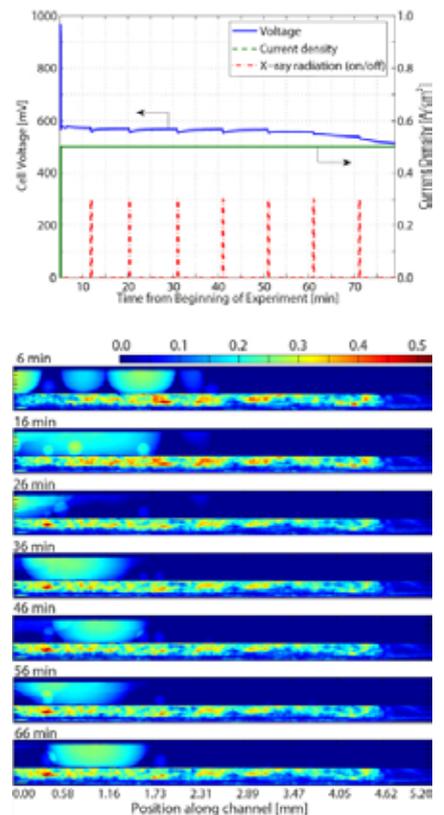
Am Paul Scherrer Institut (PSI) wird zu dieser Thematik der Transport von Wasser innerhalb der Gasdiffusionsschicht von PEFCs in-situ durch Röntgentomographie untersucht. Das PSI betreibt hier weltweite Spitzenforschung, wobei insbesondere auch von industrieller Seite ein grosses Interesse besteht, das Verhalten von Brennstoffzellen in-situ zu untersuchen. Für die Röntgentomographie wird eine speziell ausgerüstete Beamline (TOMCAT) an der PSI-Synchrotronquelle SLS (Swiss Light Source) genutzt (Figur 1). Durch die intensive Röntgenstrahlung werden die Materialien in der Brennstoffzelle relativ stark strahlengeschädigt. Dadurch sind die Scan-Zeiten auf rund 60 Sekunden beschränkt bei einer Synchrotron-Bestrahlung mit 13,5 keV. Bei grösseren Strahlendosen nimmt die Leistungscharakteristik der Brennstoffzelle merklich ab (Figur 2).

Im Berichtsjahr erfolgte eine Nachrüstung der TOMCAT-Beamline mit einer neuen Kamera (2016 x 2016 Pixel, Belichtungszeiten von 1,5  $\mu$ s bis 40 ms), so dass nun ultra-schnelle XTM-Messungen möglich sind mit mehreren Scans innerhalb von rund 10 Sekunden mit einem erweiterten Blickfeld und gleichbeibend guter Auflösung aufgenommen werden können. Durch ein zusätzliches Objektiv kann das Blickfeld zwischen 2,9 x 2,9  $\mu$ m<sup>2</sup> und 5,8 x 5,8 mm<sup>2</sup> gewählt werden.

Wichtigste Fragestellungen, welche mit XTM-Messungen beantwortet werden sollen, sind:

- die zeitliche Stabilität der Wasserverteilung innerhalb der Gasdiffusionsschicht (GDL);
- die Reproduzierbarkeit der Wasserverteilung bei Start-Stop-Zyklen;
- der Zusammenhang zwischen Gas-Flussraten bzw. Stromdichten und der Wasserverteilung innerhalb der GDL;
- der Unterschied in der Wasserverteilung für Membranen mit und ohne sulfoniertem Fluoropolymer als Grundgerüst (PTFE);
- ein möglicher Einfluss der Belichtungszeiten auf die Wasserverteilung.

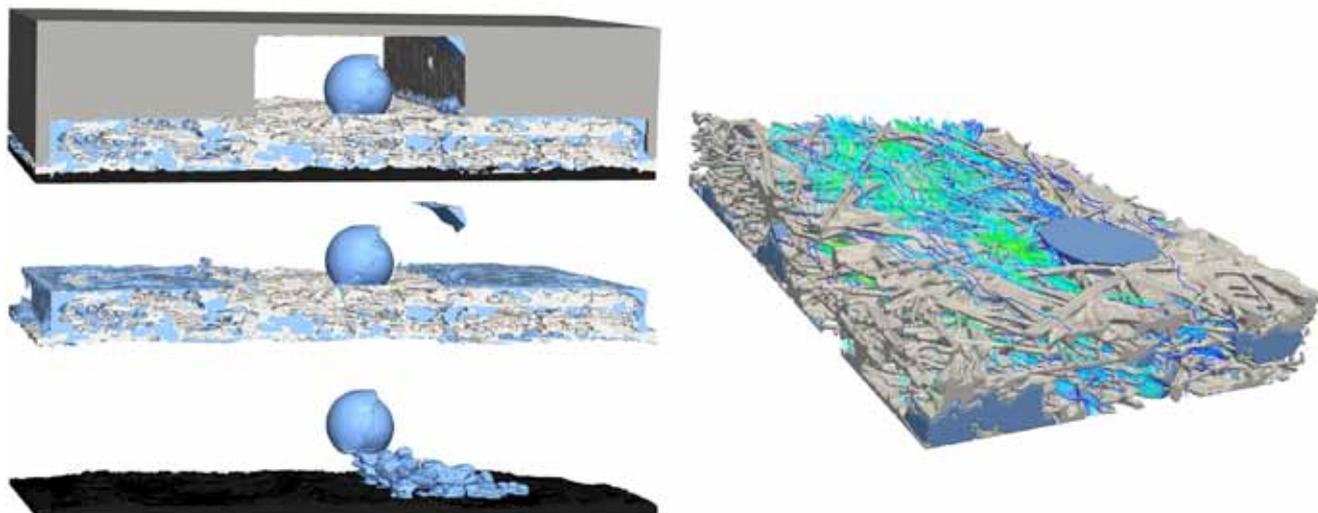
Zur Untersuchung der Stabilität der Wasserverteilung innerhalb der GDL wurden Zellen bei 30 °C bei konstanter Stromdichte (0,5 A/cm<sup>2</sup>) betrieben.



Figur 2: (Oben) Zellspannung und Stromdichte als Funktion der Zeit und Anzahl der XTM-Scans. Nach der sechsten Messung (entspricht einer Belichtungszeit von rund 50 Sekunden) mit 13,5 keV, beginnt die Zellspannung merklich abzufallen. (Unten) 2D-Projektion der Wasserverteilung entlang des Kanals. Die Fluktuationen in der Wasserverteilung zwischen verschiedenen Scans stabilisieren sich nach 46 Minuten bei rund 10 %.



Figur 1: (Links) Schematischer Aufbau der Brennstoffzelle für Röntgentomographie-Messungen mit vertikal orientierter Membran-Elektroden-Einheit (MEA). CCM: Mit Katalysator beschichtete Membran. (Rechts) Aufbau am Messstand der TOMCAT-Beamline der Swiss Light Source am PSI.



Figur 3: (Links) In-situ Röntgen-Tomographie (XTM) an Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen ermöglicht es, die 3D-Wasserverteilung in der Gasdiffusionsschicht (poröse Struktur) auf einer Mikrometerskala zu visualisieren und die Verlaufswege von flüssigem Wasser vom Katalysator an der Membran (schwarz) zum Gas-Fluss-Kanal in der Kathode (dunkelgrau) zu identifizieren. (Rechts) Rekonstruktion einer Gas-Diffusions-Schicht auf Basis von XTM-Daten. Die Stromlinien visualisieren den Gasdurchgang und wurden mit Hilfe der Lattice Boltzmann Modellierungsmethode berechnet. Blau entspricht niedrigen, gelb erhöhten Flussgeschwindigkeit.

ben. Nach jeweils 10 Minuten wurde jeweils ein XTM-Scan aufgenommen. Die verschiedenen Scans wurden dann miteinander verglichen in Bezug auf den gesamten Wassergehalt, sowie auf die Anzahl mit Wasser gefüllter Voxel. Phasensegmentierte Daten aus verschiedenen XTM-Scans dienen

ebenfalls als Input zur Berechnung der Permeabilität und relativen Diffusionskoeffizienten der Gas-Diffusionsschicht mittels eines am PSI entwickelten Lattice-Boltzmann-Code. Durch die Kombination von in-situ-XTM-Daten und Lattice-Boltzmann-Modellierung konnte zum ersten Mal experimentell

aufgezeigt werden, dass die Beziehung zwischen relativer Permeabilität  $k_{rel}$  und Wassersättigung  $S$  einem Potenzgesetz der Form  $k_{rel} = (1-S)^3$  entspricht, welches so typischerweise in der Modellierung von PEFCs genutzt wird.

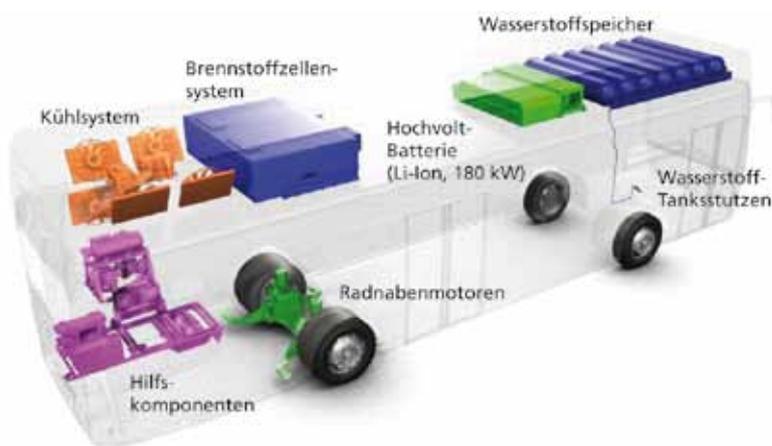
## Pilot- und Demonstrationsprojekte

### Brennstoffzellenbusse bei PostAuto

Als Schweizer Partner beteiligt sich PostAuto am Europäischen Projekt Clean Hydrogen In European Cities Project (CHIC), welches die Integration von europaweit 26 Brennstoffzellen-Bussen in den öffentlichen Verkehr vorsieht. Bei PostAuto werden seit Ende 2011 fünf Citaro-Brennstoffzellen-Hybridbusse der neuesten Generation eingesetzt. Der Betrieb der Busse erfolgt ab Brugg, wo eine erste Wasserstofftankstelle für Busse in der Schweiz aufgebaut wird. Wasserstoff wird über Elektrolyse bereitgestellt mit dem Einsatz von zertifiziertem Naturstrom. Über die Betriebszeit von fünf Jahren können bei PostAuto durch den Einsatz dieser Busse der Ausstoß von 2'000 Tonnen CO<sub>2</sub> eingespart werden.

Das Projekt CHIC als Ganzes soll die Praxistauglichkeit der Technologie demonstrieren. Im Vergleich zu früheren

Feldversuchen wird der Wasserstoffverbrauch der neuen Busgeneration um die Hälfte reduziert werden.



Figur 4: Aufbau des Brennstoffzellen-Postautos (Citaro FuelCELL-Hybrid): Max. kurzfristige Leistung: 220 kW, Reichweite > 250 km, Wasserstoffverbrauch: 10–14 kg / 100 km, max. Effizienz 58 %, Passagierkapazität: 76.

## Nationale Zusammenarbeit

Die nationale Zusammenarbeit zwischen Projektnehmern wurde auch im Berichtsjahr weiter gepflegt. In vom BFE unterstützten Projekten bestehen verschiedene Arbeitsnetzwerke.

Auf Programmebene konnte die Zusammenarbeit mit verschiedenen Förderungsinstitutionen weiter ausgebaut werden, dies insbesondere mit Swisselectric Resarch, dem Competence Center Energy and Mobility (CCEM) und der Kommission für Technologie und Innovation (KTI). Daneben besteht auch eine gemeinsame Förderung von BFE und der Firma BELENOS bei der Weiterentwicklung von Wasserstoff/Sauerstoff-Brennstoffzellen.

Die direkte Förderung durch das BFE hat im Bereich Brennstoffzellen nach wie vor eine grosse Bedeutung als

Grundfinanzierung und Know-how-Sicherung an den entsprechenden Kompetenzzentren.

Die meisten Schweizer Akteure im Bereich PEM-Brennstoffzellentechnologie – aus der Forschung und der Industrie – sind in der nationalen Wasserstoffvereinigung Hydropole ([www.hydropole.ch](http://www.hydropole.ch)) organisiert.

Im Bereich der Umsetzung erhielt die Einführung von Brennstoffzellenbussen im regulären Linienbetrieb bei PostAuto hohe mediale Aufmerksamkeit. Ebenfalls von hohem nationalen Interesse ist das Projekt Hy.muve der EMPA, ein mit Wasserstoff betriebenes Kommunalfahrzeug, welches nach rund zwei Jahren erfolgreichem Testbetrieb in Basel im kommenden Jahr an die Stadt St. Gallen übergeben wird.

## Internationale Zusammenarbeit

Das Brennstoffzellenprogramm (AFC) der Internationalen Energieagentur (IEA, [www.ieafuelcell.com](http://www.ieafuelcell.com)) bildet eine Hauptplattform der internationalen, vorkommerziellen Forschungszusammenarbeit, an welchem sich die Schweiz beteiligt. Insbesondere wird der Subtask 1 Market Outlook, welcher sich zum Ziel setzt, im Bereich stationäre Anwendungen wichtige Märkte, länderspezifische Bedürfnisse betreffend Produkt- und Sevedesign, sowie Kostenstrukturen und Business-Konzepte zu analysieren, vom Schweizer Taskmitglied geleitet.

Verschiedenste Brennstoffzellenprojekte werden durch die EU-Forschungsrahmenprogramme unterstützt. 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 (N.ERGHY, [www.nerghy.eu](http://www.nerghy.eu)) ist die Schweiz durch die EMPA und das PSI vertreten. Über die States Representatives Group wird versucht, die Forschungsprogramme der einzelnen Länder einzubinden.

## Referenzen

[1] *A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis, The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles*, McKinsey & Company (2010) ([www.zeroemissionvehicles.eu/](http://www.zeroemissionvehicles.eu/))

[2] *Bundesamt für Energie, Energieforschungsprogramme Brennstoffzellen und Wasserstoff für die Jahre 2008 bis 2011, Januar 2008* ([www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)).

[3] *Bundesamt für Energie, Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 bis 2011* ([www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)).

[4] *Clean Hydrogen In European Cities Project (CHIC)* ([chic-project.eu/](http://chic-project.eu/)).

## Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(\* IEA-Klassifikation)

### ● ACCELENT – ACCELERATED TESTING OF SOFC COMPONENTS R+D 5.2.1\*

Lead:	Hexis AG	Funding:	BFE / HyCo-ERA-NET
Contact:	Andreas Mai andreas.mai@hexis.com	Period:	2008–2011
Abstract:	Festoxid-Brennstoffzellen (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC) sind ein typischer Brennstoffzellen-Typus für stationäre Anwendungen. Als solche müssen sie Lebensdauern von 40.000 Std. und mehr erfüllen. In diesem Bereich ist es unmöglich, Prüfungen auf garantierte Lebensdauern im Labor durchzuführen. Stattdessen müssen Methoden gefunden werden, die Alterung der SOFC Komponenten so zu beeinflussen, dass ihre Haltbarkeit aus Tests mit ‚vernünftiger‘ Dauer abgeleitet werden kann.		

### ● ASSENT – ANODE SUB-SYSTEM DEVELOPMENT & OPTIMISATION FOR SOFC SYSTEMS R+D 5.2.1

Lead:	Htcearmix	Funding:	EU-JU FCH
Contact:	Olivier Bucheli olivier.bucheli@htceramix.ch	Period:	2010–2013
Abstract:	The high temperature fuel cell technologies have potential for high electrical efficiency, 45-60%, and total efficiency up to 95%. SOFC has the added benefit of offering commercial applications from 1 kW residential to several MW stationary units with high fuel flexibility. Whilst much effort is devoted to cell and stack issues, less attention has been paid to the components and sub-systems required for an operational system ( <a href="http://www.fch-ju.eu/sites/default/files/assent[1].pdf">www.fch-ju.eu/sites/default/files/assent[1].pdf</a> ).		

### ● ASTERIX3 – ASSESSMENT OF SOFC CHP SYSTEMS BUILD ON THE TECHNOLOGY OF HTCERAMIX 3 R+D 5.2.1

Lead:	Htcearmix	Funding:	EU-FP7
Contact:	Olivier Bucheli olivier.bucheli@htceramix.ch	Period:	2011–2012
Abstract:	The objective of the collaboration was to evaluate Htceramix's SOFC technology in perspective of development of a residential micro-CHP application with a strong and well defined market focus. The project has achieved its goals in providing a serious evaluation of the feasibility of fuel cell based micro CHP. The viability of the technology has been validated and a proof of concept, for most aspects of the system, has been developed and tested.		

### ● AUTOSTACK – AUTOMOTIVE FUEL CELL STACK CLUSTER INITIATIVE FOR EUROPE R+D 5.2.2

Lead:	PSI / Belenos	Funding:	EU-JU FCH
Contact:	Felix Büchi felix.buechi@psi.ch	Period:	2010–2011
Abstract:	The project aims to develop approaches to address the critical barriers for substantial improvement of collaboration between major stakeholders and establishing a solid business model for an independent European stack integrator for automotive applications. In the work proposed, key European players including automotive OEMs, component suppliers, and research organizations are involved to provide a structured approach to establish fuel cells as a mass product ready for market.		

### ● BACWIRE – BACTERIAL WIRING FOR ENERGY CONVERSION AND REMEDIATION R+D 5.2.3

Lead:	Uni Bern	Funding:	EU-FP7
Contact:	Thomas Wandlowski thomas.wandlowski@dcb.unibe.ch	Period:	2009–2012
Abstract:	The aim of the project is to develop a new paradigm for the simultaneous cogeneration of energy and bioremediation using electro-active bacteria. A new nano-structured transducer that efficiently connects to these bacteria will be developed, aiming to the production of devices with superior performance across a range of applications including microbial fuel cells, whole cell biosensors and bioreactors.		

### ● CHIC – CLEAN HYDROGEN IN EUROPEAN CITIES P+D 5.2.2

Lead:	Postauto AG	Funding:	EU-JU FCH
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.		

### ● DEMMEA – UNDERSTANDING THE DEGRADATION MECHANISMS OF MEA FOR HIGH TEMPERATURE PEMFCS R+D 5.2.2

Lead:	PSI / Belenos	Funding:	EU-JU FCH
Contact:	Felix Büchi felix.buechi@psi.ch	Period:	2010–2012
Abstract:	The state of the art high temperature PEM fuel cell technology is based on H3PO4 imbedded polymer electrolytes. The most challenging areas towards the optimization of this technology are: (i) the development of stable long lasting polymer structures with high ionic conductivity and (ii) the design and development of catalytic layers with novel structures and architectures aiming to more active and stable electrochemical interfaces with minimal Pt corrosion.		

- **DEVELOPMENT OF A 25 KW HYDROGEN/OXYGEN FUEL CELL SYSTEM** R+D 5.2.2
- |          |   |          |           |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead:    | PSI Paul Scherrer Institut  | Funding: | KTI       |
| Contact: | Dietrich Philipp <a href="mailto:philipp.dietrich@psi.ch">philipp.dietrich@psi.ch</a> | Period:  | 2009–2011 |
- Abstract: To achieve a competitive component for a fuel cell (FC) driven powertrain for a passenger car the FC-system has to meet several goals, which shall be addressed in the BELENOS CLEAN POWER -Fuel Cell project. The degradation of the FC-system shall be reduced by optimal stack design and a specific operation strategy for a H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> FC. The cost issue will be addressed by improving production processes of the components, integration of system components and the development of the concept of an industrial assembly process.
- **FITUP – FUEL CELL FIELD TEST DEMONSTRATION FOR PORTABLE GENERATORS, BACKUP AND UPS POWER SYSTEM APPLICATIONS** P+D 5.2.3
- |          |   |          |                 |
|----------|---|----------|-----------------|
| Lead:    | HTA Luzern  | Funding: | EU-JU FCH / BFE |
| Contact: | Ulrike Trachte <a href="mailto:ulrike.trachte@hslu.ch">ulrike.trachte@hslu.ch</a> | Period:  | 2010–2013       |
- Abstract: A total of 19 market-ready fuel cell systems from 2 suppliers (ElectroPS, FutureE) will be installed as UPS/ backup power sources in selected sites across the EU. Real-world customers from the telecommunications and hotel industry will utilize these fuel cell-based systems, with power levels in the 1-10kW range, in their sites. These units will demonstrate a level of technical performance (start-up time, reliability, durability, number of cycles) that qualifies them for market entry.
- **GAS-ANALYSE IN POLYMERELEKTROLYT-BRENNSTOFFZELLEN** R+D 5.2.2
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | PSI Paul Scherrer Institut   | Funding: | BFE       |
| Contact: | Felix Büchi <a href="mailto:felix.buechi@psi.ch">felix.buechi@psi.ch</a> | Period:  | 2007–2012 |
- Abstract: Transportprozesse spielen in Brennstoffzellen einerseits für die Optimierung von Leistung und Wirkungsgrad andererseits für die Lebensdauer und Degradation eine entscheidende Rolle. Reaktanden und teilweise das Reaktionsprodukt Wasser sind gasförmig. Lokale Gasanalyse in der Zelle während des Betriebes ist daher ein wichtiges und interessantes Werkzeug zum Verständnis dieser Prozesse. Die Methode mit Tracergasen und in-situ Analytik ist neu und einzigartig.
- **GO.PEF-CH – ENHANCING PEFC DURABILITY AND RELIABILITY UNDER APPLICATION-RELEVANT CONDITIONS** R+D 5.2.2
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | PSI Paul Scherrer Institut   | Funding: | BFE       |
| Contact: | Lorenz Gubler <a href="mailto:lorenz.gubler@psi.ch">lorenz.gubler@psi.ch</a> | Period:  | 2007–2011 |
- Abstract: Understanding of mass transport limitations in PEFC is of prime importance for optimizing performance and for better understanding of degradation. The anisotropic, porous gas diffusion structures (GDL) play an important role in the transport between channel and catalyst. Under condensing conditions (the general case), liquid water will occupy part of the void in the porous structure and thus change the properties of the pore network for gas transport.
- **HY.MUVE – HYDROGEN DRIVEN MUNICIPAL VEHICLE** P+D 5.2.2
- |          |   |          |                 |
|----------|---|----------|-----------------|
| Lead:    | EMPA  | Funding: | CCEM / BFE u.a. |
| Contact: | Christian Bach <a href="mailto:christian.bach@empa.ch">christian.bach@empa.ch</a> | Period:  | 2009–2012       |
- Abstract: Bei der Einführung der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie auf dem Markt spielen geeignete Nischenanwendungen als Wegbereiter eine wichtige Rolle. Im diesem Projekt wird ein praxi tauglicher Brennstoffzellenantrieb für ein Kommunalfahrzeug entwickelt, mit dem der energetische Verbrauch gegenüber heutigen, dieselmotorisch betriebenen Antrieben halbiert werden kann. ([www.empa.ch/hy.muve](http://www.empa.ch/hy.muve)).
- **IHPOS-E – BRENNSTOFFZELLEN-MINIBAR** P+D 5.2.2
- |          |   |          |           |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead:    | CEKAtec AG  | Funding: | BFE       |
| Contact: | Marco Santis <a href="mailto:Marco.Santis@ceka.ch">Marco.Santis@ceka.ch</a> | Period:  | 2010–2012 |
- Abstract: Das Projekt sieht die Einführung von einer Kleinserie innovativer Brennstoffzellensystemen (BZ-System) inklusive Wasserstofflogistik (Speicherung, Befüllung, Lieferung) für die Firma elvetino (Catering Firma der SBB) vor. Dabei soll das BZ-System die heute von elvetino eingesetzten Li-Ionen Batterien ersetzen. Motivation ist die Möglichkeit durch den Einsatz von einem BZ-System über praktisch unbegrenzte elektrische Energie zu verfügen und somit die Limitierung der Batterie bzw. dessen lange Aufladezeiten zu eliminieren.
- **IHPOS-E – MODULARES BRENNSTOFFZELLENSYSTEM** R+D 5.2.2
- |          |   |          |           |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead:    | Berner Fachhochschule   | Funding: | KTI       |
| Contact: | Michael Höckel <a href="mailto:Michael.Hoeckel@bfh.ch">Michael.Hoeckel@bfh.ch</a> | Period:  | 2009–2011 |
- Abstract: Im Rahmen des Projektes IHPOS-E wird ein modular aufgebautes und gesteuertes PEM-Brennstoffzellensystem entwickelt. Bedingt durch die Systemmodularität kann ein sehr breiter Leistungs- und Anwendungsbereich gedeckt werden (200W - 5kW), was den Einsatz und Vertrieb ähnlicher IHPOS-E Systeme in verschiedensten spezifischen Anwendungen ermöglicht. Im Rahmen des Projektes wird ein Systemtyp bis zur Produktreife entwickelt.

● **LOTUS – LOW TEMPERATURE SOLID OXIDE FUEL CELLS FOR MICRO-CHP APPLICATIONS** R+D 5.2.1

Lead: Htcearmix / SOFCPower Funding: EU-JU FCH

Contact: Olivier Bucheli olivier.bucheli@htceramix.ch Period: 2009–2012

Abstract: The objective of the LOTUS project is to build and test a Low Temperature SOFC system prototype based on new SOFC technology combined with low cost, mass-produced, proven components. The use of a modular concept and design practices from the heating appliances industry will reduce maintenance and repair downtime and costs of the system.

● **MCFC-BRENNSTOFFZELLEN-PILOTANLAGE GRÜNAU.** P+D 5.2.1

Lead: EWZ Funding: EWZ, Erdgas Zürich

Contact: Mevina Feuerstein Mevina.Feuerstein@ewz.ch Period: 2010–2022

Abstract: Die Schmelzkaronat-Brennstoffzellen-Anlage (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC) in der Heizzentrale der Überbauungsgemeinschaft Grünau soll aufzeigen, wie sie sich in einem realen Wärme-, Strom- und Erdgasnetz längerfristig bewährt. Zudem soll die Pilotanlage aufzeigen, wie sich die Brennstoffzelle im Dauerbetrieb verhält und wie sich die Betriebskosten entwickeln. Der elektrische Jahresnutzungsgrad liegt bei ca. 42% und der gesamte Jahresnutzungsgrad ca. 80 %.

● **MECHANISMEN DER CHEMISCHEN STABILISIERUNG IN STRAHLENGEPFROPFTEN BRENNSTOFFZELLEN-MEMBRANEN** R+D 5.2.2

Lead: PSI Paul Scherrer Institut Funding: BFE

Contact: Lorenz Gubler lorenz.gubler@psi.ch Period: 2007–2012

Abstract: Die Zielsetzung der Arbeit ist, Membran-Degradationsmechanismen zu ermitteln und zu bestimmen, wie die Schädigungsrate von Betriebsbedingungen und Membran-zusammensetzung abhängt. Diese Quantifizierung der Degradationsprozesse erlaubt es, beschleunigte Alterungsversuche an Membranen durchzuführen und damit den Proben-durchsatz deutlich zu erhöhen. Damit werden die Innovationszyklen signifikant kürzer.

● **MINIATURIZED RECIPROCATING PUMPS FOR BIOMEDICAL AND FUEL CELL APPLICATIONS** R+D 5.2.3

Lead: EPFL-LMIS2 Funding: KTI

Contact: Gijs Martin martin.gijs@epfl.ch Period: 2009–2011

Abstract: We propose a micropump that is actuated by a set of arc-shaped permanent magnets, mounted in a 3-phase arrangement on the axis of a DC minimotor. This pump is addressed by the low voltage of a direct methanol fuel cell and its role is to avoid fuel-oxidant depletion effects near the fuel cell's electrodes. Pump and fuel cell together will form an integrated system for sustainable miniaturized power generation.

● **MODELING OF ENERGY CONVERSION PROCESSES AT THE MICROSCALE** R+D 5.2.1

Lead: PSI Paul Scherrer Institut Funding: BFE

Contact: Ioannis Mantzaras ioannis.mantzaras@psi.ch Period: 2009–2012

Abstract: The aim of the project is to develop an advanced numerical tool capable of modeling key microscale processes occurring in both thermochemical and electrochemical conversion systems. A particular objective is to apply this model in a Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEMC) and compare the predictions with measurements of permeabilities and diffusivities inside the gas diffusion layer (GDL).

● **POLYMER-ELECTROLYTE FUEL CELLS AND FUEL CELL SYSTEMS** R+D 5.2.2

Lead: PSI-Electrochemistry Laboratory Funding: diverse

Contact: Günther Scherrer guenther.scherer@psi.ch Period: 2011

Abstract: Kompetenzzentrum für PEFC-Brennstoffzellen und -Brennstoffzellensysteme. Diverse Industrieprojekte (<http://ecl.web.psi.ch/>).

● **REMOBILISIERUNG VON PHOSPHAT AUS AUSGEFALTEN KLÄRSCHLAMM MIT HILFE EINER MIKROBIELLEN BRENNSTOFFZELLE** R+D 5.2.3

Lead: Haute école valaisanne (HEVs) Funding: BFE

Contact: Fabian Fischer Fabian.Fischer@hevs.ch Period: 2008–2011

Abstract: Die Mobilisierung von Phosphat aus ausgefalten Klärschlamm mit einer mikrobiellen Brennstoffzelle bietet ganz besondere Vorteile. Man nutzt einerseits die Energie, welche auf der Kläranlage bereits in Form mikrobieller Aktivität vorhanden ist, und die Mikroben liefern Elektronen und Protonen, wie diese für die Reduktion von Fe<sup>3+</sup>+PO<sub>4</sub> und den Ersatz von Fe-Kationen gebraucht werden. Daneben fällt der wertvolle Phosphatdünger an, welcher somit dosiert in den Kulturen angewendet werden kann.

- ROBANODE – UNDERSTANDING AND MINIMIZING ANODE DEGRADATION IN HYDROGEN AND NATURAL GAS FUELLED SOFCs**

R+D 5.2.1

Lead:	EPFL	Funding:	EU-JU FCH
Contact:	Jan van Herle jan.vanherle@epfl.ch	Period:	2010–2012

Abstract: The proposed project offers an effective methodology for a holistic approach of the SOFC anode degradation problem, through detailed investigation of the degradation mechanisms under various operating conditions and the prediction of the anode performance, degradation and lifetime on the basis of a robust mathematical model, which takes into account all underlying phenomena.
- ROBUST MICROTUBULAR SOLID OXIDE FUEL CELL DESIGN BY CHEAP PROCESSING AND USING A NEW MATERIAL**

R+D 5.2.1

Lead:	EPFL-LENI	Funding:	BFE
Contact:	Jan van Herle jan.vanherle@epfl.ch	Period:	2009–2011

Abstract: The goal of this project is to fabricate and test small tubular solid oxide fuel cells (SOFC) that are cathode-supported on a new, promising cathode material for intermediate temperature operation. Porous cathode tubes of neodymium nickelate, were prepared by cold-isostatic pressing (CIP), extrusion and slip-casting by collaborating institutes and industrial partners in this project. The nickelate powder was commercially obtained from Marion Technologies, France.
- RÖNTGEN-MIKRO-TOMOGRAPHIE UND RADIOGRAPHIE**

R+D 5.2.2

Lead:	PSI Paul Scherrer Institut	Funding:	BFE
Contact:	Felix Büchi felix.buechi@psi.ch	Period:	2008–2012

Abstract: Transportprozesse gehören zu den wichtigsten Parametern für die Optimierung von Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen. Kondensiertes Wasser beeinflusst die Transporteigenschaften der Reaktanten in der mikroporösen Gasdiffusionsschicht. Das Verständnis dieser Transport-Limitationen und deren Änderungen mit der Betriebsdauer (Alterung) ist dabei zentral für die Leistungsoptimierung.
- SAFEDRIVE – A PLATFORM POWER MANAGEMENT SYSTEM AND LOW VOLTAGE DRIVE TRAIN FOR HYBRID AND ELECTRIC VEHICLES**

R+D 5.2.2

Lead:	e.mobil	Funding:	EU-FP7
Contact:	Susanne Wegmann swegmann@e-mobile.ch	Period:	2010–2013

Abstract: The European hybrid, electric and fuel cell vehicle industry represents 1,600 SME manufacturers and suppliers. They commercialise small volumes of low-emission vehicles, including taxis, delivery vans, factory vehicles and domestic cars. However with current technologies their market is limited and their development has been split between low-cost mass market and expensive high-performance vehicles. These vehicles do not meet customer performance demands, at a price point which is competitive with IC engines.
- S-CHAIN FUNDAMENTALS (SCF)**

R+D 5.2.2

Lead:	PSI Paul Scherrer Institut	Funding:	BFE / Belenos
Contact:	Felix Büchi felix.buechi@psi.ch	Period:	2010–2013

Abstract: The main project goals are to understand and improve the operation of the polymer electrolyte fuel cells (PEFC) of Belenos by means of numerical simulations and to develop a simulation program tailored to describe the complex S\_Chain design and to understand and improve the sub-zero operation by experimental investigation and by modeling of the sub-zero start and operation for H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> operation.
- SCOTAS – SULPHUR, CARBON, AND RE-OXIDATION TOLERANT ANODES AND ANODE SUPPORTS FOR SOFC**

R+D 5.2.1

Lead:	Hexis AG	Funding:	EU-JU FCH
Contact:	Andreas Mai www.scotas-sofc.eu	Period:	2008–2011

Abstract: The project will demonstrate a new full ceramic SOFC cell with superior robustness as regards to sulphur tolerance, carbon deposition (coking) and re-oxidation (redox resistance). Such a cell mitigates three major failure mechanisms which today have to be addressed at the system level. Having a more robust cell will thus enable the system to be simplified, something of particular importance for small systems, e.g. for combined heat and power (CHP).
- SOF-CH ASE — INCREASED EFFICIENCY AND RELIABILITY OF SOFC SYSTEM USING ANODE-SUPPORTED-ELECTROLYTE TECHNOLOGY**

R+D 5.2.1

Lead:	Hexis AG	Funding:	BFE / SER
Contact:	Andreas Mai andreas.mai@hexis.com	Period:	2008–2011

Abstract: Solid oxide fuel cells (SOFC), based on ceramics as central components, stand out with the highest potential for electrical efficiency, longevity and manageable cost, owing to thermal process integration, wide fuel flexibility, and absence of corrosive liquids and noble metals. This project addresses the three crucial features of electrical efficiency, durability and reliability of operation.

- **SOF-CH ESC — ELECTROLYT SUPPORTED SOLID OXID FUEL CELLS FOR SMALL COMBINED HEAT AND POWER PLANTS** R+D 5.2.1

Lead: HTceramix SA	Funding: BFE / SER
Contact: Olivier Bucheli <a href="mailto:olivier.bucheli@htceramix.ch">olivier.bucheli@htceramix.ch</a>	Period: 2011

Abstract: It is the main target of the project to develop new solutions which lead to a significant extension of the stack lifetimes, based on new and established know-how. In addition the planned project will also include characterisation and modelling activities for reliable lifetime predictions.
- **SOFC-LIFE – INTEGRATING DEGRADATION EFFECTS INTO LIFETIME PREDICTION MODELS** R+D 5.2.1

Lead: EMPA / EPFL u.a.	Funding: EU-JU FCH
Contact: Jan van Herle <a href="mailto:r.steinberger@fz-juelich.de">r.steinberger@fz-juelich.de</a>	Period: 2011–2013

Abstract: Long-term stable operation of Solid Oxide Fuel Cells (SOFC) is a basic requirement for introducing this technology to the stationary power market. Degradation phenomena limiting the lifetime can be divided into continuous (baseline) and incidental (transient) effects. This project is concerned with understanding the details of the major SOFC continuous degradation effects.
- **SOFCOM- SOFC CCHP WITH POLY-FUEL: OPERATION AND MANAGEMENT** P+D 5.2.1

Lead: EPFL	Funding: EU-JU FCH
Contact: Jan van Herle <a href="mailto:jan.vanherle@epfl.ch">jan.vanherle@epfl.ch</a>	Period: 2011–2014

Abstract: The proposal is an applied research project devoted to demonstrate the technical feasibility, the efficiency and environmental advantages of CCHP (a three product plant based on cogeneration of cooling, heat and power) based on SOFC (solid oxide fuel cell technology) fed by different typologies of biogenous primary fuels (biogas and bio-syngas, locally produced), also integrated by a process for the CO<sub>2</sub> separation from the exhaust gases.
- **REFORCELL - ADVANCED MULTI-FUEL REFORMER FOR CHP-FUEL CELL SYSTEMS** R+D 5.2.1

Lead: Quantis Sàrl	Funding: EU-JU FCH
Contact: Patricia Girardbille <a href="mailto:info@quantis-intl.com">info@quantis-intl.com</a>	Period: 2011–2014

Abstract: Distributed power generation via Micro Combined Heat and Power (m-CHP) systems, has been proven to overcome disadvantages of centralized plant since it can give savings in terms of Primary Energy consumption and energy costs. The main advantage is that m-CHP systems are able to recover and use the heat that in centralized systems is often lost. Wide exploitation of these systems is still hindered by high costs and low reliability due to the complexity of the system.
- **DESIGN - DEGRADATION SIGNATURES IDENTIFICATION FOR STACK OPERATION DIAGNOSTICS** R+D 5.2.1

Lead: EPFL	Funding: EU-JU FCH
Contact: Jan van Herle <a href="mailto:jan.vanherle@epfl.ch">jan.vanherle@epfl.ch</a>	Period: 2011–2014

Abstract: DESIGN addresses the detection of slow and hidden phenomena that nevertheless have strong and detrimental long-term effects on the performance and durability of the SOFC stack. The project proposes to study the influence of slowly-damaging conditions on measures performed on the stack sub-components: the Cells and the Single Repeating Units (SRU) and on small stacks. Identification of characteristic signatures of these degradation phenomena at the lower level will be subsequently transposed at the stack level.
- **GENIUS - GENERIC DIAGNOSIS INSTRUMENT FOR SOFC SYSTEMS** R+D 5.2.1

Lead: HTceramix SA	Funding: EU-JU FCH
Contact: Olivier Bucheli <a href="mailto:olivier.bucheli@htceramix.ch">olivier.bucheli@htceramix.ch</a>	Period: 2011–2014

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 appropriate counter measure, to ensure the required reliability level. The GENIUS project aims to develop a "GENERIC" tool that would only use process values (normal measurements and system control input parameters) and that would be based on a validated diagnostic algorithm.
- **PEMICAN - PEM WITH INNOVATIVE LOW COST CORE FOR AUTOMOTIVE APPLICATION** R+D 5.2.2

Lead: Timcal SA	Funding: EU-JU FCH
Contact: Ivan Iri <a href="mailto:info@ch.timcal.com">info@ch.timcal.com</a>	Period: 2011–2014

Abstract: Up to now, a lot of work has been performed on the catalyst of the active layers (AL) of PEMFC but much less on the structure of the AL and on the two other major components (carbon and electrolyte) whereas they do have a major impact on the performance of PEMFC and on Pt utilization. Based on this analysis, PEMICAN proposes to reduce the Pt cost for automotive application down to 0.15 gram of Pt per kW.

- **NEXTHYLIGHTS - SUPPORTING ACTION TO PREPARE LARGE-SCALE HYDROGEN VEHICLE DEMONSTRATION IN EUROPE** P+D 5.2.2
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | Bucher-Guyer AG                          | Funding: | EU-JU FCH |
| Contact: | Alex Koch<br>coordinator@nexthylights.eu | Period:  | 2010–2011 |
- Abstract: NextHyLights is a Supporting Action of the Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) to prepare large-scale hydrogen vehicle demonstration in Europe. In parallel to already existing demonstration projects (Lighthouse Projects) NextHyLights is assisting the FCH JU to prepare the next consequent step, the planning and preparation of further large-scale demonstration projects for next-generation hydrogen vehicle fleets at additional demo sites across Europe.
- **FCPOWEREDRBS - DEMONSTRATION PROJECT FOR POWER SUPPLY TO TELECOM STATIONS THROUGH FC TECHNOLOGY** P+D 5.2.2
- |          |   |          |           |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead:    | MES SA                                    | Funding: | EU-JU FCH |
| Contact: | Gianmario Picciotti<br>g.picciotti@mes.ch | Period:  | 2011–2014 |
- Abstract: Fuel cells may represent a real alternative to standard power sources (batteries and diesel generators) for off-grid Telecom applications and the project aims to prove their advantages to potential customers in different industrial sectors. Therefore, the FCpoweredRBS Project solution will demonstrate the advantage of a Cells power generation solution substituting standard Diesel generators with a PEM Fuel Cell generator.
- **MOBYPOST - MOBILITY WITH HYDROGEN FOR POSTAL DELIVERY** P+D 5.2.2
- |          |   |          |           |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead:    | MES SA                                    | Funding: | EU-JU FCH |
| Contact: | Gianmario Picciotti<br>g.picciotti@mes.ch | Period:  | 2011–2014 |
- Abstract: Mobypost will develop the concept of electric vehicles powered by fuel cells using hydrogen produced locally by renewable energy means: solar panels installed on the roofs of the buildings. Mobypost will implement low pressure storage solutions for hydrogen over two fleets of five vehicles on two different sites for postal mail delivery.
- **TEMONAS - TECHNOLOGY MONITORING AND ASSESSMENT** R+D 5.2.2
- |          |                                   |          |           |
|----------|-----------------------------------|----------|-----------|
| Lead:    | European Fuel Cell Forum          | Funding: | EU-JU FCH |
| Contact: | Michael Spirig<br>info@temonas.eu | Period:  | 2011–2013 |
- Abstract: The objective of the TEMONAS Project is to provide a functional and integrated TMA tool specifically tailored for the needs of research program progress evaluation. TEMONAS will take the various existing technology monitoring and assessment methodologies a step further in providing a transparent system that allows a targeted comparison and evaluation of project results and technology achievements with a high degree of objectivity.
- **F-CITY H2 (ENERGY PACK)** R+D 5.2.2
- |          |   |          |                |
|----------|---|----------|----------------|
| Lead:    | Michelin Research and Innovation Center         | Funding: | Michelin / FAM |
| Contact: | Pierre Varenne<br>Pierre.varenne@cd-michelin.ch | Period:  | 2010–2014      |
- Abstract: The F-City H2 is the outcome of a partnership between the Michelin, the automotive producer FAM Automobiles, EVE Systems, FC LAB and the Institut Pierre Vernier. The F-City H2 is currently in the process of homologation in the Swiss canton of Fribourg and the first models could be on sale by 2014. The fuel cell energy pack weighs 120 kg, which is half the weight of the pack in the original F-City prototype. With a range of 150 km the F-City H2 refuels its hydrogen tank in a matter of minutes.
- **IEA ADVANCED FUEL CELL IMPLEMENTING AGREEMENT - ANNEX FUEL CELLS FOR STATIONNARY APPLICATIONS: MARKET OULOOK FOR STANTIONNARY FUEL CELLS (LEAD)** R+D 5.2.1
- |          |   |          |           |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead:    | Beratung Thoma & Renz                   | Funding: | BFE       |
| Contact: | Stephan Renz<br>renz.btr@swissonline.ch | Period:  | 2006–2013 |
- Abstract: Im Rahmen des Task Stationäre Anwendung von Brennstoffzellen sollen vorrangig die folgenden Inhalte erarbeitet werden: Analyse der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für den Einsatz von stationären Brennstoffzellen, Identifizierung von Nischenmärkten und von Marktapplikationen für die möglichst breite Anwendung bzw. Markteinführung von stationären Brennstoffzellen sowie Analyse der Chancen und Barrieren für die Marktimplementierung von Brennstoffzellen.
- **IEA ADVANCED FUEL CELL IMPLEMENTING AGREEMENT (IEA-AFC)** R+D 5.2
- |          |   |          |      |
|----------|---|----------|------|
| Lead:    | BFE   | Funding: | BFE  |
| Contact: | Stefan Oberholzer<br>stefan.oberholzer@bfe.admin.ch | Period:  | 2011 |
- Abstract: The aim of the IEA Advanced Fuel Cells programme is to advance the state of understanding of all Contracting Parties in the field of advanced fuel cells. It achieves this through a co-ordinated programme of research, technology development and system analysis on Molten Carbonate (MCF), Solid Oxide (SOFC) and Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEFC) systems. There is a strong emphasis on information exchange through Task meetings, workshops and reports.



Michael Spirig

# Industrielle Prozesse



## **Titelbild:**

### **Zeolith für künftige industrielle Energie-Anwendungen.**

Zeolith hat ein hohes Adsorptionsvermögen für gelöste Stoffe. Bei der Adsorption von Wasser entsteht viel Adsorptionswärme, was interessante Optionen als Wärmespeicher ergibt. Das Adsorptionsvermögen macht Zeolithe in Form eines Molekularsiebs zur Trennung von Azeotropen auch zu einer Alternative (PSA) gegenüber den üblichen Membrantrennverfahren (PPA). Die ZHAW vergleicht im Projekt «Entwässerung von Bioethanol für die Zugabe in Benzin» diese Verfahren mittels gleich dimensionierten Pilotanlagen (Quelle: ZHAW).

PPA = Pervaporations-Pilotanlage (links), welche mit Folex AG, CM-Membranes, Seewen gebaut wurde und betrieben wird (Membranfläche 1,2–2,7 m<sup>2</sup>, Feedfluss 200 kg/h, Zulaftank 200 l, Permeattank 100 l, Vakuum Permeatseite: < 20 mbar)

PSA = Pressure Swing Adsorption Pilotanlage (rechts), welche mit Zeochem AG gebaut wurde. Gezeigt sind die Adsorptionskolonnen, welche alternierend betrieben und regeneriert werden.

## **BFE Forschungsprogramm Industrielle Prozesse**

Überblicksbericht 2011

### **Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
CH-3003 Bern

### **Programmleiter BFE (Autor):**

Dr. Michael Spirig, Fomenta AG (m.spirig@fomenta.ch)

### **Bereichsleiter BFE:**

Martin Pulfer (martin.pulfer@bfe.admin.ch)

<http://www.bfe.admin.ch/forschungsverfahrenstechnik>

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

## Einleitung

Industrielle Prozesse benötigten 2010 18,8 % der Endenergie in der Schweiz. Dabei ist die Industrie der grösste Stromverbraucher. Von diesen 18,8 % Endenergie werden 55 % zur Erzeugung von Prozesswärme aus mehrheitlich fossilen Energieträgern eingesetzt. Das summierte Einsparpotenzial wird auf 30 bis 50 % geschätzt, was eine Energieverbrauchsverminderung für die Schweiz um 5 bis 8 % bedeuten würde.

Für die Herstellung von Produkten ist eine enorme Vielzahl von verfahrens- und fertigungstechnischen Prozessen im Einsatz. Entsprechend vielfältig und breit ist das dazugehörige Technologieportfolio und das spezifische Know-how. Ebenso vielfältig, spezifisch und auch neu ist das Wissen um den jeweiligen Energieverbrauch und das energetische Verbesserungspotenzial dieser Prozesse. Für eine industrielle Umsetzung von durchaus bekannten Massnahmen zum Energiesparen und zur Wärmerückgewinnung spielt die Entwicklung des Engineerings eine wichtige Rolle. Ein grosser Forschungs- und Klärungsbedarf besteht bei der Entwicklung, Verbesserung und energetischen Analyse von bestehenden und neuen Herstellverfahren. Dasselbe gilt auch für die Integration von erneuerbaren Energiequellen und neuen Speichertechnologien. Hierbei ist eine ganzheitliche Betrachtungsweise mit Methoden wie z. B. der Prozessintegration (PinCH) oder Lebenszyklusanalysen (LCA) wesentlich, speziell auch um effektive Investitionen, Amortisationszeiten und Risiken kalkulierbarer und damit deren Mehrwert sichtbar zu machen.

Dem entsprechend konnten im Jahre 2011 im Programm in den Bereichen «effiziente Verfahren» und «Methoden und Tools» wichtige Erweiterungen und Validierungen, sowie Fortschritte in Richtung Umsetzbarkeit erzielt werden. Die geplanten ETH-Spin-Off-Firmen wurden zwar aufgrund mangelnder Ressourcen bisher leider nicht gegründet. Dafür wurden aber die Informationen als open-source Software aufbereitet resp. als Downloadtool allgemein verfügbar gemacht ([www.ifu.ethz.ch/ESD/downloads/LCA4AFR](http://www.ifu.ethz.ch/ESD/downloads/LCA4AFR)). Dies ist bezüglich der Dissemination von Informationen und Resultaten, mit denen weltweit energetische Verbesserungen erreicht werden können, ein grosser Erfolg. Denn gerade im Bereich industrielle Prozesse manglt es in der Schweiz an effektiven Mechanismen zum Überwinden des sogenannten «Valley of Death» resp. am gezielten, nachhaltigen Wissens- und Technologietransfer von der Hochschule in die industrielle Nutzung. Es fehlt der Innovationsmechanismus, eine ganze Entwicklungsphase vom Grundlagenprojekt bis zum Pilot- und Demonstrationsprojekt (P&D), resp. bis zum Prototypen konsequent auf eine unternehmerische und damit langzeitige Resultatnutzung auszurichten. In diesem Sinne wäre es auch wichtig, dass die eher zu kleinen Toolentwicklungs-Gruppen, die an ähnlichen, längerfristig vernetzbaren Lösungen arbeiten, zu einer überkritischen, in internationalen Projekten führenden Einheit vernetzt würden.

Im Bereich «Integration erneuerbare Ressourcen und Abwärmenutzung» wurde eine Marktübersicht fertigge-

stellt und neue Projekte zur Wärmerückgewinnung eingegeben. Projekte zur Nutzung von erneuerbaren Ressourcen, d.h. im Speziellen zur Erzeugung von solarer Wärme zwischen 200–400 °C, laufen im Programm «industrielle Solarenergienutzung». Sehr aufschlussreiche Aussagen wurden im Bereich Abwärmenutzung mittels mobiler Zeolith-Speicher erreicht (siehe Projekt Highlights). Bei der Realisierung «effizienter Verfahren» wurde ein Projekt zum Vergleich von verschiedenen Verfahren zur Entwässerung von Bioethanol für die Zugabe in Benzin gestartet. Ebenso wurde ein P&D-Projektantrag mit einer mobilen Graströcknungsanlage zur Futtermittelherstellung ausgearbeitet.

Zur Ausweitung der Aktivitäten auf die Fertigungstechnik wurden mit entsprechenden Stakeholdern interessante, neue Lösungsoptionen eruiert. Realisationspotenzial, Umsetzungs- und Projektmöglichkeiten sind nun mit potenziellen Industriepartnern zu diskutieren. Insgesamt ist weiterhin eine gute Industriebeteiligung, inkl. Finanzierung in den Projekten vorhanden und widerspiegelt das industrielle Interesse am Thema sowie das Forschungspotenzial, welches es künftig intensiver zu bearbeiten gilt.

IEA Klassifikation: 1.1 Industry

Schweizer Klassifikation: 1.10 Verfahrenstechnische Prozesse

## Programmschwerpunkte

Die drei Haupt-Forschungsprioritäten sind:

- die Entwicklung und Anwendung von Methoden und (Entscheidungs-)Tools, wie z. B. Batch-Prozess-Energie-Modeling und Monitoring, Berechnung und Optimierung von Energie- und Massenflüssen in Prozessen unter Life-Cycle-Analysis-Aspekten (LCA);
- Integration von erneuerbaren Ressourcen, inkl. Reststoffverwertung und Abwärmenutzung bis hin zur Energieträgerproduktion wie z. B. Solarenergie, Hochdruckwärmepumpe, Wärmespeicherung, Reststoffreaktoren, Abwärmenutzungskonzepte, usw.;
- Realisierung effizienter Verfahren und Strategien inkl. P&D-Projekte, wie z. B. Substitutionsverfahren für die Trocknung und Trennung, schmutzresistente Wärmeübertrager, usw.

Bezüglich Kommunikation und Vernetzung werden folgende Ziele verfolgt:

- Ausbau der nationalen und internationalen Vernetzung, sowie Verbesserung der Wahrnehmung des Programmes inkl. Ausweitung der Forschungsschwerpunkte auf die Fertigungstechnik;
- Zielgruppengerechte Information zur Sensibilisierung und Motivation der Industrie sowie Erweiterung der Unterstützungsressourcen von heute ca. 3,7 Mio. CHF/a;
- Langfristig verstärkte Sensibilisierung für das Thema Energie der für die Industrie aktiven Forschergruppen mittels thematischer Ausbildung und Aufbau von überkritischen Gruppen, bis hin zur Initiierung von Kompetenzzentren und Plattformen.

### Rückblick und Bewertung 2011

Im Berichtsjahr unterstützte das BFE Programm direkt insgesamt drei Projekte aus dem ETH-Bereich (EHTZ) und zwei (weitere zwei sind geplant) der Fachhochschulen (FHNW, HSLU, HSR, ZHAW), sowie drei der Industrie (BMG Engineering, BSB + Partner AG, Zeochem AG, Folex AG).

Bei der «Methoden- und Tool-Entwicklung» konnten Erweiterungen und Validierungen, sowie wichtige Fortschritte in Richtung Umsetzbarkeit und Verfügbarkeit erzielt werden. Bei der Kommerzialisierung und dem Aufbau einer vernetzten, international führenden Gruppe mangelt es noch.

Im Bereich «Integration erneuerbare Ressourcen und Abwärmenutzung» wurde eine Marktübersicht abgeschlossen, ein Projekt zur Abwärmenutzung mittels stationärer Zeolith-Speicheranlage läuft und eines zur Wärmerückgewinnung ist eingegeben.

Für die Entwicklung «effizienter Verfahren» wurde ein Projekt zum Vergleich von verschiedenen Verfahren zur Entwässerung von Bioethanol erfolgreich gestartet, sowie ein P&D-Projektantrag mit einer mobilen Grastrocknungsanlage ausgearbeitet. Vielversprechende Arbeiten laufen zum Thema Zeolith: Zeolith als Wasser adsorbierendes Wärmespeichermedium, wie auch als Molekularsieb zur Entwässerung von Bioethanol. In der Fertigungstechnik wurden neue Lösungsoptionen eruiert. Diese sind nun für Umsetzungsprojekte mit der Industrie aufzubereiten. Für die weitere Bekanntmachung und Vernetzung des Programms wurde an relevanten Veranstaltungen Präsenz markiert. Ein eigener Anlass wie der Impulstag 2010 und die ExCo Teilnahme am IEA IETS Implementing Agreement sowie eine Mitgliedschaft in einem der passenden Tasks wurden aus Kostengründen nicht in Erwägung gezogen.

### Ausblick

Die Entwicklung und Akzeptanz von energetischen Verbesserungen in industriellen Prozessen erfordert professionelle, qualitativ hoch stehende Lösungen, welche neben dem spezifischen Know-how auch Kontinuität in der Forschung voraussetzen. Eine stetige Fortsetzung und, wo erforderlich, eine Stärkung der begonnen Aktivitäten bis hin zur kommerziellen Anwendung hat daher Priorität. Entsprechend sorgfältig sind neue Themen auszuwählen und allenfalls national und international zu koordinieren.

Der erfolgreichen Tool-Entwicklung im Bereich Energie-Monitoring, LCA-resp. Decision-Aid-Tool, welche ein hohes Umsetzungspotenzial haben, gilt daher auch im Jahr 2012 ein spezielles Augenmerk. Künftige Gesuche sollen aber vertieft Umsetzungspotenzial und -motivation des Konsortiums aufzeigen. Eine Ausschreibung für die Weiterentwicklung von Engineering-Tools, u.a. zur Auslegung und energetisch-ökonomischen Beurteilung von Technologien zur Abwärmenutzung, soll geprüft werden.

Im Bereich «effizienter neuer Verfahren» sollen die laufenden Projekte optimal unterstützt werden. Dies gilt auch für die «Integration erneuerbare Ressourcen und Abwärmenutzung» u.a. von heissen Industrieabgasen mittels schmutzresistenter Wärmetauscher.

In der Fertigungstechnik sollen die bestehenden Projektoptionen mit relevanten Stakeholdern diskutiert und entsprechende Projekte lanciert werden. Die Vernetzungs- und Kommunikationsaktivitäten werden kontinuierlich fortgesetzt.

## Highlights aus Forschung und Entwicklung

Im Jahr 2011 wurden wiederum bei den «Methoden und Tools» wichtige Fortschritte in Richtung Umsetzbarkeit gemacht. Die Entwicklung von Energiemonitoring- und Auslegungswerkzeugen, sowie sogenannten Decision-Aid-Tools ist hier Stärke und Chance für die Schweiz zugleich. Im Jahresbericht 2010 wurden der Bedarf an Engineering- und Decision-Aid-Tools und auch die in der Schweiz vorhandenen Entwicklungsrichtungen im Detail erläutert und summarisch in der Lebenszykluskarte der industriellen Produktion dargestellt. An dieser Stelle sei für zwei davon ein kurzes Up-date nachfolgend aufgeführt.

Bei den «effizienten neuen Verfahren» eröffnet Zeolith (siehe Kasten auf Seite 8) interessante Möglichkeiten für künftige, industrielle Energie-Anwendungen: Als Wärmespeichermedium, als Molekularsieb zur energiesparenden Trennung von Stoffen und modifiziert als Kohlenstoffdioxidspeicher. Für die ersten zwei Optionen gibt es aus von BFE unterstützten Projekten aufschlussreiche Resultate und weiter laufende Untersuchungen.

### Tool-Entwicklung

#### Energiemonitoring-Tool

Im Forschungsprojekt «Implementation of monitoring tool for targeting energy saving potential in batch chemical industry» hat das Institut für Chemie- und Bioingenieurwesen (ICB) der ETHZ ein «Energie-Monitoring-Tool»

(EMT) entwickelt, welches als Energiebedarfs-Prognose- und Optimierungsinstrument für verfahrenstechnische Mehrprodukte-Batchanlagen genutzt werden kann. Im vergangenen Jahr sind eine Reihe von Key Performance Indikatoren (KPIs) entwickelt, integriert und in einer Fallstudie validiert worden. Mit diesen ist es möglich, die Einsparpotentiale systematisch zu erfassen und darzustellen. Diese werden damit auf Anlagen-, Reaktor- resp. Produkt-Ebene realisierbar gemacht. Mit Hilfe des Tools wurden ca. 130'000 CHF jährliche Energiekosteneinsparungen realisiert, was Einsparungen von ca. 800 t CO<sub>2</sub> bedeutet. Zudem war das Tool auch fähig, systematisch Anlage-Produkt-Paarungen zu priorisieren, welche die viel versprechendsten Energieeinsparungen ermöglichen. Das EMT soll demnächst als open-source Software auf dem Internet veröffentlicht werden.

#### Decision-Aid-Tool

Am Institut für Umweltingenieurwissenschaften der ETH Zürich wird in einer fortlaufenden Projektserie ein «Decision-Aid-Tool» für Kommunen oder grössere Industriezonen entwickelt. Mit dem LCA-Tool konnte bisher die Entscheidungsfindung zur optimalen Verwertungsart von Abfällen in Regionen mit unterschiedlich ausgerüsteten Zementwerken unterstützt werden. Neu kommt nun noch das Modul für die Stahlindustrie dazu. Zur Validierung des Tools wurden konkrete Fallstudien ausgearbeitet, so dass nun

eine globale Anwendung angegangen werden kann. Es wurde auch ein Konzept zur Optimierung von regionalen Abfall- und Ressourcen-Managements vorgeschlagen und mit internationalen Experten diskutiert. Zur Dissemination des Tools wurde eine Download-Website aufgebaut, wo dieses als Shareware interessierten Kreisen verfügbar gemacht wird ([www.ifu.ethz.ch/ESD/downloads/LCA4AFR](http://www.ifu.ethz.ch/ESD/downloads/LCA4AFR) [1]).

### Zeolith als ad- und desorbierendes Wärmespeichermedium

Zeolithe sind kristalline Alumosilikate, die in zahlreichen Modifikationen in der Natur vorkommen, aber auch synthetisch hergestellt werden können. Mehr als 150 verschiedene Zeolithtypen sind synthetisiert worden, 48 natürlich vorkommende Zeolithe sind bekannt.

Die 1818 gegründete Firma Zeochem AG in Uetikon ZH mit Niederlassung in den USA stellt Zeolith in verschiedener Form, Grösse und Menge für verschiedene Verwendungen gross-industriell her (Figuren 1,2 und 3). Die Zeochem AG beteiligt sich aktiv an den Abklärungen zur Einsetzbarkeit von Zeolith für neue Energie-relevante Anwendungen.

Zwei spezielle Eigenschaften der Zeolithe sind bei technischen Anwendungen von grossem Nutzen:



Figur 1: Bei der Firma Zeochem AG aus Zeolith-Pulver im Granulierteller hergestellte Granulate.



Figur 2: Apparaturen für die Zeolith-Herstellung: Säureaustausch-System zur Modifizierung von Zeolithen (links), Synthesereaktor zur Herstellung der Zeolith-Kristalle (17 m<sup>3</sup>, oben mitte), Granulierteller zur Herstellung von runden Kugeln (rechts oben), Drehrohröfen zum Trocknen von Zeolithpulver (unten mitte), Filtrationssystem zum Filtrieren und Waschen der Zeolith-Kristallen (unten rechts).

1. Der hohe Ionenaustausch, welcher zum Beispiel für die Wasserenthärtung in Waschmitteln oder die Entfernung von Schwermetallen aus Abwässern ausgenutzt wird.

2. Das hohe Adsorptionsvermögen für Gase, Dämpfe und gelöste Stoffe mit bestimmten Molekülgrößen. Hierbei wird auch die grosse innere Oberfläche (600–700 m<sup>2</sup>/g) zum entscheidenden Vorteil. Diese Eigenschaften machen sie als Molekularsieb zur Trennung von Stoffen (siehe nächstes Kapitel) oder als starkes Trockenmittel interessant. Insbesondere bei der Adsorption von Wasser entsteht zudem viel Adsorptionswärme bei 130–300 °C, was als Folge interessante Optionen zur Energiespeicherung ergibt. Die Wärmekapazität beträgt bis 270 kWh/m<sup>3</sup>, in der Praxis lassen sich ca. 130 kWh/m<sup>3</sup> erreichen. Das spezifische Gewicht beträgt ca. 2'120 kg/m<sup>3</sup> und die spezifische, realisierbare Leistungsdichte ca. 80 W/kg. Zeolithe besitzen somit analog zu NiMH-Akkus eine hohe Energiedichte bei mässiger Leistungsdichte, dafür aber eine hohe Zeitverfügbarkeit (ca. 2–3 h).

Entscheidende Vorteile haben die Zeolithe aufgrund eines 20 bis 200 Mal besseren Preis-Leistungsverhältnis, einer hohen Zyklusstabilität (nach 3'500 Lade-Entladezyklen > 80 %), sowie einem guten Lade-Entlade-Wirkungsgrad (90 %, gesamte technische Systeme ca. 70 %)

Auf der Basis des hohen Adsorptionsvermögens, der anfallenden Adsorptionswärme und auch der Verdampfungsenthalpie beim Adsorbieren von Wasser, haben Zeolithe vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Bekannt sind u.a.: saisonale Speicherung solarer Wärme, Lastausgleich in Fernwärmenetzen, Luftentfeuchtung in Hallenbädern, energiesparendes Trocknen in Geschirrspülmaschinen, Kälte für Raumklimatisierung, Adsorptionswärmepumpen resp. Kurzzeit-Puffer für Solarwärme, selbstkühlendes Bierfass, Solarkühlschrank usw.

In der nachfolgend aufgeführten Projektgruppe «Abwärmenutzung mittels mobilen Zeolith-Akkumulatoren» und «Abwärmenutzung mittels stationärer Zeolith-Speicheranlage» steht die technisch-ökonomische Machbarkeit

und Planung von konkreten Umsetzungs-fällen im Vordergrund.

### Mobile Zeolith-Akkumulatoren

Im ersten Projekt «Abwärmenutzung mittels mobilen Zeolith-Akkumulatoren» wurde die Rentabilität von mobilen Zeolith-Akkumulatoren anhand einer Vollkostenbetrachtung der ganzen Nutzungskette (Abwärmeübertragung, Speicherung, Transport und Endnutzung) ermittelt. Neben den Kosten für den Aufbau und die eigentlichen Zeolith-Container werden die Kosten für Personal, Transport und LKWs mit einbezogen. Als potentielle Abwärmespenden werden das Stahlwerk Gerlafingen und die Kehrlichtverbrennungsanlage (KVA) Biel betrachtet. Die potenziellen Abnehmer sind Schwimmbäder, Treibhäuser, Nachtclubs, Sägereien mit Heiz-, Kühl- oder Trocknungsbedarf. Als Vergleichsdaten werden mehrere Studien der ZAE (Zentrum für angewandte Energienutzung) Bayern berücksichtigt.

Es konnte gezeigt werden, dass der Transport von Abwärme einer KVA

mittels Zeolith-Containern bis zu einer Entfernung von 30 km kostendeckend zu betreiben ist. Betriebswirtschaftlich sinnvoll ist bei heutigen Energiepreisen ein Transport bis zu einer Distanz von max. 20 km für Verbraucher mit hoher und konstanter Nachfrage (Papierhersteller, Lebensmittel, eingeschränkt Schwimmbäder) zur Substitution von Bandenergie. Dies ermöglicht eine optimale Nutzung der Container. Für eine rentable Anlage ist zudem eine optimale Aufladung des Zeolith-Akkumulators zentral. Hierzu braucht es einen trockenen und sauberen Energiestrom mit einer Temperatur von 230–270 °C zur Desorption des Zeoliths.

Der Vergleich zu handelsüblichen PCM-Containern (PCM = phase-change-material) fällt zugunsten der Zeolith-Technologie aus. So kann der Temperaturbereich sowohl beim Input (150–300 °C) als auch beim Output (80–250 °C) freier gewählt werden. Zudem sind die Gestehungskosten bei der Zeolith-Technologie um den Faktor zwei niedriger anzusetzen.

Im Vergleich zum Fernwärmenetz mit grossem Wärmetransportpotenzial (> 100 GWh/a) ergeben sich differenziertere Resultate. Der Break-Even zwischen den beiden Methoden ist stark vom energetischen Szenario abhängig (Jahresverlaufslinie, Standort KVA, topographische Gegebenheiten, Leistungsdichte, Wärmekosten, Verkaufspreis etc.). Im untersuchten Fall der KVA Biel ist der Transport der Energie ab einer Distanz von 3–4 km mittels Zeolith-Containern günstiger als mit einem Fernwärmenetz. Dabei stehen Investitionen mit 8,2 Mio Euro mit jährlichen Unterhalts- und Betriebskosten (interne Wärmekosten: 25 Euro/MWh) von knapp 2 Mio. Euro einem jährlichen Ertrag von 4,3–5,7 Mio. Euro bei einem Wärmepreis von 50 Euro/MWh gegenüber. Bei diesen Wärmekosten und -preisen können Zeolith-Container bis zu einer Distanz von 5 km rentabel genutzt werden. Die Berücksichtigung des Schweizerischen Klimarappenmodells würde dann die Rentabilität zusätzlich verbessern.

Somit könnte man die Zeolith-Container-Technologie als «den verlängerten, flexiblen Arm der Fernwärme» bezeichnen. Die hohen Freiheitsgrade



Figur 3: «Schwefelentfernung aus Erdgas mittels Zeolith»-Weltklasse-Anlage zur Entfernung von Merkaptanen aus Erdgas: Pro Bett (Turm) sind über 40 Tonnen Zeolith enthalten. Die ganze Anlage besteht aus zwei parallelen Strängen mit je 6 Betten.

für Energie-Contractors ermöglichen eine Optimierung der Abnehmerstruktur ohne Beschränkungen durch teure Verteilnetzinfrasturktur. Im Weiteren ist das unternehmerische Risiko (Investition, schwankende Energienachfrage) bei Zeolith-Containern im Vergleich zur Fernwärme deutlich geringer. Auch stellt die Lagerung von geladenen wie entladenen Zeolith-Containern energetisch kein Problem dar.

Durch die Nutzung von Abwärme wird CO<sub>2</sub> eingespart, vor allem durch den Ersatz von Heizöl und Erdgas. Dieser Effekt muss sich in einem Abnehmerbezogenen Preismodell widerspiegeln. Eine grosse CO<sub>2</sub>-Einsparung erfolgt vor allem auf kurzen Transportstrecken kleiner 5km. Mit zunehmender Transportdistanz nehmen die CO<sub>2</sub>-Einsparungen durch den Treibstoffverbrauch der LKWs rapide ab.

Dieses Projekt zeigt insgesamt, dass unter den beschriebenen Randbedingungen (Substitution von Bandenergie, trockener und sauberer Energiestrom mit 230–270 °C, 3–22 km) mobile Zeolith-Akkumulatoren bereits heute rentabel zur Nutzung von Abwärme und damit CO<sub>2</sub>-Einsparung eingesetzt werden können. Somit kann durchaus eine Win-Win-Situation für Umwelt/Klima, Wirtschaft als auch für den Ab-

wärmelieferanten und -verbraucher entstehen. Eine Erprobung der untersuchten Konzeption und Technologie im Rahmen des angedachten Pilotprojekts wäre ein möglicher nächster Schritt.

### Stationäre Zeolith-Speicheranlage

Im Projekt «Abwärmennutzung mittels stationärer Zeolith-Speicheranlage» wird überprüft, wie eine stationäre Zeolith-Anlage zur Speicherung thermischer Energie möglichst energieeffizient und rentabel betrieben werden könnte. Mit einem Folgeprojekt für das Holzkraftwerk der industriellen Werke Basel (IWB) wurde diese Untersuchung in die Wege geleitet. Folgendes soll dabei erarbeitet werden: Das Konzept von Lade-Entlademechanismen und -Zyklen; erforderliches Speichervolumen; Abhängigkeit von der Qualität (Verschmutzung, Verfügbarkeit) der Abwärmeluft (hohes Temperaturniveau von 150 °C); technisches und ökonomisches Potenzial. Falls das Potenzial vorhanden ist, werden verschiedene Umsetzungsvarianten auf ihre Realisierbarkeit und die Detail-Kosten geprüft und verglichen. Für die beste Variante soll ein Modellversuch entwickelt und unabhängig evaluiert werden.

## Pilot- und Demonstrationsprojekte

Neben oben beschriebener Anwendung von Zeolith als mobiler und stationärer Energiespeicher kann es aufgrund des hohen Adsorptionsvermögens auch als Molekularsieb eingesetzt werden. Damit wird die Trennung von durch Destillation nicht trennbaren Lösungsmittelgemischen möglich. Solche sogenannte Azeotrope wie z. B. Isopropanol-Wasser, Isopropanol-Toluol, Methanol-Toluol oder Ethanol-Wasser fallen in der stoffverarbeitenden Industrie häufig an und eine Trennung und Wiederverwendung ist meist ökologisch und ökonomisch sinnvoller als deren Verbrennung.

### Zeolith als Molekularsieb zur Entwässerung von Bioethanol

Der im Projekt «Entwässerung von Bioethanol für die Zugabe in Benzin» angestrebte exemplarische Vergleich von verschiedenen Verfahren zur Abtrennung des Bioethanols ist quasi ein doppeltes Energiethema. Zum einen weil die Herstellverfahren energetisch zu optimieren sind und zum anderen weil das Bioethanol selber zur Vermeidung des Einsatzes fossiler Brennstoffe und zur Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstosses dem Benzin bis zu einem Gehalt von 85% zugegeben wird (E85). In der Schweiz wurde die erste Tanksäule für E85 im Juli 2006 in Winterthur in Betrieb genommen ([www.e85-fahren.ch](http://www.e85-fahren.ch)). Damit Ethanol ohne Wasserabscheidung dem Benzin beigemischt werden kann, muss es aber wasserfrei sein. Hierzu werden heute vorwiegend

#### ZEOLITH

ist eine Mineralgruppe (Al-Silikate), die sich durch eine besonders poröse Mikrostruktur auszeichnet, was zu einer extrem grossen inneren Oberfläche führt (600–700 m<sup>2</sup>/g). Diese schwammartige Struktur der Zeolithminerale macht sie extrem wasseranziehend. Lagert sich Wasserdampf in ihren winzigen Poren ein (Sorptions), wird die Bindungsenergie freigesetzt und die Mikrokristalle erwärmen sich. Zum Laden des Speichers wird der Prozess umgekehrt. Die zugeführte Wärme lässt das gebundene Wasser wieder verdampfen (Desorption). Je trockener der Zeolith, desto mehr potentielle Energie ist darin gespeichert. Die besten Zeolithe können je nach Desorptionstemperatur bis zu 270 kWh Wärmeenergie pro Kubikmeter speichern – fast fünfmal so viel wie ein Warmwassertank. Das macht die mikroporösen Kügelchen zum idealen mobilen Wärmeträger – zumal das Laden und Entladen des grossen zeolithhaltigen Speichers (Container) denkbar einfach ist.

Membrantrennverfahren (Dampfpermeation, Pervaporation) oder «Pressure Swing Adsorption» (PSA) eingesetzt. Membrantrennverfahren sind zu einem Teil Konkurrenten zur PSA, zum anderen ergänzen sie sich.

Die ZHAW betreibt seit 2008 zusammen mit der Firma Folex AG, CM-Membranes, Seewen (ehem. Celfa AG) in ihrem Ex-Raum eine Pervaporations-Pilotanlage (PPA, Membranfläche 1,2–2,7m<sup>2</sup>, Feedfluss 200 kg/h, Zulufttank 200 l, siehe Titelbild links). Für einen optimalen Verfahrensvergleich wurde auch eine Pressure Swing Adsorption Pilotanlage (PSA, siehe Titelbild rechts) mit Unterstützung der Firma Zeochem AG gebaut. Die Funktionsweise der PSA ist wie folgt: Ethanol-Wasserdampf wird bei etwa 3 bar Druck in

die linke Kolonne geleitet. Das Molekularsieb (Zeolith) nimmt das Wasser auf und das entwässerte Ethanol verlässt die Kolonne. Wenn die linke Kolonne mit Wasser beladen ist, wird auf die rechte Kolonne geschaltet und der Druck in der rechten Kolonne auf 0,2 bar reduziert. 10–30 % des entwässerten Ethanols werden zur Regeneration des Molekularsiebes in die linke Kolonne geleitet. Mit der regenerierten linken Kolonne beginnt die Entwässerung wieder von vorne. Die damit erreichte Ethanolreinheit beträgt 99,9%. Ziel des Projektes sind der energetische und ökonomische Vergleich einerseits der Verfahren und andererseits der unterschiedlichen Molekularsiebe. Damit soll ein entsprechender Beitrag an die energetische Verbesserung von breit angewendeten industriellen Verfahren erreicht werden.

## Nationale Zusammenarbeit

Aufgrund der Vielfältigkeit und Inhomogenität der Themen bestehen sowohl in der Verfahrenstechnik als auch in der Fertigungstechnik kleinere projektspezifische Kollaborationen. Die Beteiligung und das Interesse der Industrie in den einzelnen Projekten sind gut. Die Gründe liegen in der Anwendungsnähe der Themen und den guten Kontakten der Forscher zur Industrie. Allerdings ist die Anzahl von Projekten und damit die Involvierung einer grösseren Anzahl industrieller Stakeholder noch ungenügend. Die Energie und die Verbesserungsmöglichkeiten sind in der industriellen Praxis insgesamt noch zu wenig thematisiert. Hier bedarf es einer verstärkten Kommunikation. Für eine energieeffiziente Forschergemeinschaft mit gemeinsamen «grossen» Themen für industrielle Prozesse bräuchte es mehr. Als Zwischenstufe ist der aktive Austausch mit den bestehenden Vereinigungen und Verbänden wie der Energieagentur der Wirtschaft (EnAW) und der Interessengemeinschaft Energieintensiver Branchen (IGEB) sehr wichtig. Aber auch in

anderen Branchenverbänden ist die Diskussion um die Nutzung und Bereitstellung unterschiedlichster Energie-Technologien anzuregen. Zudem ist die Entwicklung von energieoptimierten Verfahren gegebenenfalls zu unterstützen. Es wäre wünschenswert, wenn das Energiethema in der Industrie breit, systematisch und vernetzt angegangen würde. Zwar bestehen solche Bewegungen in der Schweiz, die auch Strategien und Konzepte erarbeiten. Was aber fehlt sind davon abgeleitete, priorisierte Umsetzungs- und Projektroadmaps. Diese würden es gestatten, die erforderlichen Forschungsthemen früh genug zu identifizieren, national abzugleichen und auch Ressourcen für langfristige Projekte zu allozieren. Für die nationale Zusammenarbeit ist auch der Austausch mit den Forschungsprogrammen Elektrizität, Industrielle Solarenergienutzung, Solarwärme, Energie in Gebäuden, WKK und Umgebungswärme verstärkt aufzubauen.

## Internationale Zusammenarbeit

Die in der Schweiz laufenden Aktivitäten sind branchenspezifisch und orientieren sich in erster Linie an den Bedürfnissen der inländischen Industrie. Bei gewissen Themen beteiligen sich jedoch auch international aktive Grossfirmen. So sind u. a. im Projekt «LCA4AFR» der ETHZ Voestalpine und der international operierende Konzern Holcim beteiligt. In einem anderen Projekt der ETHZ beteiligt sich BASF. International Beachtung finden vor allem die an der ETHZ und EPFL entwickelten Tools für das «Energy Monitoring» (EMT) zur Analyse und Planungen chemischer Mehrprodukte-Batchbetriebe und das Tool für die Abschätzung von Ökobilanzdaten für die Produktion von Chemikalien (Finechem). Das Finechem-Tool ist bereits heute international im Einsatz, was auch Ziel für die anderen Analysen- und Decision-Aid-Tools ist.

Vom BFE-Programm aus wurde der Kontakt mit dem Implementing Agreement der Internationalen Energie-Agentur (IEA) Industrial Energy-Related Technologies and Systems (IETS) aufgenommen. Hierzu wurden im Vorjahr die Exco-Meetings in Lausanne und Lissabon besucht

und die Schweizer Kompetenzen vorgestellt. Gegenseitige Interessen und Potenziale zur Projektzusammenarbeit konnten in den Annexes Industrial Heat Pumps, an welchem die Schweiz beteiligt ist, Process integration in the iron and steel industry, Process integration for SMEs, Biorefineries, LCA and tool development ausgemacht werden.

Das BFE reicht jeweils auf Basis von Umfragen bei der Europäischen Kommission die Land spezifischen, prioritären Themenvorschläge für die EU FP7 Calls ein. Eine direkte internationale Zusammenarbeit resp. eine vertiefte Klärung gemeinsamer Interessen mit der EU wurde noch nicht initiiert, da die aktuell verfügbaren Ressourcen entsprechende Aktivitäten kaum breit genug ermöglichen würden. Eine zunehmende Beteiligung an den Ausschreibungen des 7. und bald 8. Forschungsrahmenprogramms z. B. in spezifischen Materialtechnologien, Anwendungen mit erneuerbaren Energie etc. ist nach wie vor anzustreben.

## Referenzen

[1] [www.ifu.ethz.ch/ESD/downloads/LCA4AFR](http://www.ifu.ethz.ch/ESD/downloads/LCA4AFR)

## Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(\* IEA-Klassifikation)

- ABWÄRMENUTZUNG MITTELS MOBILEN UND STATIONÄREN ZEOLITH-WÄRMESPEICHERN**

Lead: BSB + Partner	Funding: BFE
Contact: Kohli Alexander Alexander.Kohli@bsb-partner.ch	Period: 2009–2012

Abstract: In einer Machbarkeitsstudie wird die Rentabilität der neuen Zeolith-Akku-Abwärmennutzungstechnologie analysiert. Dabei wird eine Vollkostenbetrachtung der ganzen Nutzungskette an klar definierten Beispielen unter Einbezug der beteiligten Industriepartner gezeigt.

R+D 1.1\*
- IMPLEMENTATION OF MONITORING TOOL FOR TARGETING ENERGY SAVING POTENTIAL IN BATCH CHEMICAL INDUSTRIES**

Lead: ETH Zürich	Funding: BFE
Contact: Hungerbühler Konrad konrad.hungerbuehler@chem.ethz.ch	Period: 2009–2011

Abstract: The goal is to further apply and improve an «Energy Monitoring Tool (EMT)» already installed in a case study batch plant (Ciba/Basf, Grenzach). The tool facilitates model-based energy consumption allocation at different levels of aggregation in a production building i.e. set of production steps, batches, equipments, product lines etc.. This analysis provides additional process insights compared to the overall building energy consumption.

R+D 1.1
- EFFIZIENZSTEIGERUNGEN VON LANDWIRTSCHAFTLICHEN TROCKNUNGSANLAGEN**

Lead: Fachhochschule Nordwestschweiz	Funding: BFE
Contact: Sandoval Lisseth lisseth.sandoval@fhnw.ch	Period: 2009–2012

Abstract: In diesem Projekt wurde gezeigt, dass der bei der Trockenfüttermittelherstellung anfallende, gebührenpflichtig zu entsorgende Grasso wie Maispresssaft durch biologische Umformungsprozesse zur Biogas-, Bio-Ethanolgewinnung oder Milchsäureherstellung verwendet werden kann. Zudem zeigten die Studien zur biotechnologischen Produktion organischer Säuren, dass eine mikrobielle Produktion von Milchsäure aus beiden Pflanzenpresssäften möglich ist.

R+D 1.1
- MARKTÜBERSICHT IN ENERGIEINTENSIVEN BEREICHEN DER SCHWEIZERISCHEN INDUSTRIE**

Lead: BMG Engineering AG	Funding: BFE
Contact: Reto Müller reto.mueller@bmgeng.ch	Period: 2009–2012

Abstract: Ziel ist eine Marktübersicht in energieintensiven Bereichen der CH Industrie (Chemie, Pharma, Kunststoff, Nahrungsmittel, Baustoff, Technologie). Es soll die Verfügbarkeit und Nutzungsmöglichkeiten von industrieller Abwärme untersucht werden. Langfristig soll eine Reduktion des Primärenergieverbrauchs durch eine bessere Abwärmennutzung resultieren. Zudem sollen Standortvorteile bei einer integralen Wärmenutzung aufgezeigt werden.

R+D 1.1
- ABSCHÄTZUNG VON MASSEN- UND ENERGIEFLÜSSEN IN DER CHEMISCHEN INDUSTRIE**

Lead: ETH Zürich	Funding: BFE
Contact: Hungerbühler Konrad konrad.hungerbuehler@chem.ethz.ch	Period: 2010–2012

Abstract: Ziel dieses Projektes ist die Bestimmung und Vorhersage der Energie- und Materialflüsse in chemischen Produktionsprozessen anhand von prozessbasierten Modellen. Auf diese Weise soll eine verbesserte Energieallokation in Mehrzweck-Produktionsgebäuden möglich werden. Material- und Energieverbrauch einzelner Reaktionen und Teilschritte in der Synthese sollen gezielt bestimmt und wenn möglich auf Betriebsparameter zurückgeführt werden können.

R+D 1.1
- ENTWÄSSERUNG VON BIOETHANOL FÜR DIE ZUGABE IN BENZIN**

Lead: Zürcher Hochschule Winterthur	Funding: BFE
Contact: Spielmann Thomas spta@zhaw.ch	Period: 2011–2013

Abstract: Zur Schonung fossiler Brennstoffe und Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstosses wird Bioethanol dem Benzin bis zu einem Gehalt von 85% zugegeben (E85). Beizumischendes Ethanol muss wasserfrei sein. Die Absolutierung von Ethanol kann mittels Membranverfahren oder Molekularsiebe erfolgen. Ziel dieses Projektes ist der Vergleich der beiden Verfahren mittels einer Membran-Pilotanlage (Pervaporation) und der PSA-Pilotanlage (pressure swing absorption).

R+D 1.1
- LCA4AFR: ENERGY EFFICIENCY AND SUSTAINABLE REGIONAL MANAGEMENT OF WASTE AND INDUSTRIAL BY-PRODUCTS**

Lead: ETH Zürich	Funding: BFE
Contact: Stefanie Hellweg hellweg@ifu.baug.ethz.ch	Period: 2011–2013

Abstract: The goal is to contribute to a sustainable and energetically optimal valorization or treatment of wastes and industrial by-products in a regional context. Energy demand and greenhouse gas emissions are addressed. A life cycle assessment LCA method and finally an IT-tool is developed, that supports decision making of e.g. authorities, industry, local communities and non-governmental organizations. The tool is validated in real-world case studies.

R+D 1.1

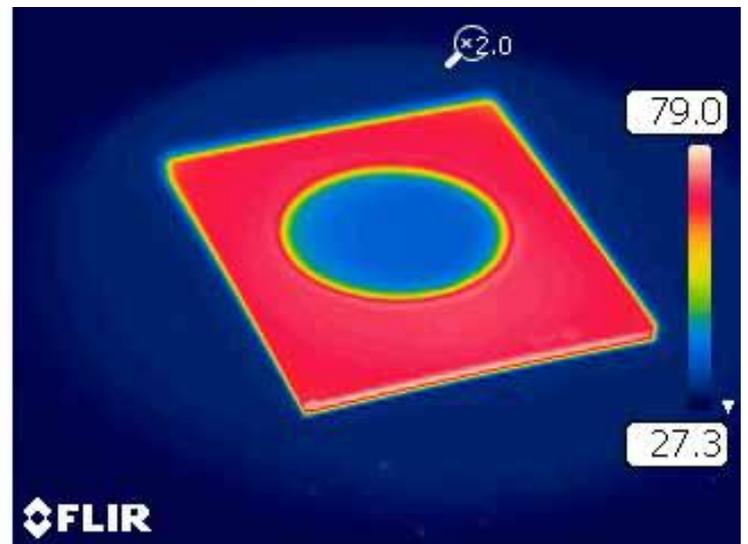
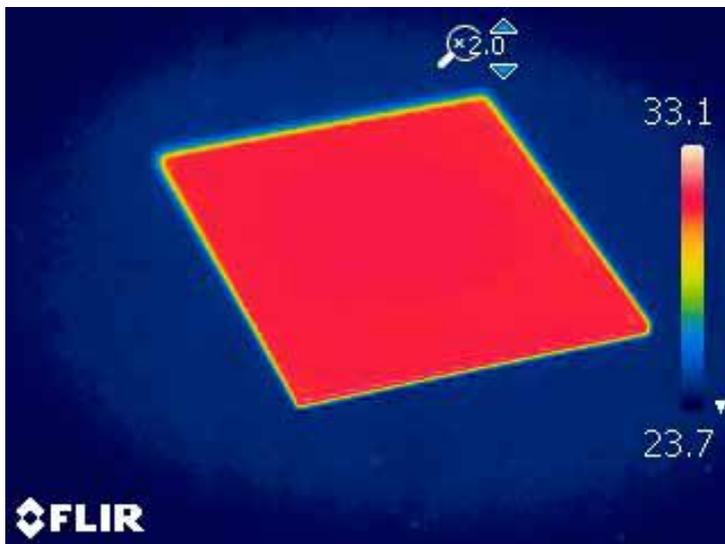


# Erneuerbare Energien Sources d'Énergie Renouvelables



Jean-Christophe Hadorn

# Chaleur solaire et Stockage de chaleur



## Page de couverture :

### Thermochromie appliquée à un absorbeur solaire

Une nanocouche thermochromique a été développée avec succès par le LESO-EPFL. La couche sur substrat métallique change de propriétés optiques à une température critique qu'il est possible de choisir dans certaines limites. C'est toute la difficulté du projet: savoir combiner les couches et les dopants. Le but final est de résoudre de manière passive et automatique le problème de la surchauffe dans les capteurs solaires. Dans l'illustration, (à gauche) à température ambiante le dépôt circulaire sur l'échantillon métallique carré n'est pas visible en rayonnement infrarouge, (à droite) à 60 °C environ il le devient, l'émissivité de la plaque ayant passé de 34 % à 85 %. LESO EPFL [1]

## Programme de recherche OFEN Chaleur solaire et Stockage de chaleur

Rapport de synthèse 2011

### Mandant :

Office fédéral de l'énergie OFEN  
CH-3003 Berne

### Chef de programme (auteur) :

Jean-Christophe Hadorn, BASE Consultants SA (jchadorn@baseconsultants.com)

### Chef de domaine de l'OFEN :

Andreas Eckmanns (andreas.eckmanns@bfe.admin.ch)

<http://www.bfe.admin.ch/forschungsolarwaerme>

L'auteur de ce rapport porte seul la responsabilité de son contenu et de ses conclusions.

## Introduction

Le marché solaire thermique suisse s'est stabilisé en 2010 après une forte croissance entre 2006 et 2009. Il reste toutefois à un niveau de 165'000 m<sup>2</sup> de capteurs vendus par an, soit 4 fois le volume de 2002–2003.

En 2010 ce sont presque comme en 2009, 165'000 m<sup>2</sup> de capteurs thermiques qui ont été vendus, principalement des capteurs plans vitrés, des capteurs non vitrés pour piscine (11'000 m<sup>2</sup>), des absorbeurs sélectifs (1'200 m<sup>2</sup>, en régression) et 16'000 m<sup>2</sup> de capteurs sous vide, segment en progression relative forte [10].

La Suisse a exporté 70'000 m<sup>2</sup> de capteurs (80 % de capteurs plans, 20 % de capteurs sous vide) et en a importé 60'000. Il y a eu 14'210 installations réalisées en 2010. Ce sont encore principalement des installations d'eau chaude sanitaire pour la villa (33 % part en recul), des systèmes combinés pour la villa (23 %) et d'eau chaude sanitaire pour les immeubles (27 % part stable), de l'eau chaude sanitaire pour les locatifs (30 %) et des systèmes combinés pour les locatifs en moins grand nombre (6 %).

Plus de 8'800 installations comprennent moins de 10 m<sup>2</sup> de capteurs (part en recul), plus de 2'200 ont entre 11 et 20 m<sup>2</sup> et le reste, soit environ 22 % (en progression) dépasse 21 m<sup>2</sup>. Il y a eu en 2010 37 installations de plus de

100 m<sup>2</sup>, ce qui confirme la tendance vers des installations à plus grande surface de capteurs. Mais nous sommes encore un pays de petites installations surtout pour l'eau chaude et le chauffage de villas et notre programme doit répondre à cette orientation de marché.

La tendance du marché du chauffage est d'une part et principalement dans le neuf de faire appel à la pompe à chaleur et de plus en plus en version air/eau, soit en monovalent soit en combinaison avec du solaire pour l'eau chaude sanitaire, et d'autre part d'installer des systèmes solaires combinés pour la villa avec appoint gaz ou bois et de moins en moins souvent au mazout.

Quant à la recherche internationale en énergie solaire thermique, elle s'oriente vers les capteurs hybrides photovoltaïque et thermique, la combinaison solaire et pompe à chaleur, la réfrigération solaire thermique pour les climats où elle a un intérêt, le stockage de chaleur dans le sous-sol à grande échelle, le stockage chimique dense pour la villa, les réseaux de chaleur à basse température et les grands champs de capteurs solaires, les matériaux plastiques, la prévision du rayonnement solaire en tout point de la planète.

La recherche suisse est en phase avec ces grands thèmes.

Classification de l'AIE : 3.1 Solar Energy, 3.1.1 Solar heating and cooling

Classification Suisse: 2.1.1 Solarwärme

## Centres de gravité du programme

Le programme de recherche traite de la chaleur solaire à température comprise entre 0 et 150 °C. Les axes en sont l'amélioration des performances des éléments de la boucle solaire, le développement de couches intelligentes pour les capteurs, la recherche de systèmes et composants standardisés pour la production de chaleur solaire, une meilleure intégration des capteurs dans les bâtiments et dans les systèmes de chauffage existants, notamment dans les combinaisons solaire-bois et solaire-pompe à chaleur, le stockage compact de chaleur avec de nouvelles solutions mais aussi l'amélioration du stockage en cuve à eau largement dominant sur le marché, et enfin les outils de simulation.

### Revue et évaluation 2011

Les buts en 2011 ont été atteints :

- le maintien des équipements de tests de capteurs et l'amélioration des procédés permettant de mesurer leur qualité et les tests de capteurs du marché ;
- la publication du rapport final sur la réussite de la première nanocouche thermochromique sur support métallique ;
- l'intégration des travaux internationaux sur la prévision du rayonnement solaire en utilisant les données des satellites dans le logiciel Meteonorm ;
- les tests comparatifs des modules de préparation d'eau chaude sanitaire externes à la cuve de stockage ;
- les possibilités d'améliorations de la géométrie des échangeurs immergés par l'étude des transferts thermiques autour des échangeurs immergés ;
- la conclusion quant aux meilleurs concepts de maintien de la stratification dans les cuves de stockage solaire court terme ;
- la mise au point d'un banc d'essai dynamique des éléments de connexion entre capteurs dans un champ ;
- les premiers résultats de la Tâche 44 « Solar and heat pump systems » de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) dans les programmes Solar Heating and Cooling (SHC) et Heat pump programme (HPP) et notamment le référentiel de simulation et la description des combinaisons solaire et pompe à chaleur du marché ;
- les premiers résultats du projet international d'intégration architecturale des capteurs solaires actifs dans des éléments de construction (AIE SHC Task 41) ;
- la mise au point des méthodes pour prédire la production de gaz non condensables lors de la stagnation dans les circuits solaires ;
- les conclusions quant aux premiers essais de développement d'un stock solaire dense avec le NaOH ;
- la mise en production de deux bancs de test de combinaison solaire et pompe à chaleur, l'un à Rapperswil, l'autre à Yverdon ;

- les premières mesures d'un projet P+D avec une combinaison absorbeurs solaires et pompe à chaleur sur une cuve de glace.

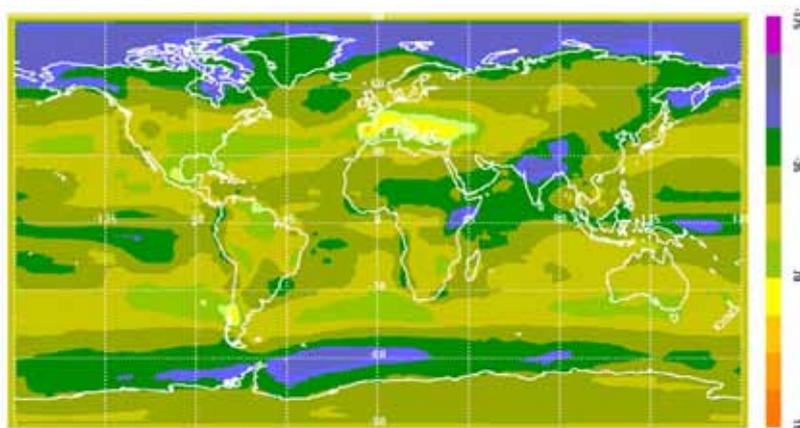
### Perspectives

En 2012 nous verrons les résultats de la Tâche 41 « Solar energy and architecture » pour une meilleure intégration des composants solaires actifs dans l'architecture et les bons exemples internationaux.

Les premières conclusions de la Tâche 44 « Solar and heat pump systems » devraient être disponibles notamment quant aux performances de systèmes mesurés (plus de 20 projets sont suivis par la Tâche). Dans cette Tâche nous devrions également avoir les premiers résultats de simulation montrant les systèmes les plus performants théoriquement, et une procédure de test de combinaison au banc d'essai appelée à devenir une norme internationale.

La stagnation dans un circuit solaire sera mieux simulée et peut être ses effets réduits par des dispositifs spécifiques grâce à une étude menée à Zürich. Des dispositifs de connexion entre capteurs auront été testés et les meilleurs identifiés. La nouvelle Tâche AIE SHC 46 sur l'étude du gisement solaire par satellite aura débuté. Deux nouveaux projets au SPF (HES Rapperswil) s'intéresseront au stockage sous forme de glace et au test des étanchéités dans les capteurs. Et le SPF participera à des projets européens pour compléter son activité et son financement. Nous espérons possible la poursuite des travaux sur les couches thermochromiques qui ont abouti à des résultats très prometteurs en 2011.

Dans l'ensemble le programme travaille sur tous les aspects systémiques du domaine du solaire thermique, du composant au système : le gisement solaire, les matériaux nouveaux en captage et stockage, la qualité des capteurs solaires, la boucle solaire en conditions de stagnation, le stockage, les systèmes solaires en combinaison avec les pompes à chaleur, les outils de simulation des systèmes dans tout climat (voir figure).



Anomalies de rayonnement solaire en kWh/m<sup>2</sup> anticipées pour 2080–2090 par rapport aux niveaux de 1961–1990 calculées dans le scénario A2 de l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Meteotest [11].

## Highlights Recherche et Développement

Trois projets ont abouti en 2011. Ce sont : l'étude de l'intérêt de la stratification dans une cuve solaire et des dispositifs pour la renforcer, la découverte de nanocouches à propriété thermo-chromique, et l'analyse comparative de modules solaires de préparation d'eau chaude solaire instantannée. Cette analyse conduite sur sept systèmes du marché a montré la difficulté d'obtenir un confort satisfaisant avec des modules externes (Frischwassermodul), qui sont pourtant très à la mode en Allemagne [6,7]. Des critères ont été proposés par le SPF qui pourront servir de base à une norme européenne.



Figure 1 : Les modules de préparation d'eau chaude sanitaire solaire externe peuvent aussi être sujets à entartrage mais en principe moins que les systèmes avec échangeurs immergés (SPF [7]).

### La thermochromie : une parade contre la surchauffe des capteurs solaires

Lors de la panne du circulateur dans une installation solaire, apparaît en cas d'ensoleillement même usuel, une surchauffe dangereuse et préjudiciable pour les capteurs solaires thermiques vitrés. Les températures élevées qui se produisent au cours de ce phénomène dit de stagnation, peuvent conduire à la vaporisation du fluide, la dégradation du glycol et une très forte augmentation de pression dans toutes les conduites du circuit pouvant dégrader la pompe ou le vase d'expansion. Des précautions particulières sont nécessaires pour absorber ou libérer cette pression. A ce jour il n'y a que des solutions mécaniques (ombrage, purge, vidange) et encore imparfaites. En outre, les températures élevées conduisent en cas de répétition de la stagnation durant la vie des capteurs à la dégradation des matériaux qui composent le collecteur, étanchéité, isolation thermique et revêtement sélectif.

L'objectif de ce projet était de trouver une nouvelle façon de protéger les systèmes solaires thermiques sans dispositif mécanique en recourant à un procédé thermique passif. Des revêtements thermochromiques nouveaux ont été développés, qui ont la particularité de modifier leurs propriétés optiques au delà d'une température dite critique  $T_c$ . Le phénomène n'est pas nouveau mais il n'y a pas de recherche aboutie internationalement sur le sujet pour le solaire. Le LESO de l'EPFL est particulièrement compétent dans les

nanocouches solaires aussi par l'investissement que nous avons consenti depuis des années dans ce laboratoire de pointe notamment pour des couches sélectives ou de couleur sur vitrage. Le laboratoire a réussi à réaliser des échantillons dopés et non dopés de revêtements inorganiques présentant un comportement de commutation thermochrome par évaporation sous vide et par pulvérisation à magnétron. Une commutation dynamique de l'émission thermique peut être obtenue par les oxydes de métaux de transition thermochromiques. Pour obtenir une variation importante de l'absorption solaire, des films spéciaux d'alliages métalliques sont déposés. Les détails sont de l'ordre du brevet. Les propriétés structurales et optiques de films d'oxyde de transition thermochromiques métalliques minces ont été caractérisées en détail par des méthodes telles que la spectroscopie de rétrodiffusion de Rutherford (RBS), de mesure de longueur d'onde dispersive X-Ray Spectrometry (WDS), de diffraction des rayons X pour l'identification de phase (DRX), dépendant de la température spectrophotométrique et dépendant de la température ellipsométrique. Les films déposés en alliage de métaux sur des substrats métalliques montrent un comportement commutable entre absorption et réflexion. Les paramètres du procédé de dépôt de ces revêtements ont été étudiés et optimisés. Les propriétés optiques et structurales des films d'alliages métalliques ont été caractérisées par diffraction des rayons

X de sorte que les dépôts sont parfaitement connus. En effet la production des couches n'est pas aisée mais leur mesure de vérification ne l'est pas non plus et est aussi un défi de ces travaux.

Le LESO a prouvé qu'une solution est possible au laboratoire autour pour l'instant de 60 à 70 °C. Les propriétés optiques exceptionnelles de ces films commutables font entrevoir une solution technologique. Il reste des étapes importantes notamment les tests de différents substrats et le passage à des surfaces plus importantes que l'échantillon de laboratoire. Nous avons fait une percée mais il faut que les moyens financiers de recherche suivent. Le rapport final de ce projet a été publié en 2011 [1] et de nombreuses publications internationales sont en cours [2,3,4].

### Dispositifs de renforcement de la stratification dans une cuve solaire

Dans les systèmes solaires combinés, la stratification dans la cuve de stockage peut jouer un rôle important dans les performances et surtout l'énergie d'appoint nécessaire pour atteindre les 55 °C nécessaires à l'eau chaude sanitaire. Le sujet est à peine controversé mais la meilleure manière de stratifier fait encore débat. Dans diverses publications, l'influence des dispositifs de charge d'un stock solaire sur les performances d'ensemble du système est



Figure 2 : La thermochromie au laboratoire dépend des chercheurs et de leurs outils. Vue sur la chambre de dépôt UHV développée par le LESO pour ses créations de nanocouche [1].

étudiée par simulation. La réalité est cependant complexe et la simulation ne peut pas tout détecter.

Pour obtenir une connaissance plus précise de l'influence des dispositifs de stratification dans une cuve solaire, le SPF a testé quatre systèmes différents, dans des conditions de charge et décharge réalistes sur banc-test dynamique. Pour tous les systèmes testés, étaient identiques: le chauffage d'appoint, les capteurs solaires et le volume de stockage. La différence résidait dans l'interconnexion hydraulique des composants utilisés et donc la manière de charger et de décharger le stock. Les échangeurs de chaleur étaient soit internes et immergés, soit externes. Il a

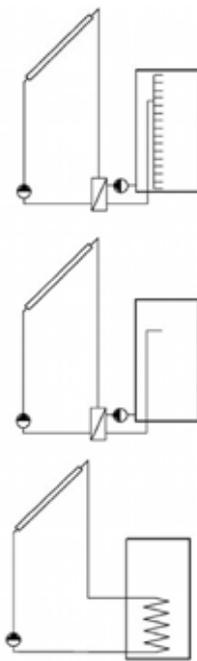


Figure 3 : Dispositifs étudiés favorisant ou pas la stratification côté charge solaire (SPF [5]).

été considéré deux « philosophies » différentes de stock sans échangeur de chaleur interne: un concept avec une installation complexe quasi-parfaite pour la stratification en charge et en décharge, et une installation simple avec une cuve sans dispositif particulier de stratification mais chargée par l'extérieur. Comme référence, une mesure de comparaison d'une installation combinée courante a été réalisée soit une installation avec une cuve avec des échangeurs de chaleur internes en spirale.

Les tests réalisés extrapolés à une situation annuelle ont montré une différence de consommation d'appoint du système selon le concept de charge /

décharge du stock de + ou -5 % en valeur absolue, ceci pour couvrir une demande en chaleur identique. Les différences ne sont donc pas très marquées alors que les dispositifs qui permettent les meilleurs résultats peuvent devenir complexes [5]. En fait, dans le cas d'un appoint par une chaudière à condensation une meilleure stratification peut être particulièrement important parce que l'usage de la chaleur de condensation des fumées est fortement dépendante de la température de retour à la chaudière et donc de l'effet de stratification. Il a été montré que une bonne stratification et un contrôle optimal du stockage réduit la consommation d'énergie d'appoint annuelle de plus de 2 % en valeur absolue à configuration semblable mais l'une stratifiée, l'autre pas. Le système avec échangeur de chaleur immergé pour l'eau chaude sanitaire (type spirale) et pas de système de stratification interne particulier a été également comparé aux autres solutions. Les températures de stockage sont au final légèrement plus élevées, ce qui est favorable aux exigences de confort pour le stock d'eau chaude domestique en partie haute de la cuve. Mais il en est résulté des performances globales annuelles selon le critère de la consommation d'énergie d'appoint moins bonnes, mais faiblement (-5 %) par rapport à une solution avec un stock parfaitement stratifié. Au final, les dispositifs de stratification apparaissent complexes par rapport aux gains véritables qu'ils procurent. A nos yeux une certaine stratification est importante mais elle peut être obtenue par les solutions usuelles d'échangeurs immergés. Ce projet a le grand mérite de clarifier ce point et de jeter les bases pour d'autres comparaisons avec des dispositifs de stratification nouveaux.

## Projets Pilotes et de Démonstration

En 2011, trois projets P+D liés au solaire actif ont débutés. Il s'agit de Pacsol en Valais solaire et pompe à chaleur pour une villa, Sonnengarten à Zürich où l'on teste une combinaison solaire et pompe à chaleur dans une rénovation et Florence à Genève projet de centrale solaire thermique avec 3'000 m<sup>2</sup> de

capteurs prévus et un stock saisonnier diffusif souterrain. Ce projet a été malheureusement arrêté à fin 2011 pour des raisons de surcoût trop important pour une partie des maîtres d'ouvrage privés malgré l'aide accordée de la Confédération.

Les autres projets sont parfaitement en phase avec les travaux de la Tâche 44 sur les combinaisons solaire et pompe à chaleur. Ils viennent compléter les études théoriques et apportés des mesures in situ nécessaires pour la validation des modèles de simulation.

## Solaire et pompe à chaleur avec un stock de glace

Le projet Pacsol consiste à tester un pilote de stockage en glace pour une pompe à chaleur (PAC).

Ceci permet d'éviter de forer une sonde, et devrait avoir des performances meilleures qu'une pompe à chaleur air/eau, spécialement en altitude. Bien sûr pour ne pas surdimensionner le stock, il faut le recharger souvent, et les absorbeurs solaires sélectifs d'Énergie Solaire SA peuvent particulièrement bien faire l'affaire.

La maison est une habitation villageoise d'une surface de 230 m<sup>2</sup>, rénovée selon le standard Minergie et située à Savièse à 850 m d'altitude. La puissance installée est de 8 kW avec un départ chauffage à 35 °C pour une température extérieure de -8 °C. A l'origine, l'énergie de base provenait de 30 m<sup>2</sup> de capteurs solaires sélectifs sans vitrage. L'appoint d'énergie était fourni par une chaudière à bois automatique, à bûches, couplée à un accumulateur de chaleur combiné, permettant l'alimentation du circuit de chauffage et la production d'eau chaude sanitaire (ECS). L'installation d'origine a été légèrement modifiée pour permettre le raccordement de la pompe à chaleur de 6 kW et de l'accumulateur de glace de 320 litres de la société Consolar. Les capteurs solaires peuvent ainsi injecter de la chaleur soit dans l'accumu-



Figure 5 : Les tests de qualité des capteurs intègrent un test de grêle de plus en plus sévère vu les modifications climatiques (SPF).

lateur combiné, soit dans le réservoir à changement de phase glace/eau. Si l'appoint par la chaudière à bois est toujours possible, il n'est volontairement pas sollicité pendant la période du projet P&D.

Le « Seasonal Performance Factor » (SPF) de l'installation mesuré sur la période 04/2010–03/2011 s'est établi à 4,0. Il correspond aux attentes, si l'on prend en compte l'inclinaison et l'orientation non optimales des capteurs solaires de l'installation pilote. Ces résultats confirment que les PAC solaires avec stock de glace présentent une alternative intéressante par rapport aux PAC géothermiques (sans capteurs solaires). Les coûts de ces deux types de systèmes de chauffage pour maisons familiales sont similaires.

Les mesures montrent que pour ce pilote, le volume du stock à changement de phase est trop petit et affecte le coefficient of performance (COP) de la PAC en hiver. Il serait judicieux de doubler son volume (700 litres) en combinaison avec une PAC de 6 kW et une surface active de capteurs solaires non vitrés sélectifs de 30 m<sup>2</sup>.

Toutefois pour généraliser, des conditions favorables doivent être présentes pour les PAC solaires avec stock de glace. Le positionnement du champ de capteurs solaires afin de bénéficier d'un apport solaire optimal en hiver, ainsi qu'un rayonnement solaire régulier en hiver sont primordiaux. Il est également important que le champ de capteurs soit libre de neige pendant la période de chauffage. Ce projet P+D a permis d'acquérir des connaissances sur les performances des capteurs sans vitrage utilisés comme échangeurs sur l'air ambiant à très basse température. Les résultats obtenus pour les absorbeurs sur l'installation pilote ont été comparés avec ceux mesurés sur le

banc de test du SPF à Rapperswil, et l'on a pu constater une bonne corrélation.

Le but de 2012 est de pouvoir valider des modèles de simulation sur la base des mesures in situ et d'utiliser ces modèles pour dimensionner de futures installations solaires PAC avec stockage de glace. Ce projet est une contribution suisse à la Tâche SHC 44 « Solar and heat pump systems ».



Figure 4 : Les absorbeurs solaires utilisés par la pompe à chaleur comme échangeur givrent en l'absence de soleil matinal (ESSA).

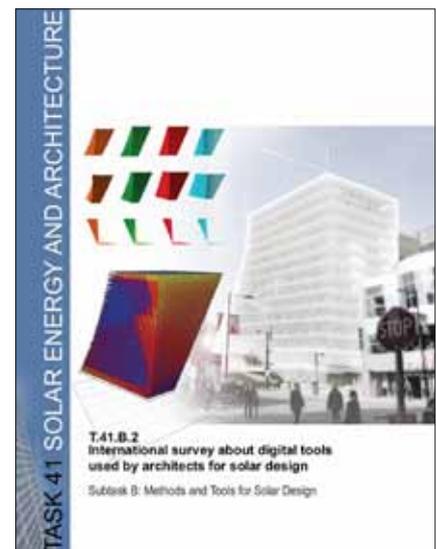


Figure 6 : La coopération internationale dans les projets de l'AIE permet des études à large spectre comme cette nouvelle publication de la Tâche 41 à destination des architectes et ingénieurs du bâtiment.

## Collaboration Nationale

L'industrie solaire thermique suisse est en fréquente interaction avec le SPF pour les tests de systèmes, de capteurs et de composants. Le SPF a déjà testé 1500 capteurs et plus de 150 pour la Solar Keymark européenne. En 2011 ce sont plus de 50 capteurs de toute origine qui ont été testés. L'interaction avec l'industrie permet au SPF de détecter des sujets où la recherche peut apporter des innovations nécessaires. En retour l'industrie solaire suisse bénéficie de l'expérience d'un institut de tests pour améliorer comparativement ses produits.

La qualité des capteurs solaires testés en 2011 reste très inhomogène et justifie les tests poussés. En outre, le vent, la neige et la grêle sont plus à redouter qu'auparavant.

Pour garder la qualité de ses tests, le SPF prend aussi part au comité NK0144 de l'association suisse de normalisation.

Comme chaque année, la journée de transfert au marché de nos travaux a lieu à Rapperswil. Le SPF a organisé en 2011 un « jour de l'industrie » durant lequel ont

été exposés tous les projets en cours devant plus de 100 personnes. Les thèmes abordés sont ceux de notre programme de recherche et le transfert à l'industrie peut débuter lors de telles journées par les contacts pris.

Dans le cadre de projets de recherche ou P+D, le SPF collabore en matière de solaire et pompe à chaleur avec les sociétés suisses 3S Swiss Solar Systems et H+S Solar.

Le Lesbat d'Yverdon collabore avec Elco pour une combinaison solaire et pompe à chaleur pour la production d'eau chaude sanitaire.

Entre écoles supérieures suisses les échanges aussi sont favorisés: les travaux d'intégration architecturale des éléments solaires du Leso sont partagés avec la HSLU Lucerne et le Supsi de Canobbio.

Enfin à l'avenir, le projet de couches thermochromiques du Leso de l'EPFL pourrait avoir un débouché à terme chez un partenaire industriel suisse qui a déjà la licence pour les verres solaires en couleur. La difficulté des start-up spécialement en énergie solaire est cependant connue dans le paysage suisse.

## Collaboration Internationale

Le SPF prend part aux comités de normalisation européen TC312 pour toutes les normes sur les capteurs solaires. L'institut est aussi actif auprès de l'association Solar Keymark dépositaire du label. Ceci est important car tous les Etats imposent petit à petit ce label à leur marché.

La plupart des projets du programme participe à des tâches de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) dans le programme SHC « solar heating and cooling ». Il y a là un véritable échange de connaissances et des avancées en commun qui ne seraient pas possibles pour un seul pays et spécialement les plus petits ou les moins organisés.

Le SPF collabore avec divers instituts européens pour la mise au point de méthodes ou logiciels ou de tests comparatifs (IWT Graz en Autriche, ITW Stuttgart en Allemagne) ou encore de nouvelles méthodes d'évaluation de combinaisons solaire et pompe à chaleur [8].

La recherche sur les phénomènes de stagnation dans les capteurs est menée à l'ETH Zürich avec le SPF comme expert, et en partenariat avec l'Université de Dresde.

Dans le projet de stockage en soude, l'EMPA fait partie de la Tâche IEA SHC 42, et recherche des collaborations dans un projet européen dénommé COMTES pour augmenter ses moyens financiers et la portée de ses travaux. Le stockage de chaleur reçoit en effet depuis quelques

années des budgets plus importants dans la Communauté européenne grâce à des actions auxquelles nous avons participé, pour montrer que la clé du solaire thermique est avant tout le stockage.

Meteotest et l'Université de Genève ont participé activement à la Tâche 36 sur les données satellitaires [11], et participeront à la nouvelle Tâche 46 qui poursuit les activités dans la prévision du rayonnement solaire sur la planète et la mise à disposition des données sur le Web. Le projet est également étroitement lié au programme européen MESOR, pour lequel un prototype de diffusion des banques de données de rayonnement est disponible sur internet.

Le SPF participe très activement aux travaux de la Tâche IEA SHC 39 sur les nouveaux matériaux pour le solaire (aluminium, polymères) depuis plusieurs années.

Energie Solaire SA a collaboré pour un projet P+D avec l'entreprise allemande Consolar.

Il y a quatre laboratoires suisses et deux industries (ESSA et 3S) participant à la Tâche 44 « Solar and heat pump systems » que nous dirigeons et qui réunit plus de 50 experts de 11 pays différents sur le sujet très demandé par le marché du solaire couplé avec une pompe à chaleur.

Dans l'ensemble, le programme est très lié à l'international mais sur des thèmes qui sont ceux utiles à la Suisse.

## Références

- [1] A. Paone, A. Schueler: *Advanced switchable selective absorber coatings for overheating protection of solar thermal collectors, Final report, 23 pages (2011).*
- [2] A. Schueler, *Optical and electronic properties of carbon and nitrogen based nanostructured inorganic thin films, invited keynote lecture, International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films ICMCTF 2010, San Diego, USA, (2010)*
- [3] D. P. Gruber, G. Engel, H. Sormann, A. Schueler, W. Papousek, *Modeling the absorption behavior of solar thermal collector coatings utilizing graded a-C:H/TiC layers, Applied Optics, Vol. 48, No. 8, (2009)*
- [4] A. Paone, *Thermochromic films of VO<sub>2</sub>:W for « smart » solar energy applications, International conference SPIE on Optics and Photonics, Solar energy and Technology, August 2nd, (2009)*
- [5] R. Haberl, E. Frank, *Experimental Investigations on Charging and Discharging Strategies of Thermal Energy Stores and Their Effect on System Efficiency, ISES SOLAR WORLD CONGRESS, Kassel, Deutschland, (2011).*
- [6] F. Ruesch, E. Frank, « *Development of a Test Procedure for External Domestic Hot Water Modules* », presented at the EuroSun International conference on Solar Heating, Cooling and Buildings, Graz, Austria, (2010).
- [7] F. Ruesch, E. Frank, « *The Influence of External DHW Modules on the Yearly Energy Consumption of Solar Combisystems* », ISES SOLAR WORLD CONGRESS, Kassel, Deutschland, (2011).
- [8] M. Haller, E. Frank, *On the Potential of using Heat from Solar Thermal Collectors for Heat Pump Evaporators, ISES SOLAR WORLD CONGRESS, Kassel, Deutschland, (2011).*
- [9] W. Logie, E. Frank, *A Computational Fluid Dynamics Study on the Accuracy of Heat Transfer from a Horizontal Cylinder into Quiescent Water, ISES SOLAR WORLD CONGRESS, Kassel, Deutschland, (2011).*
- [10] Swissolar, *Le recensement du marché de l'énergie solaire en 2010, (2011).*
- [11] J. Remund, S. Müller, *Trends in global radiation between 1950 and 2100, Eurosun conference, (2010).*

## Projets en cours et terminés dans l'année de référence

(\* Classification de l'AIE)

- SOLAR RESOURCE MANAGEMENT IEA SHC 36**

Lead:	Meteotest	Funding:	BFE
Contact:	Remund Jan <a href="mailto:jan.remund@meteotest.ch">jan.remund@meteotest.ch</a>	Period:	2005–2011

Abstract: Le programme AIE « Solar heating and cooling » a lancé la Tâche 36 « Solar Resource Knowledge Management ». Il s'agit d'explorer la qualité de la prévision du rayonnement, la tendance des dernières données internationales et la répartition des aérosols atmosphériques. Le groupe fait appel aux données satellitaires. Les résultats sont intégrés rapidement dans le logiciel suisse Meteonorm.

R+D 3.1.1\*
- ADVANCED SWITCHABLE SELECTIVE ABSORBER COATINGS FOR OVERHEATING PROTECTION OF SOLAR THERMAL COLLECTORS**

Lead:	EPFL/ENAC/LESO-PB	Funding:	BFE
Contact:	Schüeller Andreas <a href="mailto:andreas.schueler@epfl.ch">andreas.schueler@epfl.ch</a>	Period:	2007–2011

Abstract: Overheating and the resulting stagnation of solar thermal collectors is a common problem. A promising way to protect solar thermal systems is to produce a selective coating which exhibit a change in optical properties at a critical temperature. This project aims at the development of such new coatings for thermochromic solar collectors.

R+D 3.1.1
- SPF SOLAR TRINKWARMWASSERBEREITSTELLUNG 2009–2011**

Lead:	Institut für Solartechnik, SPF	Funding:	BFE
Contact:	Frank Elimar <a href="mailto:Elimar.Frank@solarenergy.ch">Elimar.Frank@solarenergy.ch</a>	Period:	2009–2011

Abstract: Die Verwendung von Frischwassermodulen (FWM) zur Bereitstellung von Brauchwarmwasser hat in den letzten Jahren stark zugenommen und ein Vergleich der Angebote ist schwierig. In diesem Projekt soll ein Teststand zur genauen Prüfung von FWM entwickelt und eine repräsentative Anzahl marktüblicher Exemplare miteinander verglichen werden.

R+D 3.1.1
- SPF TESTING 2009 - 2011**

Lead:	Institut für Solartechnik, SPF	Funding:	BFE
Contact:	Bohren Andreas <a href="mailto:andreas.bohren@solarenergy.ch">andreas.bohren@solarenergy.ch</a>	Period:	2009–2012

Abstract: Die Messinfrastruktur für die umfassende Beurteilung von solarthermischen Systemen und Komponenten ist vergleichsweise aufwändig. Das SPF-Testing betreibt die notwendigen Einrichtungen auf hohem Niveau und ist damit eines der führenden Labors. Ziel des Projektes ist die Aufrechterhaltung des Prüfbetriebes auf hohem Niveau.

R+D 3.1.1
- SPF APPLIED RESEARCH**

Lead:	Institut für Solartechnik, SPF	Funding:	BFE
Contact:	Frank Elimar <a href="mailto:Elimar.Frank@solarenergy.ch">Elimar.Frank@solarenergy.ch</a>	Period:	2009–2012

Abstract: Mit diesem Projekt soll dies am SPF ermöglicht und sichergestellt werden. Ergänzend zum applied research ist für die nicht zwingend projektgebundene Kontinuität der internationalen Vernetzung die F&E-bezogene Mitarbeit des SPF in verschiedenen Gremien und working groups sowie die aktive Mitgliedschaft in Verbänden nötig. Hier können die Ergebnisse und Erkenntnisse der SPF regelmässig zielführend eingebracht und verbreitet werden.

R+D 3.1.1
- SPF UNTERSUCHUNG VON EINGETAUCHTEN WÄRMEÜBERTRAGERN FÜR SOLARE WARMWASSER-SPEICHER**

Lead:	Institut für Solartechnik, SPF	Funding:	BFE
Contact:	Frank Elimar <a href="mailto:Elimar.Frank@solarenergy.ch">Elimar.Frank@solarenergy.ch</a>	Period:	2009–2011

Abstract: Die Wahl der richtigen Konstruktions- und Dimensionierungsparameter für eingetauchte Wärmeübertrager ist von zentraler Bedeutung für die Be- und Entladung von Warmwasserspeichern. Anhand der neueren Methoden PIV und LIF sollen am SPF ideale Parameter für die Konstruktion und Dimensionierung eingetauchter Wärmeübertrager experimentell bestimmt werden. Die Messergebnisse werden anschliessend zur Validierung angepasster Modelle verwendet.

R+D 3.1.1
- SPF NEUE MATERIALIEN IN DER SOLARTHERMIE**

Lead:	Institut für Solartechnik, SPF	Funding:	BFE
Contact:	Brunold Stefan <a href="mailto:Stefan.Brunold@solarenergy.ch">Stefan.Brunold@solarenergy.ch</a>	Period:	2009–2011

Abstract: Im beantragten Forschungsprojekt sollen neue Kollektorkonzepte ausgearbeitet werden, insbesondere mit Hinblick auf den Einsatz von Polymeren. Diese sollen anhand moderner Simulationmethoden optimiert und, bei Erfolgsaussicht, als Prototypen umgesetzt und hinsichtlich der Leistungsfähigkeit detailliert gemessen werden.

R+D 3.1.1

- **IEA SHC TASK 41 "SOLAR ENERGY AND ARCHITECTURE"- DIRECTION DE LA SOUS-TÂCHE A "CRITERIA FOR ARCHITECTURAL INTEGRATION"** R+D 3.1.1
- Lead: EPFL/ENAC/LESO-PB Funding: BFE
- Contact: Roecker Christian christian.roecker@epfl.ch Period: 2009–2012
- Abstract: Il s'agit d'assurer une participation active à la Tâche 41 de l'AIE « Solar Energy and Architecture », avec direction de la Sous-tâche A « Criteria for architectural integration », l'organisation de la coordination avec des projets d'autres pays, le développement des critères d'intégration du solaire actif, des séminaires pour architectes, industriels et autorités et la publication de manuels pour architectes, industriels et autorités.
- **LEITUNG DES FORSCHUNGSPROGRAMMS "AKTIVE SOLARNUTZUNG"** R+D 3.1.1
- Lead: BASE CONSULTANTS SA Funding: BFE
- Contact: Hadorn Jean-Christophe jchadorn@baseconsultants.com Period: 2008–2011
- Abstract: Le projet a pour but la gestion et la direction des activités du programme de recherche "Solaire actif et stockage de chaleur". Il convient d'initier ou d'évaluer des projets, de les suivre, de les orienter, de les contrôler et de les valoriser.
- **AQUAPACSOL** R+D 3.1.1
- Lead: HEIG-VD / LESBAT Funding: BFE
- Contact: Citherlet Stéphane Stephane.Citherlet@heig-vd.ch Period: 2009–2013
- Abstract: Ce projet vise à développer une installation pour la production d'ECS en couplant des capteurs solaires thermiques sur l'évaporateur d'une PAC qui soit compétitif du point de vue énergétique, financier et environnemental avec des systèmes existants. Un banc d'essai et des simulations sont prévus.
- **SOLCOOL II - PROLONGATION** R+D 3.1.1
- Lead: HEIG-VD / LESBAT Funding: BFE
- Contact: Citherlet Stéphane Stephane.Citherlet@heig-vd.ch Period: 2006–2011
- Abstract: Ce projet consiste à développer et utiliser un stand d'essais permettant de tester une machine de climatisation solaire à sorption en conditions réelles, de valider un modèle de simulation et d'étudier l'intérêt de solutions optimisées pour le climat suisse.
- **THERMOHYDRAULIK VON SOLARANLAGEN** R+D 3.1.1
- Lead: Eismann Ing. Funding: BFE
- Contact: Eismann Ralph eismann@lke.mavt.ethz.ch Period: 2010–2012
- Abstract: Das übergeordnete Ziel ist die Erarbeitung eines grundlegenden Verständnisses der instationären Vorgänge in thermischen Solaranlagen mit Einphasen- und Zweiphasenströmungen. Dazu werden Computermodelle entwickelt, mit denen die Vorgänge bei Stagnation, bei Inbetriebnahme und Wartung, im Betrieb und bei Störfällen simuliert werden können.
- **NAOH-SPEICHER FÜR SAISONALE WÄRMESPEICHERUNG** R+D 3.1.1
- Lead: EMPA Funding: BFE
- Contact: Weber Robert Robert.Weber@empa.ch Period: 2007–2010/11
- Abstract: Im Projekt „NaOH“ soll ein Wärmespeicher entwickelt werden, welcher eine hohe Speicherdichte aufweist und dessen Speicherverluste nur beim Laden bzw. Entladen des Speichers auftreten. Das Projekt gliedert sich grob auf in Machbarkeitsabklärungen, Bau eines einstufigen Laborprototyps und Erweiterung des Prototyps mit einer zweiten verbesserten Stufe.
- **SPF SOL HEAP AND IEA SHC 44 SUBTASK C LEADERSHIP** R+D 3.1.1
- Lead: Institut für Solartechnik, SPF Funding: BFE
- Contact: Haller Michel Michel.Haller@solarenergy.ch Period: 2010–2013
- Abstract: In der IEA-SHC Task 44 „Solar and Heat Pump Systems“, das SPF über das Projekt „SOL-HEAP“ eingebunden ist. Für diesen Task wurde das SPF angefragt, die Leitung des Subtask C „Modeling and simulation“ zu übernehmen. In diesem Subtask werden Simulationsmodelle für Komponenten und Systeme erarbeitet und neue Systemkonzepte mit der Hilfe von Simulationsrechnungen evaluiert und miteinander verglichen.

## ● IEA SHC 44 OPERATING AGENT

R+D 3.1.1

Lead: BASE CONSULTANTS SA

Funding: BFE

Contact: Hadorn Jean-Christophe jchadorn@baseconsultants.com

Period: 2010–2014

Abstract: The project is to lead the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38 Task. The scope of this Task is on small-scale residential heating and hot water systems that use heat pumps and any type of solar thermal collectors. More than 10 countries participate.

## ● PACSOL: CHAUFFAGE PAR POMPE A CHALEUR SOLAIRE AVEC DES CAPTEURS SÉLECTIFS NON VITRÉS ET ACCUMULATEUR A CHANGEMENT DE PHASE

P+D 3.1.1

Lead: Energie Solaire SA

Funding: BFE

Contact: Bernard Thissen bernard@energie-solaire.com

Period: 2011–2013

Abstract: Le système Solaera de la société Consolar avec stockage de chaleur en glace a été développé depuis 2004. Ce système couplé à 30 m<sup>2</sup> de absorbeurs nonn vitrés sélectifs est testé sur une villa de 230 m<sup>2</sup> en Valais. Le but est d'évaluer les performances annuelles du système pompe à chaleur - stock de glace rechargé par le solaire. Le projet participe à la Tâche IEA SHC 44.

## ● BAUGENOSSENSCHAFT SONNENGARTEN IN ZÜRICH

P+D 3.1.1

Lead: naef energietechnik

Funding: BFE

Contact: René Naef naef@naef-energie.ch

Period: 2011–2013

Abstract: Wie ist die Einbindung der unverglasten, selektiven Kollektoren in ein System mit Unterstationen und Fernwärme auszurüsten? Wie gross sind die Gewinne der Kondensationswärme bei unverglasten, selektiven Kollektoren bei der geplanten Anwendung?

## ● PROJET DE STOCKAGE SAISONNIER EN TERRE DE CHALEUR SOLAIRE DE FLORENCE-CHAMPENDAL

P+D 3.1.1

Lead: SIG, Services Industriels de Genève

Funding: BFE

Contact: Michel Monnard michel.monnard@sig-ge.ch

Period: 2010 - 2016

Abstract: Projet d'installation solaire pour un ensemble de bâtiments de 90'000 m<sup>2</sup> prévoyant 3000 m<sup>2</sup> de capteurs et un stock souterrain diffusif de 45'000 m<sup>3</sup>.

Stefan Nowak

# Photovoltaik



**Titelbild:****Vom Gebäude zum Kraftwerk: Photovoltaik auf Dach und Fassaden**

Der mit dem Solarpreis 2011 ausgezeichnete, neue solare PlusEnergieBau der Heizplan AG in Gams ist im wahrsten Sinne des Wortes ein Kraftwerk. Eine Photovoltaik-Anlage mit rund 61 kW Leistung (Dach: 37 kW monokristallin, Südfassade 13 kW monokristallin, Ostfassade 7 kW amorph, Tracker 4 kW multikristallin) liefert deutlich mehr elektrische Energie, als im Gebäude gebraucht wird. Thermische Solarkollektoren auf dem Dach und eine Luft-Wasser-Wärmepumpe sorgen für die nötige Heizenergie. Ein 2'000-Liter Solarspeicher steht in der Energiezentrale und komplettiert die Heizungsanlage (Bildquelle: Heizplan).

**BFE Forschungsprogramm Photovoltaik**

Überblicksbericht 2011

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
CH-3003 Bern

**Programmleiter BFE (Autor):**

Dr. Stefan Nowak, NET Nowak Energie & Technologie AG (stefan.nowak@netenergy.ch)

**Bereichsleiter BFE:**

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

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

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

## Einleitung

Die Photovoltaik erfährt in aktuellen nationalen und internationalen Energieszenarien eine immer grössere Beachtung. Dabei wird diese sehr dynamische Energietechnologie sowohl aus wissenschaftlich-technischer Sicht, als auch industriell und marktbezogen viel diskutiert. Vor dem Hintergrund einer rasch wachsenden, global orientierten Industrie findet weltweit eine intensive Forschung statt, welche als Hauptziel eine weitere Kostenreduktion und die rasche Industrialisierung der Photovoltaik verfolgt. In den technologisch besonders wichtigen Ländern wie Deutschland, Japan und USA werden die Photovoltaikforschung intensiviert und ambitionöse Ziele formuliert [1,2]. Ähnlich ist Europa mit der Solar Europe Industry Initiative bestrebt, weiterhin eine führende Rolle auf diesem Gebiet zu spielen. Parallel dazu findet marktseitig eine rasante Kostenreduktion statt, welche einerseits die Wettbewerbsfähigkeit der Photovoltaik mit anderen Energieträgern laufend erhöht, andererseits innerhalb der Photovoltaikindustrie zu einem stark verschärften Wettbewerb führt.

In der Forschung geht es um die anhaltende Weiterentwicklung der bestehenden Photovoltaik-Technologien sowie die Entwicklung neuer Materialoptionen und Konzepte. Nebst dem Kerngebiet der verschiedenen Solarzellen-Technologien beinhaltet die Photovoltaikforschung auch technologiespezifische Themen auf der Systemebene, z. B. der Gebäudeintegration, der elektrischen Systemtechnik oder der Um-

weltindikatoren und des Recyclings. Mit der derzeit anhaltenden Kostenreduktion bilden System übergreifende Aspekte wie die Netzintegration, die Speicherung oder energetische Konzepte im Gebäude immer wichtigere Themen der Forschung. Neue Erkenntnisse und Resultate aus der Forschung werden möglichst rasch in die Industrie übergeführt.

Die Photovoltaik als möglicher wesentlicher Pfeiler einer nachhaltigen Stromversorgung hat in relevanten Szenarien weiter an Bedeutung gewonnen: Die im Jahr 2010 publizierte Photovoltaik-Roadmap der Internationalen Energie Agentur IEA [3] spricht bis 2050 von einem möglichen Beitrag von mehr als 10 % zur weltweiten Stromversorgung, ein Wert der von vielen Akteuren aus der Photovoltaik als untere Grenze angesehen wird. In aktuellen Schweizer Energieszenarien wird von der Photovoltaik bis 2050 ein Beitrag von mindestens 10 TWh Elektrizität als möglich erachtet [4].

In den letzten 25 Jahren hat sich eine starke Schweizer Position in verschiedenen Gebieten der Photovoltaikforschung herausgebildet: Im Vordergrund stehen die Entwicklungen von verschiedenen Dünnschicht-Technologien, welche schon immer den Schwerpunkt der Schweizer Photovoltaikforschung bildeten. Ausgehend von Arbeiten an neuen Solarzellen-Konzepten wurden diese sukzessiv in die industrielle Umsetzung übergeführt. Heute findet neben der Forschung an Instituten und Hochschulen auch seitens der Industrie

eine intensive Technologieentwicklung statt, welche mittlerweile zu einer entlang der ganzen Wertschöpfung der Photovoltaik bedeutenden Schweizer Industrie geführt hat.

Laufende Aktivitäten in Forschung und Entwicklung sowie Projekte im Bereich von Pilot- und Demonstrationsanlagen umfassen im Berichtsjahr 2011 rund 70 Projekte, wobei alle der Programmleitung bekannten Projekte mit einer Förderung der öffentlichen Hand berücksichtigt sind. Nebst den durch das Bundesamt für Energie (BFE) geförderten Projekten und den Schwerpunkten einzelner Hochschulen und Forschungsinstitute spielen KTI- und EU-Projekte im Forschungsprogramm Photovoltaik eine tragende Rolle.

Das Forschungsprogramm Photovoltaik des BFE verfolgte in der Periode 2008–2011 die folgenden Ziele [5,6]:

- Senkung der Kosten der Solarzellen und -module;
- Steigerung des Wirkungsgrades (Solarzellen);
- Senkung des Material- und Energieeinsatzes;
- Vereinfachung und Standardisierung der elektrischen Systemtechnik; Steigerung der Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Wechselrichtern;
- Erhöhung der Verfügbarkeit und der Vielfalt industrieller Produkte.

IEA Klassifikation: 3.1.2 Photovoltaics

Schweizer Klassifikation: 2.1.2 Photovoltaik

## Programmschwerpunkte

Das Forschungsprogramm Photovoltaik ist in folgende fünf Bereiche aufgeteilt (die in Klammern angegebene Klassifizierung bezieht sich auf die Liste der Projekte, Seite 135 ff.):

### *Solarzellen (1a-e)*

Verschiedene materialspezifische Ansätze zu Dünnschichtsolarzellen stellen hier den wichtigsten Schwerpunkt dar (Silizium, Verbindungshalbleiter, organische Materialien). Verstärkt werden Heteroübergänge zwischen Dünnschicht- und kristallinem Silizium untersucht. Organische und Polymer-solarzellen als mögliche langfristige Technologieoptionen gewinnen an Bedeutung. Ausserdem findet Grundlagenforschung an elektrochemisch abgeschiedenen Schichten statt.

### *Module und Gebäudeintegration (2a-e)*

Das Gebiet der Solarmodule ist im Forschungsprogramm Photovoltaik eng mit der Anwendung der Gebäudeintegration verbunden. Im Vordergrund stehen Modultechnologien, welche mit den in der Schweiz entwickelten Solarzellen einhergehen.

### *Elektrische Systemtechnik (3)*

Bei der elektrischen Systemtechnik, insbesondere bei Wechselrichtern, steht die Qualitätssicherung im Vordergrund, einschliesslich entsprechender Normen. Ein in Zukunft wichtiger werdendes Thema ist die Wechselwirkung mit dem elektrischen Netz und die Integration der Photovoltaik ins Netz.

### *Begleitende Themen (4)*

Zum einen geht es hier um relevante technische und nicht technische Themen zur Marktentwicklung (z. B. Hilfsmittel, Monitoring, Umweltaspekte). Andererseits sind hier auch auf andere Energiethemen übergreifende Projekte (z. B. Gebäude, Mobilität, Speicherung) angesiedelt.

### *Institutionelle internationale Zusammenarbeit (5)*

Sie erfolgt einerseits projektbezogen auf allen Gebieten und andererseits im Rahmen des Implementing Agreements Photovoltaic Power System Programme (PVPS) der Internationalen Energieagentur (IEA), der Europäischen Photovoltaik-Technologieplattform, der europäischen PV-ERA-Net-Kooperation (ERA: European Research Area), der neuen Solar Europe Industry Initiative (SEII) im Rahmen des SET-Plans und der Normen festlegenden Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC).

### **Rückblick und Bewertung 2011**

Gemessen an der Anzahl laufender Projekte mit öffentlicher Finanzierung und der gesamthaft gemeldeten Forschungsprojekte [7] kann eine Verstärkung der Photovoltaik-Forschungsaktivitäten beobachtet werden. Allerdings ist diese Erhöhung weiterhin in erster Linie auf Erfolge mit KTI- und EU-Projekten zurückzuführen. Die zur spezifischen Förderung der Photovoltaik verfügbaren Mittel des BFE sind im Jahr 2011 weiter zurückgegangen. Diese Entwicklung ist insofern Besorgnis erregend, als die BFE-Mittel primär zur Wahrung des Kompetenzvorsprungs der beteiligten Institute auf ihren Spezialgebieten eingesetzt werden. Ausserdem steht diese Entwicklung im Widerspruch zu den jüngsten energiepolitischen Signalen; sie ist damit für die Forschungsgemeinschaft schwierig nachvollziehbar.

### **Ausblick**

Es zeichnet sich anfangs der Dekade 2011–2020 immer mehr ab, dass dieses Jahrzehnt für die Photovoltaik weltweit eine kritische Zeit ist, welche massgebend über den mittelfristigen Erfolg dieser jungen Energietechnologie bestimmen wird. Für die Photovoltaikindustrie hat der Wettbewerb im letzten Jahr deutlich zugenommen und erste Insolvenzen grösserer Unternehmen leiten eine Konsolidierungsphase in der Industrie ein. Dies mag aus Sicht des wachsenden Marktes mit der damit einhergehenden raschen Kostenreduktion eine willkommene Entwicklung sein. Sie stellt aber die Photovoltaikindustrie weltweit vor gewaltige Herausforderungen. Dazu kommt die schwierige globale Wirtschaftslage, welche zusätzliche Herausforderungen nach sich zieht.

Aus Schweizer Sicht gilt es deshalb umso mehr, diesen Zeitraum optimal zu nutzen, um die Photovoltaikforschung als innovative Kompetenz-Grundlage der Schweizer Photovoltaikindustrie zu positionieren und in dieser Hinsicht weiter zu verstärken. Optimal wird dies mittels einer Stärkung der Forschung und der institutionellen Kapazitäten zur raschen Umsetzung von Forschung in die Industrie erreicht. Dahingehende Initiativen sollten so rasch wie möglich konkretisiert und auf eine mittelfristig feste Grundlage gestellt werden. Eine starke Schweizer Photovoltaik braucht mehr denn je auch eine starke Photovoltaikforschung.

## Highlights aus Forschung und Entwicklung

Seit vielen Jahren setzt sich das Forschungsprogramm Photovoltaik zum Ziel, zu den einzelnen Teilbereichen Kompetenzzentren mit nationaler und internationaler Ausstrahlung zu fördern. Im Jahr 2011 sind dies das Photovoltaik-Labor (PV-Lab) an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne (EPFL) (Silizium-Dünnschicht-Solarzellen), das Institut of chemical sciences and engineering (ISIC) an der EPFL (Farbstoff-Solarzellen), die Empa (Verbindungshalbleiter- und organische Solarzellen), die Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana (SUPSI, Solarmodule und Gebäudeintegration) und die Berner Fachhochschule HTI Burgdorf (elektrische Systemtechnik).

Forschung und Entwicklung auf kristallinen Solarzellen ist in der Schweiz weit gehend Sache der Industrie. Ein Grossteil der öffentlichen Photovoltaikforschung befasst sich mit neuen Solarzellen auf der Grundlage von Dünnschicht-Technologien. Die wesentlichen Technologieansätze betreffen Dünnschicht-Silizium (zur Hauptsache am PV-Lab der EPFL) sowie Dünnschicht-Verbindungshalbleiter CIGS und CdTe (Empa). Die rasche Kostenreduktion bei den kristallinen Solarzellen zwingt die Vertreter der Dünnschicht-Technologien, ihre Konzepte kosten- und effizienzmassig noch rascher weiter zu entwickeln.

Wachsende Tätigkeiten finden zudem auf dem Gebiet der organischen Solarzellen (Empa, ZHAW) statt. Auf der exploratorischen Ebene werden neue Solarzellen auf der Grundlage von elektrochemisch abgeschiedenen, sehr dünnen Absorberschichten erforscht.

Die Qualitätssicherung hat seit vielen Jahren ihren festen Stellenwert in der Photovoltaik Forschungslandschaft. Die Prüfung von Solarmodulen und deren Verhalten bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen ist die Kernkompetenz des Istituto sostenibilità applicato all'ambiente costruito (ISAAC) an der SUPSI. Komplementär dazu wird an der Fachhochschule in Burgdorf das Verhalten von Wechselrichtern und Systemen untersucht. Beide Institute betreiben Prüflabors, in welchen Solarmodule oder Wechselrichter gemäss gängigen Normen geprüft werden können.



Figur 1: Neues PECVD Depositionssystem Octopus von Indeotec am PV-Lab des IMT mit automatischer Beladung von 10 Proben (Bildquelle: PV-Lab, IMT, EPFL).

Im Folgenden werden aktuelle Resultate aus den bedeutenden Arbeitsgebieten der Dünnschicht-Solarzellen vertieft.

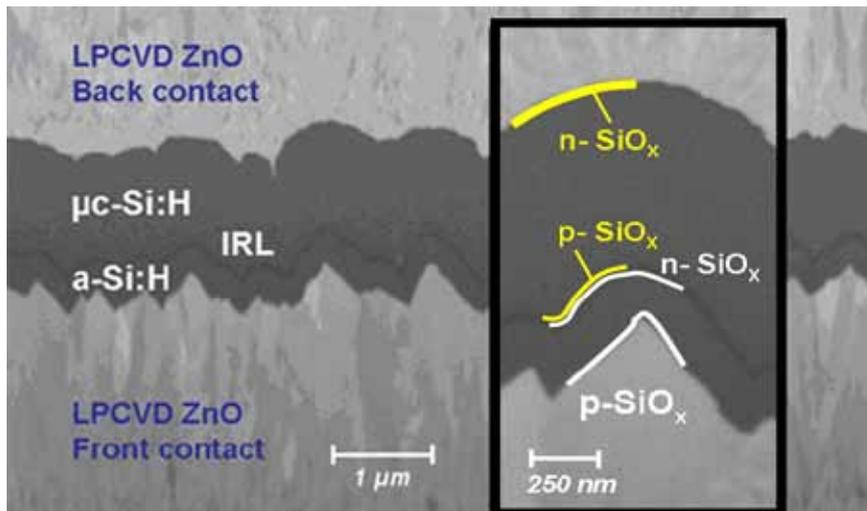
### Dünnschicht Silizium – mit Nanostrukturen und neuen Materialkombinationen zu höchsten Wirkungsgraden

Auf dem Gebiet des Dünnschicht-Siliziums hat sich am PV-Lab der EPFL in Neuchâtel im Verlauf der Zeit ein Cluster von Projekten herausgebildet, welcher verschiedenste Materialvarianten und Prozessschritte beinhaltet: Zur Optimierung der Dünnschicht-Silizium-Solarzellen in ihren verschiedenen Ausprägungen stehen zahlreiche Parameter zur Verfügung. Neben Art, Anzahl und Umfang der aktiven Schichten, welche zur Hauptsache aus amorphem und mikrokristallinem Silizium bestehen, spielen Dotierung, Fenster- und Zwischenschichten, Art der Deposition, usw. wichtige Rollen. Ziel der laufenden Optimierung und neuer Ansätze ist es letztlich, den Wirkungsgrad der Solarzellen zu erhöhen. Eine wachsende Rolle spielen dabei kontrollierte Strukturen und Zwischenschichten im Nanometerbereich. Entsprechend komplex ist der Weg zu verbesserten Solarzeleigenschaften, welche auch noch den Anforderungen an grossflächige industrielle Prozesse gerecht werden müssen.

Am PV-Lab der EPFL finden eng verwandte Forschungsprojekte zu ver-

schiedenen Fragestellungen rund um die Dünnschicht-Silizium-Solarzellen auf den Substraten Glas und Kunststoff sowie in Kombination zu kristallinen Silizium-Solarzellen statt. Die zu beantwortenden Forschungsfragen beinhalten das grundlegende Verständnis einzelner Prozesse und Schichten ebenso wie den Aufbau ganzer Solarzellen und neuerdings auch von Kleinmodulen. Die Übertragbarkeit der Forschungsergebnisse auf den industriellen Massstab bildet eine zentrale Aufgabe, bei welcher eine zunehmende Anzahl von Industrieunternehmen mit dem PV-Lab zusammenarbeitet. Damit wachsen auch die Anforderungen an eine leistungsfähige Labor-Infrastruktur, welche in der Lage sein muss, rasch reproduzierbare Resultate zu liefern (Figur 1).

Wichtige Arbeiten im Sinn der Kernkompetenz am PV-Lab finden im BFE-Projekt Silizium-Dünnschicht-Solarzellen und -module zur weiteren Verbesserung der mikromorphen Solarzelle (Kombination aus amorphem und mikrokristallinem Silizium) statt. Die laufende Phase dieses Projektes wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Im vierten und letzten Projektjahr stand die Verwendung von fortgeschrittenen Materialien und optischen Nanostrukturen im Vordergrund. Die Struktur der nanokristallinen Siliziumoxid-Zwischenschichten, welche aufgrund ihrer positiven Eigenschaften inzwischen in den meisten Laborzellen eingesetzt werden, konnte analysiert und damit besser verstanden werden (Figur 2). Für die

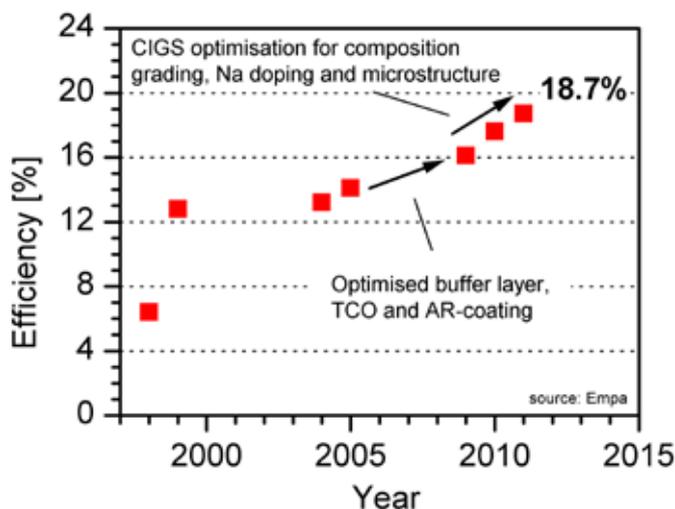


Figur 2: Elektronenmikroskopische Aufnahme von dotierten nanokristallinen  $\text{SiO}_x$  Schichten, welche bessere optische und elektrische Eigenschaften von mikromorphen Silizium-Dünnschichtsolarzellen ermöglichen (Bildquelle: PV-Lab, IMT, EPFL).

transparenten leitenden Oxidschichten wurde ein neuer Nanoprägeprozess von Zinkoxidschichten entwickelt. Damit gelingt es, das Zusammenspiel zwischen Oberflächenmorphologie, Lichteinfang und elektrischen Eigenschaften der Zelle gezielter zu beeinflussen. Durch die Kombination einer transparenten, nanogeprägten Textur aus Indiumoxid, einer dotierten Zinkoxidschicht mit kleinskaliger Textur konnte eine mikromorphe Laborzelle mit einem neuen Rekord-Anfangswirkungsgrad von 14,1 % erzeugt werden. Mit optimierten Schichten konnte zudem für eine Einfachzelle aus mikrokristallinem Silizium ein Laborrekord

von 10,9 % erreicht werden. Diese Arbeiten werden durch das neue anwendungsnahe EU-Projekt PEPPER ergänzt.

Die nachgewiesenen Optimierungsmöglichkeiten durch die Erzeugung von Strukturen im Nanometerbereich stellen nicht triviale Anforderungen für deren Umsetzung im industriellen Massstab. Das EU-Projekt N2P (Nano to Production) befasst sich mit dieser Fragestellung und untersucht insbesondere die Möglichkeiten von Plasmaprozessen bei Atmosphärendruck. Im Vordergrund steht für das PV-Lab das Wachstum von strukturierten Zinkoxid-Schichten als leitende Oxidschicht (TCO).



Figur 3: Hocheffiziente flexible CIGS Dünnschichtsolarzellen: Entwicklung des Wirkungsgrades, neuer Weltrekord 18.74 % (Bildquelle: Empa).

Dünnschicht-Siliziumsolarzellen auf Kunststoffsubstraten bilden weiterhin ein Thema am PV-Lab. Auch hier sind Materialeigenschaften und Lichteinfang die zentralen Fragestellungen, welche im EU-Projekt Si-LIGHT untersucht werden. Mikromorphe Tandemsolarzellen erreichten 11,8 % stabilisierten Wirkungsgrad.

Als weitere Stossrichtung der Solarzellenforschung am PV-Lab kommt das bekannte Konzept eines Heteroübergangs zwischen verschiedenen Schichten aus kristallinem und amorphem bzw. mikrokristallinem Silizium zur Anwendung (HIT-Zelle). Mit diesem Ansatz lassen sich hoch effiziente Solarzellen herstellen. Im EU-Projekt 20PLUS erreichte das PV-Lab hierzu einen Wirkungsgrad von 21,2 %.

### CIGS Solarzellen – neuer Wirkungsgrad-Weltrekord für flexible Solarzellen

Die derzeit wichtigsten Vertreter der Verbindungshalbleiter-Solarzellen sind CIGS und CdTe. Letztgenannte Technologie hat sich in den vergangenen Jahren als weltweit führende Dünnschichttechnologie etabliert mit einer Produktion im GW-Massstab (First Solar) und ist der Referenzwert für die Wettbewerbsfähigkeit von Dünnschicht-Solarzellen. CIGS-Solarzellen werden erst in kleinerem Umfang produziert, bergen aber ein grosses Effizienzpotenzial. Nebst diesen Hauptvertretern der Verbindungshalbleiter-Solarzellen werden weltweit neue Materialvarianten erforscht, insbesondere in der Materialklasse der Kesteriten.

In der Schweiz hat sich auf diesem Gebiet das Labor für Dünne Schichten und Photovoltaik an der Empa als leistungsfähige Forschungseinheit etabliert. Das Labor arbeitet im Rahmen von BFE-, EU-, KTI- und weiteren Projekten an unterschiedlichen Fragestellungen zu CIGS-Solarzellen. Dabei interessieren auch bei dieser Technologie die Materialeigenschaften, Depositionsprozesse und -temperaturen (sowohl unter Vakuum, als auch bei Atmosphärendruck), die notwendigen Pufferschichten und die Substratwahl. Von besonderem Interesse sind flexible

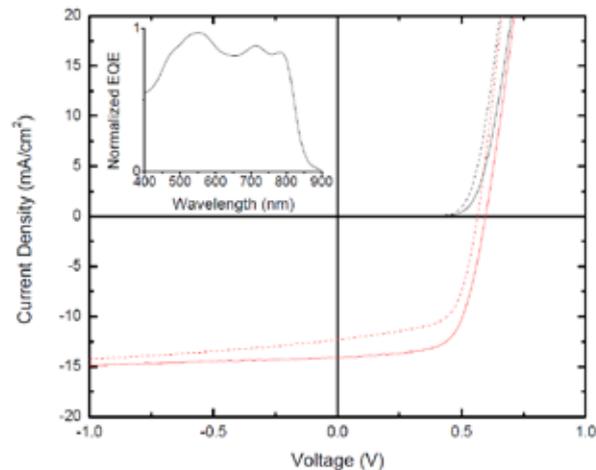
Solarzellen auf Kunststoffsubstraten. Hier erfolgt eine intensive Zusammenarbeit mit dem Empa-Spin-off-Unternehmen FLISOM.

Im BFE-Projekt FEBULAS werden mit dem Ziel Cd-freier Solarzellen die Möglichkeiten von und die Solarzeleigenschaften mit alternativen Pufferschichten zu CdS untersucht. Mit einer Pufferschicht auf der Grundlage von  $\text{In}_2\text{S}_3$  wurde bisher ein Wirkungsgrad von 12,6 % erreicht. Dieser reicht allerdings noch nicht an die Eigenschaften der mit CdS Schichten realisierten Solarzellen, für welche Mini-Module mit 13,3 % Wirkungsgrad erreicht wurden. Dieses Resultat steht stellvertretend für die Forschung an Cd-freien CIGS-Solarzellen.

Im EU-Projekt HIPO-CIGS wurde mit CdS ein neuer Rekordwirkungsgrad für flexible Solarzellen von 18,7 % (Figur 3) erzielt. Damit konnte gezeigt werden, dass für flexible Solarzellen hohe Wirkungsgrade möglich sind und der Höchstwert wohl noch nicht erreicht ist.

Als kostentreibender Faktor gelten die bei CIGS Solarzellen notwendigen Ausgangsmaterialien und deren Depositionsprozesse (z. B. Verdampfen, Molekularstrahlepitaxie MBE). Im BFE-Projekt IMPUCIS wird in Zusammenarbeit mit dem belgischen Industriepartner Umicore der Einfluss von unterschiedlichen Materialreinheiten erforscht. Im Berichtsjahr wurde der Einfluss von Eisenverunreinigungen untersucht, welche einen besonders starken Einfluss auf die Solarzellen-Eigenschaften haben. Die bisherigen Resultate von hohen Wirkungsgraden mit Ausgangsmaterialien geringerer Reinheit konnten bestätigt werden. Mit der neuen Molekularstrahlepitaxie-Anlage wurden CIGS Solarzellen bei unterschiedlichen Temperaturen (450 und 600 °C) abgeschieden. Es konnte gezeigt werden, dass auch bei der tieferen Temperatur mit geeigneten Prozessen hohe Wirkungsgrade möglich sind.

Als Alternative zu den aufwändigen, vakuumbasierten Verfahren zur Herstellung von CIGS Solarzellen werden vermehrt die Möglichkeiten von vakuumfreien Prozessen untersucht. Das EU-Projekt NOVA-CI(G)S befasst sich mit dieser Fragestellung. Im Berichtsjahr wurden mit ersten CIGS



Figur 4: Stromspannungskennlinien von Polymer-Solarzellen durch Spin Coating (ausgezogene rote Linie, Wirkungsgrad 5,5 %) und Inkjet Druckverfahren (unterbrochene rote Linie, Wirkungsgrad 4,4 %) (Bildquelle: ZHAW).

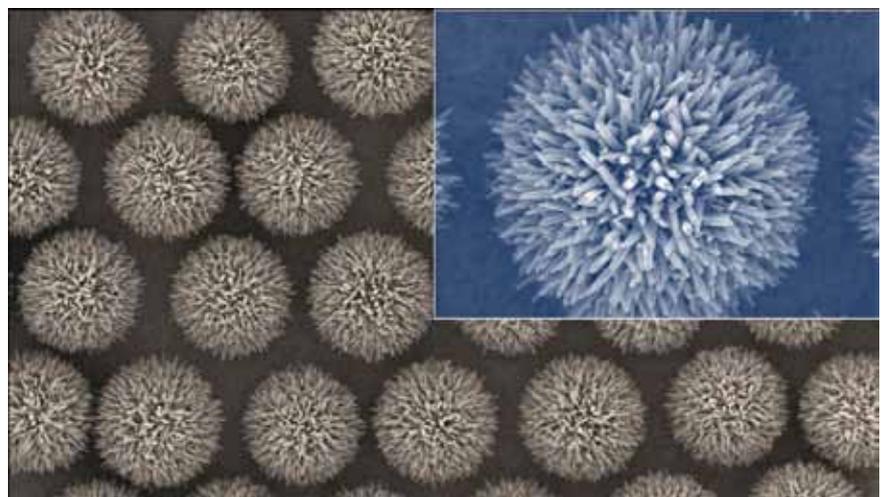
Solarzellen auf der Grundlage von Nanopartikel-Precursor-Dispersionen ein Wirkungsgrad von 4,8 % erreicht.

### Organische und andere neue Materialansätze – Neuste Grundlagenresultate

Während sich die bekannten Solarzellentechnologien immer stärker in Richtung industrielle Prozesse und Umsetzung bewegen, entwickeln sich in der Grundlagenforschung neue Materialansätze, welche das Spektrum der künftigen Photovoltaiktechnologien ergänzen können. Auch wenn diese Ansätze die Photovoltaikanwendun-

gen der nächsten Jahre noch nicht unmittelbar beeinflussen werden, ist die Erforschung neuer Lösungen mittel- und langfristig dennoch wichtig. Die folgenden Beispiele zeigen neue Forschungsergebnisse, welche in den mehr grundlagenorientierten Gebieten der organischen Solarzellen und der elektrochemisch abgeschiedenen ETA-Solarzellen erzielt wurden. Mehrere Projekte kamen in diesem Bereich im Berichtsjahr zum Abschluss:

Die Abteilung Funktionspolymere an der Empa entwickelte im BFE-Projekt HIOS-CELL im Rahmen der europäischen PV-ERA-NET Zusammenarbeit eine neue Bulk-Heterojunction zwischen Cyanin-Farbstoffen und PCBM Fullerenen. Als Resultate der grund-



Figur 5: Elektronenmikroskop Aufnahmen von elektrochemisch abgeschiedenen Zinkoxid Nanostrukturen als Grundlage für ETA (extremely thin absorber) Solarzellen (Bildquelle: Empa).

legenden Arbeiten konnten Morphologie, Ionenlöslichkeit und ein Modell des neuen Systems erarbeitet werden. Erste Solarzellen mit tiefen Wirkungsgraden von  $< 1\%$  wurden ebenfalls hergestellt, wobei das vorliegende System materialspezifisch weiter entwickelt werden muss.

Näher an den bereits erprobten Ansätzen der organischen Solarzellen war das BFE-Projekt Apollo an der ZHAW, in welchem ebenfalls im internationalen PV-ERA-NET Kontext aufgrund von Erfahrungen aus der Kunststoff-

elektronik neue Ansätze für druckbare organische Solarzellen mittels Tintenstrahldrucker entwickelt wurden. Durch Spin-Coating abgeschiedene Solarzellen erreichten Wirkungsgrade von  $6\%$ , die gedruckten organischen Solarzellen zeigten beachtliche Wirkungsgrade bis zu  $4,5\%$  (Figur 4). Zudem konnten Tandemzellen mit bis bis zu  $6\%$  Wirkungsgrad erreicht werden.

Ein grundlegend anderer Ansatz wurde im BFE-Projekt ETA Solar Cell an der Abteilung Werkstoff- und Nanomechanik der Empa verfolgt. Hier wurden auf

Polystyrol-Kugeln durch Atomic Layer Deposition ZnO-Nanoschichten und anschliessend elektrochemisch Nano-drähte abgeschieden. Dadurch wurden hohe spezifische, igelartige Oberflächen erzielt (Figur 5). Als Lichtabsorber wurden darauf CdSe Schichten und anschliessend CuSCN abgeschieden. Die optischen Eigenschaften dieses Materialsystems wurden bestimmt und erste Solarzellen gebaut. Dabei wurde ein Wirkungsgrad von  $1,3\%$  erreicht.

## Pilot- und Demonstrationsprojekte

Als Schwerpunkt stehen neue Ansätze im Bereich der Photovoltaik Gebäudeintegration im Vordergrund. Typische Themen sind hier der Unterbau und das Montagesystem, der Aufbau des Solarmoduls, ein hoher Integrationsgrad oder Zusatzfunktionen am Bau. Photovoltaik-Indachsysteme übernehmen neben der Stromproduktion die Funktion der Wasser führenden Dachhaut.

Das ISAAC an der SUPSI hat zum Thema der Photovoltaik-Gebäudeintegration einen Schwerpunkt gesetzt und erarbeitet in mehreren übergreifenden Projekten umfassende Analysen und Lösungsansätze. Dieses Wissen wird im BRENET-Netzwerk weiter entwickelt ([www.bipv.ch](http://www.bipv.ch)).

Im neuen BFE-Projekt PV Foamglas sollen die Photovoltaikmodule neben der Stromproduktion und der Funktion der Dachhaut auch die Wärme- und Schalldämmung übernehmen. Dieser Ansatz stellt insbesondere in Bezug auf das thermische Verhalten der Photovoltaikanlage eine Herausforderung dar. Hierzu erarbeiten die Partner Basler & Hofmann und Pittsburgh Corning Schweiz geeignete Lösungen, welche anschliessend in einer Demonstrationsanlage realisiert werden sollen.

Einen grundlegenden Ansatz verfolgt das P+D-Projekt Archinsolar, welches

verschiedene Partner und Förderorganisationen (BFE, swisslectric research, SIG, CCEM) vereint. Es geht darum, Silizium-Dünnschichtsolarmodule mittels kolorierten Interferenzfiltern so zu gestalten, dass unterschiedliche Farben möglich werden. Damit soll eine neue und energetisch effizientere Art der Farbgebung von Solarmodulen erzielt werden. Im Berichtsjahr konnte ein erstes Terra-Cotta-farbiges Demonstrationsmodul realisiert werden. Neben der ästhetischen Funktion werden auch die Aspekte der Zuverlässigkeit und der Lebensdauer des neuen Ansatzes untersucht.

### Photovoltaik Gebäudeintegration – ästhetische und funktionale Integration

2011 schloss 3S Swiss Solar Systems das BFE-Projekt SmartTile eines neuen Photovoltaik-Indachsystems mit den Messungen eines ganzen Betriebsjahrs einer Pilotanlage ab (Figur 6). Mit diesem Ansatz können Photovoltaik und Solarthermie in einem System vereint werden. Für die Photovoltaik-Anlage von  $9,6\text{ kW}_p$  Leistung konnte ein jährlicher Energieertrag von  $11'225\text{ kWh}$  ermittelt werden, was einem spezifischen Ertrag von  $1'169\text{ kWh/kW}_p$  entspricht.



Figur 6: Gebäudeintegrierte Photovoltaik-Pilotanlage ( $9,6\text{ kW}_p$ ) mit dem neuen Smart-Tile System (Bildquelle: 3S Swiss Solar Systems).

## Nationale Zusammenarbeit

Im Berichtsjahr wurde die vielfältige nationale Zusammenarbeit in verschiedenen, zum Teil übergreifenden Projekten weiter gepflegt. Damit findet innerhalb der Schweizer Photovoltaik-Gemeinschaft aus Forschung, Industrie und Anwendung ein reger Austausch statt. Die Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen konnte weiter intensiviert werden, sowohl in neuen Projekten mit der KTI, als auch in der Form von direkten Mandaten der Industrie an ausgewählte Forschungsinstitute. Auf Programmebene wurde die Zusammenarbeit mit vielen Stellen des Bundes, der Kantone und der Elektrizitätswirtschaft weiter gepflegt.

Die weltweit sehr dynamische Entwicklung der Photovoltaik, die jüngsten energiepolitischen Entwicklungen im

Zusammenhang mit der Fukushima-Katastrophe sowie die KTI-Sondermassnahmen Starker Franken haben für die Schweizer Photovoltaik für viel Hektik gesorgt und zahlreiche Diskussionen sowie neue Projekte ausgelöst.

Eine Arbeitsgruppe mit Vertretern der führenden Forschungsinstitute und der Industrie hat sich intensiv mit dem Masterplan Photovoltaik 2020, welcher auf der Grundlage des Masterplans Cleantech erarbeitet werden soll, befasst. Aufgrund der raschen Änderung der Randbedingungen auf allen Ebenen konnte dieses Strategiepapier noch nicht abgeschlossen werden. Es soll im ersten Halbjahr 2012 weiter konkretisiert und einer breiten Vernehmlassung unterzogen werden.

## Internationale Zusammenarbeit

Die institutionelle Zusammenarbeit innerhalb der IEA, der IEC und der europäischen Netzwerkprojekte wurde im Berichtsjahr kontinuierlich fortgesetzt. Auf der Projektebene konnte die Zusammenarbeit innerhalb der EU in bestehenden und neuen Projekten sehr erfolgreich fortgesetzt werden. Im Jahr 2011 waren es 23 Projekte im 7. Rahmenforschungsprogramm der EU.

Die Beteiligung am Photovoltaikprogramm der IEA (IEA PVPS) wurde im Berichtsjahr fortgesetzt, sowohl auf der Projektebene als auch im Executive Committee (ExCo).

Die Firma Nova Energie vertritt die Schweiz in Task 1 des Implementing Agreements (IA) PVPS der IEA, welcher allgemeine Informationsaktivitäten zur Aufgabe hat. Im Berichtsjahr wurde ein weiterer nationaler Bericht über die Photovoltaik in der Schweiz bis 2010 [8] ausgearbeitet. Auf dieser Grundlage wurde die 16. Ausgabe des jährlichen internationalen Berichtes (Trends Report) über die Marktentwicklung der Photovoltaik in den IEA-Ländern erstellt [9].

Im Rahmen der interdepartementalen (SECO, DEZA, BAFU, BFE) Plattform REPIC zur Förderung der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz in der internationalen Zusammenarbeit [10] leistet das Beratungsunternehmen Entec den Schweizer Beitrag zum IA PVPS Task 9 über die Photovoltaik-Entwicklungszusammenarbeit. Dieses Projekt befasst sich mit der nachhaltigen Verbreitung der Photovoltaik in Entwicklungsländern und thematisiert auch Aspekte der solaren Wasserversorgung.

ESU Services vertritt die Schweiz im IA PVPS Task 12 zu Umwelt-, Sicherheits- und Gesundheitsaspekten der Photovoltaik. In diesem Projekt sollen industriell möglichst aktuelle, relevante und international abgeglichene Informationen zu diesem bedeutenden Thema aufgear-

beitet und publiziert werden. Im Berichtsjahr erschien eine neue Publikation zu Lebenszyklusanalysen (LCA) der Photovoltaik [11].

TNC vertritt die Schweiz im neuen IA PVPS Task 13 zu Performance und Zuverlässigkeit von Photovoltaikanlagen. Eine Arbeitsgruppe unter Leitung von Planair vertritt die Schweiz im neuen IA PVPS Task 14 zur hohen Penetration von PV-Anlagen in elektrischen Netzen.

Das Unternehmen Meteotest und die Groupe Energie an der Universität Genf erbringen zusammen den Schweizer Beitrag zum Task 36 Solar resource knowledge management. Task 36 ist Bestandteil des IA Solare Wärme und Kälte (SHC) der IEA, inhaltlich ist es jedoch für alle Solartechnologien relevant. Dementsprechend erfolgt eine Zusammenarbeit mit den weiteren IA zur Solarenergie (IA PVPS und IA SolarPACES). In diesem Projekt wird die Qualität verschiedener Strahlungsmodelle und daraus abgeleiteter Produkte verglichen und optimiert.

Ähnlich erfolgt im Task 41 Solar Energy and Architecture des IA SHC eine Mitwirkung der Schweiz durch die HSLU (CCTP) und das ISAAC an der SUPSI. Auch hier finden Photovoltaik-relevante Aktivitäten statt.

Basler & Hofmann vertritt die Schweiz im Auftrag von Swissolar im TC 82 der IEC zu Photovoltaik-Normen.

Die Beteiligung am EU-Projekt PV-ERA-Net, welches Programmkoordinationsstellen und verantwortliche Ministerien unter dem ERA-Net-Schema zusammengeführt hatte, wurde im Berichtsjahr von den beteiligten Ländern als selbst getragenes Netzwerk weiter verfolgt [12]. Das Sekretariat ist bei der Programmleitung Photovoltaik angesiedelt.

Die Schweiz ist in der Europäischen Photovoltaik-Technologie-Plattform sowohl im Steuerungsausschuss, als auch in der Mirror Group vertreten [13]. Die von der Europäischen Kommission lancierte Solar Europe Industry Initiative soll im Rahmen eines neuen Solar ERA-Net-

Projektes konkretisiert werden. Die Programmleitung Photovoltaik koordiniert dieses Vorhaben, welches im Februar 2012 bei der Europäischen Kommission eingereicht wird.

## Referenzen

[1] *Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, Das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, BMWi (2011).*

[2] *SunShot Vision Study, US DOE (2012).*

[3] *IEA Technology Roadmap Solar photovoltaic energy, OECD/IEA, ([www.iea.org/papers/2010/pv\\_roadmap.pdf](http://www.iea.org/papers/2010/pv_roadmap.pdf)) (2010).*

[4] *Grundlagen für die Energiestrategie des Bundesrates, BFE (2011).*

[5] *Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 bis 2011, CORE/BFE (2007).*

[6] *Energieforschungsprogramm Photovoltaik für die Jahre 2008–2011, BFE (2008).*

[7] *Projektliste der Energieforschung des Bundes 2008–2009, BFE (2011).*

[8] *National Survey Report of PV Power Applications in Switzerland 2010, BFE (2011).*

[9] *Trends in Photovoltaic Applications, Survey Report of selected IEA countries between 1992 and 2010, IEA-PVPS T1–20 (2011).*

[10] *Interdepartementale Plattform zur Förderung der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz in der internationalen Zusammenarbeit, REPIC ([www.repic.ch](http://www.repic.ch)).*

[11] *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems, IEA-PVPS T12-02 (2011).*

[12] *The Photovoltaic European Research Area Network, PV-ERA-Net ([www.pv-era.net](http://www.pv-era.net)).*

[13] *European Photovoltaic Technology Platform ([www.eupvplatform.org](http://www.eupvplatform.org)).*

## Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(\* IEA-Klassifikation)

- NEW PROCESSES AND DEVICE STRUCTURES FOR THE FABRICATION OF HIGH EFFICIENCY THIN FILM SILICON PHOTOVOLTAIC MODULES** R+D (1a) 3.1.2\*

Lead: EPFL STI IMT-NE PV-LAB	Funding: BFE
Contact: Ballif Christophe <a href="mailto:christophe.ballif@epfl.ch">christophe.ballif@epfl.ch</a>	Period: 2007–2011

Abstract: New processes and device structures for the fabrication of high efficiency thin film silicon photovoltaic modules. Focus is on layers with new or better properties, on improved processes, on improved devices and on enhanced cells and modules reliability.
- PEPPER – PROCESSES AND EQUIPMENTS FOR THIN FILM SILICON PV MODULES PRODUCED WITH LOWER ENVIRONMENTAL IMPACT AND REDUCED COST AND MATERIAL USE** R+D (1a) 3.1.2

Lead: EPFL STI IMT-NE PV-LAB	Funding: SBF/EU
Contact: Ballif Christophe <a href="mailto:christophe.ballif@epfl.ch">christophe.ballif@epfl.ch</a>	Period: 2010–2013

Abstract: The FP7 EU PEPPER project aims at achieving high efficiency (11%) micromorph (amorphous/microcrystalline silicon tandem) modules at low cost (CoO ≤ 0.5 €/Wp) while reducing the environmental impact of fabrication processes.
- FLEXIBLE PRODUCTION TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT BASED ON ATMOSPHERIC PRESSURE PLASMA PROCESSING FOR 3D NANO STRUCTURED SURFACES (N2P)** R+D (1a) 3.1.2

Lead: EPFL STI IMT-NE PV-LAB	Funding: SBF/EU
Contact: Ballif Christophe <a href="mailto:christophe.ballif@epfl.ch">christophe.ballif@epfl.ch</a>	Period: 2008–2012

Abstract: The overall objective of the project "N2P" (Nano to Production) is to develop and substantially enhance the position of Europe in the science, application and production technologies of surface 3D nano-structuring.
- IMPROVED MATERIAL QUALITY AND LIGHT TRAPPING IN THIN FILM SILICON SOLAR CELLS (SILOCON\_LIGHT)** R+D (1a) 3.1.2

Lead: EPFL STI IMT-NE PV-LAB	Funding: SBF/EU
Contact: Ballif Christophe <a href="mailto:christophe.ballif@epfl.ch">christophe.ballif@epfl.ch</a>	Period: 2010–2012

Abstract: The project Si-Light is devoted to the investigation of n-i-p solar cells on flexible substrates with focus on material quality, interface properties, and light management.
- INTERFACE TEXTURING FOR LIGHT TRAPPING IN SOLAR CELLS** R+D (1a) 3.1.2

Lead: EPFL STI IMT-NE PV-LAB	Funding: SNF
Contact: Ballif Christophe <a href="mailto:christophe.ballif@epfl.ch">christophe.ballif@epfl.ch</a>	Period: 2009–2011

Abstract: The project is devoted to a fundamental understanding of the light trapping process in solar cells.
- A NEW LOW ION ENERGY BOMBARDMENT PECVD REACTOR FOR THE DEPOSITION OF THIN FILM SILICON FOR SOLAR CELL APPLICATIONS.** R+D (1a) 3.1.2

Lead: EPFL CRPP	Funding: KTI
Contact: Hollenstein Christoph <a href="mailto:christophe.hollenstein@epfl.ch">christophe.hollenstein@epfl.ch</a>	Period: 2008–2012

Abstract: A novel electrode configuration is proposed for improved plasma-enhanced chemical vapour deposition of films such as amorphous silicon and micro-crystalline silicon.
- ZWEIDIMENSIONALE NANOSTRUKTUREN FÜR SILIZIUM-SOLARZELLEN** R+D (1a) 3.1.2

Lead: PSI Paul Scherrer Institut	Funding: BFE
Contact: Gobrecht Jens <a href="mailto:jens.gobrecht@psi.ch">jens.gobrecht@psi.ch</a>	Period: 2008–2012

Abstract: Numerische Simulation von zweidimensionalen Nanostrukturen für Silizium-Solarzellen.

- **ALL-INORGANIC NANO-ROD BASED THIN-FILM SOLARCELLS ON GLASS (ROD-SOL)** R+D (1a) 3.1.2

Lead: EMPA Thun	Funding: SBF/EU
Contact: Michler Johann <a href="mailto:johann.michler@empa.ch">johann.michler@empa.ch</a>	Period: 2009–2011

Abstract: The ROD-SOL project aims at the synthesis of Si nano-rods, densely packed at sufficiently large diameters (few 100 nm's) and lengths (>1µm) directly on cheap substrates like glass or flexible metal foils.
- **HIGH EFFICIENCY THIN-FILM PASSIVATED SILICON SOLAR CELLS AND MODULES – THIFIC: THIN FILM ON CRYSTALLINE SI** R+D (1b) 3.1.2

Lead: EPFL STI IMT-NE PV-LAB	Funding: Axpo Naturstrom
Contact: Ballif Christophe <a href="mailto:christophe.ballif@epfl.ch">christophe.ballif@epfl.ch</a>	Period: 2007–2011

Abstract: The THIFIC project aims at developing a new kind of ultra-high efficiency (20-22%) solar cells by depositing very thin silicon layers of amorphous and/or microcrystalline silicon on top of silicon wafers.
- **20 PERCENT EFFICIENCY ON LESS THAN 100 µM THICK INDUSTRIALLY FEASIBLE C-SI SOLAR CELLS (20PLµS)** R+D (1b) 3.1.2

Lead: EPFL STI IMT-NE PV-LAB	Funding: SBF/EU
Contact: Ballif Christophe <a href="mailto:christophe.ballif@epfl.ch">christophe.ballif@epfl.ch</a>	Period: 2010–2013

Abstract: The guiding principle of the 20PLµS project is to develop new and innovative process steps for wafer fabrication and solar cell and module manufacturing, taking into consideration the transfer of the processes to a pilot production line.
- **ULTRA-HIGH CONDUCTIVITY METALLIZATION PASTES FOR HETEROJUNCTION SOLAR CELLS (TCOC)** R+D (1b) 3.1.2

Lead: EPFL STI IMT-NE PV-LAB	Funding: KTI
Contact: Ballif Christophe <a href="mailto:christophe.ballif@epfl.ch">christophe.ballif@epfl.ch</a>	Period: 2009–2011

Abstract: The TCOC project aims at developing nano-enabled low temperature curable silver pastes exhibiting very low resistivity compatible with high efficiency heterojunction solar cells (HJC).
- **FEBULAS** R+D (1c) 3.1.2

Lead: EMPA Dübendorf	Funding: BFE
Contact: Tiwari Ayodhya N. <a href="mailto:ayodhya.tiwari@empa.ch">ayodhya.tiwari@empa.ch</a>	Period: 2009–2011

Abstract: FEBULAS – Flexible CIGS Solar Cells and Mini-Modules on polymer without – or with alternative buffer layer. Focus is on Cd-free buffer layers.
- **IMPUCIS** R+D (1c) 3.1.2

Lead: EMPA Dübendorf	Funding: BFE
Contact: Tiwari Ayodhya N. <a href="mailto:ayodhya.tiwari@empa.ch">ayodhya.tiwari@empa.ch</a>	Period: 2009–2012

Abstract: Influence of impurities on the performance of CIGS thin film solar cells. Focus is on achieving good performance CIGS solar cells with reduced material quality.
- **HIPOCIGS – NEW CONCEPTS FOR HIGH EFFICIENCY AND LOW COST IN-LINE MANUFACTURED FLEXIBLE CIGS SOLAR CELLS** R+D (1c) 3.1.2

Lead: EMPA Dübendorf	Funding: SBF/EU
Contact: Tiwari Ayodhya N. <a href="mailto:ayodhya.tiwari@empa.ch">ayodhya.tiwari@empa.ch</a>	Period: 2010–2012

Abstract: The HIPO-CIGS project aims at the development of cost efficient flexible solar cells and modules based on the compound semiconductor CIGS.

- **NOVA-CI(G)S – NON-VACUUM PROCESSES FOR DEPOSITION OF CI(G)S ACTIVE LAYER IN PV CELLS** R+D (1c) 3.1.2
- Lead: EMPA Dübendorf Funding: SBF/EU  
 Contact: Tiwari Ayodhya N. ayodhya.tiwari@empa.ch Period: 2010–2013  
 Abstract: NOVA-CI(G)S proposes alternative, non-vacuum deposition processes for thin film CI(G)S photovoltaic cells. The low capital intensive, high throughput, high material yield processes are expected to deliver large area uniformity and optimum composition of cells.
- **MULTIFUNCTIONAL BACK ELECTRICAL CONTACT FOR FLEXIBLE THIN FILM SOLAR CELLS** R+D (1c) 3.1.2
- Lead: EMPA Dübendorf Funding: KTI  
 Contact: Tiwari Ayodhya Nath ayodhya.tiwari@empa.ch Period: 2009–2011  
 Abstract: The project will demonstrate development of next generation of high efficiency CIGS flexible thin film solar cells and monolithically interconnected modules based on 'alternative multilayer electrical back contact' that provides multi-functionality and overcomes the problems of conventionally used electrical back contact.
- **ALL LASER SCRIBING OF CIGS PHOTOVOLTAIC PANELS ON RIGID SUBSTRATES: FEASIBILITY STUDY** R+D (1c) 3.1.2
- Lead: BFH Funding: KTI  
 Contact: Romano Valerio valerio.romano@bfh Period: 2011  
 Abstract: All laser based scribing of thin film photovoltaics such as CIGS or CdTe would represent an enormous step forward from the cost and technological points of view. This study should demonstrate the feasibility of all laser CIGS scribing as a first step for an efficient all laser scribing machine.
- **APOLLO – EFFICIENT AREAL ORGANIC SOLAR CELLS VIA PRINTING** R+D (1d) 3.1.2
- Lead: ZHAW ICP Funding: BFE  
 Contact: Ruhstaller Beat beat.ruhstaller@zhaw.ch Period: 2008–2011  
 Abstract: This project aims to combine plastic electronics expertise in Europe for realizing organic solar cells for empowering printed electronics applications.
- **HIOS-CELL** R+D (1d) 3.1.2
- Lead: EMPA Dübendorf Funding: BFE  
 Contact: Heier Jakob jakob.heier@empa.ch Period: 2009–2011  
 Abstract: The project explores nanoscale structuring of heterojunction ionic organic solar cells by liquid-liquid dewetting.
- **FABRI-PV -TRANSPARENT FABRIC ELECTRODES FOR ORGANIC PHOTOVOLTAICS** R+D (1d) 3.1.2
- Lead: EMPA Dübendorf Funding: KTI  
 Contact: Nüesch Frank frank.nuesch@empa.ch Period: 2009–2011  
 Abstract: Solar cells require at least one transparent electrode which are commonly made of transparent conducting metal-oxide films (TCOs) since they ally excellent conductivity and high optical transmission in the visible domain. The project explores transparent fabric electrodes for organic photovoltaics (FABRI-PV).
- **NEUARTIGE SENSIBILISATOREN FÜR FARBSTOFFSOLARZELLEN: SQUARAIN- UND HEPTAMETHINFARBSTOFFE MIT EINER GROSSEN SPEKTRALEN VIELFALT OBERHALB 700 NM.** R+D (1d) 3.1.2
- Lead: EMPA Dübendorf Funding: KTI  
 Contact: Nüesch Frank frank.nuesch@empa.ch Period: 2009–2012  
 Abstract: Was für die Pflanzen bzw. für die Photosynthese die komplexen Chlorophyllmoleküle sind, sind für Solarzellen heutzutage photosensitive anorganische und organische Materialien, die in gleicher Weise wie das Chlorophyll effizient Licht absorbieren und in Energie umwandeln können. Die Entwicklung solcher organischer Materialien für Farbstoffsolarzellen ist das Ziel des Projektes.

- **ESCORT – EFFICIENT SOLAR CELLS BASED ON ORGANIC AND HYBRID TECHNOLOGY** R+D (1d) 3.1.2
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | EPFL ISIC-LPI                                | Funding: | SBF/EU    |
| Contact: | Graetzel Michael<br>michael.graetzel@epfl.ch | Period:  | 2010–2013 |
- Abstract: The project's objectives are to exploit the joint leadership of the top European and Indian academic and industrial Institutions to foster the wide-spread uptake of Dye-Sensitized Solar Cells technology, by improving over the current state of the art by innovative materials and processes.
- **MOLESOL – ALL-CARBON PLATFORMS FOR HIGHLY EFFICIENT MOLECULAR WIRE-COUPLED DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS** R+D (1d) 3.1.2
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | EPFL ISIC-LPI                                | Funding: | SBF/EU    |
| Contact: | Graetzel Michael<br>michael.graetzel@epfl.ch | Period:  | 2010–2013 |
- Abstract: The proposed project comes with a visionary approach, aiming at development of highly efficient molecular-wire charge transfer platform to be used in a novel generation thin film dye-sensitized solar cells fabricated via organic chemistry routes. The proposed technology combines the assembled dye monolayer's, linked with organic molecular wires to semiconducting thin film deposited on optically transparent substrates.
- **ORDERED INORGANIC-ORGANIC HYBRIDS USING IONIC LIQUIDS FOR EMERGING APPLICATIONS (ORION)** R+D (1d) 3.1.2
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | Solaronix SA                           | Funding: | SBF/EU    |
| Contact: | Meyer Toby<br>toby.meyer@solaronix.com | Period:  | 2009–2013 |
- Abstract: The ORION project puts together a multidisciplinary consortium of leading European universities, research institutes and industries with the overall goal of developing new knowledge on the fabrication of inorganic-organic hybrid materials using ionic liquids.
- **DURSOL – EXPLORING AND IMPROVING DURABILITY OF THIN FILM SOLAR CELLS** R+D (1d) 3.1.2
- |          |                                      |          |           |
|----------|--------------------------------------|----------|-----------|
| Lead:    | EMPA                                 | Funding: | diverse   |
| Contact: | Nüesch Frank<br>frank.nuesch@empa.ch | Period:  | 2011–2013 |
- Abstract: The project's objectives are focused towards the understanding of fundamental degradation phenomena in thin film solar cells and enhancement of lifetime.
- **NUMERICAL SIMULATION, DESIGN AND FABRICATION OF EXTREMELY THIN ABSORBER SOLAR CELLS** R+D (1d) 3.1.2
- |          |                               |          |           |
|----------|-------------------------------|----------|-----------|
| Lead:    | ZHAW EMPA Thun                | Funding: | BFE       |
| Contact: | Loeser Martin<br>loma@zhaw.ch | Period:  | 2011–2012 |
- Abstract: This joint research focuses on combining both numerical and experimental methods to analyze and improve the optical efficiency of extremely thin absorber (ETA) solar cells.
- **UPCON – ULTRA-PURE NANOWIRE HETEROSTRUCTURES AND ENERGY CONVERSION** R+D (1d) 3.1.2
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | EPFL                                       | Funding: | SBF/EU    |
| Contact: | Vaccaro Luciana<br>luciana.vaccaro@epfl.ch | Period:  | 2010–2014 |
- Abstract: This proposal is devoted to the synthesis of ultra pure semiconductor nanowire heterostructures for energy conversion applications in the photovoltaic domain.
- **SANS – SENSITIZER ACTIVATED NANOSTRUCTURED SOLAR CELLS** R+D (1d) 3.1.2
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | EPFL ISIC-LPI                                | Funding: | SBF/EU    |
| Contact: | Graetzel Michael<br>michael.graetzel@epfl.ch | Period:  | 2011–2013 |
- Abstract: Plastic electronics and solution-processable inorganic semiconductors can revolutionise the photovoltaic industry due to their relatively easy and low cost processability (low embodied energy). The project aims at achieving significant progress in the materials for this type of solar cells.

- **DEPHOTEX – DEVELOPMENT OF PHOTOVOLTAIC TEXTILES BASED ON NOVEL FIBRES** R+D (1d) 3.1.2
- Lead: Greatcell solar AG Funding: SBF/EU  
 Contact: Brooks Keith Period: 2008–2011  
 Abstract: The goal of the project is to research and develop photovoltaic cells in order to get flexible photovoltaic textiles based on novel fibres allowing taking benefit from the solar radiation so as to turn it into energy.
- **MESOLIGHT – MESOSCOPIC JUNCTIONS FOR LIGHT ENERGY HARVESTING AND CONVERSION** R+D (1d) 3.1.2
- Lead: EPFL Funding: SBF/EU  
 Contact: Vaccaro Luciana luciana.vaccaro@epfl.ch Period: 2010–2015  
 Abstract: Research will focus on the generation of electric power by mesoscopic solar cells. The target is to increase the photovoltaic conversion efficiency from currently 11 to over 15 percent rendering these new solar cells very attractive for applications in large areas of photovoltaic electricity production.
- **ETA SOLAR CELL – EXTREMELY THIN ABSORBER SOLAR CELLS BASED ON ELECTRODEPOSITED ZNO NANOSTRUCTURES** R+D (1e) 3.1.2
- Lead: EMPA Thun Funding: BFE  
 Contact: Laetitia Philippe laetitia.philippe@empa.ch Period: 2009–2011  
 Abstract: The aim of the "ETA solar cells" project is to study separately the different materials used for the fabrication of this kind of photovoltaic device in order to improve the solar efficiency.
- **NANOSPEC – NANOMATERIALS FOR HARVESTING SUB-BAND-GAP PHOTONS VIA UPCONVERSION TO INCREASE SOLAR CELL EFFICIENCIES** R+D (1e) 3.1.2
- Lead: Universität Bern, Dep. Chemie & Biologie Funding: SBF/EU  
 Contact: Krämer Karl karl.kraemer@iac.unibe.ch Period: 2010–2013  
 Abstract: Fundamental loss mechanisms limit the maximum achievable efficiency: around 20% of the incident power is lost, because photons with energies below the band-gap are transmitted. Upconversion of two low energy photons into one usable photon reduces these losses. In this project we will realize upconversion with the help of nanostructures and nanotechnology-based materials and show a significant improvement in solar cell efficiency.
- **INNOVATIVE MATERIALS FOR FUTURE GENERATION EXCITONIC SOLAR CELLS** R+D (1e) 3.1.2
- Lead: Solaronix SA Funding: SBF/EU  
 Contact: Meyer Andreas andreas.meyer@solaronix.com Period: 2009–2012  
 Abstract: The main objective is to leapfrog current limitations of third-generation PV devices through a drastic improvement of the materials used for assembling excitonic solar cells.
- **PLASMONS GENERATING NANOCOMPOSITE MATERIALS (PGNM) FOR 3RD GENERATION THIN FILM SOLAR CELLS (SOLAMON)** R+D (1e) 3.1.2
- Lead: Solaronix SA Funding: SBF/EU  
 Contact: Meyer Toby toby.meyer@solaronix.com Period: 2009–2011  
 Abstract: The objective of the SOLAMON project is to develop high potential Plasmon Generating Nanocomposite Materials (PGNM) which will pave the way to the generation III solar cells (high efficiency & low cost).
- **ADVANCED LASERS FOR PHOTOVOLTAIC INDUSTRIAL PROCESSING ENHANCEMENT (ALPINE)** R+D (1e) 3.1.2
- Lead: Oclaro (Switzerland) AG Funding: SBF/EU  
 Contact: Schmid Manuel www.oclaro.com Period: 2009–2012  
 Abstract: ALPINE aims to push forward the European research and development of fiber laser systems for the scribing of photovoltaic modules, joining together two exciting challenges: the fiber laser development for advanced industrial processing and the solar energy exploitation.

- SOLARGLAS PV**

Lead: **SPF / HSR**

Contact: **Stefan Brunold** stefan.brunold@solarenergy.ch

Abstract: In this project the existing certificate for "solar glass", originally developed for solar thermal collectors, is adapted to the special properties of crystalline solar cells, which are directly laminated onto the tested glass. For the certification different factors are defined in order to classify the tested glasses in several performance groups.

R+D (2a) 3.1.2

Funding: **BFE**

Period: **2011–2012**
- SMARTTILE: INNOVATIVE PHOTOVOLTAIK INDACHLÖSUNG**

Lead: **3S Swiss Solar Systems AG**

Contact: **Szacs vay Tamás** tamas.szacs vay@3-s.ch

Abstract: Die zunehmende Industrialisierung der Fertigungsprozesse von Photovoltaik (PV) Modulen eröffnet neue Möglichkeiten für die Massenfertigung. Im Projekt SmartTile wird ein neues Solardachelement nach neusten Erkenntnissen entwickelt.

P+D (2a) 3.1.2

Funding: **BFE**

Period: **2008–2011**
- UNIQUE AND INNOVATIVE SOLUTION OF THIN SILICON FILMS MODULES BUILDING INTEGRATION**

Lead: **EPFL STI IMT-NE PV-LAB**

Contact: **Ballif Christophe** christophe.ballif@epfl.ch

Abstract: This project aims to develop and test a new generation of photovoltaic building elements based on thin film silicon technology (single amorphous and tandem amorph/microcrystalline cells).

P+D (2a) 3.1.2

Funding: **BFE**

Period: **2010–2013**
- PROFILED PHOTOVOLTAIC MODULES**

Lead: **EPFL-STI-IMX-LTC**

Contact: **Leterrier Yves** yves.leterrier@epfl.ch

Abstract: The objective of this collaboration is to develop a materials system and process for profiled encapsulation of thin film silicon photovoltaic devices with improved efficiency for structured roofing elements.

R+D (2a) 3.1.2

Funding: **KTI**

Period: **2009–2012**
- TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT FOR LOW-COST PV BITUMINOUS-MODIFIED ROOFING MEMBRANE WITH INTEGRATION OF FLEXIBLE THIN-FILM SILICON PV MODULES (PV-GUM)**

Lead: **VHF Technologies SA**

Contact: **Fischer Diego** diego.fischer@flexcell.com

Abstract: The PV-GUM project aims at developing new manufacturing technologies and equipments which will produce a low cost highly efficient flexible BIPV solar cell on a bituminous roofing membrane.

R+D (2a) 3.1.2

Funding: **SBF/EU**

Period: **2010–2013**
- BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAICS THERMAL ASPECTS**

Lead: **SUPSI ISAAC**

Contact: **Frontini Francesco** francesco.frontini@supsi.ch

Abstract: PV industries offering products that can be integrated as building materials represent so far a niche but promising market. The intentions of this project are to: Analyze building integrated PV products in order to define their electrical and thermal characteristics. Analyze the interaction between these materials and the building. Demonstrate what BiPV modules look like and how to integrate them into the building concept.

R+D (2a) 3.1.2

Funding: **BFE**

Period: **2009–2011**
- LARGE AREA SOLAR SIMULATOR INTEGRATING POWER LIGHT EMITTING DIODES FOR PERFORMANCE MEASUREMENT OF NEW GENERATIONS OF PHOTOVOLTAIC MODULES (SUNSIM)**

Lead: **EPFL STI IMT-NE PV-LAB**

Contact: **Ballif Christophe** christophe.ballif@epfl.ch

Abstract: High precision solar simulators will become crucial to characterize the next generation of low cost PV modules. In this project, a new large area characterization tool, satisfying criteria on homogeneity, spectrum, and temporal stability will be developed, prototyped and tested.

R+D (2b) 3.1.2

Funding: **KTI**

Period: **2009–2011**

- **OPTIMIZATION OF THIN FILM MODULE TESTING AND PV MODULE ENERGY RATING AT SUPSI** R+D (2c) 3.1.2

Lead: SUPSI ISAAC	Funding: BFE
Contact: Friesen Gabi <a href="mailto:gabi.friesen@supsi.ch">gabi.friesen@supsi.ch</a>	Period: 2011–2014

Abstract: This project aims to improve the measurement accuracy for thin film technologies through the definition of new test procedures and the up-grade of the test equipment.
- **MOBILES PV MESSSYSTEM** P+D (2c) 3.1.2

Lead: ZHAW IEFE	Funding: diverse
Contact: Baumgartner Franz <a href="mailto:franz.baumgartner@zhaw.ch">franz.baumgartner@zhaw.ch</a>	Period: 0

Abstract: Ein Messsystem für PV-Module ist auf einem Kleinbus montiert und erlaubt so Messungen von PV-Modulen an einem beliebigen Ort. Damit können langwierige Transporte von grösseren Mengen von zu testenden Modulen vermieden werden.
- **PHOTOVOLTAIK IM VERBUND MIT DÄMMSTOFF FOAMGLAS** P+D (2d) 3.1.2

Lead: Basler & Hofmann AG	Funding: BFE
Contact: Bucher Christof <a href="mailto:christof.bucher@baslerhofmann.ch">christof.bucher@baslerhofmann.ch</a>	Period: 2010–2013

Abstract: In diesem Projekt soll mindestens ein Produkt aus PV und FOAMGLAS entwickelt werden.
- **APPLICATION DE MODULES PV FLEXIBLES SUR LE SITE DE PRODUCTION FLEXCELL** P+D (2d) 3.1.2

Lead: VHF Technologies SA	Funding: BFE
Contact: Fischer Diego <a href="mailto:diego.fischer@flexcell.com">diego.fischer@flexcell.com</a>	Period: 2009–2012

Abstract: The goal of this project is to develop, install and monitor various building integrated PV products and installation solutions based on Flexcell's technology on buildings of Flexcell's production site in Yverdon.
- **PHOTOVOLTAÏQUE ET NEIGE: HORIZON DES SOLUTIONS POUR L'INSTALLATION SUR LES TOITS DANS LES RÉGIONS ENNEIGÉES** P+D (2d) 3.1.2

Lead: Planair SA	Funding: BFE
Contact: Perret Lionel <a href="mailto:lionel.perret@planair.ch">lionel.perret@planair.ch</a>	Period: 2011–2014

Abstract: Seven different photovoltaic fields and three snow clearing solutions were implemented. Measures on different parameters such as production and consumption of each field will occur during the winters of 2012, 2013 and 2014. The evaluation of the measures will enable to determine snow impact and compare different photovoltaic technologies and snow clearing solutions.
- **BISOL – BUILDING INTEGRATED SOLAR NETWORK – BRENET** R+D (2e) 3.1.2

Lead: SUPSI ISAAC	Funding: BFE
Contact: Rudel Roman <a href="mailto:roman.rudel@supsi.ch">roman.rudel@supsi.ch</a>	Period: 2008–2011

Abstract: The aim of the BiSol project is to create a competence network between specialists from various stakeholders so as to maximize solar energy integration into the built environment and overcome the related technical and non technical issues.
- **BIPV TOOLS** WTT (2e) 3.1.2

Lead: SUPSI ISAAC	Funding: BFE
Contact: Frontini Francesco <a href="mailto:francesco.frontini@supsi.ch">francesco.frontini@supsi.ch</a>	Period: 2009–2011

Abstract: The BiPV Tools project is addressed specifically to architects. Its aim is to provide information and tools which will allow a correct and appropriate integration of photovoltaics into the building design concept.

- **TEXTILE PHOTOVOLTAICS: INTEGRATION OF MINIATURIZED SOLAR MODULES ON TEXTILES BY EMBROIDERY TECHNIQUES** R+D (2e) 3.1.2

Lead:	NTB	Funding:	KTI
Contact:	Gutsche Martin <a href="mailto:martin.gutsche@ntb.ch">martin.gutsche@ntb.ch</a>	Period:	2010–2012

Abstract: Im Projekt Textile Photovoltaik werden durch die Kombination von bestehenden Techniken miniaturisierte Solarmodule hergestellt und mittels Sticktechnik zu einem neuen Gewebeverbund verarbeitet. Die erarbeiteten Techniken erlauben es zum ersten Mal, vollflexible Flächengebilde mit photovoltaischer Funktion zu erzeugen.
- **PHOTOVOLTAIK SYSTEMTECHNIK 2007 – 2010** R+D (3) 3.1.2

Lead:	HTI Burgdorf	Funding:	BFE
Contact:	Häberlin Heinrich <a href="mailto:heinrich.haeberlin@bfh.ch">heinrich.haeberlin@bfh.ch</a>	Period:	2007–2011

Abstract: Bau eines neuen Solargenerator-Simulators von 100 kW zusätzlich zu den bisherigen Geräten von 20 kW und 25 kW. Wartung und laufende Weiterentwicklung der Mess-Software der vorhandenen Solargenerator-Simulatoren.
- **SOLAR WINGS: SEIL-BASIERTES PHOTOVOLTAIK-NACHFÜHRSYSTEM 2-ACHSIG** P+D (3) 3.1.2

Lead:	PAMAG Engineering	Funding:	BFE
Contact:	Kessler Hugo <a href="mailto:hke.pamag@flumroc.ch">hke.pamag@flumroc.ch</a>	Period:	2009–2011

Abstract: Im Pilotprojekt Solar Wings wird erstmalig das Verhalten eines Seil-basierten 2-achsig nachgeführten Photovoltaiksystems erprobt und mit einer fix installierten Anlage verglichen.
- **AUTONOMOUS CLEANING ROBOT FOR LARGE SCALE PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS IN EUROPE RESULTING IN 5% COST REDUCTION OF ELECTRICITY (PV-SERVITOR)** R+D (3) 3.1.2

Lead:	HTI Burgdorf	Funding:	SBF/EU
Contact:	Häberlin Heinrich <a href="mailto:heinrich.haeberlin@bfh.ch">heinrich.haeberlin@bfh.ch</a>	Period:	2009–2011

Abstract: The PV-Servitor project focuses on concepts for a fully autonomous cleaning robot for ground mounted large scale photovoltaic power plants consisting of several 100 kW units. The PV-Servitor shall be able to automatically clean glass surfaces of solar modules in several areas of up to 2,500 square meters in an unrestricted way.
- **PV TESTANLAGE DIETIKON** P+D (3) 3.1.2

Lead:	ZHAW IEFE	Funding:	diverse
Contact:	Baumgartner Franz <a href="mailto:franz.baumgartner@zhaw.ch">franz.baumgartner@zhaw.ch</a>	Period:	

Abstract: In einer Testanlage werden verschiedene Photovoltaik-Modultechnologien erprobt und miteinander verglichen.
- **SIMULATION APPROACH TO INVESTIGATE THE IMPACT OF DISTRIBUTED POWER GENERATION WITH PHOTOVOLTAICS ON A POWER GRID (PV ERA NET PROJECT PV+GRID\_06\_DPVG)** R+D (3) 3.1.2

Lead:	Basler & Hofmann AG	Funding:	BFE
Contact:	Bucher Christof <a href="mailto:christof.bucher@baslerhofmann.ch">christof.bucher@baslerhofmann.ch</a>	Period:	2010–2012

Abstract: Simulation Approach to Investigate the Impact of Distributed Power Generation with Photovoltaics on a Power Grid. The project addresses the important topic of grid integration of variable production from photovoltaics.
- **MESSKAMPAGNE PHOTOVOLTAIK SCHALLSCHUTZANLAGE MÜNSINGEN** P+D (4) 3.1.2

Lead:	TNC Consulting AG	Funding:	BFE
Contact:	Nordmann Thomas <a href="mailto:nordmann@tnc.ch">nordmann@tnc.ch</a>	Period:	2009–2011

Abstract: In dieser Messkampagne wird das Verhalten der bifacialen Photovoltaik Schallschutzanlage beim Bahnhof Münsingen (Kt. BE) analysiert.

- **RESOURCE- AND COST-EFFECTIVE INTEGRATION OF RENEWABLES IN EXISTING HIGH-RISE BUILDINGS (COST-EFFECTIVE)** R+D (4) 3.1.2

Lead:	Emmer Pfenninger Partner AG	Funding:	SBF/EU
Contact:	andreas.emmer@eppag.ch	Period:	2008–2012

Abstract: The main focus of the project is to convert facades of existing “high-rise buildings” into multifunctional, energy gaining components. This goal will be achieved by: development of integrated building concepts, development of new multi-functional façade components and development of new business and cost models.
- **NORMENARBEIT FÜR PV SYSTEME** WTT (4) 3.1.2

Lead:	Basler & Hofmann AG	Funding:	Swissolar
Contact:	peter.toggweiler@baslerhofmann.ch	Period:	2007-

Abstract: Normen sind ein wichtiges Instrument zur Qualitätssicherung sowie zum sicheren und zuverlässigen Betrieb von PV-Anlagen. Das Projekt umfasst den Schweizer Beitrag zu den entsprechenden Arbeiten im IEC Technischen Komitee 82.
- **SCHWEIZER BEITRAG IEA PVPS TASK 1 – EXCHANGE AND DISSEMINATION OF INFORMATION ON PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS** R+D (5) 3.1.2

Lead:	Nova Energie GmbH	Funding:	BFE
Contact:	pius.huesser@novaenergie.ch	Period:	2011

Abstract: IEA PVPS Task 1 befasst sich mit Informationsaufgaben zum Stand der Photovoltaik in den Mitgliedsländern des IEA PVPS Programms. Dazu leistet dieses Projekt den Schweizer Beitrag, insbesondere zur Entwicklung von Industrie und Markt sowie des regulatorischen Kontextes.
- **SCHWEIZER BEITRAG IM IEA PVPS PROJEKT TASK 9 „PHOTOVOLTAIC SERVICES FOR DEVELOPING COUNTRIES“** R+D (5) 3.1.2

Lead:	Entec	Funding:	REPIC
Contact:	alex.arter@entec.ch	Period:	1999–2012

Abstract: Gestützt auf die umfangreichen weltweiten Erfahrungen mit Photovoltaik Anlagen in Entwicklungsländern, strebt dieses Projekt die Erhöhung von erfolgreich und nachhaltig betriebenen Anlagen dieser Art für unterschiedliche Zwecke an. Die internationale Expertengruppe umfasst auf diesem Gebiet eine breite Projekterfahrung und konzentriert ihre Arbeit insbesondere auf die nicht-technischen Aspekte dieser Anwendungen.
- **SCHWEIZER BEITRAG IEA PVPS TASK 12 – PV ENVIRONMENTAL HEALTH & SAFETY ISSUES** R+D (5) 3.1.2

Lead:	ESU-Services AG	Funding:	BFE
Contact:	frischknecht@esu-services.ch	Period:	2011

Abstract: IEA PVPS Task 12 befasst sich mit Umweltaspekten der Photovoltaik ausgehend von Analysen in den Mitgliedsländern des IEA PVPS Programms. Dazu leistet dieses Projekt den Schweizer Beitrag, insbesondere zur Lebenszyklusanalyse (LCA) von PV-Systemen.
- **SCHWEIZER BEITRAG IEA PVPS TASK 13 – PERFORMANCE AND RELIABILITY OF PV SYSTEMS** R+D (5) 3.1.2

Lead:	TNC Consulting AG	Funding:	IEA PVPS Pool
Contact:	nordmann@tnc.ch	Period:	2011–2012

Abstract: IEA PVPS Task 13 befasst sich mit Performance und Zuverlässigkeit von PV-Komponenten und PV-Anlagen in den Mitgliedsländern des IEA PVPS Programms. Mit diesem Projekt wird der Schweizer Beitrag zu diesem neuen internationalen Vorhaben vorbereitet.
- **SCHWEIZER BEITRAG IEA PVPS TASK 14 – HIGH PENETRATION OF PV SYSTEMS IN ELECTRICITY GRIDS (SWISS CONTRIBUTION)** R+D (5) 3.1.2

Lead:	Planair	Funding:	IEA PVPS Pool
Contact:	pierre.renaud@planair.ch	Period:	2010–2014

Abstract: The main purpose of Task 14 is to analyze the role of grid connected PV as an important source in electric power systems on a high penetration level where additional efforts may be necessary to integrate the dispersed generation in an optimum manner. The aim of these efforts is to reduce the technical barriers to achieve high penetration levels of distributed renewable systems on the electric power system.



Pierre Renaud, Stefano Giamboni

# Solaire industriel à haute température



### **Page de couverture :**

#### **Projet du PSI: Solar Production of Zinc and Hydrogen – 100 kW Solar Pilot Reactor for ZnO Dissociation**

Première campagne de mesures en juin–juillet 2011 au Four Solaire de 1 MW (MWSF) d'Odeillo en France menée sur le réacteur pilote de 100 kW pour la dissociation thermique solaire du ZnO (porte de la tour du MWSF partiellement ouverte montrant l'impact du rayonnement sur l'écran de protection).

### **Programme de recherche OFEN Solaire industriel à haute température**

Rapport de synthèse 2011

#### **Mandant :**

Office fédéral de l'énergie OFEN  
CH-3003 Berne

#### **Chef de programme (auteur) :**

Pierre Renaud, Planair SA (pierre.renaud@planair.ch)

#### **Chef de domaine de l'OFEN :**

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

<http://www.bfe.admin.ch/forschungindustriesolar>

L'auteur de ce rapport porte seul la responsabilité de son contenu et de ses conclusions.

## Introduction

Une des ressources les plus abondantes sur la surface terrestre est la lumière du soleil. Des calculs montrent que, en couvrant seulement 0,1 % de la surface terrestre avec des collecteurs solaires d'un rendement de 20 %, on pourrait produire plus que l'énergie nécessaire à couvrir les besoins annuels actuels.

Parmi les systèmes de transformation du rayonnement solaire en énergie (thermique, électrique ou carburants), le solaire industriel à haute température a un rôle très important à jouer. Ses trois principales filières sont la thermochimie solaire, le solaire thermique dans les processus industriels et les centrales solaires thermiques pour la production d'électricité (CSP). Les avantages du solaire industriel à haute température se résument principalement dans la possibilité de stockage et transport de l'énergie solaire (atout majeur pour répondre aux pics de consommation et assurer une production en continu jour et nuit), la possibilité d'hybridation (p.ex. avec le gaz naturel) ainsi que la possibilité de créer des centrales multi-usages: électricité, chaleur haute et basse température (ex. d'applications: froid solaire ou désalinisation d'eau de mer). Par contre, les obstacles encore à franchir sont d'ordre scientifique et technique (p.ex. dans le domaine de la thermochimie solaire) ainsi qu'économiques (coûts légèrement trop élevés et rentabilité à améliorer pour le solaire thermique dans l'industrie et les CSP, difficulté à trouver les financements et à les mettre en relation avec les bons projets pour les CSP).

Les priorités des recherches en cours au niveau mondial dans le domaine de la thermochimie solaire sont mises

sur la production de carburant (hydrogène et gaz de synthèse) et de produits chimiques (Task II « Solar Chemistry Research » de l'Implementing Agreement « SolarPACES » de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) [1]). La technologie des processus solaires thermochimiques ouvre des perspectives prometteuses à long terme pour la fourniture de services énergétiques propres, efficaces et durables.

Contrairement à la chaleur solaire pour le chauffage de l'eau ou des bâtiments, l'utilisation de la chaleur solaire pour des processus industriels n'est pas encore très développée. En effet, moins de 100 systèmes en service sont recensés dans le monde, avec une capacité totale d'environ 24 MW<sub>th</sub> (34'000 m<sup>2</sup>). La plupart de ces systèmes sont de nature expérimentale et d'une taille relativement petite. Cependant, il y a un grand potentiel pour le développement du marché et des technologies vu que, p. ex. 28 % de la demande d'énergie globale dans les pays EU27 provient du secteur industriel et que la majorité de cette chaleur concerne des températures inférieures à 250 °C. Les principales activités en cours au niveau mondial dans ce domaine touchent le développement et les essais sur les collecteurs, l'intégration et l'amélioration des processus en combinaison avec la chaleur solaire ainsi que l'établissement de règles de construction, l'analyse de cas d'étude et la dissémination (Solar Heating and Cooling Programme (SHC) de l'AIE, Task 49 « Solar Process Heat for Production and Advanced Applications » [2]).

Concernant le CSP (cf. aussi [3]), la feuille de route de l'AIE prévoit plus de 1'000 GW installés et une production

de 4'050 TWh/an d'électricité solaire thermique dans le monde en 2050, presque autant que la production prévue pour le photovoltaïque, soit environ 11 % de la production d'électricité mondiale. Néanmoins, une analyse publiée par la société d'études de marche Pike Research à fin 2011 sur le développement du solaire thermique dans le monde, montre que la capacité installée devrait passer de 1,7 GW fin 2012 à 35 GW en 2020. Un résultat bien en dessous des 148 GW prévus par la feuille de route de l'AIE. Ceci est dû notamment à la concurrence du photovoltaïque dont les coûts de production sont aujourd'hui plus faibles. Pour que le solaire thermodynamique puisse à terme concurrencer le photovoltaïque, il faudra intensifier les efforts de R&D visant une baisse des coûts de production ainsi que miser sur l'hybridation et le stockage à grande échelle. D'après une étude de l'Association européenne de l'électricité solaire thermique (Estela), l'amélioration des technologies et les économies d'échelle résultant de la création de plus grandes centrales pourraient conduire à des coûts de production de l'électricité solaire thermique à 12 c€/kWh (45 à 60 % inférieurs aux coûts actuels). L'Espagne, avec 952 MW installés grâce à 23 centrales et 1'252 MW en construction, est assurément leader de la filière, devant les Etats-Unis. En outre les deux grands projets « Plan solaire méditerranéen » et « Desertec » visent la production d'électricité dans les pays à fort gisement solaire, pour l'exporter en partie vers l'Europe.

Classification de l'AIE : 3.1.3 Solar thermal power and high-temp. applications

Classification Suisse: 2.1.3 Ind. Solarenergienutzung

## Centres de gravité du programme

Le programme est structuré en trois axes principaux : la thermochimie solaire, la chaleur solaire dans les processus industriels et les CSP (concentrated solar power). Ces applications concernent des températures allant de 90 °C pour certains processus industriels jusqu'à 2'000 °C pour la thermochimie.

La recherche dans le domaine de la thermochimie est principalement axée sur la production de zinc par cycle thermo-chimique ZnO/Zn et est mené par le Paul Scherrer Institut (PSI).

Concernant la chaleur solaire pour des processus industriels, les points clés de la recherche sont l'engineering et l'implémentation. L'événement majeur en 2011 a été le lancement des activités du nouveau Centre de compétence CST (Concentrating Solar Thermal Energy) au SPF. En outre, la Suisse, par le SPF (HES Rapperswil), est le pays leader de la Subtask A « Process heat collector development and process heat collector testing » (Task 49 du programme SHC de l'AIE).

Dans le domaine du CSP, la recherche est principalement axée sur la modélisation, la simulation et les mesures de différents prototypes d'absorbeurs à air afin d'en optimiser l'échange de chaleur et d'en réduire les pertes de pression. De plus, un système de stockage de l'énergie thermique est en développement.

### Revue et évaluation 2011

Concernant la thermochimie solaire, une installation pilote de 100 kW pour la dissociation thermique solaire du ZnO a été conçue et fabriquée au PSI. Une première campagne de mesures a été conduite en juillet 2011 au Four

Solaire de 1 MW (MWSF) d'Odeillo en France. Son objectif était de tester globalement le réacteur ainsi que d'en optimiser la performance en mettant en œuvre une unité de séparation des gaz par trempage modifiée et en opérant à des températures plus élevées utilisant des matériaux résistants pour les parois du réacteur.

Une contribution importante à l'acquisition d'expérience et la collecte de données dans le domaine de la chaleur solaire pour les processus industriels est garantie par les cinq projets pilote et démonstration actuels. De manière générale, les résultats sont satisfaisants. Les premiers résultats du monitoring des trois installations en service à fin 2011 ont déjà mis en évidence quelques adaptations à apporter: nécessité de dissiper le surplus de chaleur en période de fort ensoleillement, optimisation de la simulation sur les résultats futurs (production annuelle de chaleur inférieure aux prévisions due à des simulations inadaptées) et planification des mises en service (retardée à cause du long délai de livraison des collecteurs).

Au niveau des CSP, les principaux résultats sont la poursuite du développement d'un absorbeur à air et l'amélioration de la modélisation et la réalisation d'un nouveau prototype du système de stockage de la chaleur en lit de galets. L'événement majeur de l'année est la signature par Airlight d'un accord pour la construction d'une première installation industrielle pilote au Maroc. Le champ solaire sera intégré dans un système de récupération de chaleur existant d'une cimenterie avec la production additionnelle d'électricité pour une puissance de 150 kW en continu.

### Perspectives

Dans le domaine de la thermochimie solaire, la phase actuelle du projet va être prolongée d'une année jusqu'à février 2013. En raison de la complexité de la réparation de la cavité du réacteur, la deuxième campagne expérimentale au Four Solaire de 1 MW (MWSF) a été reportée à juillet 2012. L'objectif global sera d'atteindre un rendement de production de Zn excédant 50 % et un rendement de conversion « énergie solaire-produit chimique » proche de 10 %.

Au niveau de la chaleur solaire dans l'industrie, outre l'intégration de deux nouvelles installations P&D dans des processus agroalimentaires et la suite du monitoring des trois installations déjà en service, un élément important pour 2012 sera représenté par les activités du Centre de compétence CST (Concentrating Solar Thermal Energy) au SPF.

La recherche sur les CSP se concentrera en 2012 sur la conception et l'analyse de nouvelles configurations pour l'absorbeur afin d'en améliorer les performances à des températures élevées ainsi que sur l'analyse du nouveau prototype de système de stockage de la chaleur en lit de galets avec simulations et mesures.

Une réflexion sera également initiée pour la mise en place d'une installation pilote à concentration permettant le test de matériaux, la formation d'ingénieurs et le développement de certaines technologies.

## Highlights Recherche et Développement

Les trois projets phares de recherche dans le cadre du programme concernent la production solaire de zinc par cycle thermochimique ZnO/Zn du PSI [4], le nouveau Centre de compétence CST au SPF [5] ainsi que le développement d'un système novateur CSP avec stockage de l'énergie thermique d'Air-light Energy [6]. Compte tenu de leur caractère plus appliqué, les deux derniers projets susmentionnés sont présentés plus en détail ci-après. Le projet du PSI sera présenté dans le rapport de synthèse 2012.

### Centre de compétence CST

L'Institut de technique solaire de la HES de Rapperswil (SPF) est le centre de compétence suisse pour le solaire thermique à basse température et est reconnu au niveau international dans ce domaine. L'objectif global du présent projet est d'élargir les compétences du SPF aux domaines des collecteurs à concentration et de l'intégration de la chaleur solaire dans les processus industriels. En particulier, le SPF vise à occuper un rôle central au niveau international dans le domaine des « Concentrating Solar Thermal Energy » (CST). Pour ce faire, les activités suivantes spécifiques aux différents domaines des CST doivent être basées sur le savoir-faire actuel du SPF:

- Adaptation de la spectroscopie pour la caractérisation des tubes absorbeurs et des miroirs ainsi que mesure de vieillissement des couches des absorbeurs dans le domaine « Composants »;
- Mesures des performances de collecteurs pour la chaleur dans les processus industriels (notamment à concentration) dans le domaine « Collecteurs »;
- Relevés techniques des mesures et analyse de systèmes solaires thermiques dans les processus industriels en service dans le domaine « Systèmes ».

Dans le domaine « Composants », le spectromètre a été adapté et les premières mesures sur les absorbeurs cylindriques effectuées. Ces dernières montrent par contre que des travaux d'adaptation supplémentaires sont né-



Figure 1 : Installation de mesure par laser pour la vérification de la qualité de la géométrie de l'élément réflecteur.

cessaires. Notamment lors de la spectroscopie proche infrarouge (NIR), les bruits de mesure et les différences avec les mesures sur des échantillons plats sont nettement trop importants. La préparation des mesures de vieillissement des couches des absorbeurs est réalisée en collaboration avec Energie Solaire SA.

Au niveau du domaine « Collecteurs », les tests ont été réalisés sur des collecteurs paraboliques linéaires commercialisés d'une surface de 4,8 m<sup>2</sup>. De juin à novembre 2011, les mesures du rendement des collecteurs à des températures jusqu'à 120 °C ont été effectuées. Pour la détermination du rendement en fonction de l'angle d'incidence, des mesures supplémentaires et des simulations (OptiCAD) doivent encore être effectuées en 2012. Afin de pouvoir caractériser thermiquement le rendement des collecteurs, une première série de mesures du refroidissement de l'absorbeur sans irradiation à des températures jusqu'à 100 °C a été menée. Ces tests préliminaires serviront à la mise en place des mesures à haute température en 2012. Le montage de plusieurs pyranomètres a permis de mesurer le rayonnement direct ainsi que les rayonnements global et diffus. La fiabilité de ces mesures sera vérifiée sur la durée pendant l'année 2012. En outre, une procédure pour la vérification de la qualité de la géomé-

trie de l'élément réflecteur a été mise en place et testée lors d'un travail de master au SPF (cf. Figure 1).

Afin de pouvoir définir les exigences à respecter par les collecteurs CST dans le cadre de la production de chaleur pour les processus industriels, il est important d'effectuer des mesures sur des installations complètes en service. A ce propos, les activités de la partie du projet « Systèmes » sont déjà bien avancées. En effet, plusieurs installations présentant des types de collecteurs, des niveaux de température et des processus différents ont déjà été identifiés (projets P&D cofinancés par l'OFEN). Pour certaines installations pas encore en service, le concept de monitoring a pu être défini de manière très détaillée avec les porteurs des projets. Pour toutes les installations, les tâches suivantes seront réalisées: collecte des valeurs, analyse et interprétation des données ainsi que représentation des résultats. L'utilisation de toutes les données de monitoring disponibles ainsi que des expériences de l'exploitation des installations P&D permettront d'identifier et corriger des erreurs ainsi que d'atteindre des développements supplémentaires au niveau du rendement et l'amélioration concrète des installations.



Figure 2 : Troisième prototype de concentrateur Airlight construit à Biasca TI.

### Projet d'Airlight Energy SA: Receiver and Storage

Depuis fin 2007, l'OFEN cofinance le projet d'Airlight Energy visant le développement d'un collecteur solaire thermique parabolique linéaire novateur pour la production d'électricité qui soit efficace et rentable (cf. Figure 2). Le caractère novateur de la technologie Airlight est basé sur l'utilisation d'un miroir flexible pneumatique combiné



Figure 3 : Dernier prototype d'absorbeur développé en 2011 et monté sur une installation de mesure consistant en deux sous-systèmes: le premier est composé par le concentrateur principal et le système de suivi du soleil tandis que le deuxième est composé par le concentrateur secondaire et le tube pour l'air de processus.

avec un cadre en béton, un absorbeur qui ajoute un deuxième axe de concentration et qui utilise l'air comme fluide caloporteur combiné avec un système de stockage de la chaleur basé sur le réchauffement de rochers concassés (galets). La construction d'une première installation industrielle de taille réduite basée sur le troisième prototype de concentrateur Airlight devrait démarrer en 2012.

Les activités de recherche et développement (R&D) se sont poursuivies de manière intense durant l'année 2011 notamment au niveau du développement de l'absorbeur et du système de stockage de l'énergie. La phase actuelle du projet se terminera en 2012 mais des nouveaux axes de recherche sont déjà identifiés pour la poursuite des travaux.

Au niveau de l'absorbeur, cinq modèles ont été conçus et leurs performances ont été évaluées depuis le début du projet. Le dernier prototype développé en 2011 a été monté sur une installation de mesure (cf. Figure 3). Cette dernière consiste en deux sous-systèmes: le premier est composé du concentrateur principal et du système de suivi du soleil tandis que le deuxième est composé du concentrateur secondaire et de l'absorbeur. Le système a été modélisé et des simulations ainsi que des mesures ont été effectuées. Le comportement de l'absorbeur a été évalué grâce à la mesure des températures de l'air de processus ainsi qu'à différents

endroits du système, toujours en fonction de la puissance solaire incidente. Les simulations prédisent un bon comportement du système en termes de rendement de l'absorbeur avec une valeur moyenne attendue d'environ 0,65 (performance théorique). Les mesures effectuées à Biasca ont confirmé l'importance et l'efficacité de la concentration secondaire et ont montré un bon comportement en terme de températures atteintes dans le tube pour l'air de processus. Par contre, afin de pouvoir exploiter au maximum le potentiel du modèle d'absorbeur, une nouvelle conception de l'isolation thermique du tube est nécessaire. A ce propos, différentes solutions basées sur des boucliers thermiques multiples ont été investiguées. Les études ont montré que la réduction de l'émissivité radiative des boucliers (p. ex. par des surfaces plus réfléchissantes) améliore sensiblement leur efficacité isolante mais, de l'autre côté, le vieillissement des matériaux pourrait le détériorer de manière significative. En outre, pour éviter le transfert de chaleur par conduction, le contact entre boucliers doit être minimisé. Il a également été constaté que le vide à l'intérieur de l'absorbeur n'est pas nécessaire.

Les travaux futurs sur l'absorbeur concernent la poursuite de l'optimisation du système d'isolation thermique à multicouches ainsi que des tests sur une installation pilote.

Concernant le prototype du système de stockage de l'énergie thermique construit et testé à Biasca, des progrès considérables dans la modélisation de son comportement ont été obtenus et un nouveau prototype a été conçu et construit. La validation du modèle grâce aux données expérimentales a permis de définir la conductivité thermique effective du matériel rocheux utilisé pour le stockage de la chaleur et, par conséquent, de décrire le transfert de chaleur à travers un matériel poreux. La distribution de la porosité dans le lit de rochers ainsi que sa variation a également été définie. En outre, les propriétés thermiques de différents types de rochers et de bétons ont été évaluées. A propos du nouveau prototype de système de stockage, les différences principales avec l'ancien se focalisent sur l'amélioration de l'isolation thermique avec la pose de divers

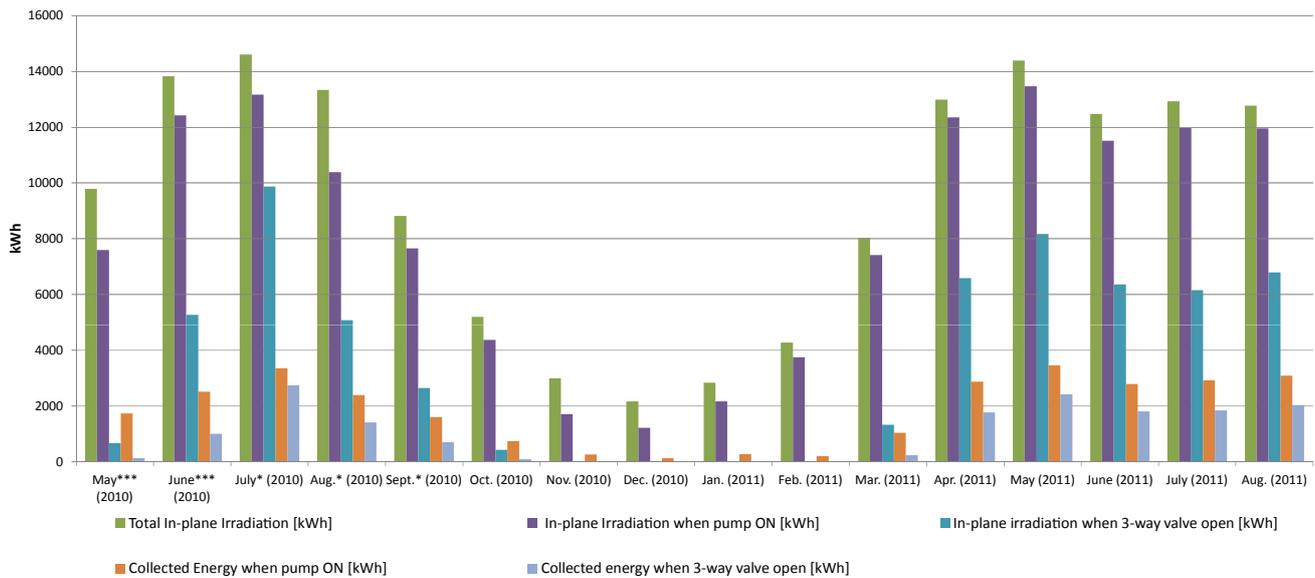


Figure 4 : Projet de production de chaleur solaire pour le chauffage de bitume chez Colas SA: irradiation solaire totale, l'irradiation et l'énergie collectée quand l'huile circule à travers les collecteurs, l'irradiation et l'énergie collectée/stockée dans les cuves de bitume quand la vanne vers la cuve est ouverte.

matériaux outre le béton isolant (microtherm et FoamGlas), la pose d'un grand nombre de sondes afin d'en monitorer le comportement avec plus de précision ainsi que la mise en place

d'un cadre extérieur en béton armé plus résistant afin de permettre des tests en surpression jusqu'à 10 bar. Le système a été modélisé et des simulations ont été effectuées. Les travaux

futurs se concentreront sur l'analyse du nouveau prototype avec des simulations et des campagnes de mesures afin d'en évaluer les performances.

## Projets Pilotes et de Démonstration

Comme pour l'année 2010, la totalité des projets P&D cofinancés par l'OFEN dans le domaine de la chaleur solaire pour les processus industriels sont mis en valeur en tant que projets phares (cf. section suivante). En effet, les trois installations déjà en service ainsi que les deux en phase de conception présentent des tailles, des types de collecteurs, des niveaux de température et des processus industriels différents. Cette situation permettra de collecter des données et des retours d'expériences variés qui seront utiles pour les installations futures.

### Production de chaleur solaire pour les processus industriels

La première installation P&D en Suisse cofinancée par l'OFEN pour la production de chaleur solaire pour un proces-

sus industriel a été mise en service à fin mars 2010 à Root LU (cf. rapport de synthèse 2010). Sur le toit de la fabrique de bougies Fischer AG ont été installés 81 m<sup>2</sup> de collecteurs à tubes sous vide et le niveau de température pour le réchauffement de la paraffine est compris entre 65 et 110 °C. La phase initiale de fonctionnement a mis en évidence un problème inattendu lié à l'impossibilité d'utiliser toute la chaleur produite par les collecteurs notamment pendant les périodes de fort ensoleillement. Pour pallier à cet inconvénient, des mesures ont été prises à savoir, l'augmentation de la vitesse de circulation du fluide caloporteur du circuit secondaire, l'intégration du système de production de chaleur des bâtiments dans le circuit solaire ainsi que la mise en place d'un ventilateur pour la dissipation de la chaleur dans l'environnement qui permet un fonctionnement automatique de l'installation solaire. Cette dernière solu-

tion, bien que non optimale, a dû être mise en place vu qu'aucune possibilité de récupérer la chaleur excédentaire n'existe sur le site. Depuis la mise en service jusqu'à fin novembre 2011, environ 50'000 kWh de chaleur ont été produits par l'installation solaire, dont environ 30'000 ont été utilisés pour chauffer la paraffine. Des résultats pertinents du monitoring seront disponibles seulement après une année complète de fonctionnement à plein régime. Des mesures visant une intensification ultérieure de l'utilisation de l'installation solaire, dont notamment le nettoyage de l'échangeur de chaleur dans les tanks à paraffine, vont être mises en place en 2012.

Début mai 2010, l'installation P&D de Colas Suisse pour le chauffage à 160 °C de bitume par des panneaux solaires à ultra vide de SRB Energy a été mise en service à Vernier GE (cf. rapport de synthèse 2010 et [7]). Les 78 m<sup>2</sup> de



Figure 5 : Vue de l'installation avec collecteurs paraboliques linéaires de Bever GR.



Figure 6 : Exemple de possible configuration de l'installation des collecteurs paraboliques linéaires chez Cremo.

collecteurs installés ont permis de produire environ 12'500 kWh de chaleur solaire entre août 2010 et août 2011. Au niveau du monitoring du système, les éléments suivants ont été mesurés: l'irradiation solaire, l'énergie captée par les panneaux et l'énergie stockée dans les cuves de bitume. Au cours du processus des pertes d'énergie ont été mises en évidence (voir figure 4). En hiver, l'énergie n'est pas suffisante pour être accumulée, mais l'efficacité du système durant le reste de l'année permet de rattraper ce manque. Les estimations préliminaires de produc-

tion de chaleur solaire étaient basées sur un premier design de panneaux solaires qui n'a pas été conservé par la suite pour des raisons économiques de mise en oeuvre. Les paramètres suivants ont notamment été modifiés: l'orientation (45° Ouest au lieu de plein Sud), l'inclinaison (5° au lieu de 34°), une augmentation de la température de consigne (température de 185 °C au lieu de 150 °C) et des tuyaux plus longs avec un diamètre supérieur. A fin 2011, l'installation fonctionne correctement et les objectifs pour 2012 sont, sur le site de Colas Genève, d'améliorer

le process et d'augmenter la surface du champ solaire (x3) ainsi que d'étendre le projet à d'autres sites en Suisse.

La troisième installation P&D a été mise en service à Bever GR (cf. figure 5) en octobre 2011 pour une première phase de test et en mode automatique dès fin 2011 après avoir résolu plusieurs petits problèmes au niveau du réglage, des senseurs et des liaisons hydrauliques. Le retard pris dans la mise en service est notamment dû aux longs délais de production et fourniture des collecteurs. Une partie de la production de vapeur pour la laiterie sera faite avec la chaleur solaire produite par les 115 m<sup>2</sup> de concentrateurs paraboliques linéaires de NEP Solar (cf. rapport de synthèse 2010). En 2012, l'installation fonctionnera pendant la première année à plein régime ce qui permettra de vérifier si elle répond aux attentes concernant les données d'exploitation.

Fin 2011, deux nouveaux projets P&D ont reçu un cofinancement de l'OFEN et leur mise en service est prévue en 2012. Le premier prévoit l'installation d'environ 500 m<sup>2</sup> de concentrateurs paraboliques linéaires de NEP Solar chez Cremo SA à Villars-sur-Glâne FR (cf. Figure 6). La surface de collecteurs importante et l'application dans une industrie agroalimentaire leader en Suisse en fait un projet de démonstration avec un potentiel de reproductibilité et de dissémination important. Ce projet vise entre autres à démontrer que, même dans une région pas particulièrement ensoleillée, le retour sur l'investissement est raisonnable compte tenu notamment des économies de gaz obtenues d'env. 175'000 kWh/an. Le deuxième projet prévoit l'installation d'environ 630 m<sup>2</sup> de concentrateurs paraboliques linéaires de NEP Solar sur la Fromagerie de Saignelégier JU. Les éléments qui en font un projet novateur et complémentaire par rapport aux autres décrits ci-dessus sont les suivants: la technologie de concentrateur utilisée représente une première dans un projet industriel en Suisse (nouveau type de concentrateur parabolique linéaire de NEP Solar avec 1,80 m d'ouverture au lieu de 1,20) et le projet permettra de comparer le rendement de différentes installations de type similaire situées dans le Jura, les Alpes et sur le Plateau.

## Collaboration Nationale

Le symposium national du programme de recherche Solaire industriel à haute température sera organisé en 2012 afin de créer des interactions entre acteurs de la recherche, de l'industrie et du monde académique.

Dans le domaine de la thermochimie solaire, le Laboratoire de technologie solaire du PSI travaille conjointement avec le Département d'énergies renouvelables de l'ETH Zurich. En outre, dans le cadre de plusieurs projets, le PSI collabore avec les industries suivantes: Bühler AG, Uzwil; ALE Airlight Energy SA, Biasca; Alstom Power Service, Baden-Dättwil et Alstom Power Systems, Birr; Holcim, Holderbank et IBM Zurich Research Laboratory, Rüschlikon. Des collaborations et synergies sont aussi en place avec les laboratoires de recherche suisses suivants:

EMPA Dübendorf – Laboratory for Solid State Chemistry and Catalysis et ETH Zürich – Particle Technology Laboratory.

Dans le domaine de la chaleur solaire pour les processus industriels, le SPF collabore avec Energie Solaire SA (Sierre), avec NEP Solar (Zurich) ainsi qu'avec les industries porteuses des projets P&D. Dans le cadre des projets P&D, les collaborations avec les sociétés suivantes ont été mises en place: BE Netz (Lucerne), SRB Energy (CERN Genève) et NEP Solar.

Airlight Energy collabore avec l'Université professionnelle de la Suisse italienne (SUPSI-DTI-ICIMSI) ainsi que l'Institut des technologies énergétiques de l'ETH Zurich.

## Collaboration Internationale

Pour la thermochimie solaire, la coopération internationale fonctionne dans le cadre de

- AIE SolarPACES Implementing Agreement (Task II – Solar Chemistry Research).
- AIE Hydrogen Implementing Agreement (Task 25 – High Temperature Hydrogen Production Processes).
- Strategic Alliance between PSI and CIEMAT (Spain) – Roadmap to Solar Hydrogen Production.
- IPHE: International Partnership for the Hydrogen Economy (Project: Solar driven high temperature thermochemical production of hydrogen).
- SOLLAB: Alliance of European Laboratories on solar thermal concentrating systems.
- EERA: European Energy Research Alliance. Participants.

- SFERA: Solar Facilities for the European Research Area (projet UE). SynPet (Industrial Project with PDVSA) – Solar steam-gasification of petroleum coke (petcoke).

- TCSPower (projet UE) – Thermo-chemical energy storage for concentrated solar power plants.

Dans le domaine de la chaleur solaire pour les processus industriels, le SPF est membre d'un consortium international, lequel, dans le cadre de l'appel d'offre de l'UE « ENERGY.2012.4.1-1: Research and development for medium temperature range solar collectors (100 °–250 °C) », a déposé un projet en octobre 2011 pour le développement d'un collecteur Fresnel novateur.

Au niveau des CSP, un accord pour la construction d'une première installation industrielle pilote au Maroc a été signé en septembre 2011 entre Airlight Energy et le producteur de ciment Italgem.

## Références

[1] [www.solarpaces.org/Tasks/Task2/task\\_II](http://www.solarpaces.org/Tasks/Task2/task_II).

[2] [www.iea-shc.org/task49](http://www.iea-shc.org/task49).

[3] [www.solarpaces.org](http://www.solarpaces.org).

[4] A. Meier: *Solar Production of Zinc and Hydrogen – Reactor Optimisation for Scale-up (1) and Towards Industrial Solar Production of Zinc and Hydrogen – 100 kW Solar Pilot Reactor for ZnO Dissociation (2)*, BFE Jahresbericht 2011.

[5] S. Brunold et al.: *Etablierung eines CST Kompetenzzentrums am SPF*, BFE Jahresbericht 2011.

[6] Maurizio C. Barbato et al.: *SolAir-2 (1) Innovative solar collectors for efficient and costeffective solar thermal power generation – 2 and SolAir-Pilot (2)*, Rapport annuel OFEN 2011.

[7] Marc Maranzana et al.: *Projet pilote de maintien en chauffe d'un stockage de 80'000 litres de bitume à 160 °C par des panneaux solaires haute énergie*, Rapport final OFEN 2011.

## Projets en cours et terminés dans l'année de référence

(\* Classification de l'AIE)

- **SOLAIR - INNOVATIVE SOLAR COLLECTORS FOR EFFICIENT AND COST-EFFECTIVE SOLAR THERMAL POWER GENERATION** R+D 3.1.3\*
- Lead: ALE Airlight Energy SA Funding: BFE  
 Contact: Andrea Pedretti andrea.pedretti@airlightenergy.com Period: 2007–2012  
 Abstract: The present project aims at the engineering investigation and design of a breakthrough concept of a solar collector system for efficient and cost-effective solar thermal power generation. The novel collector technology exploits a revolutionary air-inflated reflective structure for concentrating solar radiation. Since this new arrangement reduces drastically the investment costs of the collector field, the solar thermal plant promises to be highly economic competitive.
- **IEA-SOLARPACES-PROGRAMM** 0 3.1.3
- Lead: DLR Funding: BFE  
 Contact: Mörsdorf M. http://www.solarpaces.org Period: 1989–2010  
 Abstract: SolarPACES is an international cooperative network bringing together teams of national experts from around the world to focus on the development and marketing of concentrating solar power systems (also known as solar thermal power systems). It is one of a number of collaborative programs, called Implementing Agreements, managed under the umbrella of the International Energy Agency to help find solutions to worldwide energy problems.
- **TOWARDS INDUSTRIAL SOLAR PRODUCTION OF ZINC AND HYDROGEN – REACTOR OPTIMIZATION AND SCALE-UP** R+D 3.1.3
- Lead: PSI Funding: BFE  
 Contact: Anton Meier anton.meier@psi.ch Period: 2007–2013  
 Abstract: Die endotherme solarthermische Dissoziation von Zinkoxid in Zink und Sauerstoff wird untersucht. In diesem Projekt wird der Hochtemperatur-Solarreaktor für den zuverlässigen und effizienten Betrieb bei Temperaturen über 2000 K (100 kW Prototypreaktor) optimiert.
- **SOLAR CO2-SPLITTING USING REDOX REACTIONS** R+D 3.1.3
- Lead: PSI Funding: SNF  
 Contact: Aldo Steinfeld aldo.steinfeld@ethz.ch Period: 2009–2011  
 Abstract: The solar production of syngas from H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> is examined via TWo-step thermochemical cycles based on redox reactions such as Zn/ZnO and FeO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. The first, endothermic step is the thermal dissociation of the metal oxide using concentrated solar radiation as the energy source of high-temperature process heat. The second, non-solar, exothermic step is the reaction of the metal or reduced metal oxide with a mixture of H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> yielding syngas (H<sub>2</sub> and CO).
- **TCSPower – THERMO-CHEMICAL ENERGY STORAGE FOR CONCENTRATED SOLAR POWER PLANTS** R+D 3.1.3
- Lead: PSI Funding: EU FP7  
 Contact: Aldo Steinfeld aldo.steinfeld@ethz.ch Period: 2011–2014  
 Abstract: The overall objective of the project is to realize a new, efficient, reliable, and economic thermo-chemical energy storage (TCS) system for concentrated solar power plants, which has the capability to contribute significantly to further cost reduction of regenerative electricity production. This will be achieved by applying reversible gas-solid reactions: dissociation of calcium hydroxide and application of manganese oxide redox reactions.
- **ENEXAL – SOLAR PRODUCTION OF ALUMINUM BY CARBOTHERMAL REDUCTION OF ALUMINA** R+D 3.1.3
- Lead: ETHZ Funding: EU FP7  
 Contact: Aldo Steinfeld aldo.steinfeld@ethz.ch Period: 2010–2014  
 Abstract: Thermochemical equilibrium calculations indicate the possibility of significantly lowering the onset temperature of aluminum vapor formation via carbothermal reduction of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by decreasing the total pressure, enabling its vacuum distillation. Further, the use of concentrated solar energy as the source of high-temperature process heat offers considerable energy savings and reduced concomitant CO<sub>2</sub> emissions. When the reducing agent is derived from a biomass source, the solar-driven carbothermal reduction is CO<sub>2</sub> neutral.
- **HITECO – HIGH-TEMPERATURE EFFICIENT COLLECTOR FOR CONCENTRATING SOLAR POWER APPLICATIONS** R+D 3.1.3
- Lead: ETHZ Funding: EU FP7  
 Contact: Aldo Steinfeld aldo.steinfeld@ethz.ch Period: 2010–2013  
 Abstract: In order to accelerate the implementation of the CSP technology, the electricity cost has to be reduced by increasing the plants efficiency. The HITECO Project aims at doing so by increasing the operating temperature of the heat transfer fluid (HTF) up to 600 °C and therefore raising the overall efficiency of the process. The current state-of-the-art designs are prevented to reach such temperatures without a dramatic efficiency drop by several key components.

- **SOLAR-JET – SOLAR CHEMICAL REACTOR DEMONSTRATION AND OPTIMIZATION FOR LONG-TERM AVAILABILITY OF RENEWABLE JET FUEL** R+D 3.1.3
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | ETHZ                                     | Funding: | EU FP7    |
| Contact: | Aldo Steinfeld<br>aldo.steinfeld@ethz.ch | Period:  | 2011–2014 |
- Abstract: The SOLAR-JET project will demonstrate on a laboratory-scale a process that combines concentrated sunlight with CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O to produce kerosene by coupling a Two-step solar thermo-chemical cycle based on non-stoichiometric ceria redox reactions with the Fischer-Tropsch process.
- **SFERA – SOLAR FACILITIES FOR THE EUROPEAN RESEARCH AREA** R+D 3.1.3
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | PSI                                      | Funding: | EU FP7    |
| Contact: | Aldo Steinfeld<br>aldo.steinfeld@ethz.ch | Period:  | 2009–2013 |
- Abstract: This EU-funded research project aims to boost scientific collaboration among the leading European research institutions in solar concentrating systems, offering European research and industry access to the best research and test infrastructures and creating a virtual European laboratory.
- **SYNPET** R+D 3.1.3
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | PSI                                      | Funding: | others    |
| Contact: | Aldo Steinfeld<br>aldo.steinfeld@ethz.ch | Period:  | 2003–2011 |
- Abstract: High-temperature thermochemical processes efficiently convert concentrated solar energy into storable and transportable fuels. In the long run, H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub>-splitting thermochemical cycles based on metal oxide redox reactions are developed to produce H<sub>2</sub> and CO, which can be further processed to synthetic liquid fuels. In a transition period, carbonaceous feedstocks (fossil fuels, biomass, C-containing wastes) are solar-upgraded and transformed into valuable fuels via reforming, gasification and decomposition processes.
- **SOLSYN - SOLAR FUELS FOR CEMENT MANUFACTURING** R+D 3.1.3
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | PSI                                      | Funding: | KTI       |
| Contact: | Aldo Steinfeld<br>aldo.steinfeld@ethz.ch | Period:  | 2007–2011 |
- Abstract: Holcim, PSI and ETH Zurich have brought together most competent resources to perform long-term oriented research in exploring the use of concentrated solar energy for cement manufacturing. 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 H<sub>2</sub> and CO. The synthetic gas could be used for substituting fossil fuels in the cement kiln.
- **ALSTOM - SOLAR-DRIVEN COMBINED CYCLES** R+D 3.1.3
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | PSI                                      | Funding: | others    |
| Contact: | Aldo Steinfeld<br>aldo.steinfeld@ethz.ch | Period:  | 2008–2011 |
- Abstract: Project aimed at the engineering development of a novel solar receiver for heating compressed air to the entrance conditions of a gas turbine, as part of a combined cycle for power generation. A solar tower concentrating system will be used for electricity generation based on a Brayton-Rankine combined cycle.
- **AIRLIGHT – SOLAR RECEIVER DEVELOPMENT FOR CONCENTRATED SOLAR POWER (CSP) SYSTEMS** R+D 3.1.3
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | ETHZ                                     | Funding: | BFE       |
| Contact: | Aldo Steinfeld<br>aldo.steinfeld@ethz.ch | Period:  | 2008–2011 |
- Abstract: Project aimed at the design, fabrication, testing, modeling & validation, and optimization of a solar receiver coupled with ALE's trough concentrator, for a Rankine-based electricity generation system.
- **AIRLIGHT – HIGH-TEMPERATURE THERMAL STORAGE SYSTEM FOR CONCENTRATING SOLAR POWER** R+D 3.1.3
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | ETHZ                                     | Funding: | BFE       |
| Contact: | Aldo Steinfeld<br>aldo.steinfeld@ethz.ch | Period:  | 2010–2013 |
- Abstract: The project is aimed at the design, fabrication, testing, modeling & validation, and optimization of a thermal storage system.

- **TOMOGRAPHY-BASED DETERMINATION OF EFFECTIVE HEAT/MASS TRANSPORT PROPERTIES FOR COMPLEX MULTI-PHASE MEDIA** R+D 3.1.3

Lead:	ETHZ	Funding:	SNF
Contact:	Aldo Steinfeld <a href="mailto:aldo.steinfeld@ethz.ch">aldo.steinfeld@ethz.ch</a>	Period:	2010–2012

Abstract: Development of a computer tomography based methodology for the determination of the effective heat/mass transport properties of complex porous materials. The focus is on porous materials applied in high-temperature solar thermal and thermochemical processes for producing power and fuels. The morphological characterization and accurate determination of the effective transport properties are crucial for the optimal design and efficient operation of solar receivers and reactors.
- **BIOMASS (ALGAE) GASIFICATION USING CONCENTRATED SOLAR ENERGY** R+D 3.1.3

Lead:	ETHZ	Funding:	SER
Contact:	Aldo Steinfeld <a href="mailto:aldo.steinfeld@ethz.ch">aldo.steinfeld@ethz.ch</a>	Period:	2010–2013

Abstract: The goal of this project is to transform microalgae into clean, CO<sub>2</sub>-neutral chemical fuels. Concentrated solar radiation is used as the energy source of high-temperature process heat for the gasification of microalgae into a high-quality syngas (CO + H<sub>2</sub>). Syngas can be further processed to liquid fuels for the power and transportation sector.
- **CONCENTRATED SOLAR THERMOELECTRIC CONVERSION** R+D 3.1.3

Lead:	ETHZ	Funding:	others
Contact:	Aldo Steinfeld <a href="mailto:aldo.steinfeld@ethz.ch">aldo.steinfeld@ethz.ch</a>	Period:	2010–2013

Abstract: The goal of this project is to transform microalgae into clean, CO<sub>2</sub>-neutral chemical fuels. Concentrated solar radiation is used as the energy source of high-temperature process heat for the gasification of microalgae into a high-quality syngas (CO + H<sub>2</sub>). Syngas can be further processed to liquid fuels for the power and transportation sector.
- **CO<sub>2</sub> CAPTURE FROM ATMOSPHERIC AIR BY TEMPERATURE-VACUUM SWING ADSORPTION** R+D 3.1.3

Lead:	ETHZ	Funding:	others
Contact:	Aldo Steinfeld <a href="mailto:aldo.steinfeld@ethz.ch">aldo.steinfeld@ethz.ch</a>	Period:	2011–2013

Abstract: The CO<sub>2</sub> capture technology is based on a cyclic adsorption-desorption process that occurs on a novel filter material (« sorbent »). During adsorption, atmospheric CO<sub>2</sub> is chemically bound to the sorbent's surface. Once the sorbent is saturated with CO<sub>2</sub>, the CO<sub>2</sub> is driven off the sorbent through heating the sorbent to around 60-100°C, thereby delivering high-purity gaseous CO<sub>2</sub>. The CO<sub>2</sub>-free sorbent can be re-used for many adsorption-desorption cycles.
- **TOWARDS INDUSTRIAL SOLAR PRODUCTION OF ZINC AND HYDROGEN - 100 KW SOLAR PILOT REACTOR FOR ZNO DISSOCIATION** P+D 3.1.3

Lead:	PSI	Funding:	BFE
Contact:	Anton Meier <a href="mailto:anton.meier@psi.ch">anton.meier@psi.ch</a>	Period:	2010–2013

Abstract: In diesem Projekt wird der 100 kW Pilotreaktor am PSI konstruiert und gebaut. Der Solarreaktor sowie die Zusatzsysteme (Partikelförderer und Produktgasbehandlung) werden anschliessend gemäss Arbeitsplan im 1 MW Solarofen in Odeillo, Frankreich, getestet.
- **SOLAIR PILOT PLANT** P+D 3.1.3

Lead:	ALE Airlight Energy SA	Funding:	BFE
Contact:	Andrea Pedretti <a href="mailto:andrea.pedretti@airlightenergy.com">andrea.pedretti@airlightenergy.com</a>	Period:	2010–2012

Abstract: The solar irradiation in Biasca is insufficient for a meaningful practical demonstrator. To be able to effectively test and validate the different components of the Airlight Energy CSP system, TWo new simulation prototypes are being developed: a full TWo-axis tracking collector for the validation of the novel receiver design and a new packed bed thermal energy storage with improved thermal insulation and enhanced performance measurement capability.
- **PROZESSWÄRME MIT VAKUUMRÖHRENKOLLEKTOREN FÜR DIE BEHEIZUNG DES PARAFFINS FÜR FISCHER KERZEN AG** P+D 3.1.3

Lead:	Theo Fischer AG	Funding:	BFE
Contact:	Daniel Kretz <a href="mailto:d.kretz@kerzen.ch">d.kretz@kerzen.ch</a>	Period:	2009–2012

Abstract: Für die Kerzenfabrik Fischer Root (Kt. Luzern) wurde eine thermische Vakuumröhrenkollektoren Solaranlage für die Beheizung des Paraffins realisiert. Das Material muss dauernd auf einer Temperatur zwischen mindestens 65 und ca 110°C gelagert werden. Die 81 m<sup>2</sup> (Absorberfläche) Kollektoren Typ Augusta DF6 (SPF Nr. C938) werden eine Wärmeproduktion von ca. 47'000 kWh generieren.

- **CHAUFFAGE À 160°C DE 80'000 LITRES DE BITUME PAR PANNEAUX SOLAIRES THERMIQUES À ULTRA VIDE** P+D 3.1.3
- Lead: Colas Suisse Funding: BFE  
 Contact: Marc Maranzana maranzana@colas.ch Period: 2009–2011  
 Abstract: Ce projet de chauffage à 160 °C de 80'000 litres de bitume par panneaux solaires thermiques à ultra vide de nouvelle conception est un projet unique. Le domaine de la production de produits bitumineux est un gros consommateur d'énergie, nos panneaux solaires sont une alternative prometteuse aux énergies fossiles. Les 78 m2 de l'installation permettront une économie d'énergie fossile de 35'000 kWh/an.
- **BEVER, LESA / SOLARE PROZESSWÄRMEERZEUGUNG** P+D 3.1.3
- Lead: EWZ Funding: BFE  
 Contact: Georg Dubacher georg.dubacher@ewz.ch Period: 2010–2013  
 Abstract: Das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich realisiert im Molkereibetrieb Lesa Lataria Engiadinaisa SA in Bever eine Hochtemperatur-Solaranlage. Mit dieser Anlage wird ein Teil der Dampfproduktion mit Heizöl durch eine Energieproduktion mit erneuerbarer Energie ersetzt. Es werden konzentrierende Rinnenkollektoren eingesetzt, welche gegenüber Vakuumröhrenkollektoren effizienter Hochtemperatur-Wärme erzeugen.
- **INSTALLATION SOLAIRE INDUSTRIELLE HAUTE TEMPÉRATURE CHEZ CREMO SA** P+D 3.1.3
- Lead: Cremo SA Funding: BFE  
 Contact: Paul- Albert Nobs Panobs@cremo.ch Period: 2011–2015  
 Abstract: La technologie de concentrateur utilisée est connue mais sa taille et l'application dans une industrie agroalimentaire leader en Suisse en fait un projet de démonstration avec un potentiel de réplication et de dissémination importants. Ce projet vise entre autre à démontrer que, même dans une région pas particulièrement ensoleillée, le retour sur l'investissement est raisonnable compte tenu notamment des économies de gaz obtenues d'env. 175'000 kWh/an.
- **INSTALLATION SOLAIRE INDUSTRIELLE HAUTE TEMPÉRATURE CHEZ FROMAGERIE DE SAINGNÉLÉGIER SA: TÊTE DE MOÏNES À L'APPUI SOLAIRE** P+D 3.1.3
- Lead: Fromagerie de Saingnégier SA Funding: BFE  
 Contact: Jean-Philippe Brahier jeanphilippe.brahier@emmi.ch Period: 2011–2013  
 Abstract: Projet industriel de surface importante (env. 600 m2). La technologie de concentrateur utilisée (nouveau type de parabole linéaire de NEP Solar) est nouvelle et n'avait jamais été utilisée dans un projet solaire industriel en Suisse. Le projet permet de comparer le rendement de différents installations de type similaires situées dans le Jura, les Alpes et sur le Plateau.
- **IEA-SHC TASK SHIP SUBTASK A LEADERSHIP** R+D 3.1.3
- Lead: Institut für Solartechnik SPF Funding: BFE  
 Contact: Elimar Frank elimar.frank@solarenergy.ch Period: 2011–2014  
 Abstract: In the Subtask A « Process heat collector development and process heat collector testing », the further development, improvement and optimisation of collectors, components and the collector loop is investigated. All types of solar thermal collectors for an operating temperature level up to 400°C are addressed. It should also prepare the bases to identify and select the most suitable collector technology for a given application.
- **CST KOMPETENZZENTRUM AM SPF** R+D 3.1.3
- Lead: Institut für Solartechnik SPF Funding: BFE  
 Contact: Stefan Brunold stefan.brunold@solarenergy.ch Period: 2011–2015  
 Abstract: Ziel dieses Projektes ist es, die Kompetenzen des SPF auf den Bereich der konzentrierenden Kollektoren und der solarthermischen Prozesswärmenutzung sowie anderer Anwendungen zu übertragen bzw. zu erweitern, um insbesondere auf dem Gebiet der « Concentrating Solar Thermal Energy » (CST) international eine zentrale Rolle einzunehmen. Aktivitäten: Ausbau der Spektroskopie, Alterungsuntersuchungen, Leistungsmessungen, Messtechnische Erfassung und Analyse.
- **SOLAR LIQUID FUEL FROM H2O AND CO2** R+D 3.1.3
- Lead: ETHZ Funding: BFE  
 Contact: Aldo Steinfeld aldo.steinfeld@ethz.ch Period: 2011–2014  
 Abstract: A Two-step solar thermochemical cycle for producing syngas from H2O and CO2 via Zn/ZnO redox reactions is considered. The second, non-solar, exothermic step is the reaction of Zn with mixtures of H2O and CO2 yielding high-quality syngas (mainly H2 and CO) and ZnO. Syngas is further processed to liquid fuels via Fischer-Tropsch or other catalytic reforming processes. This research project is aimed at optimizing and scaling-up the chemical reactor technology.



Stefan Oberholzer

# Wasserstoff



**Titelbild:****Vollautomatisierte Pilotanlage zum Testen neu entwickelter Diaphragmen für den Einsatz in hoch effizienten Hochdruckelektrolyseuren**

Die Schweizer Firma Industrie Haute Technologie (IHT) ist ein weltweit führendes Unternehmen im Bereich der Herstellung alkalischer Hochdruckelektrolyseure für industrielle Anwendungen. In den letzten Jahren wurde in Zusammenarbeit mit der Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA ein Ersatz für die asbesthaltigen Diaphragmen entwickelt, welche die Vermischung der bei der Elektrolyse entstehenden Produktgase Wasserstoff und Sauerstoff verhindert. Um die neu entwickelten Materialeien testen zu können, wurde bei IHT eine Pilotanlage aufgebaut und in Betrieb genommen, welche den Einsatz der neuen Diaphragmen unter realen industriellen Bedingungen erlaubt. Eine detaillierte Analyse verschiedener Materialoptionen erlaubt anschliessend die Aufskalierung auf die industriell eingesetzte Grösse von 1,6 m im Durchmesser. Durch die Umstellung auf Asbest-freie Membranen erhält IHT die Möglichkeit, sich an dem wachsenden Markt von Gross-Elektrolyseuren im Zusammenhang mit dem verstärkten Einsatz erneuerbarer Energiequellen zu beteiligen.

**BFE Forschungsprogramm Wasserstoff**

Überblicksbericht 2011

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
CH-3003 Bern

**Programmleiter BFE (Autor):**

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

**Bereichsleiter BFE:**

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

<http://www.bfe.admin.ch/forschungwasserstoff/>

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

## Einleitung

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 erneuerbaren Quellen basierte Produktionskette erlaubt zudem eine vollständig nachhaltige Umwandlungskette.

Wasserstoff und anderen chemischen Energieträger wie Methan, Methanol, Formalinsäure etc. kommt im Zusammenhang mit der Diskussion rund um die Netzintegration von Wind- und Solarstrom eine immer grössere Bedeutung als Speichertechnologie zu, dies insbesondere in Deutschland, wo 2011 entsprechende Initiativen gestartet worden sind [1] und verschiedene Projekte zur Speicherung von Wind-Überschussstrom in Form von Wasserstoff und Methan bestehen. So nahm das Windenergieunternehmen Enertrag ([www.enertrag.com](http://www.enertrag.com)) in der Nähe von Prenzlau das weltweit erste treibhausgasfreie Hybridkraftwerk in Betrieb, wo in windreichen Zeiten die nicht bedarfsgerecht erzeugte Energie in Wasserstoff umgewandelt und zwischengespeichert wird. In windarmen Zeiten wiederum wird der Wasserstoff in einem Blockheizkraftwerk zur Stromproduktion genutzt, sodass das

6 MW-Hybridkraftwerk aus Sicht des Netztes sich wie ein Grundlastkraftwerk verhält. Eine aktuelle Studie des Fraunhofer IWES zum Thema «Energiewirtschaftliche und ökologische Bewertung eines Windgas-Angebotes» im Auftrag von Greenpeace Energy e.G. [2] zeigt für Deutschland, dass in einem 100 %-Erneuerbaren-Szenario auch bei einem grossen Ausbau der Übertragungsnetzen und intelligentem Lastmanagement mit einem Bedarf von 100 TWh an zusätzlicher Speicherkapazität zu rechnen wäre für längere windschwache oder sonnenarme Perioden. In dieser Studie werden ebenfalls die Effizienzen der verschiedenen Umwandlungsketten detailliert analysiert. Betrachtet man die reine Stromspeicherung über Wasserstoff oder Methan, dann ist der Wirkungsgrad (40 %) nur halb so gross wie der von Pumpspeicherkraftwerken oder Batteriespeichern. Durch sinnvolle Nutzung von Windgas in WKK-Anlagen unter Mitnutzung der Abwärme der Strom-zu-Gas und Gasverstromungsprozesse lässt sich dennoch ein hoher energetischer Gesamtwirkungsgrad von bis zu 60 % erzielen.

Insbesondere interessant sind Betrachtungen zu Flächenerträgen für erneuerbare Energien, welche zeigen, dass bei Wind- und Solargas etwa das

20-fache des Hektarertrages von Biogas und anderen Biomassen erzielt wird.

Allgemein kommt die Studie zum Schluss, dass eine Strom-zu-Gas («Power-to-Gas»)-Technologie trotz mehrfachen Konversionsschritten mit entsprechenden Verlusten ein wichtiger Baustein für den Aufbau einer zunehmend regenerativen Energieversorgung bildet. Um diese Technologie aufzubauen, wird in den nächsten Jahren und Jahrzehnten eine grosse Anzahl von neuen leistungsstarken Elektrolyseuren benötigt (für Deutschland wird das Potenzial auf 44 GW geschätzt [3]). Weltweit gibt es nur sehr wenige Firmen, welche Gross-Elektrolyseure herstellen: neben dem norwegischen Unternehmen Norsk Hydro Electrolysers AS, welche atmosphärische alkalische Elektrolyseure anbietet, ist die Schweizer Firma IHT mit ihren alkalischen Hochdruck-Elektrolyseuren mit bis zu 3,5 MW pro Einheit weltweit führend. Die Forschung und Weiterentwicklung der alkalischen Hochdruckelektrolyse bildet daher in der Schweiz einen wichtigen Forschungsschwerpunkt.

In dem vorliegenden Bericht werden die herausragendsten Resultate 2011 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 («Solar fuels») bildet einen zweiten Schwerpunkt. Hier werden am Paul Scherrer Institut (PSI) sowie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETHZ) verschiedene thermochemische Prozesse 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 Forschungs-

aktivitäten 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. Weiter wird in diesem Bereich die Speicherung von Wasserstoff in Form von Kohlenwasserstoff-Verbindungen wie Formalinsäure ( $\text{CH}_2\text{O}_2$ ) 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 2011

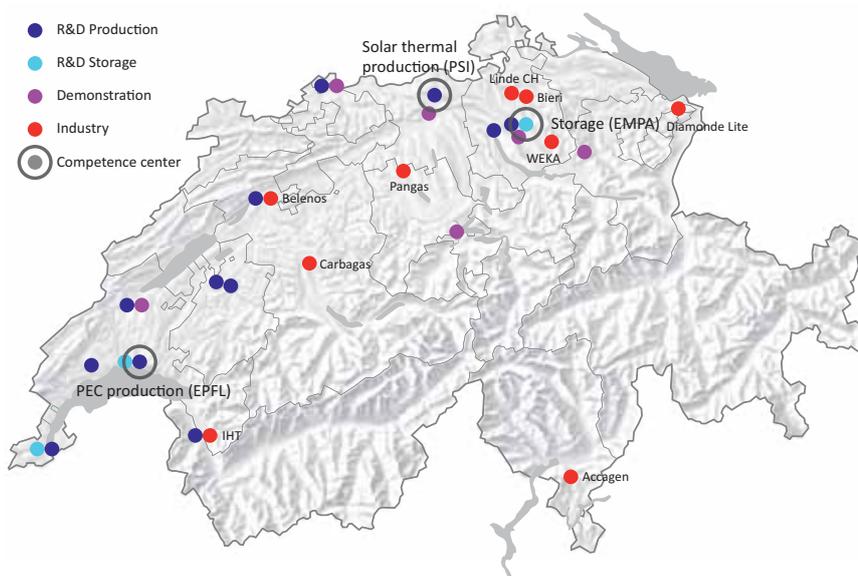
Im Bereich der photoelektrochemischen Wasserstofferzeugung konnte ein grösseres Projekt an der EPFL, welches 2007 angelaufen war, erfolgreich abgeschlossen werden. Die Arbeiten werden weitergeführt in einem Nachfolgeprojekt, welches Teil eines grösseren von verschiedensten Förderstellen

getragenen Dachprojekts zur Produktion und Speicherung von Wasserstoff (HyTech) bildet. Die Resultate aus dem abgeschlossenen Projekt an der EPFL schlugen sich in etlichen wissenschaftlichen Publikationen in renommierten Zeitschriften nieder. Im Bereich der oxid-basierten PEC-Zellen konnte sich die EPFL weltweit als «Leading house» etablieren.

Mit Unterstützung durch nationale Fördermittel (BFE, Swisselectric Research u.a.) konnte die Teilnahme verschiedener Schweizer Forschungsinstitutionen und Unternehmen an grossen europäischen Pilot- und Demonstrationsprojekten im Rahmen des Joint Undertaking Fuel Cells and Hydrogen [4] gesichert werden, einer der laufenden europäischen Industrieinitiativen. So wurden beispielsweise im Projekt FITUP in den Bereichen Telekommunikation und Sicherheitsfunknetz POLYCOM an insgesamt neun Standorten in der Schweiz unterbrechungsfreie Stromversorgungsanlagen mit Brennstoffzellen/Wasserstoff-Systemen ausgerüstet. Insgesamt kommt der EU-Unterstützung im Forschungsbereich Wasserstoff eine wichtige Bedeutung zu.

### Ausblick 2012

Im Frühjahr 2012 wird in Brugg im Rahmen des Brennstoffzellen-Bus-Projekts von PostAuto (siehe Jahresbericht Brennstoffzellen) die schweizweit erste Wasserstofftankstelle in Betrieb gehen. Dieses Grossprojekt zusammen mit andern erfolgreich laufenden Pilot- und Demoprojekten ermöglichen es, dass auch in der Schweiz die Aufmerksamkeit auf die Potenziale dieser Technologie im Zusammenhang mit dem Umbau der Energiewirtschaft erhöht werden kann. Das Forschungsprogramm Wasserstoff versucht dies mit den bescheidenen zu Verfügung stehenden Mittel in enger Zusammenarbeit mit verschiedensten Förderstellen weiter zu fördern.



## Highlights aus Forschung und Entwicklung

Um Wasserstoff als Energieträger in einer nachhaltigen Energieversorgung einzusetzen, müssen die heute existierenden Verfahren zur Produktion, Speicherung und Verteilung verbessert werden. Insbesondere sollte dazu der Anteil des regenerativ hergestellten Wasserstoffs deutlich gesteigert werden. Hier leisten die zum Teil grundlegenden Forschungsaktivitäten an verschiedensten Institutionen in der Schweiz wesentliche Beiträge.

### Alkalische Hochdruckelektrolyse zur nachhaltigen Bereitstellung von Wasserstoff

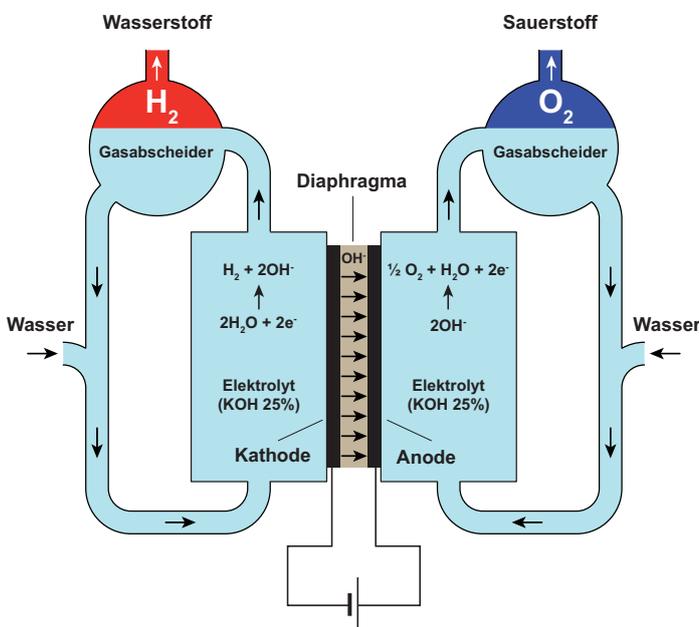
Als Basisstoff für die chemische Industrie, Raffinerien oder etwa die Stahlindustrie wird Wasserstoff zum allergrössten Teil aus fossilen Energieträgern durch Dampfreformierung gewonnen. Nur rund zwei Prozent des Wasserstoffs wird weltweit durch Elektrolyse bereitgestellt, in dem elektrische Energie genutzt wird, um Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff

aufzuspalten. Dies lohnt sich vor allem dort, wo Strom kostengünstig zur Verfügung steht. Die alkalische Wasserelektrolyse ist eine industriell etablierte Technologie mit Grossanlagen, deren Kapazitäten im Bereich von einigen Zehntausend Normkubikmetern Wasserstoff pro Stunde liegen. Im Vergleich dazu stellen Polymer-Membran-Elektrolyseure mit Protonen-leitenden festen Elektrolyten sowie Hochtemperatur-Elektrolyseure mit Sauerstoff-Ionen-leitenden Elektrolyte Technologien dar, welche sich noch in der Entwicklung befinden.

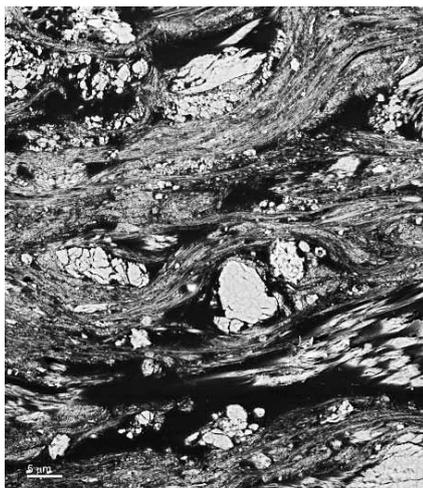
Die alkalische Elektrolyse bei erhöhtem Druck (30 bar) erzielt eine besonders hohe Effizienz bei der Umwandlung von Strom zu Wasserstoff und zeichnet sich durch eine hohe Verfügbarkeit sowie durch relative kurze Ansprechzeiten aus, was eine dynamische Regelung ermöglicht. Solche Eigenschaften prädestinieren diese Technologie für einen Einsatz im Zusammenhang mit der Integration von stochastischer Elektrizitätsproduktion aus Wind- und Sonnenenergie [1]. In der Schweiz produziert

die Firma Industrie Haute Technologie (IHT) alkalische Gross-Elektrolyseure mit einer Wasserstoff-Produktionskapazität von 760 Nm<sup>3</sup>/h mit einer Effizienz von rund 80 %. Damit gehören diese Anlagen zu den grössten ihrer Art und befinden sich weltweit in Betrieb mit Laufzeiten von zum Teil mehr als 30 Jahren.

In den letzten Jahren wurden in starker Zusammenarbeit mit der EMPA Dübendorf neue Diaphragmen entwickelt, einerseits um die Effizienz zu erhöhen und insbesondere, um die auf Asbest basierenden traditionell eingesetzten Diaphragmen zu ersetzen. Diese Entwicklungsarbeiten wurden vom Bund (KTI, BFE), Swisselectric Research und durch Mittel der Europäischen Kommission unterstützt. Die Herausforderung bestand darin, Materialien zu entwickeln, welche eine gute Trennung der Produktgase (Wasserstoff und Sauerstoff) erlauben. Weiter sollten die neuen Membranen einen geringen Haftkoeffizienten aufweisen, damit die entstehenden Bläschen schnell entweichen. Energieverluste bei der Elektro-



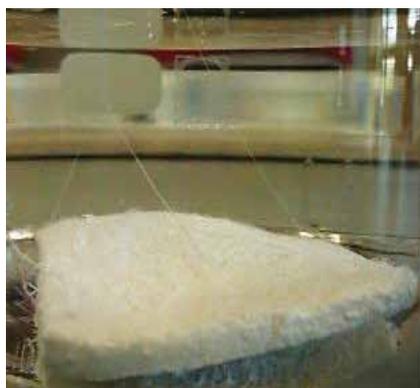
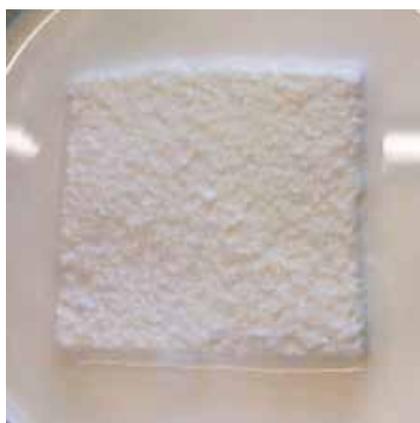
Figur 1: (links) Bei der alkalischen Elektrolyse dient eine 25-prozentige Kalilauge (KOH) als Elektrolyt. Durch das Anlegen einer Gleichspannung wird an der Kathode Wasser zu Wasserstoff und OH<sup>-</sup>-Ionen zersetzt. Theoretisch sind hierfür 1,23 Volt erforderlich, was der Dissoziationsenergie für Wasser von 286 kJ/mol entspricht. Typische Zellenspannungen liegen jedoch im Bereich von 1,8 bis 2 Volt. Das Ionen-leitende Diaphragma erlaubt den Ladungsausgleich in der Zelle und trennt die beiden Reaktionsgase Wasserstoff und Sauerstoff voneinander. (rechts) Bei industriellen Grosselektrolyseuren werden etliche Zellen in Serie hintereinander geschaltet, so zum Beispiel bei den Hochdruckelektrolyseuren von Industrie Haute Technologie SA, den grössten Druckelektrolyseureinheiten (3 MPa) weltweit mit einer Kapazität pro Einheit von bis zu 760 Nm<sup>3</sup>/h. Das Bild zeigt eine Installation bei der Firma Hrand Djvahirdjian SA ([www.djeva.com/](http://www.djeva.com/)), wo Wasserstoff und Sauerstoff in grossen Mengen (bis zu 50'000 Nm<sup>3</sup> pro Tag) zur Produktion synthetischer Edelsteine eingesetzt wird.



Figur 2: Raster-Elektronen-Mikroskop-Aufnahme eines auf Asbest basierenden Diaphragmas, eingebettet in einem organischen Harz, um eine konstante Dicke von 2,5 mm zu erreichen. Die nano-tubularen Fasern zeigen ein grosses Längen/Durchmesser-Verhältnis und bilden Bündel, welche flexibel und stabil genug sind, um als Gas-trennende Diaphragmen in Elektrolyseuren eingesetzt zu werden. Solche Diaphragmen sind im aggressiven Elektrolyten chemisch stabil und haben eine hohe Porosität von 50 % bei gleichzeitig guter ionischer Leitfähigkeit.

lyse sind zum grössten Teil durch die ohmschen Verluste am Diaphragma sowie durch anodische und kathodische Überspannungen gegeben. Daher sollten die neu entwickelten Diaphragmen eine stärkere ionische Leitfähigkeit zeigen und gleichzeitig über mehrere Jahrzehnte chemisch stabil bleiben in einer konzentrierten (> 25 wt. %) Kaliumhydroxid (KOH)-Lösung bei erhöhter Temperatur (85 °C). Der Durchmesser der Diaphragmen beträgt 1,6 m, sodass ebenfalls eine hohe mechanische Stabilität gefordert ist.

Um diese verschiedenen Eigenschaften erfüllen zu können, wurden verschiedene Mineralien, Keramiken und Kombinationen mit Polymeren in Erwägung gezogen. Spezifisch ausgewählte Materialien wurden mit dem bisher verwendeten Asbest-Material Chrysotil verglichen. Voraussetzung dazu war ein grundlegendes Verständnis der Korrelation zwischen der Mikrostruktur des Diaphragmas und den elektrochemischen Eigenschaften der Zelle. Insbesondere die Porosität hat



Figur 3: Herstellung der neuen IHT-Membranen: (Links) Polymer-Gewebe, (Mitte) eingetaucht in ein Gemisch aus Polymeren, Lösungsmitteln und inorganischem Füllmaterial, (Rechts) Koagulation der impregnierten Membran. Die notwendige Dicke (2,5–3 mm) wird durch Pressen erreicht.

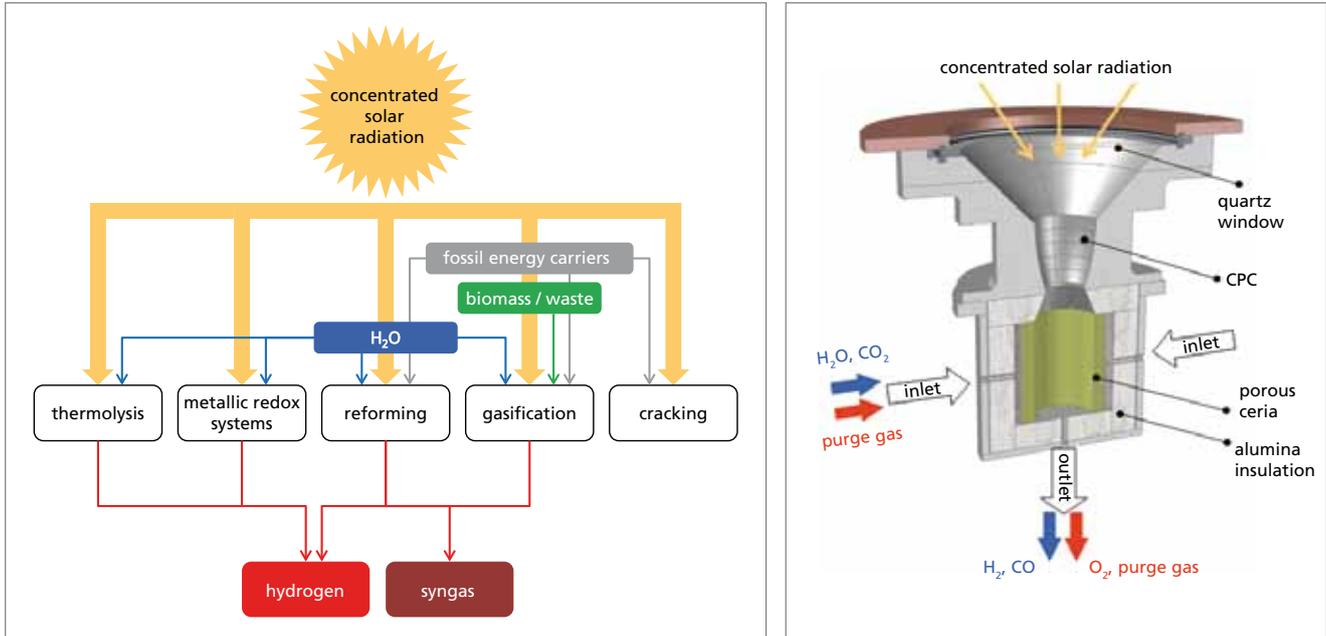
einen grossen Einfluss sowohl auf die ionische Leitfähigkeit, als auch auf die Reinheiten der Produktgase und ist daher ein zentraler Parameter. In einem ersten Schritt wurde die Struktur der bis anhin verwendeten auf Chrysotil basierenden Diaphragmen detailliert untersucht, um die Porenstruktur und die Gesamtporosität, zu bestimmen.

Diaphragmen basierend auf der Kombination von minearischen Materi-

alien (Olivin) mit Polysulfun ergaben Zellen mit guten Gasreinheiten und geringen Überspannungen, jedoch liessen sich diese nicht auf die benötigten Durchmesser aufskalieren und wären für einen industriellen Einsatz auch nicht wirtschaftlich in der Herstellung. Keramik-Membranen basierend auf Zirkon-Oxid zeigten ebenfalls sehr gute elektrochemische Eigenschaften. Hier kann die Porosität durch die Beimischung von Kohlenstoff, der anschliessend bei hohen Temperaturen ausgebrannt wurde, gezielt eingestellt werden. Solche Membranen genügen jedoch ebenfalls nicht der geforderten mechanischen Stabilität.

Um ein Diaphragma mit ausreichend hoher mechanischer Stabilität zu erreichen, wurde schliesslich ein Prozess entwickelt, bei dem inorganische Füllmaterialien ( $ZrO_2$ ,  $BaTiO_3$ ,  $BaSO_4$ , Olivin) in eine tragende Polymer-Matrix (Polyphenylsulfid) eingebettet wurden. Dazu wurde ein Polyphenylsulfid-Gewebe in ein Gemisch aus Polymeren, Lösungsmittel und inorganischem Pulver eingetaucht. Eine poröse Struktur wurde erreicht durch Auswaschen des Lösungsmittel in einem lösungsmittel-freien Bad, wobei verschiedene Porositäten durch das Einstellen der Mengenverhältnisse im Gemisch aus Polymeren, Lösungsmittel und inorganischem Pulver erzielt werden konnten.

So hergestellte Diaphragmen von 20 mm Durchmesser wurden an der EMPA elektrochemisch charakterisiert. Die gemessenen ionischen Leitfähigkeiten liegen mit 0,2–0,32 S/cm deutlich über denen von Asbest mit 0,12 S/cm. Die Porositäten liegen mit 65–71 % leicht über denen von Asbest (rund 50 %). Ebenfalls wurden Gasreinheiten analysiert. Um abschliessend bestimmen zu können, ob diese Materialien als Ersatz in den Gross-Elektrolyseuren genutzt werden können, wurde bei IHT ein voll-automatisierter Pilot-Elektrolyseur für einen Membrandurchmesser von 130 mm aufgebaut (Titelbild). Dieser entspricht in den betrieblichen Bedingungen (30 bar, 25 wt. % KOH, 85 °C) den grossen Elektrolyseuren mit Membrandurchmessern von 1'600 mm. In einem Mehrzellen-Stack können verschiedene Diaphragmen direkt miteinander und in Bezug auf die ursprünglichen Asbest-Membranen verglichen



Figur 4: (Links) Konzentrierte Solarenergie kann über verschiedene thermochemische Prozesse in speicherbare chemische Energieträger umgewandelt werden. (Rechts) Reaktor zur Produktion von Wasserstoff und Synthesegas mit Ceriumoxid. Rot: Reduktionsprozess, blau: Oxidationsprozess/Produktion von solarem Treibstoff (© Science 330, p.1979, 2010).

werden. Erste Messungen zeigen, dass die Zellenspannungen und Gasreinheiten mit den neuen Diaphragmen den gestellten Anforderungen entsprechen, so dass insgesamt der Ersatz der Asbest-haltigen Membranen als erfolgreich verlaufen ist. Als letzter Schritt vor einem kommerziellen Einsatz müssen die neuen Membranen noch auf der 1:1-Skala in einem 6-Zellen-Elektrolyseur getestet werden.

## Solarthermische Produktion von Wasserstoff und Synthesegas

Mittels der Umwandlung von konzentrierter Solarstrahlung in chemische Energieträger kann solare Energie langfristig gespeichert und über weite Distanzen transportiert werden. Das Labor für Erneuerbare Energieträger am Energietechnologie-Institut der ETH Zürich [5] zusammen mit dem Labor für Solartechnik (STL) des Paul Scherrer Instituts (PSI) erforscht und entwickelt dazu verschiedene thermochemische Prozesse zur Herstellung solarer Treibstoffe («solar fuels»). In Zentrum stehen dabei die Aufspaltung von Wasser (und CO<sub>2</sub>) in thermochemischen Kreisprozesse mittels Metalloxid-Redox-Systemen in Wasserstoff (und

Kohlenmonoxid) sowie die solarthermische Vergasung sowohl von fossilen Energieträgern als auch von biologischen Abfällen.

Im Berichtsjahr wurde im Rahmen eines KTI-Projekts ein an der ETH Zürich und am PSI entwickelter 250 kW-Solarreaktor zur Vergasung von verschiedensten organischen Abfällen erfolgreich in einer Pilotanlage an der «Plataforma Solar de Almeria» (PSA) getestet. Dabei wurden bei Temperaturen 1'200 °C organische Substanzen wie Abfälle aus der Zuckerfabrikation, Holzschnitzel oder Getreidespreu zusammen mit Wasserdampf vergast und zu einem Gemisch aus Wasserstoff und

Kohlenmonoxid (Synthesegas) umgewandelt. Über die Fischer-Tropsch-Synthese kann Synthesegas weiter in flüssige Treibstoffe (Kerosin, Benzin) umgewandelt werden. Der Einsatz konzentrierter Sonnenenergie erlaubt es, die für die Umwandlungsprozesse notwendige Energie bereitzustellen, ohne dass diese der Biomasse entnommen wird [6].

Im Bereich der solarthermischen Wasserstoffproduktion über die Nutzung von Metalloxid-Redox-Systemen wurden im Berichtsjahr in einem langfristigen Projekt des Labors für Solartechnik zur thermischen Dissoziation von Zinkoxid zu Zink und Sauerstoff erst-



Figur 5: Konzentrierende Solaranlage des CNRS-Labors in Odeillo, Frankreich (1-MW-Solar furnace).

mals ein 100 kW-Reaktor am 1 MW-Solarofen in Odeillo (CNRS Frankreich) getestet, wo wichtige operative Erfahrungen gesammelt werden. Das Testen eines solarthermischen Redox-Zyklus auf diesem vor-industriellen Massstab ist weltweit einzigartig. Ziel des Projekts, welches in einer zweiten Messkampagne 2012 erreicht werden soll, sind reproduzierbare Experimente zur solaren Zinkherstellung mit Wirkungsgrad über 15 %. In einem parallel durchgeführten Laborprojekt an der ETH Zürich wird der nich-solare exothermische Prozess zur Gewinnung

von Wasserstoff aus dem solar hergestellten Zink untersucht.

Grosse Aufmerksamkeit erregten neue Forschungsergebnisse eines neuartigen Metalloxid-Redox-Systems. Hier konnte demonstriert werden, dass durch zyklisch ablaufende Oxidation und Reduktion von Ceriumoxid ( $\text{CeO}_2$ ) in einem einzigen relativ einfach gebauten Solarreaktor Wasser und/oder Kohlendioxid in Wasserstoff und Syngas umgewandelt werden kann [7]. Die thermodynamischen Materialeigenschaften von  $\text{CeO}_2$  würden theoretisch Umwandlungseffizienzen von 16–

19 % zulassen. Die Weiterentwicklung des auf Ceriumoxid basierenden Zyklus wird weitergeführt in einem grösseren EU-Projekt (SOLAR-JET), wo mit Integration der Fischer-Tropsch-Synthese der ganze Umwandlungskette von konzentrierter Solarstrahlung bis zu synthetischem Kerosin aufgezeigt werden soll.

## Pilot- und Demonstrationsprojekte

Im Bereich Umsetzung nahm 2011 die Anzahl verschiedener Pilot- und Demonstrationsprojekte erfreulicherweise zu, dies nicht zu letzt durch Beteiligung von Schweizer Forschungsinstitutionen und Industrieunternehmen an grösseren europäischen Projekten im Rahmen des Joint Undertaking Fuel Cell and Hydrogen. So startete im Berichtsjahr der Aufbau einer ersten Schweizer Wasserstofftankstelle für Busse in Brugg, welche im Frühjahr 2012 in Betrieb genommen wird (siehe Überblicksbericht Brennstoffzellen).

### FITUP – Feldversuch zur unterbrechungsfreien Stromversorgung mit Wasserstoff und Brennstoffzellen

Unterbrechungsfreie Stromversorgungsanlagen (USV) gelten allgemein als ideale Einsatzoptionen für Brennstoffzellensysteme und Wasserstoff. Vorteile gegenüber konventionellen Systemen liegen insbesondere im geringen Wartungsaufwand, sowie in einem modularen Aufbau, und einer flexiblen Autonomiezeit, welche durch

die Menge an bereitgestelltem Wasserstoff bestimmt wird. Ein grosser europäischer Feldversuch (FITUP) [8], welcher durch die langjährigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an der Hochschule Luzern mitinitiiert wurde, soll helfen, die Markteinführung solcher Systeme zu erleichtern. Dazu werden in diesem Projekt Feldversuche an rund 20 verschiedenen Standorten durchgeführt, um die Technologiereife bei unterschiedlichsten Bedingungen zu demonstrieren. Konkrete Projektziele sind eine Verfügbarkeit grösser als 95 %, funktionierende Systeme für mehr als 1'500 Betriebsstunden und mehr als 1'000 Start-Stop-Zyklen.

In der Schweiz konnten acht verschiedene Pilot-Standorte gefunden werden (drei bei Swisscom, zwei jeweils bei den Kantonspolizeien Nidwalden und Luzern, sowie eine bei der Kantonspolizei Bern), wo USV für Mobil und Polizei-Funk-Antennen eingesetzt werden. Der Standort bei der Kantonspolizei Bern wird über über das Bundesamt für Energie co-finanziert. Hier kommt eine USV-Anlage von Benning Schweiz zum Einsatz. Die Feldtests laufen über mehrere Jahre und ein Teil der Schweizer Anlagen wird in den Aufbau des Sicherheitsfunknetzes POLYCOM [9] integriert. Hier bietet sich in den kommenden Jahren ein erster Pilotmarkt in der Schweiz für solche Anlagen an.



Figur 6: (Links) Integration eines kommerziellen Brennstoffzellensystems (T2000 von ReLion) in ein System zur unterbrechungsfreien Stromversorgung (UPS, Benning) (HTA Luzern). Die Leistung der Anlage liegt bei 2 bis 4 kW mit einer Autonomiezeit von bis zu 48 Stunden. (Rechts) Einsatz des UPS-Systems in einer Antennenanlage des Kantonspolizei Bern für das Sicherheitsfunknetz POLYCOM..

## Nationale Zusammenarbeit

Auch im Berichtsjahr wurde die nationale Zusammenarbeit zwischen Projektnehmern weiter gepflegt. In vom BFE unterstützten Projekten bestehen verschiedene Arbeitsnetzwerke, so zum Beispiel bei der solaren Wasserstoffproduktion mittels Photoelektrochemie (PEChouse, <http://pechouse.epfl.ch>). Das von der Empa organisierte internationale Symposium Hydrogen and Energy fand zum sechsten mal 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. Hier wirken sich die geringeren zur Verfügung stehenden Mittel, insbesondere im Bereich Forschung und Entwicklung, negativ aus.

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](http://www.hydropole.ch)) organisiert.

## Internationale Zusammenarbeit

Das Wasserstoffprogramm (HIA) der IEA ([www.ieahia.org](http://www.ieahia.org)) bildet neben der International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy (IPHE) die 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 sind Schweizer Akteure aktiv in verschiedensten Tasks. So wirkt die Empa im Task «Hydrogen Safety» mit und das PSI vertritt die Schweiz im Task «High Temperature Production of Hydrogen». Der «Wind Energy and Hydrogen Integration» wurde 2011 erfolgreich abgeschlossen. Hier hatte die Schweiz durch die Beteiligung eines industriellen Partners (Industrie Haute Technologie SA) einen zentralen Beitrag, indem dieser einen alkalischen Hochdruckelektrolyseur zu Testzwecken lieferte, welcher sich besonders gut für den Betrieb mit fluktuierenden Quellen wie Photovoltaik und Wind eignet. Das in diesem Task gebildete Konsortium arbeitet weiter zusammen in einem neuen EU-Projekt (ELYGRID). Schliesslich vertritt die EPFL die Schweiz im Forschungstask «WaterPhotolysis». Die EPFL ist hier mit ihrer Koordinationsfunktion im Bereich der Oxid-basierten Photoelectrolyse in Europa ein zentraler Partner.

Weiter ist die Schweiz Mitglied in der European Hydrogen Association EHA ([www.h2euro.org](http://www.h2euro.org)), welche insbesondere durch die Publikationen von Strategiepapieren und Newslettern zum Thema Wasserstoff aktiv ist.

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

Verschiedenste Schweizer Akteure beteiligen sich aktiv an dem seit 2008 laufenden Programm Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU). 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 (N.ERGHY, [www.nerghy.eu](http://www.nerghy.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.

## Referenzen

[1] NEMO-Netzwerk kWK-EWE ([www.windwasserstoff.de](http://www.windwasserstoff.de)); Wind-Hydrogen System for Providing Balancing Power ([www.hywindbalance.de](http://www.hywindbalance.de))

[2] M. Sterner, M. Jentsch, und U. Holzhammer: *Energie-wirtschaftliche und ökologische Bewertung eines Wind-gas-Angebotes*, Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (2011) ([michaelwenzl.de/wiki/\\_media/ee:greenpeace\\_energy\\_gutachten\\_windgas\\_fraunhofer\\_sterner.pdf](http://michaelwenzl.de/wiki/_media/ee:greenpeace_energy_gutachten_windgas_fraunhofer_sterner.pdf)).

[3] T. Smolinka, M. Günther und J. Garcke, *Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien*, Fraunhofer ISE/FCBAT (2011) ([www.now-gmbh.de/fileadmin/user\\_upload/RE-Mediathek/RE\\_Publikationen\\_NOW/NOW-Studie-Wasserelektrolyse-2011.pdf](http://www.now-gmbh.de/fileadmin/user_upload/RE-Mediathek/RE_Publikationen_NOW/NOW-Studie-Wasserelektrolyse-2011.pdf)).

[4] <http://www.fch-ju.eu>.

[5] <http://www.pre.ethz.ch/>.

[6] N. Piatkowski, C. Wieckert, A.W. Weimer and A. Stein-feld, *Solar-driven gasification of carbonaceous feedstock—a review*, *Energy Environ. Sci.* 4, p.73 (2011).

[7] W. C. Chueh et al., «High-Flux Solar-Driven Thermochemical Dissociation of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O Using Nonstoichiometric Ceria», *Science* 330, 1791 (2010).

[8] <http://www.fitup-project.eu>.

[9] POLYCOM - Sicherheitsnetz Funk der Schweiz ([www.polycom.admin.ch](http://www.polycom.admin.ch)).

## 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 (PILOT-NMAE)** 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.
- HCYCLES – 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 H<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>-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 H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> 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 H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> yielding syngas (H<sub>2</sub> 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 H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> 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 H<sub>2</sub> 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 TiO<sub>2</sub> connecting the two electrodes and ion-exchange resins like e.g. Nafion, respectively.

- **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<br>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 CO<sub>2</sub> emissions derived from the conventional fossil-fuel-based method. The cost of hydrogen is estimated at 0.05 EUR/kWh (LHV-H<sub>2</sub>). 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<br>aldo.steinfeld@ethz.ch | Period:  | 2007–2011 |
- 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 H<sub>2</sub> and CO. The synthetic gas could be used for substituting fossil fuels in the cement kiln.
- **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<br>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/O<sub>2</sub> 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<br>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<br>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) with extraordinary performance as compared to traditional porous solids such as zeolites and activated carbon. 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.
- **GENIUS – GENERIC DIAGNOSIS INSTRUMENT FOR SOFC SYSTEMS** R+D 5.1.1
- |          |   |          |           |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead:    | HTceramix SA                                    | Funding: | EU-FP7    |
| Contact: | Olivier Bucheli<br>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 GENERIC tool that would only use process values (normal measurements and system control input parameters) and that would be based on a validated diagnostic algorithm.
- **SOLARH2 – RENEWABLE HYDROGEN FROM SUN AND WATER** R+D 5.1.1
- |          |   |          |           |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead:    | Uni Genève  | Funding: | EU-FP7    |
| Contact: | Jean-David Rochaix<br>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<sub>2</sub>, 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.

- **MOLECULAR CATALYSTS MADE OF EARTH-ABUNDANT ELEMENTS FOR ENERGY AND SUSTAINABILITY** R+D 5.1.1
- Lead: EPFL Funding: EU-FP7  
 Contact: Luciana Vaccaro luciana.vaccaro@epfl.ch Period: 2011
- Abstract: Catalysis is an indispensable component for many potential solutions, and fundamental research in catalysis is as urgent as ever. Here, we propose to build up an interdisciplinary research program in molecular catalysis to address the challenges of energy and sustainability. There are two specific aims: (I) bio-inspired sulfur-rich metal complexes as efficient and practical electro-catalysts for hydrogen production and CO<sub>2</sub> reduction; (II) well-defined Fe complexes of chelating pincer ligands for chemo- and stereo-selective organic synthesis.
- **HYTECH/PECHOUSE2** R+D 5.1.1
- Lead: EPFL Funding: BFE  
 Contact: Massimiliano Capezzali PECHouse@epfl.ch Period: 2011–2014
- Abstract: The HyTech project is focused on the realization of breakthroughs and advancing innovative technologies in the field of sustainable H<sub>2</sub> utilization. These developments will have a large impact on future H<sub>2</sub> energy systems. To maximize the efficacy of our efforts, both the disciplines of solar H<sub>2</sub> production and H<sub>2</sub> storage will be engaged by employing the top experts in each field from Switzerland, and by pursuing pioneering approaches.
- **HYTECH (SUSTAINABLE HYDROGEN TECHNOLOGIES)** R+D 5.1.1
- Lead: EPFL Funding: SER / CCEM  
 Contact: Massimiliano Capezzali PECHouse@epfl.ch Period: 2011–2014
- Abstract: The HyTech project is focused on the realization of breakthroughs and advancing innovative technologies in the field of sustainable H<sub>2</sub> utilization. These developments will have a large impact on future H<sub>2</sub> energy systems. To maximize the efficacy of our efforts, both the disciplines of solar H<sub>2</sub> production and H<sub>2</sub> storage will be engaged by employing the top experts in each field from Switzerland, and by pursuing pioneering approaches.
- **PECHOUSE 2 – 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 H<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> 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>)
- **SOLAR LIQUID FUELS FROM H<sub>2</sub>O AND CO<sub>2</sub>** R+D 5.1.1
- Lead: ETHZ Funding: BFE  
 Contact: Aldo Steinfeld aldo.steinfeld@ethz.ch Period: 2011–2014
- Abstract: A two-step solar thermochemical cycle for producing syngas from H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> via Zn/ZnO redox reactions is considered. The second, non-solar, exothermic step is the reaction of Zn with mixtures of H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> yielding high-quality syngas and ZnO. Syngas is further processed to liquid fuels via Fischer-Tropsch or other catalytic reforming processes. This research project is aimed at optimizing and scaling-up the chemical reactor technology for the 2nd step of the cycle.
- **SOLAR-JET - SOLAR CHEMICAL REACTOR DEMONSTRATION AND OPTIMIZATION FOR LONG-TERM AVAILABILITY OF RENEWABLE JET FUEL** R+D 5.1.1
- Lead: ETHZ Funding: EU-FP7  
 Contact: Aldo Steinfeld aldo.steinfeld@ethz.ch Period: 2011–2015
- Abstract: The aim of the SOLAR-JET project is to demonstrate a carbon-neutral path for producing aviation fuel, compatible with current infrastructure, in an economically viable way. The SOLAR-JET project will demonstrate on a laboratory-scale a process that combines concentrated sunlight with CO<sub>2</sub> captured from air and H<sub>2</sub>O to produce kerosene by coupling a two-step solar thermochemical cycle based on non-stoichiometric ceria redox reactions with the Fischer-Tropsch process.
- **IDEALHY (INTEGRATED DESIGN FOR DEMONSTRATION OF EFFICIENT LIQUEFACTION OF HYDROGEN)** P+D 5.1.1
- Lead: WEKA AG Funding: EU-FP7 / BFE  
 Contact: Michael Börsch m.boersch@weka-ag.ch Period: 2011–2014
- Abstract: Das Projekt IDEALHY untersucht, entwickelt und skaliert Prozess-Daten und Modelle und führt zu einem generischen Prozess-Design. Dieses Design soll den strategischen Plan unterstützen, die Wasserstoff-Verflüssigung in großem Maßstab von 30-50t / Tag in einer Anlage zu demonstrieren. Dabei entspricht die Menge einer etwa 20-fachen Erhöhung im Vergleich zu bestehenden oder geplanten Wasserstoff-Verflüssigungsanlagen..

- **PRODUCTION OF ULTRA-PURE HYDROGEN FROM WOODY BIOMASS USING A MODIFIED CHEMICAL LOOPING PROCESS** R+D 5.1.1
- Lead: ETHZ Funding: BFE  
 Contact: Müller Christoph muelchri@ethz.ch Period: 2011–2014  
 Abstract: The proposal is concerned with a novel method for the production of hydrogen from woody biomass which is of sufficient purity to be used directly in PEM fuel cells without substantial gas clean-up, using a modified chemical looping combustion process.
- **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.
- **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 O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> 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: 2006–2011  
 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.mcrt-hydrogen.eu).
- **HY-FORM 1 : PRODUCTION ET OPÉRATION D'UN NOUVEAU SYSTÈME DE GÉNÉRATION D'HYDROGÈNE DÉCENTRALISÉ** P+D 5.1.2
- Lead: Granit SA Funding: BFE  
 Contact: Maurice Jutz Maurice.jutz@granit.net Period: 2010–2012  
 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 CO<sub>2</sub>** 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.
- **DANMC – DIHYDROGEN ACTIVATION AT NON-METALLIC CENTERS** R+D 5.1.4
- Lead: Uni Basel Funding: EU-FP7-people  
 Contact: Andreas Pfalz Andreas.Pfaltz@unibas.ch Period: 2010–2011  
 Abstract: Molecular hydrogen is widely used today in chemical reactions, such as the addition of H<sub>2</sub> 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 H<sub>2</sub>, 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 / SCHWEIZER WASSERSTOFFTANKSTELLE** P+D 5.1.5

Lead: Postauto AG	Funding: EU-FP7 / BFE
Contact: Werner Blatter <a href="mailto:werner.blatter@postauto.ch">werner.blatter@postauto.ch</a>	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 <a href="mailto:irene.walthert@psi.ch">irene.walthert@psi.ch</a>	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 <a href="mailto:klaus.yvon@unige.ch">klaus.yvon@unige.ch</a>	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 <a href="mailto:alex.koch@bucherguyer.ch">alex.koch@bucherguyer.ch</a>	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: EMPA
Contact: Uli Vogt <a href="mailto:uli.vogt@empa.ch">uli.vogt@empa.ch</a>	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](http://www.empa.ch/self)).
- PRODUCTION DE CHALEUR PAR LE BIAIS D'UNE CHAUDIÈRE À HYDROGÈNE** P+D 5.1.5

Lead: Pictet & Cie	Funding: BFE
Contact: Jean-Hugues Hoarau <a href="mailto:jhoarau@pictet.com">jhoarau@pictet.com</a>	Period: 2011–2014

Abstract: Es soll aufgezeigt werden, wie ein Teil des Sanitärwassers im Administrationsgebäude von Pictet & Cie in Genf erneuerbar bereitgestellt werden kann. Hierzu soll Überschussstrom einer hausigenen PV-Anlage zur Produktion von Wasserstoff genutzt werden, welcher in einem neuartigen katalytischen Brenner eingesetzt wird. Ziele des Projektes sind das Aufzeigen von Speicheroptionen für dezentrale Produktion mit Erneuerbaren, insbesondere langfristige oder saisonale.
- ELYGRID - HIGH PRESSURE ALKALINE ELECTROLYSERS FOR ELECTRICITY/H2 PRODUCTION FROM RENEWABLE ENERGIES** R+D 5.1.5

Lead: EMPA / IHT	Funding: EMPA
Contact: Uli Vogt <a href="mailto:uli.vogt@empa.ch">uli.vogt@empa.ch</a>	Period: 2011–2014

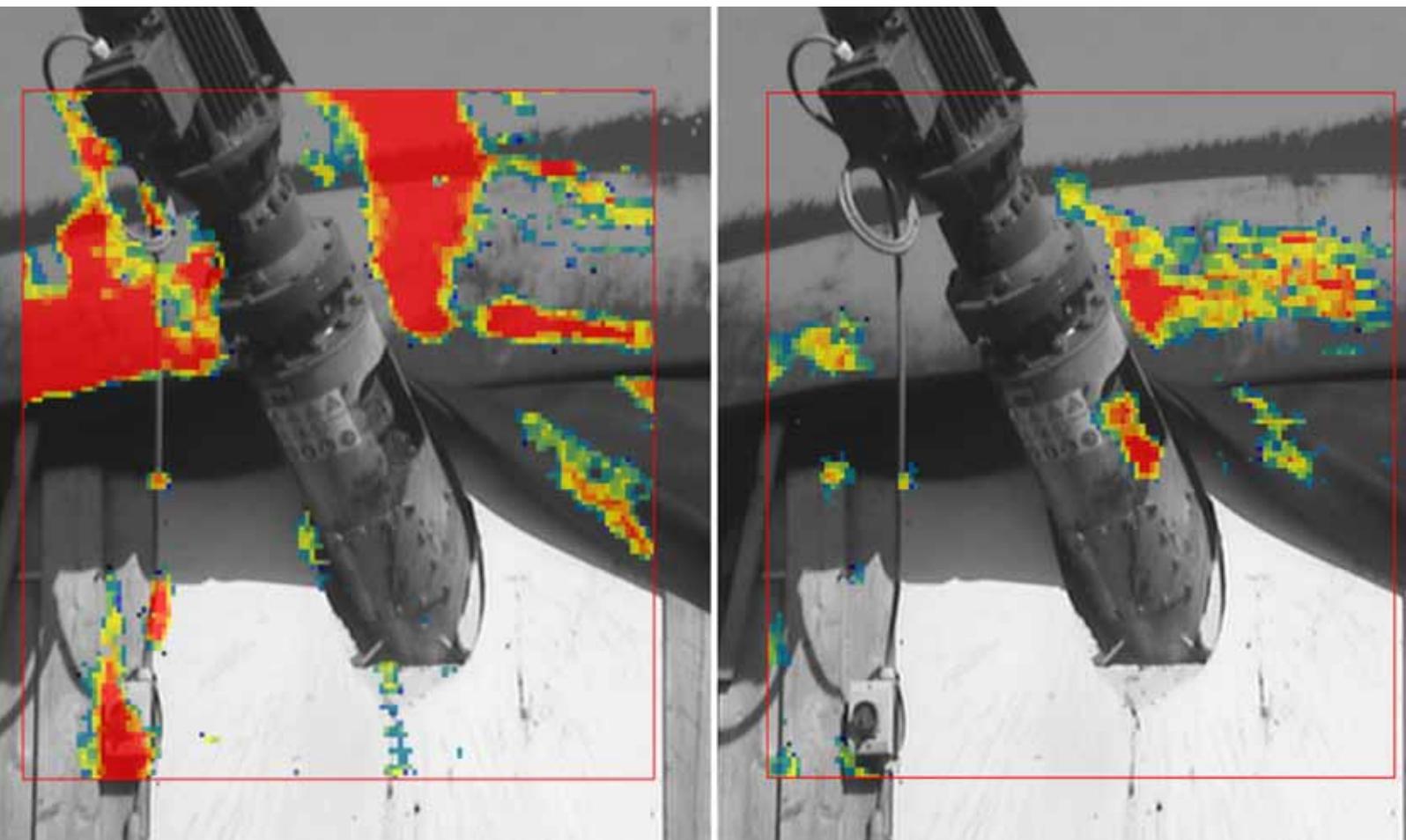
Abstract: The project aims to reduce the total cost of hydrogen production via electrolysis coupled to renewable energy sources, mainly wind. It is focusing on megawatt-scale electrolyzers (>0.5 MW) and current objectives are to improve system efficiency by 20% (10% stack and 10% electrical conversion) and to reduce costs by 25%. The work will be divided into three parts: cell improvements, power electronics, and balance of plant (BOP). Two scalable prototype electrolyzers will be tested.

- **IEA HYDROGEN IMPLEMENTING AGREEMENT (IEA-HIA)** R+D 5.1
- Lead: BFE Funding: BFE  
 Contact: Stefan Oberholzer stefan.oberholzer@bfe.admin.ch Period: 2011  
 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 HYDROGEN SAFETY** R+D 5.1
- Lead: EMPA Funding: BFE  
 Contact: Michael Biemann michael.biemann@empa.ch Period: 2011  
 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.
- **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 (<http://task24.hydrogenoragon.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 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<sub>2</sub> 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 FUNDAMENTAL AND APPLIED HYDROGEN STORAGE MATERIALS DEVELOPMENT** R+D 5.1.2
- Lead: EMPA Funding: BFE  
 Contact: Andreas Züttel andreas.züttel@empa.ch Period: 2011  
 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.



Sandra Hermle

# Biomasse und Holzenergie



**Titelbild:**

**Visualisierte Gasverluste an einem Rührwerk einer Biogasanlage (links vor Einfetten des Rührwerks; rechts nach Einfetten des Rührwerks) (Quelle: Agroscope Reckenholz-Tänikon ART)**

Das Bild zeigt die Gasverluste aus dem Fermenterrührwerk einer Biogasanlage, aufgenommen aus einer Entfernung von ca. 16 m. Bei den rot dargestellten Flächen handelt es sich um hohe Methan-Konzentrationen, die blau dargestellten Flächen weisen niedrige Konzentrationen auf. Die Quelle wurde mit Hilfe des Konzentrationsmessgerätes im Bereich des Antriebsmotors des Rührwerks lokalisiert. Die gemessene Methankonzentration in diesem Bereich betrug maximal 0,65 Vol% CH<sub>4</sub> (bei laufendem Motor).

**BFE Forschungsprogramm Biomasse und Holzenergie**

Überblicksbericht 2011

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
CH-3003 Bern

**Programmleiter BFE (Autor):**

Dr. Sandra Hermle, Bundesamt für Energie (sandra.hermle@bfe.admin.ch)

**Bereichsleiter BFE:**

Dr. Sandra Hermle (sandra.hermle@bfe.admin.ch)

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

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

## Einleitung

Der Einsatz von Biomasse zur Energieproduktion ist sehr komplex und vielfältig. Zum einen existiert eine breite Palette an einsetzbaren Ausgangssubstraten, und zum anderen stehen verschiedene Umwandlungstechnologien zur Produktion von Strom, Wärme und Treibstoff zur Verfügung. Biomasse ist mit dem geringsten technischen Aufwand speicher- und regelbar und für alle drei oben genannten Energiebereiche geeignet. Dementsprechend vielfältig sind die internationalen Forschungsbestrebungen in der Biomasse-nutzung, welche auch durch die lokal verfügbare Biomasse geprägt sind.

Innerhalb der europäischen Union spielt der SET (Strategic Energy Technology) Plan [1] der europäischen Kommission bei der Förderung der Energieproduktion aus erneuerbarer Energie eine wichtige Rolle. Im Rahmen des SET Plans wurde die «European Industry Bioenergy Initiative (EIBI)» [2] initiiert. Ziel dieser Industrieinitiative ist die Demonstration innovativer Bioenergie-Wertschöpfungsketten mit grossem Marktpotenzial, um die Klima- und Energieziele 2020 der EU mittels dem Einsatz nachhaltiger Bioenergie zu erreichen. Die Implementierung der Initiative erfolgt durch Errichtung von Demonstrationsanlagen unter anderem über ein ERA-NET-Plus-Programm. Mit diesem Programm will man sowohl nationale als auch internationale Synergien im Bereich Bioenergie nutzen, um durch kooperative und koordinierte Aktivitäten die Bioenergienutzung voranzutreiben. Auch die Schweiz ist in der Ausgestaltung des Calls für das ERA-NET-Plus-Programm involviert.

Die Implementierung der EIBI mittels Demonstrationsanlagen zeigt, dass viele neue Bioenergie-technologien aus der Forschungsphase heraustreten und

sich Richtung Markteinführung bewegen. Dies wird national wie auch international bei verschiedenen Technologien, wie z.B. der Biomassevergasung zur Produktion von synthetischen Treibstoffen bzw. Methan, der Pyrolyse, der Torrefizierung, der Nutzung von aquatischer Biomasse zur Herstellung von Bioenergieträgern etc. ersichtlich.

Im Forschungsbereich stehen sowohl national wie auch international die Optimierung der Technologien und die Reduktion von Schadstoffen im Vordergrund.

International ist bei der anaeroben Vergärung die Biogasaufbereitung weiterhin eines der wichtigen Themen. Die Aufbereitungstechnologien sind heute Stand der Technik und werden im grossen Rahmen angewendet. Das Europäische Komitee für Normung ist an der Erarbeitung einer Norm bezüglich der Gasqualität von Biomethan (CEN/TC408). In der Forschung wird die Entwicklung von effizienten und rentablen Klein- Aufbereitungsanlagen angestrebt, die auf landwirtschaftlichen Anlagen eingesetzt werden können. Da gerade bei Kleinanlagen der Wärme-Nutzungsgrad gering ist, würde die Aufbereitung eine interessante Alternative darstellen. In Schweden ist eine erste Anlage zur Verflüssigung von Biogas in Betrieb gegangen (Kryotechnik), weitere sind in Planung. Der Vorteil von flüssigem Biogas ist der geringe Platzbedarf, was den Transport erleichtert. Das Verfahren ist jedoch sehr energieaufwändig. Ein weiteres wichtiges Thema betrifft das Gärgutmanagement, was national wie international von Bedeutung ist. Schaut man auf die deutsche Biogasproduktion, so geht der Forschungstrend hin zum Einsatz neuer Substrate wie z.B. Wildpflanzen, Quinoa, Buchweizen

und Sorghum-Hirsens. Eine effizientere Biogasproduktion wird durch den gezielten Einsatz von Enzymen angestrebt.

Bei der festen Biomasse sind verschiedene Themen sowohl von internationalem, als auch teilweise von nationalem Interesse. In Deutschland ist für den Wärmesektor die Energieholzproduktion auf dem Acker mittels schnell nachwachsender Gehölze in Kurzumtriebsplantagen ein Zukunftsthema. Die Fokussierung auf die Erhöhung der Energiedichte von Biomasse, z.B. durch Torrefizierung, spielt international eine wichtige Rolle. Der Einsatz von torrefizierten Biomasse-Brennstoffen wird insbesondere für Kohlekraftwerke von Interesse sein. Ein weiteres Thema, welches in Europa von Bedeutung ist, betrifft die Ascheverwertung von Verbrennungsprozessen. Im Biotreibstoffsektor rechnet man langfristig mit einer Ablösung der 1. Generation mit der 2. Generation, wie z.B. BtL (Biomass-to-Liquids)-Treibstoffen.

Generell werden Forschungsthemen im Biomassebereich immer vernetzter und komplexer. Dementsprechend gewinnen Fragestellungen im Zusammenhang mit der Kombination von verschiedenen Technologien oder über verschiedene Forschungsbereiche hinaus an Bedeutung. Beispiele hierfür sind der gesamte Themenkomplex der Bioraffinerie, Einsatz von Biomasse in industriellen Prozessen zur Substitution fossiler Energieträger, Kombination von Biomassevergasung und Brennstoffzelle, Produktion von Wasserstoff aus Biomasse, um nur einige zu nennen.

IEA Klassifikation: 3.4 Bio-Energy

Schweizer Klassifikation: 2.4 Biomasse und Holz

## Programmschwerpunkte

Das Forschungsprogramm Biomasse und Holzenergie des BFE leistet einen wichtigen Beitrag zur effizienten Nutzung der nationalen Biomasse zur Energieproduktion. Im Fokus der Forschungsförderung stehen die drei Technologien Biomasseverbrennung, Biomassevergasung und anaerobe Vergärung. Alle drei Technologien werden anhand von Forschungsfragen an Schweizer Hochschulen, Fachhochschulen, KMUs und privaten Büros untersucht, um die Verfahren zu optimieren, den Wirkungsgrad zu steigern und die Emissionen zu senken.

### Rückblick und Bewertung 2011

Bei der anaeroben Vergärung war im Jahr 2011 die Erfassung und Quantifizierung von Emissionen ebenso zentral wie Prozessoptimierungen und Ökobilanzen zur optimalen (im ökologischen Sinne) Biomasseverwertung. Bei der Verbrennung lag das Hauptaugenmerk auf der Minderung der Schadstoffemissionen – sowohl durch Primär-, als auch durch Sekundärmassnahmen. Des Weiteren wurden Messverfahren zur Bestimmung der Partikelemissionen entwickelt, welche sowohl primäre, als auch sekundäre organische Aerosole in den Abgasen erfassen können. Ferner sind mehrere P&D Projekte im Bereich Holznutzung aktiv, welche sich u.a. mit der Entwicklung einer marktreifen Technik für die kombinierte Steigerung der Energieeffizienz (durch Wärmerückgewinnung aus den Abgasen) und die Reinigung der Abgase bei Holzfeuerungen beschäftigt. Ein weiteres Projekt hat die Entwicklung eines holzbefeuerten BHKW mit Heissluftturbine im Pilotmassstab zum

Ziel. Anhand einer weiteren Pilotanlage in Form einer Kleinf Feuerung wurde der Betrieb dieser Anlage über längere Zeit mit 100 % Miscanthus als Substrat im Hinblick auf die hohen Anforderungen an die Verbrennung (tiefer Ascheschmelzpunkt, hoher Chlorgehalt) und die Feinstaubemissionen geprüft.

Im Bereich der Biomassevergasung wurde die Entwicklung zu marktreifen Holzvergasungsanlagen durch die Initiierung von Pilot- und Demonstrations (P&D)-Projekten ebenso vorangetrieben, wie auch durch die Entwicklung der Hochtemperaturentschwefelung, welche Dank effizienter Gasreinigung eine Wirkungsgradsteigerung verspricht.

Im Rahmen der Qualitätssicherung wurde die Datengrundlage für Ökobilanzen aktualisiert bzw. aufgrund neuer Erkenntnisse erweitert.

Neben der Beantwortung von wissenschaftlichen Herausforderungen in den einzelnen Forschungsprojekten ist die Vernetzung der Akteure in der Biomasseszene ein wichtiger Aspekt, um Erkenntnisse kritisch zu diskutieren und publik zu machen. Neben dem alle zwei Jahre stattfindenden Holzenergiesymposium (nächste Auflage 2012) [3] wurde im Jahr 2011 erstmals eine Konferenz «Biomasseforschung in der Schweiz» [4] vom BFE initiiert, welche sehr gute Resonanz hatte. Ziel dieser Tagung war der Informationsaustausch zu ausgewählten Themenschwerpunkten der Biomasseforschung im Bereich der «nicht-holzigen» Biomasse, um die Forschung in der Schweiz zu stärken und die einzelnen Akteure noch besser miteinander zu vernetzen (siehe Kapitel Nationale Zusammenarbeit).

### Ausblick

In Zukunft wird die Förderung von P&D-Anlagen von marktnahen Entwicklungen im Biomassebereich eine wichtige Rolle spielen. Für möglichst tiefe spezifische Kosten sind tiefe Investitionskosten und ein hoher Nutzungsgrad wichtige Voraussetzungen. Gleichzeitig gilt es auch, bestehende Anlagen und Prozesse betreffend Betriebskosten zu optimieren und auch mit anderen Technologien – wo sinnvoll – zu kombinieren. Bei der Erzeugung von Strom im Rahmen der Biomassenutzung fällt in erheblichem Masse Wärme an. Um die Energieausbeute bei der Nutzung von Biomasse zu optimieren, gilt es, diese Wärme zu nutzen (optimale Standorte, neue Konzepte, bessere Anlagenintegration). Um die Förderung der Verwendung von biogenen Abfällen, Hofdünger und Reststoffe, welche sich günstig auf die Nachhaltigkeit und Treibhausgasbilanz der ganzen Kette auswirken, und die ein grosses Potenzial besitzen, zu stärken, sollen neue Technologien zur möglichst vollständigen Umsetzung der Abfallbiomasse und zur Wiederverwertung der Reststoffe entwickelt werden. Für die rasche Umsetzung ist nicht nur die Vernetzung der Forscher von Bedeutung sondern in erster Linie die Vernetzung von Industrie und Forschung.

## Highlights aus Forschung und Entwicklung

Die Weiterentwicklung der Messmethodik und die Optimierung der Prozesse wurden im Berichtsjahr sowohl bei der anaeroben Vergärung, als auch bei der Verbrennung und Vergasung von Biomasse bearbeitet.

### Weiterentwicklungen im Bereich Messmethodik

Bei der anaeroben Vergärung existieren Vergärbarkeitstests seit bald 25 Jahren und trotzdem sind die Resultate oft unzuverlässig, da die Methanproduktion regelmässig über- oder unterschätzt wird. Die falsche Abschätzung der Biogasproduktion hat vor allem für die Dimensionierung von Anlagen nicht zu unterschätzende Konsequenzen. Für die Verwertung des Biogases in Blockheizkraftwerken werden Module verschiedener Grössen verwendet. Wird zu wenig Biogas produziert, können ein oder mehrere Module nicht in Betrieb genommen werden, wird zu viel produziert, muss Biogas abgefackelt werden, da die Verwertungsanlage zu klein dimensioniert wurde. Mehrere Grossanlagen haben mit diesen Problemen zu kämpfen, Probleme, die man hätte vermeiden können, wenn das Biogasproduktionspotenzial der zu vergärenden Substrate zu Beginn realistischer hätte abgeschätzt werden können.

Verantwortlich für die schwer miteinander vergleichbaren Resultate von Vergärungstests sind die Testbedingungen, welche von der verwendeten Norm und den spezifischen Laborgewohnheiten abhängen (Wahl des Inokulums, Medienzusammensetzung, Volumen des Testreaktors). Ziel dieses Projekts war, die Parameter zu analysieren, die zu solchen Unsicherheiten führen. Das bessere Verständnis des Testverfahrens soll erlauben, genauere Anweisungen zu umstrittenen Punkten zu geben und damit die Verlässlichkeit der Resultate zu verbessern.

Die Literaturstudie sowie die Resultate von zwei Ringtests haben klar gezeigt, dass Lücken bestehen bei den Anweisungen zu Vergärbarkeitstests. Abweichungen der Resultate bis 30 % bei einem Referenzsubstrat (Cellulose) und bis 75 % bei komplexeren Substraten mussten festgestellt werden.

Zur Durchführung der Experimente wurde ein Protokoll mit folgenden fixen Schlüsselparametern erarbeitet: Ein Verhältnis der oTS-Inokulum/oTS-Substrat von 4:1 (oTS = organische Trockensubstanz), eine Konzentration der oTS-gesamt von ca. 40 g/L und die Abwesenheit von jeglichen Zusätzen wie Mineralsalze, Vitamine, und Spurenelemente. Der Einfluss der Herkunft und Adaptierung des Inokulums wurden im Rahmen der Studie analysiert. Gärschlamm aus Faultürmen in Abwasserreinigungsanlage (ARA), Upflow anaerobic sludge blanket (UASB), Landwirtschaft und Industrie wurden getestet, mit und ohne Adaptierung an das Gärsubstrat.

Die Resultate haben gezeigt, dass das definierte Protokoll eine robuste Testführung gewährt. Die Herkunft des Inokulums war nicht massgebend, unter der Bedingung, dass es von guter Qualität ist, und dass die Temperatur des Tests mit derjenigen des Faulturms übereinstimmt. Unter den gegebenen Bedingungen hatte auch die Adaptierung des Inokulums keinen bedeutenden Einfluss auf das Testresultat (lediglich in einigen Fällen auf die Kinetik). In Folge der Experimente wurde ein Empfehlungskatalog zu den Vergärbarkeitstests gemäss dem Stand der Technik erstellt.

Im Bereich Feststoffverbrennung stand die Entwicklung und Validierung eines

neuen Messverfahrens für Partikelemissionen (particulate matter emissions, PME) im Vordergrund. Das Verfahren soll Basis für ein zukünftiges einheitliches Messprozedere sein, das in eine europäische Norm einfließen soll.

Die Arbeiten sind in fünf Arbeitspakete aufgeteilt, die von insgesamt 19 Partnern aus 10 europäischen Ländern bearbeitet werden. Im europäischen Projektkonsortium sind Forschungsanstalten und Prüflabors vertreten.

Im Berichtsjahr erarbeitete das Schweizer Projektkonsortium ein Set von PME-Messverfahren und beurteilte ihr Potenzial als mögliche europäische Messnorm. Die evaluierten Messverfahren sollen sowohl die Primärpartikel als auch die organischen Sekundärpartikel (secondary organic aerosols, SOA) erfassen können, da beide Fraktionen zu den partikulären Frachten in der Umgebungsluft beitragen.

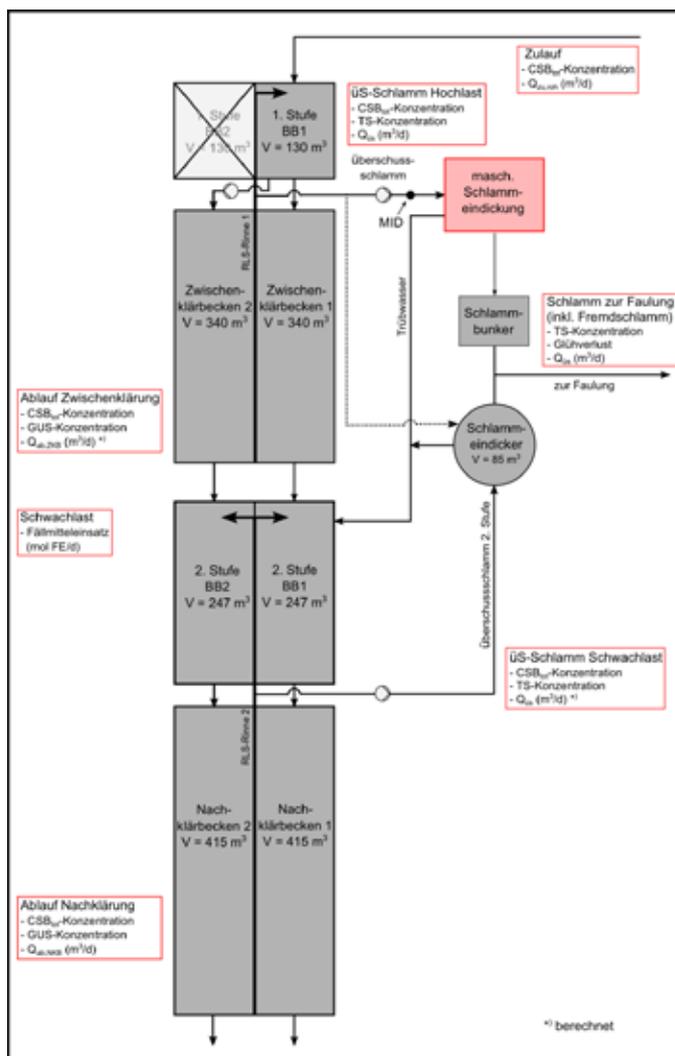
Zwei Ansätze zur Erfassung von Sekundäraerosolen sollen vertieft untersucht werden: die Messung von organischen Substanzen in den Abgasen mit Ausschluss von Methan mittels einer Nicht-Methan-FID-Gasmessung und die Erzeugung von SOA in einer Mikro-Smog-Kammer, die organische Substanzen in den Abgasen durch die Bestrahlung mit UV-Strahlung zu SOA umwandelt.



Figur 1: Vorbereitung des Batch-Tests: Spülung des Gasdoms mit  $N_2/CO_2$  (Quelle: EPFL).



Figur 2: Migro-Smog-Kammer zur Erzeugung von sekundären organischen Aerosolen aus Abgasen mittels UV-Strahlung (Quelle: FHNW).



Figur 3: Anlagenlayout sowie Messstellen zur CSB- und Schlammbilanz über die Hochlaststufe während des Pilotbetriebs auf der ARA Vorderes Prattigau (Quelle: Kappeler Concept AG).

Das europäische technische Normenkomitee CEN/TC 295 WG5 (die Schweiz ist darin vertreten) arbeitet derzeit daran, eine kurzfristige PME-Messmethode zu entwickeln, und steht deshalb in intensivem fachlichen Austausch mit dem europäischen Projektkonsortium.

### Prozessoptimierungen bei Kläranlagen und der Holzvergassung

Im Bereich Prozessoptimierung wurde im Jahr 2011 unter anderem das Konzept der energieautarken Kläranlage anhand einer realen Anlage verfolgt. Kommunale Kläranlagen gehören in der Regel zu den grössten einzelnen Energieverbrauchern der öffentlichen Hand. Schweizerische Kläranlagen, welche dem Stand der Technik entsprechen, sind nahezu wärmeautark. Bezüglich Elektrizität wird üblicherweise jedoch nur ein Eigenversorgungsgrad von ca. 50 % erreicht. Aufgrund von diversen Abschätzungen kann jedoch erwartet werden, dass ein energieautarker Betrieb von Kläranlagen möglich sein sollte. Besonders geeignet sind hierfür Kläranlagen, welche mit einem zweistufigen Belebtschlammverfahren ausgerüstet sind. Es ist zu erwarten, dass infolge einer äusserst starken Belastung der Hochlaststufe ein Grossteil der organischen Fracht an den Belebtschlamm adsorbiert. Dies führt dazu, dass einerseits der für die Belüftung der biologischen Stufe erforderliche Strombedarf reduziert und andererseits eine grössere organische Fracht der Faulung zugeführt werden kann, was sich positiv auf die Energieproduktion auswirkt. Ein erster Pilotversuch wurde auf einer Anlage durchgeführt. Hierfür wurde durch eine Verfahrensumstellung die Hochlastbiologie über den Zeitraum von sieben Wochen äusserst stark belastet. Mittels einer CSB- (chemischer Sauerstoffbedarf) und einer Schlammbilanz über die Hochlaststufe wurde das Adsorptionsverhalten des Belebtschlammes untersucht. Es zeigte sich, dass während der Versuchsphase ca. 70 % der gesamten CSB-Zulauf-fracht in der Hochlaststufe eliminiert werden konnte. Verbunden mit einer erhöhten Schlammproduktion wurde ein Anstieg der Gasproduktion von ca.

26 % gegenüber dem üblichen Betrieb der ARA gemessen. Die erste Auswertung der erhobenen Daten zeigt, dass das Konzept viel versprechend ist.

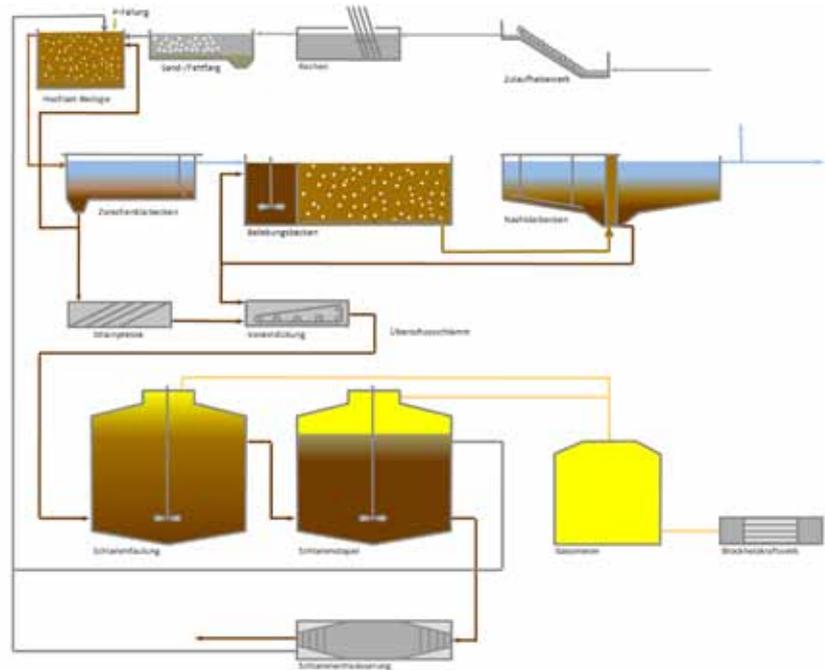
Auch bei der Holzvergasung gibt es noch Optimierungspotenzial bezüglich der ablaufenden Prozesse.

Gegenüber der Niedertemperatur-Entschwefelung mittels Gaswäsche, die zurzeit bei der Herstellung von synthetischem Erdgas (SNG) aus Holz Stand der Technik ist, hat eine Hochtemperatur-Entschwefelung Vorteile hinsichtlich des Gesamtwirkungsgrades und der Anlagenverfügbarkeit. Ein solcher Schritt erfordert die Umwandlung von organischen Schwefelverbindungen (z.B. Thiophene) im Holzvergaser-Produktgas zu Schwefelwasserstoff, da sich dieser mittels etablierten Standardverfahren wie etwa Zinkoxid-Betten zuverlässig bei hohen Temperaturen auch in Gegenwart von Wasserdampf abscheiden lässt.

Aufgrund einer kritischen qualitativen Analyse möglicher Prozessketten für die SNG-Technologie mit einer Hochtemperatur-Entschwefelung wurden die Reaktionsbedingungen für das Materialscreening und die Experimente zur Ermittlung kinetischer Parameter eingengt. Es zeigte sich, dass bei Anwendung eines Hochtemperaturfilters Reaktionstemperaturen ab 300 °C bis zu 600 °C möglich sind.

In einer parallelen Aktivität wurden die diagnostischen Möglichkeiten zur repräsentativen Probenahme und anschließender Analyse der Teer- und Schwefelverbindungen weiter verbessert. Dies geschah einerseits durch systematische Experimente zur Optimierung der Betriebsbedingungen des eingesetzten Gas-Flüssig-Quench-Probenahmesystems. Andererseits wurden die Analysemöglichkeiten der erzeugten Flüssigproben durch qualitative online-Analyse mittels UV-VIS und quantitative offline-Analyse mittels GC-MS, GC-SCD und GC-FID erweitert.

Aufgrund der Prozesskettenanalyse ergab sich, dass neben der notwendigen Umwandlung von organischen Schwefelverbindungen zu Schwefelwasserstoff grundsätzlich weitere Reaktionen der Verbindungen im Holzvergaser-Produktgas ablaufen könnten: Ethylen-



Figur 4: Umrüstung einer Kläranlage mit Vorklärun in eine Anlage mit einer Hochlastbiologie durch Erstellung einer separaten Hochlastbiologie (Quelle: Kappeler Concept AG).

Hydrierung, Teerabbau, Wassergas-Konvertierung sowie Methanisierung der Kohlenoxide. Ausserdem ist mit der Deaktivierung eingesetzter Katalysatoren durch Kohlenstoffablagerungen, Umwandlung der aktiven Phase in Gegenwart von Wasserdampf, aber auch mit Sinterung zu rechnen. Daraus ergab sich, dass die Testbedingungen des Materialscreenings diese Phänomene berücksichtigen sollten.

Einerseits wurden Molybdänsulfid-basierte Standardkatalysatoren (CoMo- und NiMo-Katalysatoren) für die HDS-Stufe (sog. Hydrodesulphurisation) in Raffinerien untersucht, andererseits wurden neue Materialien synthetisiert. Mittels Screeningtests in einem Mikroreaktor konnte festgestellt werden, dass neben den Standardkatalysatoren auch ein Rutheniumsulfid-Typ für die Thiophen-Umwandlung, die Wassergaskonvertierung und die Ethylenhydrierung aktiv ist. Dieses neu synthetisierte Material kann bei deutlich höheren Temperaturen eingesetzt werden als die Standardmaterialien, so dass sich Vorteile bei der Prozessführung ergeben. Für die besten Materialien (CoMo, NiMo, RuS<sub>2</sub>-basiert) wurde eine angewandte Kinetik gemäss Langmuir-Hinshelwood-Ansatz

bestimmt, die die Modellierung der Hochtemperatureschwefelungsstufe und damit die weitere Optimierung ermöglicht.



Figur 5: Laborversuchsanlage für Katalysatoruntersuchungen mit schwefelhaltigen Gasgemischen, z.B. simuliertem Produktgas aus der Biomassevergasung (Quelle: PSI).

## Pilot- und Demonstrationsprojekte

### Heissluftturbine im unteren Leistungsbereich (80–100 kW<sub>el</sub>)

Ein aktuelles P&D-Projekt hat die Entwicklung eines Blockheizkraftwerks mit Holzenergie im unteren Leistungsbereich (80–100 kW<sub>el</sub>) zum Ziel. Der Einsatz der Heissluftturbine soll dort sein, wo eine hohe Laufzeit möglich ist, die thermische Energie abgesetzt und dementsprechend ein hoher Gesamtwirkungsgrad erreicht werden kann (z.B. Sägereien, die ohnehin eine Holzfeuerung haben und bei denen der Brennstoff vorhanden ist, Fernheizungen, Industrieanlagen). Die Heissluftturbine würde eine wesentliche Lücke im Bereich kleinerer Stromerzeuger mit Holz schliessen.

Eine wichtige Voraussetzung für ein marktfähiges Produkt ist die Forderung, dass die mit Holz betriebene Heissluftturbine während 6'000–8'000 h pro Jahr mit wenig Bedienungs- und Unterhaltskosten laufen muss. Im Weiteren muss versucht werden, die gesamte Abluftmenge durch höhere Temperaturen in der Anlage zu reduzieren. Dies, weil die Reinigung grosser Luftmengen sehr teuer und der Eigenstromverbrauch hoch ist. Ebenso muss die Ausnutzung der thermischen Energie und damit der Gesamtwirkungsgrad durch entsprechende Nahwärmetauscher hoch sein.

Herausforderungen in diesem Projekt waren zum einen die Evaluation und Lieferung einer Mikroturbine, die auf eine solche Leistung abgestimmt ist

und zum anderen die hohen Anforderungen an den Abgas-Luft-Wärmetauscher bezüglich der aussergewöhnlich hohen Temperaturen von bis zu 750 °C (Spezialstahl notwendig), welche notwendig sind, um die Turbine rationell zu betreiben. Bei diesen Temperaturen sind neben der Festigkeit auch die Ausdehnungen konstruktiv nicht einfach.

Im November 2011 erfolgte dann die Inbetriebnahme zusammen mit den Fachleuten der Turbine und des Konverters. Bereits am zweiten Tag konnte die Anlage gestartet werden und lieferte erstmals Strom ins Netz. Die Turbine wurde bis zu einer Leistung von 94 kW<sub>el</sub> hochgefahren und anschliessend mit ca. 85 kW<sub>el</sub> weiterbetrieben. In der zweiten Woche nach der Inbetriebnahme konnte man bereits erstmals einen 24-Stundenbetrieb ansetzen und die Anlage über Nacht ohne Kontrolle durch Personen laufen lassen. Im Weiteren wurde das Herunterfahren der Anlage getestet und erste Emissionsmessungen (ohne Staub) durchgeführt. Die Anlage ist Erfolg versprechend, zumal erste Erfahrungen zeigen, dass die angestrebten Werte erreicht werden könnten. Im Weiteren werden nun noch Optimierungen vorgenommen, um einen stabilen Betrieb zu gewährleisten. Anschliessend sind die Leistungsmessungen und deren Auswertung vorgesehen.



Figur 6: Maschinenraum der mit Hackschnitzeln befeuerten Heissluftturbine (Quelle: Schmid AG).

## Nationale Zusammenarbeit

Das Forschungsprogramm Biomasse und Holzenergie pflegt eine intensive Zusammenarbeit mit Hochschulen, Universitäten, privaten Forschungsstellen und Kompetenzzentren.

BFE-intern arbeitete man auch im Jahr 2011 eng mit dem Marktbereich zusammen, um marktrelevante Bedürfnisse im Forschungsprogramm aufzunehmen. In der Begleitgruppe des Forschungsprogramms haben deshalb sowohl die Marktbereichsleiter Biomasse (Sektion Erneuerbare Energien), als auch die Mandatsträger von EnergieSchweiz Einsitz, wodurch sowohl der Informationsfluss, als auch informeller fachlicher Austausch gewährleistet sind. Gleichzeitig erfolgt ausserhalb der Begleitgruppe auch ein Austausch mit anderen Forschungsprogrammen des BFE, welche thematisch eng mit dem Forschungsprogramm Biomasse und Holzenergie verknüpft sind (z. B. WKK, Industrielle Prozesse).

Um die nationale Vernetzung der Fachleute, welche im Bereich «nicht-holzige» Biomasse tätig sind, zu unterstützen wurde im Jahr 2011 erstmals eine Tagung «Biomasseforschung in der Schweiz» vom BFE durchgeführt, welche mit 90 Teilnehmern grosse Resonanz fand. Aktuelle Projekte wurden zu den drei Schwerpunkten (1) Prozessoptimierung von Biogasanlagen, (2) Methan- und Geruchsemissionen und (3) Neue Entwicklungen von Wissenschaftlern als auch von Vertretern von involvierten Unternehmen vorgestellt und diskutiert [4]. Die Rückmeldungen der Teilnehmer zeigten, dass die Veranstaltung in einem 2-jährigen Turnus wiederholt werden soll.

Eine weitere wichtige Tagung im Forschungsbereich wurde vom BAFU und dem Cercl'Air zum Thema «Holzverbrennung und Feinstaub» im November 2011 durchgeführt, welche ebenfalls sehr grossen Anklang fand. Die Tagung zeigte, dass die Spannweite zwischen lufthygienisch schlechten und guten kleinen Holzfeuerungen gross ist. Der Feinstaubausstoss kleiner Heizungen lässt sich aber wirksam verringern, indem auf die Funktionstüchtigkeit und den sachgemässen Betrieb der Anlage geachtet und ausschliesslich geeignetes Brennmaterial verwendet wird. Die Erfahrungen beim Vollzug der LRV-Bestimmungen für mittelgrosse und grosse Holzfeuerungen haben gezeigt, dass selbst bei neuen Anlagen die Grenzwerte bei Normalbetrieb nicht immer eingehalten werden. Die Gründe dafür liegen häufig in Konzeptionsmängeln und beim unsachgemässen Betrieb der Anlagen. Für die Verringerung der Feinstaubemissionen aus solchen Anlagen sind daher Qualitätssicherungsmaßnahmen von entscheidender Bedeutung [5].

Auch die Ämter übergreifende Zusammenarbeit spielt innerhalb des Forschungsprogramms eine wichtige Rolle. Neben der vom BAFU initiierten Koordinationsgruppe Ökobilanzen (Einsitz von BAFU, BBL, BFE, SECO) wurde mit verschiedenen Sektionen des BAFU und auch mit dem BLW der Austausch gepflegt. Ein weiteres Instrument zum ämterübergreifenden Austausch ist die AG Biomasse mit Einsitz von ARE, BAFU, BLW, BVet, EAV, EZV, und SECO.

## Internationale Zusammenarbeit

### IEA

Das BFE ist Mitglied beim Implementing Agreement Bioenergy der IEA (International Energy Agency) [6], welches aus 13 Tasks besteht. Die Schweiz arbeitet in 3 Tasks aktiv mit. Generell haben die Schweizer Vertreter in dem jeweiligen Task zum Ziel, den internationalen Stand von Technik, Forschung und Marktumsetzung zu kennen und in der Schweiz zu vermitteln, und gleichzeitig die Anliegen der Schweiz in der IEA zu vertreten.

#### *Task 32: Biomass Combustion and Co-Firing*

Ziel des IEA Bioenergy Task 32 ist die Förderung des vermehrten Einsatzes von Biomasse in Verbrennungsanlagen zur Energienutzung und Substitution von fossiler Energie [7]. Dazu sollen Schwachstellen der heutigen Versorgung identifiziert und in internationaler Zusammenarbeit an deren Lösung gearbeitet werden. Im Weiteren sollen die Potenziale der zur Biomasseverbrennung geeigneten Sortimente abgeschätzt und so

ein sinnvoller Ausbau der Biomasse unterstützt werden. Die IEA sichert dazu einen Erfahrungsaustausch über Methoden und Verfahren zur Verbesserung der Effizienz und Umweltverträglichkeit von Anlagen zur Biomasseverbrennung. Im Berichtsjahr wurden drei Workshops zu den Themen Aerosole, «Torrefaction» und «Small Scale Biomass Combustion» durchgeführt, welche auch für die Schweiz von Interesse waren. Unter den laufenden Aktivitäten sind für die Schweiz die in Arbeit befindliche Studie über Ascheverwertung sowie die Studie über Sicherheitsaspekte (Silobrände, CO in Silos etc.) von besonderem Interesse.

#### *Task 33: Thermal Gasification of Biomass*

Dieser Task [8] begleitet die Forschung, Umsetzung in Pilot- und Demonstrationsanlagen sowie die Markteinführung und den kommerziellen Anlagenbetrieb der thermischen Vergasung von Biomasse. Konzepte für Kleinanlagen im kW-Bereich als auch für Grossanlagen im 100-MW-Bereich und grösser stehen zur Diskussion.

Forschungsthemen im Bereich Vergasung sind (1) Optimierung der Anlagenkonzepte für CHP, SNG, Mixedfuel und Biofuel-Produktion, (2) Prozessoptimierung für die Herstellung von SNG, Mixedfuel, BtL, (3) Komponente-optimierung: Gasreinigung, Filterkonzepte, Optimierung der Synthetisierung und (4) Verbesserung des gesamten Anlagen-Wirkungsgrades auf den verschiedenen Verfahren. Im vergangenen Jahr wurde zwei Workshops mit den Themen «Gasification and Alternative Fuels Development» und «Biomass Gasification Opportunities in the Forest Industry» durchgeführt. Generell scheinen sich in den skandinavischen Ländern die Forschungsaktivitäten bezüglich Biomassevergasung zu verstärken, was sich auch in der Tatsache niederschlägt, dass sich vermehrt Fachhochschulen mit der thermischen Vergasung auseinandersetzen.

#### *Task 37: Energy from Biogas and Landfill Gas*

Die übergeordnete Aufgabe des Tasks [9] ist der Informationsaustausch über die Technik der anaeroben Vergärung. Dazu gehören die Gärtechnik, die Beurteilung von Substraten, die Nutzung von produziertem Biogas, sowie der Einsatz des Gärguts als organischer Dünger. Im Triennium 2010 bis 2012 führt die Arbeitsgruppe zahlreiche Aktivitäten im Bereich der definierten Schwerpunktthemen Gärsubstrate, Prozessoptimierung, Aufbereitung und Einspeisung von Biogas, Gärrettestverarbeitung und Emissionen durch. Die Schweizer Vertreterin

hat die Leitung bzw. Co-Leitung bei den Arbeitsthemen «Anaerobic Digestion of Sewage Sludge» und «Small Scale Anaerobic Digestion». Im Berichtsjahr wurden zwei Workshops zu den Themen «Biogas Production and Utilisation» und «Energy from Biogas» durchgeführt. Im Folgenden sind einige Schwerpunkte für das kommenden Triennium (2013–2015) genannt: Vergärung von Klärschlamm; Aufbereitungstechniken für Gärgut, im Hinblick auf Nährstoffregeneration; Integration der Vergärung in andere industrielle Prozesse für einen besseren Ressourceneinsatz und eine Reduzierung von Treibhausgasemissionen; Emissionsmanagement bei der Biogasproduktion über die gesamte Prozesskette hinweg.

#### **SET Plan**

Neben den Aktivitäten innerhalb der IEA nahm das BFE eine Koordinationsfunktion bei der European Industrial Bioenergy Initiative (EIBI) des SET-Plans (European Strategic Energy Technology Plan) [1,2] der Europäischen Kommission ein. Im Berichtsjahr wurde ein Proposal für die Lancierung eines ERA-NET-Plus-Calls im Herbst 2012 erarbeitet. Ziel dieses Calls ist die Implementierung von Bioenergie-Demonstrationsprojekten gemäss EIBI Implementation Plan. Insgesamt stehen 7 Wertschöpfungsketten im Fokus (sowohl thermochemisch, als auch biochemisch), wobei die Schweiz am thermochemischen Umwandlungspfad der Vergasung interessiert ist.

## Referenzen

[1] Europäische Kommission: *Strategic Energy Technology Plan (SET Plan) (2008)* ([http://ec.europa.eu/energy/technology/set\\_plan/set\\_plan\\_en.htm](http://ec.europa.eu/energy/technology/set_plan/set_plan_en.htm)).

[2] Europäische Kommission: *European Industry Bioenergy Initiative (EIBI) (2008)* ([http://setis.ec.europa.eu/activities/implementation-plans/European%20Industrial%20Bioenergy%20Initiative\\_-EIBI.pdf/view](http://setis.ec.europa.eu/activities/implementation-plans/European%20Industrial%20Bioenergy%20Initiative_-EIBI.pdf/view)).

[3] 11. Holzenergiesymposium (2010) (<http://www.holzenergie-symposium.ch/>).

[4] BFE 2011: *Tagung Biomasseforschung in der Schweiz* ([http://www.bfe.admin.ch/forschungbiomasse/index.html?lang=de&dossier\\_id=05021](http://www.bfe.admin.ch/forschungbiomasse/index.html?lang=de&dossier_id=05021)).

[5] BAFU 2011: *Fachtagung Holzverbrennung und Feinstaub* (<http://www.bafu.admin.ch/luft/11577/index.html?lang=de>).

[6] International Energy Agency (IEA) *Implementing Agreement Bioenergy* (<http://www.ieabioenergy.com/>).

[7] *Implementing Agreement Bioenergy Task 32* (<http://www.ieabcc.nl/>).

[8] *Implementing Agreement Bioenergy Task 33* (<http://www.ieatask33.org/>).

[9] *Implementing Agreement Bioenergy Task 37* (<http://www.iea-biogas.net/>).

## Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(\* IEA-Klassifikation)

- ANALYSE DE CYCLE DE VIE DE LA PRODUCTION CENTRALISÉE ET DÉCENTRALISÉE DE BIOGAZ EN EXPLOITATIONS AGRICOLES** R+D 3.4\*

Lead:	ENERS Energy Concept Co.	Funding:	BFE
Contact:	arnaud.dauriat@eners.ch	Period:	2009–2011

Abstract: La présente étude a pour objectif principal la comparaison de systèmes centralisés et décentralisés de production de biogaz en milieu agricole au moyen d'une analyse de cycle de vie (ACV). Cette étude s'appuiera en particulier sur des cas concrets d'exploitations de biogaz agricole sur l'ensemble du territoire suisse. Les résultats de l'étude permettront de préciser le type d'installations de biogaz agricole le plus performant du point de vue environnemental.
- MESSVERFAHREN ZUR BESTIMMUNG DER PARTIKELEMISSIONEN VON FESTBRENNSTOFFFEUERUNGEN** R+D 3.4

Lead:	Ökozentrum Langenbruck	Funding:	BFE, BAFU
Contact:	christian.gaegauf@oekozentrum.ch	Period:	2011–2012

Abstract: Ziel des Projektes ist die Entwicklung und Validierung eines neuen Messverfahrens für Partikelemissionen in den Abgasen von Feuerstätten und Kesseln für feste Brennstoffe. Das Verfahren will Basis für ein zukünftiges einheitliches Messprozedere sein, das in eine europäische Norm einfließen soll. Die Arbeiten werden von insgesamt 19 Partnern aus 10 europäischen Ländern durchgeführt.
- CH<sub>4</sub>-EMISSIONEN BEI EPDM-GASSPEICHERN UND DEREN WIRTSCHAFTLICHEN UND ÖKOLOGISCHE FOLGEN** R+D 3.4

Lead:	Genesys Biogas AG	Funding:	BFE
Contact:	elmar.bueeler@oekostromschweiz.ch	Period:	2009–2011

Abstract: Auf landw. Biogasanlagen wird das Biogas häufig in einem Gasspeicher mit einer EPDM Folie zwischengelagert. Als Ziel dieses Projekts gilt es festzustellen, ob nach einer gewissen Einsatzdauer und unter gewissen Bedingungen (z. B. erhöhte Säurewerte im Fermenter) diese Folie an Qualität einbüsst und die Methanverluste an die Umwelt zunehmen. Die evaluierten Methanverluste werden wirtschaftlich und ökologisch beurteilt.
- ENTWICKLUNG DER INGENIEURWISSENSCHAFTLICHEN GRUNDLAGEN DER SCHWEFELRESISTENTEN METHANISIERUNG** R+D 3.4

Lead:	PSI Paul Scherrer Institut	Funding:	BFE
Contact:	serge.biollaz@psi.ch	Period:	2010–2012

Abstract: Es soll eine schwefelresistente Methanisierungsstufe für den Prozess Methan aus Holz entwickelt werden. Gegenüber der Niedertemperaturentschwefelung mittels Gaswäsche, die bei der 1MWSNG-Anlage am Standort Güssing zum Einsatz kommt, hat die Hochtemperatur-Entschwefelung Vorteile hinsichtlich des Gesamtwirkungsgrades und der Anlagenverfügbarkeit.
- ERWEITERTE PARTIKELANALYTIK FÜR HOLZFEUERUNGSABGASE** R+D 3.4

Lead:	PSI Paul Scherrer Institut	Funding:	BFE
Contact:	andre.prevot@psi.ch	Period:	2007–2011

Abstract: Mit diesem Projekt soll die Holzfeuerungsbranche im Bemühen, partikelarme Verbrennungstechnologien zu entwickeln, unterstützt werden. Dazu ist die Anpassung der On-line-Aerosolanalytik auf die Anforderungen der Emissionsmessung im Abgasstrom erforderlich. Mit der Aerosolanalytik können die Emissionen mit der in instationären Verbrennungsphasen notwendigen Zeitauflösung gemessen werden, was erlaubt, gezielt technische Verbesserungen an Feuerungen vornehmen zu können
- GERUCHSQUELLEN BEI BIOGASANLAGEN** R+D 3.4

Lead:	Forschungsanstalt Agroscope ART	Funding:	BFE
Contact:	matthias.schick@art.admin.ch	Period:	2009–2012

Abstract: Landwirtschaftliche Biogasanlagen werden häufig an bestehenden Standorten mit Tierhaltung ergänzt und für eine effektive Wärmenutzung bevorzugt in der Nähe zur Wohnbebauung errichtet. Dies führt zu Geruchsklagen der Anwohner. Ziel des Projektes ist es, relevante Geruchsquellen zu identifizieren und zu quantifizieren sowie Minderungsmaßnahmen aufzuzeigen.
- HARMONISIERUNG UND ERWEITERUNG DER BIOENERGIE-ÖKOINVENTARE UND -ÖKOBILANZEN** R+D 3.4

Lead:	EMPA	Funding:	BFE
Contact:	rainer.zah@empa.ch	Period:	2009–2012

Abstract: Projektziel ist es, die Bioenergie-Daten der ecoinvent Datenbank in Hinblick auf die aktuellen Entwicklungen im landwirtschaftlichen Anbau (z.B. Jatropha oder schnellwachsende Gräser) und Energie-Umwandlung (z.B. hydrothermale Vergasung) zu aktualisieren, harmonisieren und zu erweitern.

- IEA BIOENERGY TASK 32**

WTT 3.4

Lead:	Verenum	Funding:	BFE
Contact:	Nussbaumer Thomas <a href="mailto:thomas.nussbaumer@verenum.ch">thomas.nussbaumer@verenum.ch</a>	Period:	2011–2012

Abstract: Die IEA Bioenergy Task 32 befasst sich mit der Biomasseverbrennung zur Energieerzeugung und setzt sich zur Überwindung technischer und nicht-technischer Hindernisse ein. Dazu erfolgt ein Erfahrungsaustausch unter den Mitgliedsstaaten sowie die Zusammenarbeit zu Schwerpunktsthemen. Die schweizerische Vertretung hat zum Ziel, die Anliegen der Schweiz in der IEA zu vertreten und in der Schweiz den internationalen Stand der Technik zu vermitteln
- IEA BIOENERGY TASK 33**

WTT 3.4

Lead:	ETECA	Funding:	BFE
Contact:	Rüegsegger Martin <a href="mailto:eteca@gmx.ch">eteca@gmx.ch</a>	Period:	2011–2012

Abstract: Die IEA Bioenergy fördert mit Task 33 die energetische Nutzung von Biomasse über die thermische Vergasung (Thermal Gasification of Biomass). Task 33 begleitet die Forschung, deren Umsetzung in Pilot- und Demonstrationsanlagen sowie die Markteinführung und den kommerziellen Anlagenbetrieb der thermischen Vergasung von Biomasse.
- IEA BIOENERGY TASK 37**

WTT 3.4

Lead:	EREP SA	Funding:	BFE
Contact:	Membrez Yves <a href="mailto:yves.membrez@erep.ch">yves.membrez@erep.ch</a>	Period:	2011–2012

Abstract: Als Arbeitsgruppe der IEA Bioenergy befasst sich der Task 37 mit der Produktion von Biogas und dessen energetischen Anwendung, wobei die gesamte Produktionskette betrachtet wird. Ziel ist der Informationsaustausch und die Weiterverbreitung neuester Erkenntnisse zur Gärtechnik, Beurteilung von Substraten, Nutzung des produzierten Biogas sowie der Einsatz des Gärguts als organischen Dünger.
- PRAXISEINSATZ ELEKTROABSCHIEDER - TEIL 1**

R+D 3.4

Lead:	Ing. Büro Verenum, Zurich	Funding:	BFE
Contact:	Nussbaumer Thomas <a href="mailto:thomas.nussbaumer@verenum.ch">thomas.nussbaumer@verenum.ch</a>	Period:	2011–2014

Abstract: In der Schweiz werden autom. Holzfeuerungen ab 500 kW meist mit Elektroabscheidern ausgerüstet, um die verschärften Emissionsgrenzwerte einzuhalten. Allerdings werden Heizanlagen oft bei Teillast oder im Ein-/Aus-Betrieb betrieben, weshalb die Feinstaubabscheider während eines Grossteils der Betriebszeit der Feuerung unwirksam sind. Im Projekt wird der Einsatz von Elektroabscheidern im Praxisbetrieb untersucht (Betrieb, Regelung, Verfügbarkeit, Betriebsprobleme).
- MASSNAHMEN ZUR OPTIMIERUNG DER VERGÄRUNG DURCH VORBEHANDLUNG, PROZESS UND VERFAHRENSTECHNIK UND HILFSSTOFFE**

R+D 3.4

Lead:	Hochschule Wädenswil HSW	Funding:	BFE
Contact:	Baier Urs <a href="mailto:urs.baier@zhaw.ch">urs.baier@zhaw.ch</a>	Period:	2009–2011

Abstract: Im Projekt werden verschiedene Optimierungsbereiche des Biogasverfahrens im Hinblick auf inländische Substrate mit hohem Massenpotenzial im Labor- und im Pilotmassstab untersucht. Das Schwergewicht liegt dabei auf Hofdünger, zellstoffreicher Biomasse und langsam abbaubaren Proteinsubstraten. Es werden Konzepte der chemisch – physikalischen, enzymatischen und biologischen Vorbehandlung zur Steigerung der Biogausausbeute untersucht.
- MESSUNG VON GERUCHSEMISSIONEN UND ENTWICKLUNG EINES GERUCHSEMISSIONSMODELLS FÜR BIOGASANLAGEN**

R+D 3.4

Lead:	Ernst Basler + Partner AG	Funding:	BFE, BAFU, div. Kt
Contact:	Frantz Holger <a href="mailto:holger.frantz@ebp.ch">holger.frantz@ebp.ch</a>	Period:	2009–2011

Abstract: Ziel des Projektes ist die Erstellung eines Geruchsemissionsmodells für Biogasanlagen in der Schweiz. Das Geruchsemissionsmodell soll Planern, Investoren und Bewilligungsbehörden eine Planungshilfe schaffen, mit der Geruchsemissionen von Biogasanlagen noch in der Planungs- und Bewilligungsphase abgeschätzt, sowie sinnvolle geruchsmindernde Massnahmen geplant werden können.
- METHANVERLUSTE BEI BIOGASANLAGEN**

R+D 3.4

Lead:	Forschungsanstalt Agroscope ART	Funding:	BFE
Contact:	Schick Matthias <a href="mailto:matthias.schick@art.admin.ch">matthias.schick@art.admin.ch</a>	Period:	2009–2011

Abstract: In diesem Projekt sollen die relevante Methanverlustquellen (Flächenquellen, Leckagen, Methanschlupf) bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen identifiziert und das Verlustpotenzial näherungsweise bestimmt werden. Dabei sollen auch bauliche, verfahrenstechnische, organisatorische und klimatische Parameter sowie der Gasertrag als Einflussgrößen auf die Methanverluste erhoben werden. Im Abschluss sollen davon Minderungsmaßnahmen abgeleitet werden.

- **ÖKOBILANZ DER VERBRENNUNG VON BIOMASSESUBSTRATEN** R+D 3.4
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | ESU-services                                 | Funding: | BFE       |
| Contact: | Jungbluth Niels<br>jungbluth@esu-services.ch | Period:  | 2009–2011 |
- Abstract: Biomasse Ressourcen wie z.B. Abfälle aus der Lebensmittelindustrie (Presskuchen, Kaffeesatz oder Olivenkerne), eignen sich nicht nur für die Vergärung. Einige dieser Abfälle können auch direkt verbrannt und dabei in Strom und Wärme umgewandelt werden. In diesem Projekt soll eine Ökobilanz der Verbrennung unterschiedlicher Biomassesubstrate erstellt werden.
- **ÖKOBILANZ DES ANBAUES VON ZWISCHENFRÜCHTEN ZUR BIOGASPRODUKTION** R+D 3.4
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | Forschungsanstalt Agroscope ART Reckenholz | Funding: | BFE       |
| Contact: | Hayer Frank<br>frank.hayer@art.admin.ch    | Period:  | 2009–2011 |
- Abstract: Ziel des Projektes ist es, Zwischenfrüchte hinsichtlich ihrer Eignung zur Biogaserzeugung aus ökologischer, wirtschaftlicher und agronomischer Sicht zu bewerten. Die Umweltauswirkungen des Anbaues werden aufgrund der Emissionen pro m<sup>3</sup> Methanertrag bewertet. Die betriebswirtschaftliche Bewertung beinhaltet eine detaillierte Rentabilitätsberechnung und die agronomische Eignung wird zusammen mit Vertretern der Praxis beurteilt.
- **ÖKOBILANZ ZU BIOMASSENUTZUNG** R+D 3.4
- |          |                                       |          |           |
|----------|---------------------------------------|----------|-----------|
| Lead:    | Carbotech AG Umweltanalytik           | Funding: | BFE       |
| Contact: | Dinkel Fredy<br>f.dinkel@carbotech.ch | Period:  | 2009–2011 |
- Abstract: Mit der vermehrten Nutzung von Biomasse, stellt sich auch die Frage nach der optimalen Verwertung. Im Projekt werde die folgenden Hilfsmittel zur Evaluation der Umweltauswirkungen erarbeitet bzw. bestehende aktualisiert: (1) Ökoinventare von verschiedenen Anlagen, Grüngutarten, energetischer und stofflicher Nutzung; (2) Erarbeitung eines Tools zur Evaluation der optimalen Grüngutverwertung bei verschiedenen Rahmenbedingungen.
- **OPTIMIERUNG VON STANDARDISIERTEN VERGÄRBARKEITSTESTSYSTEMEN IN BATCH- UND DURCHFLUSSREAKTOREN** R+D 3.4
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | EPFL/ENAC/IEE/LBE                              | Funding: | BFE       |
| Contact: | Holliger Christof<br>christof.holliger@epfl.ch | Period:  | 2009–2011 |
- Abstract: Mittels standardisierten Vergärtests wird die Biogasproduktion oft unter- beziehungsweise überschätzt. Dies hängt mit der Wahl des Inokulums, der Medienzusammensetzung, der Temperatur, des Volumens des Testreaktors, usw. zusammen. Das Projekt soll die Hauptparameter, die zur Unter- beziehungsweise Überschätzung des Biogasproduktionspotenzials führen, identifizieren.
- **VERGÄRUNG VON GÜLLE UND CO-SUBSTRATEN IN EINEM MEMBRAN-BIO-REAKTOR (MBR II)** R+D 3.4
- |          |  |          |                |
|----------|--|----------|----------------|
| Lead:    | ARGE MBR II c/o Ingenieurbüro                | Funding: | BFE, BLW, Axpo |
| Contact: | Hersener Jean-Louis<br>postmaster@agrenum.ch | Period:  | 2007–2012      |
- Abstract: Die Grenzen und Möglichkeiten des Membran-Bio-Reaktors (MBR) sollen in diesem Projekt vertieft untersucht werden. Das Prinzip des MBR besteht darin, dass der Biogasfermenter mit einer nachgeschalteten Ultrafiltration betrieben wird. Das MBR-Verfahren verspricht eine gesteigerte Effizienz. Zudem lassen sich die eingesetzten Biomassesortimente durch die verfahrensbedingte Trennung und Aufbereitung viel bereitgefächerter als Dünger einsetzen.
- **TORPLANT - PHASE 1** R+D 3.4
- |          |   |          |           |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead:    | HEIG-VD   | Funding: | BFE       |
| Contact: | Michel Jean-Bernard<br>jean-bernard.michel@heig-vd.ch | Period:  | 2011–2012 |
- Abstract: Le projet consiste en la construction, les essais et l'optimisation d'une unité pilote de torréfaction de biomasse d'une capacité de 620 kg/h soit environ 3000 kWth avec production combinée d'énergie mécanique et étude de la valorisation des gaz de torréfaction. Les objectifs de la phase 1 sont: 1) la torréfaction de divers sources de biomasse, 2) la production de pellets à partir de la biomasse torréfiée et 3) la démonstration de leur conformité aux normes environnementales.
- **PRODUCTION OF ULTRA-PURE HYDROGEN FROM WOODY BIOMASS USING A MODIFIED CHEMICAL LOOPING PROCESS** R+D 3.4
- |          |                                      |          |           |
|----------|--------------------------------------|----------|-----------|
| Lead:    | ETHZ                                 | Funding: | BFE       |
| Contact: | Müller Christoph<br>muelchri@ethz.ch | Period:  | 2011–2014 |
- Abstract: The proposal is concerned with a novel method for the production of hydrogen from woody biomass which is of sufficient purity to be used directly in PEM fuel cells without substantial gas clean-up, using a modified chemical looping combustion process.

● **ENERGIEAUTARKE KLÄRANLAGE** R+D 3.4

Lead:	Abwasserverband Vorderes Prättigau	Funding:	BFE, Kt GR
Contact:	Gabathuler Hans <a href="mailto:hans.gabathuler@bluewin.ch">hans.gabathuler@bluewin.ch</a>	Period:	2011–2012

Abstract: Im Rahmen des Projekts soll das Konzept einer energieautarken Kläranlage am Beispiel der ARA Vorderes Prättigau untersucht werden. Die Energieautarkie kann erreicht werden, wenn ein Grossteil der organischen Fracht am Belebtschlamm adsorbiert wird und nicht veratmet werden muss. Dafür ist die Hochlaststufe von zweistufigen Belebtschlammverfahren signifikant höher zu belasten, als üblicherweise praktiziert.

● **ÖKOBILANZ DER BIOGASPRODUKTION AUS UNTERSCHIEDLICHEN SUBSTRATEN** R+D 3.4

Lead:	ESU-services	Funding:	BFE
Contact:	Jungbluth Niels <a href="mailto:jungbluth@esu-services.ch">jungbluth@esu-services.ch</a>	Period:	2009–2011

Abstract: In den letzten Jahren gab es eine Reihe von Ökobilanzen zur Verwendung von Grüngut in Biogasanlagen. Bisher gibt es unterschiedliche Ergebnisse bzgl. der Vor- und Nachteile der Vergärung von Grüngut. Ziel dieses Projektes ist ein Vergleich der Verwendung verschiedener gekaufter bzw. angebauter Substrate für die Biogasproduktion.

● **NACHBEREITUNG VON GÄRGUT** R+D 3.4

Lead:	Engeli engineering	Funding:	BFE, BAFU
Contact:	Engeli Hans <a href="mailto:engeli@compuserve.com">engeli@compuserve.com</a>	Period:	2011–2013

Abstract: Ziel des Projektes ist zu untersuchen, ob die Gärgutaufbereitung Sinn macht. Dazu werden Daten über den Energiebedarf, Emissionen, Nährstoffgehalte und hygienische Aspekte gesichtet und zur Schliessung von identifizierten Datenlücken Messungen und Laboranalysen durchgeführt. Anschliessend werden die erforderlichen Energie- und Stoffbilanzen durchgeführt und mit den Kennzahlen von Verfahrenskonzepten ohne Gärgutaufbereitung verglichen.

● **KOMBINIERTE ABGASKONDENSATION/ABGASREINIGUNG FÜR HOLZHEIZANLAGEN** P+D 3.4

Lead:	GUNEP	Funding:	BFE
Contact:	Koller Eugen <a href="mailto:e.koller@gunep.ch">e.koller@gunep.ch</a>	Period:	2011–2013

Abstract: Ziel des Projektes ist die Abgaskondensation zur Marktreife zu entwickeln, welche die Emissionswerte von 20mg/Nm<sup>3</sup> bzw. 50mg/Nm<sup>3</sup> Abgas unterschreiten und zugleich eine Wärmerückgewinnung bis über 20% erreichen. Um diese Ziel zu erreichen soll ein Kompaktgerät als Gaswäscher mit integriertem bzw. nachgeschaltetem Filtermodul entwickelt werden.

● **MISCANTHUS KLEINFEUERUNG** P+D 3.4

Lead:	Forschungsanstalt Agroscope ART	Funding:	BFE, Kt. TG
Contact:	Anken Thomas <a href="mailto:thomas.anken@art.admin.ch">thomas.anken@art.admin.ch</a>	Period:	2008–2011

Abstract: Der Einsatz von Miscanthus soll in einer Kleinfeuerungsanlage demonstriert werden. Dabei sollen Feinstaub und andere Emissionen messtechnisch erfasst werden. Mittels Rauchgaswäscher soll aufgezeigt werden, dass sich die Feinstaubemissionen auf das Niveau vergleichbarer Holzfeuerungen reduzieren lassen. Des weiteren soll aufgezeigt werden, dass die thermische Nutzung von Miscanthus hohe Energieerträge pro Nutzfläche generiert.

● **HOLZBEFEUERTES BLOCKHEIZKRAFTWERK MIT HEISSLUFTTURBINE IM KLEINEREN LEISTUNGSBEREICH 80-100 KWEL** P+D 3.4

Lead:	Schmid AG	Funding:	BFE
Contact:	Schmid Hans-Jürg <a href="mailto:HJ@holzfeuerung.ch">HJ@holzfeuerung.ch</a>	Period:	2010–2011

Abstract: Ziel ist die Entwicklung eines Blockheizkraftwerks mit Holzenergie, welches rationell im unteren Leistungsbereich der Stromerzeugung (70-100 kWel) eingesetzt werden kann.

Überblicksbericht 2011

# Wasserkraft



**Titelbild:****Der Grimselsee mit Staumauer Spitalamm**

Der Grimselsee dient als Unterbecken für das Pumpspeicherkraftwerk Grimsel 2, welches natürliche Zuflüsse vom Unteraargletscher und dem Stausee Oberaar nutzt. Zu Schwachlastzeiten kann Wasser aus dem Grimselsee in den Oberaarsee zurückgepumpt werden. Bei den Grimselkraftwerken sind unter dem Begriff KWO plus derzeit umfangreiche Erweiterungsarbeiten im Gang. Neben dem geplanten Bau und der Aufwertung neuer und bestehender Kraftwerke wird eine Erhöhung des Stauziels des Grimselsees angestrebt, die das Speichervolumen um rund drei Viertel steigern würde. Damit könnte wesentlich mehr Strom im Winter bereitgestellt werden. Die Kraftwerke Oberhasli KWO positionieren sich mit diesen Massnahmen ebenso wie andere grosse Betreiber der Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke für den zukünftigen Strommarkt in der Schweiz und im übrigen Europa.

**BFE Forschungsprogramm Wasserkraft**

Überblicksbericht 2011

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
CH-3003 Bern

**Programmleiter BFE (Autor):**

Dr. Klaus Jorde, Entec AG (klaus.jorde@entec.ch)

**Bereichsleiter BFE:**

Dr. Michael Moser (michael.moser@bfe.admin.ch)

<http://www.bfe.admin.ch/forschungwasserkraft>

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

## Einleitung

Wasserkraft erzeugt etwa 16 % des weltweiten Stromverbrauchs und ist in der Schweiz die bedeutendste Quelle für die Generierung von elektrischem Strom. Fast 60 % des benötigten Stroms werden hier mithilfe von Wasserkraft erzeugt. Über die Hälfte davon stammt aus Speicherkraftwerken. Das heisst, dass dieser Strom auf Abruf bereitgestellt werden kann, was ihn besonders wertvoll macht. Der andere Teil stammt aus Laufwasserkraftwerken ohne Speichermöglichkeiten [2]. Die meisten attraktiven Standorte in der Schweiz sind seit langem genutzt, trotzdem stiegen die Erwartungen an die Schweizer Wasserkraft infolge der Reaktorkatastrophe in Fukushima und der darauf entstandenen Energiedebatte massiv an. Man schätzt aber, dass 80–85 % des vorhandenen nutzbaren Potenzials heute bereits ausgenutzt wird. Dennoch finden enorme Investitionen in die Wasserkraft statt. Insbesondere bei den Speicherkraftwerken und Pumpspeicherkraftwerken gibt es eine Reihe von wesentlichen Erweiterungen und Neubauten, die infolge ihrer Rolle im europäischen Verbundnetz wirtschaftlich attraktiv geworden sind.

Das Forschungsprogramm Wasserkraft unterstützt und fördert die vollständige Nutzung des vorhandenen Wasserkraftpotenzials in der Schweiz. Dieser Zielsetzung wird eine ganzheitliche Betrachtungsweise zu Grunde gelegt, die neben technischen und ökonomischen Aspekten auch ökologische und landschaftsbezogene Schutzaspekte mit einbezieht. Mit «vollständiger Nutzung» ist daher nicht die Ausnutzung des gesamten technischen Potenzials gemeint, sondern der Anteil, für dessen Nutzung ein gesellschaftlicher und politischer Konsens vorhanden ist. Das Forschungsprogramm trägt unter an-

derem dazu bei, Wissen und Informationen zu schaffen und bereitzustellen, die diese Konsensfindung unterstützen.

Ein grosser Teil der Wasserkraftforschung, insbesondere im Bereich der grossen Speicherkraftwerke, wird wie seit jeher von den grossen Forschungseinrichtungen der ETHs sowie der Universitäten und Fachhochschulen geleitet. Die Fragestellungen beziehen sich häufig auf Erneuerungs- oder Erweiterungsmaßnahmen an einer bestimmten Wasserkraftanlage, für die es bis heute keine genau untersuchten und allgemein gültigen Lösungsansätze gibt. In solchen Fällen werden häufig Felduntersuchungen mit Laborversuchen nachgestellt und die gewonnenen Erkenntnisse in Entwurfsrichtlinien oder in numerische Modelle implementiert. Dies können rein technische aber auch hydraulisch-ökologische oder technisch-ökonomische Fragestellungen sein, die meistens von mehreren Geldgebern gemeinsam gefördert werden. Zunehmende Bedeutung haben Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke, die meistens in Kombination gebaut und betrieben werden. Da in Europa immer mehr Strom aus nicht regulierbaren erneuerbarer Energie in die Netze eingespeist wird, braucht es mehr Speichermöglichkeiten, die mit grossen Leistungen und schnell zu- und abgeschaltet werden können und bei einem Überangebot aus Wind und Sonne Strom aus dem Netz für ihre Speicherpumpen aufnehmen können. Für die Speicherkraftwerke und alle ihre Komponenten bedeutet das ganz andere Betriebsweisen als noch vor einigen Jahren, insbesondere häufige Lastwechsel und Wechsel zwischen Pump- und Turbinenbetrieb.

Die Kleinwasserkraft befindet sich im immerwährenden Spannungsfeld zwischen dem Wunsch nach mehr erneuerbarer Energie und dem gleichzeitig wachsenden Wunsch nach einer intakten Umwelt und Natur. Die kostendeckende Einspeisevergütung mit ihren sehr attraktiven Vergütungssätzen für kleine Wasserkraftanlagen hat eine grosse Anzahl von Wasserrechtsanträgen zur Folge und die Behörden sind zum Teil überfordert. Gleichzeitig wächst der Widerstand gegen noch mehr kleine Wasserkraftanlagen. Neuere Untersuchungen liefern Klarheit über das tatsächlich nutzbare Potenzial, das mithilfe kleiner und sehr kleiner Wasserkraftanlagen in der Schweiz noch erschlossen werden könnte. Was davon tatsächlich nutzbar ist oder genutzt werden sollte, ist Gegenstand weiterer Untersuchungen, die, wie praktisch alle Forschung im Bereich Kleinwasserkraft, öffentlich gefördert werden müssen. Gleichzeitig erarbeiten viele Kantone eigene Schutz- und Nutzungsstrategien, um die vielen Anfragen besser bewältigen zu können. Kleine Wasserkraftwerke können schätzungsweise insgesamt zu einer ca. 5 %-igen Steigerung der Wasserkraftproduktion beitragen.

Weltweit betrachtet wurde nie so viel neue Stromerzeugung aus Wasserkraftwerken in Betrieb genommen, wie zurzeit. Die grössten Zuwächse finden sich in den Schwellenländern Asiens, Afrikas und Lateinamerikas, wo noch enorme nicht genutzte Ressourcen vorhanden sind. Viele grossen Projekte sind aufgrund ihrer komplexen sozio-ökonomischen, gewässerökologischen und geopolitischen Auswirkungen umstritten.

IEA Klassifikation: 3.6 Hydropower

Schweizer Klassifikation: 2.7 Wasserkraft

## Programmschwerpunkte

Die Schwerpunkte in der Wasserkraftforschung resultieren aus der Situation in der Schweiz selbst, aber auch aus der Einbindung der Schweizer Wasserkraftwerke in das europäische Verbundnetz. Das Programm ist in die Sparten Gross- und Kleinwasserkraftwerke unterteilt [1,4].

Die technischen Potenziale der Grosswasserkraft werden bereits zum grössten Teil genutzt, und die weiteren möglichen Zuwächse in Bezug auf die Produktion sind im Vergleich dazu gering. Dagegen wird die installierte Leistung bei vielen Speicher- und Pumpspeicherkraftwerken derzeit massiv gesteigert, neue Pumpspeicherkraftwerke werden gebaut. Die Speichermöglichkeiten werden im europäischen Verbundnetz dringend benötigt, weil immer grössere Mengen von Strom aus Wind- und Solarenergie in das Netz eingespeist werden. Aus dieser Rolle im europäischen Verbundnetz und den damit verbundenen häufigen Lastwechseln ergeben sich veränderte technische Anforderungen. Die Speicher und die hydraulischen und elektromechanischen Komponenten der Kraftwerke müssen dafür neu ausgelegt werden. Das ganze System wird mittel- bis langfristig schwerer prognostizierbar und die Unsicherheiten müssen bei den sehr langfristigen Investitionsentscheidungen mit berücksichtigt werden. Der Klimawandel bewirkt einen stärkeren Eintrag von Schwebstoffen und Geschiebe, was zur Speicherverlandung beiträgt und die Laufräder der Turbinen belastet. Hier müssen langfristig stabile Verhältnisse geschaffen werden und die Speicherverlandung muss kontrollierbar werden. Auch die weitere Revitalisie-

rung der Flüsse im Zusammenhang mit der Wasserkraftnutzung, insbesondere die Fischwanderung, sind nach wie vor wichtige Forschungsthemen.

Bei den Kleinwasserkraftwerken gibt es noch beträchtliche technische Potenziale, die bisher nicht genutzt sind [7,8,9]. Ob und wie weit diese tatsächlich unter technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten noch zur Stromerzeugung herangezogen werden können, wird derzeit vertieft untersucht. Zunehmend werden heute auch Niederdruckanlagen gebaut, wo z. B. bei der Turbinentechnologie Anpassungsbedarf besteht und auch weitere technische Fragen nicht generell gelöst sind.

### Rückblick und Bewertung 2011

Das Forschungsprogramm Wasserkraft fördert Projekte seit Ende 2008. Bis 2011 wurden insgesamt 15 Projekte gefördert. Im Jahr 2011 wurden drei Projekte abgeschlossen. Dabei wurden verbesserte und damit wirtschaftlichere Bemessungsansätze für stahlausgekleidete Druckleitungen für Hochdruckwasserkraftanlagen entwickelt. Im Bereich Kleinwasserkraftanlagen wurden alle heute verfügbaren Niederdrucktechnologien untersucht und vergleichend beurteilt. Dies war notwendig, da die Hersteller solcher Komponenten oft keine abgesicherten Betriebsdaten, z. B. Wirkungsgrade liefern. Die Übersicht hilft den Investoren im Kleinwasserkraftbereich bei der Auswahl geeigneter Turbinen. In einem weiteren Projekt wurden unterschiedliche Vorrichtungen und betriebliche Massnahmen zur Abweisung bzw. Ableitung von Geschiebe

aus dem Turbineneinlauf von Kleinwasserkraftanlagen an einer Pilotanlage getestet und untersucht [10,11]. Der Schlussbericht enthält wichtige Hinweise für die Planung von Niederdruckanlagen bei geschiebeführenden Gewässern. Insgesamt wurden vier neue Projekte begonnen, die alle aus dem Bereich Grosswasserkraft stammen und zum grössten Teil aus unterschiedlichen Quellen, einschliesslich Eigenleistungen der Betreiber, gefördert werden. Bei zwei Projekten geht es um Geschiebe in Speichern bzw. dadurch verursachte Probleme an Turbinen. Ein weiteres grosses Projekt behandelt den Fischabstieg an grossen Flusskraftwerken und schliesslich wird untersucht, wie Unsicherheiten und Risiken über die lange Betriebsdauer eines Wasserkraftwerks bereits bei der Planung mit berücksichtigt werden können.

### Ausblick

Im Jahr 2012 wird die Potenzialabschätzung und die tatsächliche Nutzbarkeit des in der Schweiz vorhandenen Kleinwasserkraftpotenzials abgeschlossen. Der Arbeit liegt eine ganzheitliche Beurteilungsmethode zugrunde, die auch gewässerökologische und sozioökonomische Aspekte sowie den Landschaftsschutz berücksichtigt. Die Projekte, die im Jahr 2011 in der Sparte Grosswasserkraft begonnen wurden, haben alle Laufzeiten von drei bis vier Jahren. Fünf bis sechs weitere Projekte sind bereits in der Planung, so dass die Möglichkeiten des Forschungsprogramms 2012 vollständig ausgeschöpft sein werden.

## Highlights aus Forschung und Entwicklung

Die beiden nachfolgend vorgestellten Projekte zeigen einen Ausschnitt aus den Forschungsarbeiten in diesem Programm. Aus dem Bereich Kleinwasserkraftanlagen wird ein Projekt vorgestellt, in dem zum Teil neue aber auch herkömmlich Turbinenkonzepte für sehr niedrige Fallhöhen untersucht und bewertet wurden. Eines der Projekte aus dem Bereich der Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke untersucht die Sedimentationsproblematik im wechselnden Turbinen- und Pumpbetrieb.

### Evaluation von Ultra-Niederdruckkonzepten für Schweizer Flüsse

An Schweizer Mittellandflüssen besteht eine grosse Anzahl an Wehrschwellen, die für den Erosions- und Hochwasserschutz erstellt worden sind und die ein beachtliches, aber ungenutztes Wasserkraftpotenzial enthalten. Die Fallhöhen an diesen Schwellen bewegen sich jedoch im Bereich von 2m oder weniger und geeignete Maschinengruppen für solche Ultra-Niederdruckanlagen waren bisher nur beschränkt verfügbar. Bestrebungen in verschiedenen Nachbarländern der Schweiz haben zu Pilotlösungen für Ultra-Niederdruckanlagen geführt, die in den letzten zwei Jahren an einzelnen Standorten in Betrieb genommen worden sind. Insgesamt wurden 7 Pilotlösungen und 3 schon länger bekannte Wasserkraftmaschinen für kleinste Fallhöhen identifiziert und deren Anwendung für Schweizer Verhältnisse evaluiert [3,5]. Es zeigte sich, dass:

- einige der besuchten Anlagen erst im Jahre 2010 in Betrieb genommen werden konnten und deshalb noch kaum über relevante Betriebserfahrungen verfügen
- zum Teil noch viele Kinderkrankheiten vorherrschen und die Entwicklung nicht abgeschlossen ist
- für zwei Konzepte (Wasserdruckmaschine und Schachtkraftwerk) noch keine Anbieter von tatsächlich käuflichen Maschinen und Anlagen auf dem Markt sind. Diese Konzepte sind noch im Entwicklungsstadium bei Universitätsinstituten

- keines der insgesamt 10 untersuchten Konzepte eine Lösung für sämtliche Anwendungsfälle darstellt; vielmehr müssen die spezifischen Anforderungen der verschiedenen Ultra-Niederdruck-Standorte analysiert und das im konkreten Fall jeweils geeignete Konzept gewählt werden.

Der vorliegende Bericht charakterisiert die identifizierten Pilotlösungen, zeigt die für die Evaluation vorgeschlagene Systematik und den zugehörigen Kriterienraster und stellt die Stärken und Schwächen der 10 Konzepte in Form von Spinnennetz- oder Radardiagrammen anschaulich dar.

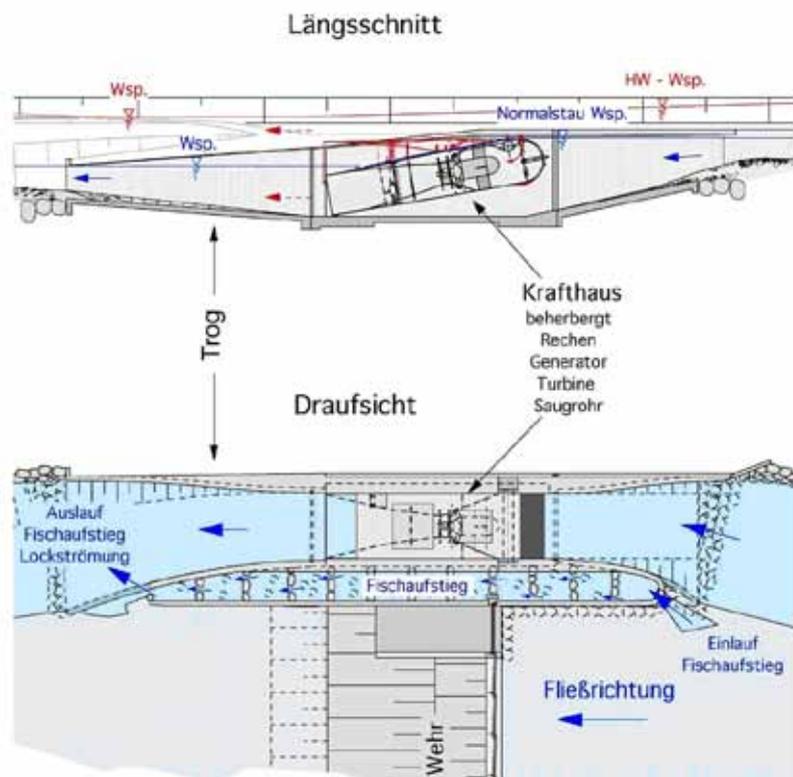
Einer der innovativen neuen technischen Lösungsansätze ist das bewegliche Kraftwerk, welches von der Hydro-Energie Roth GmbH in Karlsruhe, Deutschland, entwickelt wurde (Figur 1). Folgende Kriterien sollten dabei erfüllt sein:

- Das Krafthaus soll anhebbar sein, um Geschiebe direkt weiterzugeben

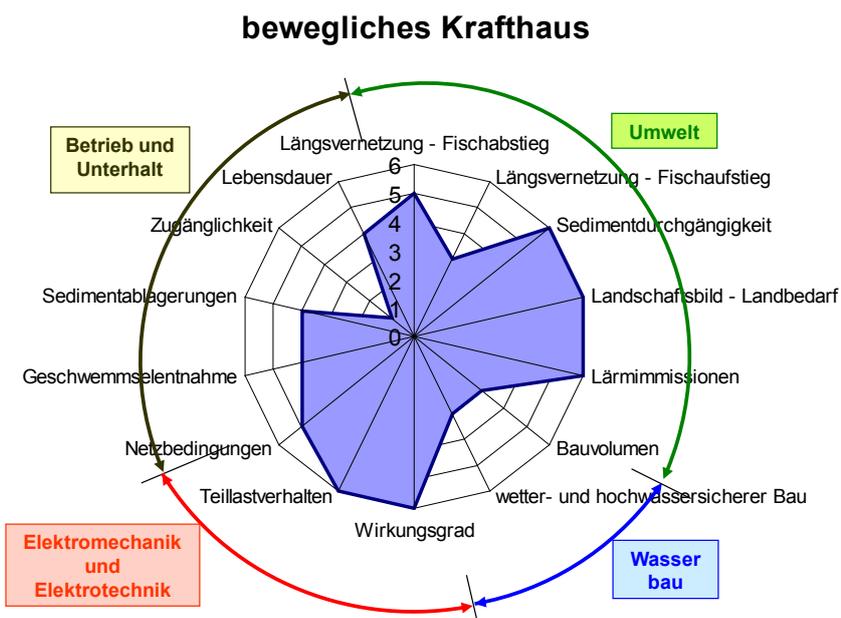
- Bauvereinfachung: das Konzept soll keinen zusätzlichen Kiesfang, Geschiebepülkanal benötigen.
- Es soll optisch möglichst wenig auffallen.
- Über das Krafthaus soll der Fischabstieg, aber auch die Geschwemm- selweitergabe möglich sein.
- Die ungenutzte Energie bei erhöhten Abflüssen soll zusätzlich genutzt werden können.

Darauf basierend wurde das bewegliche, über- und unterströmbare Wasserkraftwerk entwickelt. Bei diesem werden in einem Bauwerk folgende Anlagenteile integriert:

- das schwenkbare Krafthausgehäuse ersetzt einen beweglichen Wehrverschluss;
- ein Spülkanal zur Weitergabe der Sedimente bzw. des Geschiebes;
- ein hydraulisch optimierter Zu- und Ablauftrichter;



Figur 1: Bewegliches Kraftwerk im Längsschnitt mit Rechen-Turbine-Generator-Saugrohr in einer Klappe («Krafthausgehäuse») eingebaut (Quelle: Hydro-Energie Roth GmbH).



Figur 2: Spinnendiagramm zur Evaluation des Ultra-Niederdruckkonzepts «bewegliches Krafthaus».

- am Turbineneinlauf ist ein Rundbogenrechen installiert;
- sowohl ein sohl- wie auch ein oberflächennaher Fischabstieg ist möglich;
- seitlich neben dem Trog ist eine Fischaufstiegshilfe angeordnet.

Inzwischen ist auch in der Schweiz ein erster solcher Kraftwerkstyp in Krado-Schönenberg an der Thur installiert. Die Vor- und Nachteile dieses Konzepts sind in einem Spinnendiagramm zusammengefasst (Figur 2). Daraus erkennt man das sehr gute elektromechanische Verhalten und insbesondere die hohen Wirkungsgrade klassischer Turbinen, wie sie von alternativen Konzepten im allgemeinen nicht erreicht werden. Auch im Umweltbereich, z. B. bei Sedimentdurchgängigkeit, Fischabstieg, Landschaftsbild und Lärmmissionen schneidet diese Technik sehr gut ab. Nachteilig sind hingegen die schwierige Zugänglichkeit der unter Wasser liegenden Komponenten und die aufwändige Bauweise mit tiefen und damit kostenintensiven Gründungen in der Flusssohle.

Die Darstellung der Evaluation in einem Radar- oder Spinnennetzdiagramm zeigt auf einen Blick die Stärken und Schwächen der verschiedenen Konzepte. Obwohl die Evaluation

Schulnoten (1 schlechteste, 6 beste) verwendet, ist die Bildung eines Gesamtnotendurchschnitts über die 14 Kriterien nicht erlaubt, da absichtlich keine Gewichtung vorgenommen wurde (es herrscht z. B. ein Übergewicht von 5 Kriterien zugunsten der Umweltthemen). Der Investor in eine Ultraniederdruckanlage soll auf einen Blick erkennen können, welches Konzept sich für seine spezifische Anwendung und dessen Randbedingungen am besten eignet, sich aber nicht durch eine rein arithmetische Bestnote fehlleiten lassen. Es hat sich gezeigt, dass keines der untersuchten Konzepte den anderen generell überlegen ist und dass alle jeweils unterschiedliche Stärken und Schwächen haben, die sich in unterschiedlich geformten Spinnendiagrammen äussern.

In diesem Projekt konnten einige der Unklarheiten bezüglich verschiedener Ultra-Niederdrucktechnologien ausgeräumt werden. Insbesondere ist dies dort notwendig, wo keine brauchbaren technischen und sonstigen Informationen von der Herstellern und Promotoren bestimmter Technologien verfügbar sind. Hier stehen den Investoren der Schweizer Kleinwasserkraftszene jetzt brauchbare und verlässliche, einheitlich ermittelte Informationen zur Verfügung.

## Überwachung und Vorhersage der Sedimentation in Pumpspeicherkraftwerken

Die Verlandung von Stauseen und die daraus entstehenden Kapazitätsverluste beeinträchtigen die Zuverlässigkeit und die Lebensdauer von Wasserkraftanlagen sowie die Kontinuität der Elektrizitätsproduktion. Die Reduktion des Speichervolumens gefährdet die Nutzung von Speichern zum Brechen von Hochwasserspitzen. Ablagerungen vor Einlaufbauwerken oder Grundablässen stellen ein Sicherheitsrisiko für die Bauwerke dar. Davon sind nicht nur traditionelle Wasserkraftwerke betroffen, sondern auch die neuere Generation von Pumpspeicherkraftwerken. Solche Anlagen erlauben durch die Anordnung mit zwei Staubecken bei Bedarf entweder Strom zu produzieren oder aus dem Netz aufzunehmen und spielen deshalb eine wichtige Rolle bei der Befriedigung der Nachfrage nach Spitzenenergie und bei der Regulierung der Stromnetze. Die Speicher dieser Kraftwerke sind stetig wechselnden Pump- und Turbiniersequenzen ausgesetzt, deren Auswirkungen auf die Verlandungsprozesse noch weitgehend unbekannt sind.

In der vorliegenden Forschungsarbeit wird im Rahmen eines Forschungskonsortiums untersucht, welche Auswirkungen der wechselnde Pumpspeicherbetrieb auf die Partikelkonzentrationen im System einer Anlage sowie auf die Strömungsbedingungen und die Trübung in den Staubecken hat.

Um Lösungen für eine nachhaltige Sedimentbewirtschaftung in Pumpspeicherkraftwerken zu entwickeln, soll beantwortet werden, wie der Pumpspeicherbetrieb die Turbulenz im Becken und die Ablagerung von Feinsedimenten beeinflusst, und ob die Turbulenz durch den Betrieb des Kraftwerks und die Position der Ein-/Auslaufbauwerke beeinflusst werden kann, um das Absetzen feiner Sedimente zu reduzieren.

Basierend auf einer Literaturstudie wurde eine theoretische Grundlage ausgearbeitet, um die wichtigsten physikalischen Prozesse hinter den relevanten Phänomenen zu beschreiben. Prototypmessungen auf einer existierenden Kraftwerksanlage ermöglich-

ten eine Analyse der Verlandungsprozesse in einem realen Kraftwerk und zeigten Überwachungsmöglichkeiten auf. In hydraulischen Modellversuchen und numerischen Simulationen konnte der Einfluss verschiedener Parameter wie Abfluss, Zyklendauer, Verhältnis Pump-/Turbiniersequenzen, Konzentration und Position des Ein-/Auslaufbauwerks studiert werden.

Die Prototypmessungen wurden am Pumpspeicherwerk Grimsel II in der Region Oberhasli durchgeführt. Im Grimselsee, dem Unterbecken der Anlage, wurden drei Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP) vor dem Ein-/Auslaufbauwerk auf dem Seegrund platziert (Figur 3). So konnten während rund drei Wochen kontinuierlich Geschwindigkeitsprofile vor dem zylinderförmigen Bauwerk gemessen werden. Die Daten wurden ausgewertet, in Form von dreidimensionalen Strömungsfeldern im See dargestellt und anschließend mit den Betriebsdaten des Kraftwerksbetreibers verglichen (Figur 4).

Sowohl während Pump- wie auch bei Turbiniersequenzen wurden typische, sich wiederholende Strömungsbilder festgestellt. Insbesondere die in das Becken eintretenden Wassermassen generieren eine Strömung, die nach kurzer Zeit bis weit in den See hinein messbar ist. Im Gegensatz dazu dauert es beim Pumpen (also Wasserent-

nahme durch die Fassung) wesentlich länger, bis sich die Strömung im See zum Bauwerk hin ausrichtet. Zudem ist dieses Geschwindigkeitsfeld häufig nur in unmittelbarer Nähe der Fassung messbar.

Des Weiteren wurde der Druckschacht des Kraftwerks Grimsel II mit einer Trübesonde ausgestattet, um den Feststoffanteil im System zu messen und den Sedimenttransport zwischen den beiden Becken abzuschätzen. Die Messsonde wurde vor Ort an ein Akquisitionssystem angeschlossen, welches die gemessene Konzentration sowie die Betriebsabflüsse minütlich speicherte. Via Internet konnten die Daten in Echtzeit verfolgt, die Resultate ausgewertet und die Akquisitionparameter überwacht und bei Bedarf angepasst werden.

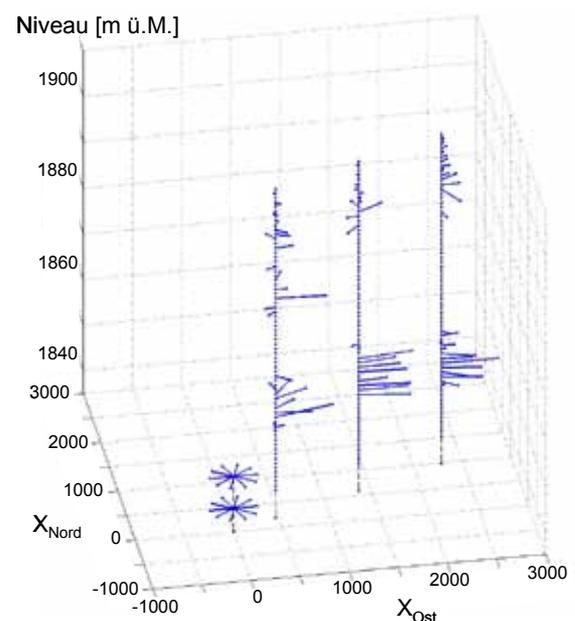
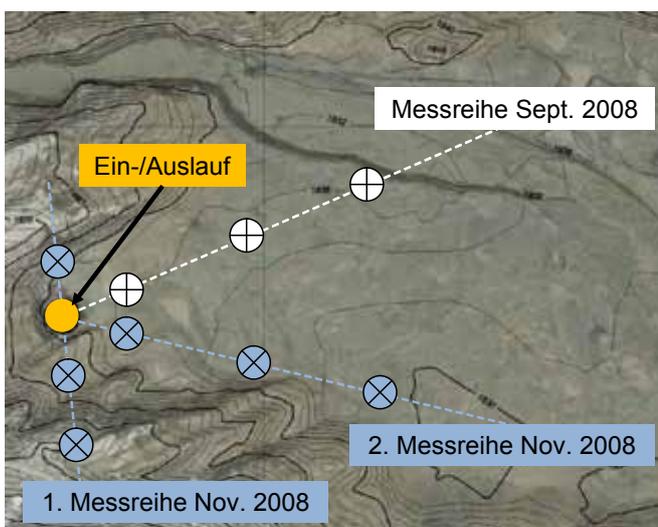
Die Feststoffkonzentration im turbinieren und gepumpten Wasser konnte so über eine Messdauer von acht Monaten (November 2010 bis Juli 2011) kontinuierlich aufgezeichnet werden (Figur 5). Die Resultate zeigen einen wesentlichen Unterschied der Trübung im System zwischen Winter- und Sommermonaten, der auf das Niederschlagsregime des Grimselgebiets zurückzuführen ist. In den Wintermonaten fällt Schnee, der See ist eisbedeckt und oberstrom erfolgt dadurch vom Unteraargletscher kaum natürlicher



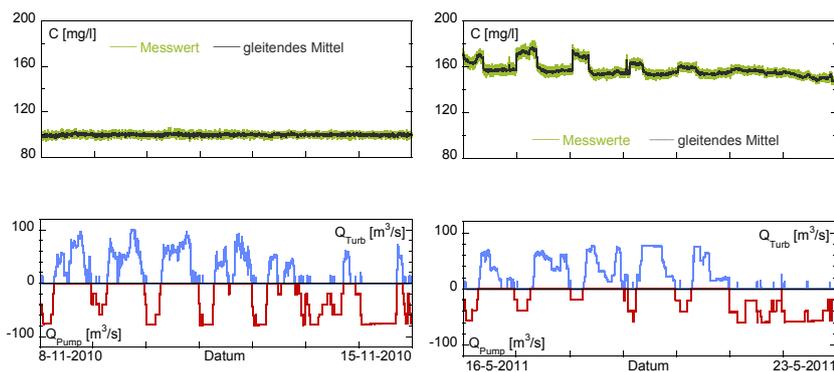
Figur 3: Feldmessungen im Grimselsee mit einem Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) zur Messung von vertikalen Geschwindigkeitsprofilen, die sich während des Pump- und des Turbinierbetriebs ausbilden.

Zufluss, der Sedimente in das Becken eintragen könnte. Zudem wurden in Abhängigkeit der Seestände in Pump- und Turbinierbetrieb unterschiedliche Konzentrationen gemessen, was verdeutlicht, dass die Pumpspeicherung die Sedimentbilanz zwischen den beiden Becken beeinflusst.

In hydraulischen Modellversuchen wurden Geschwindigkeitsfelder sowie



Figur 4: Links: Messachsen und Positionen der ADCPs vor dem Ein-/Auslaufbauwerk Grimsel 2. Rechts: typische 3D-Geschwindigkeitsprofile bei Turbinierbetrieb. Die horizontalen Äste bezeichnen Richtung und Grösse der Geschwindigkeitsvektoren.



Figur 5: Gemessene Feststoffkonzentration (oben) und zugehörige Betriebsdaten (unten), Pump- und Turbinenbetrieb. Aufzeichnungen (a) vom 8. bis 15. November 2010 und (b) vom 16. bis 23. Mai 2011.

Sedimentbilanzen und Ablagerungsprozesse in einer vereinfachten Beckengeometrie untersucht. Die Anlage besteht aus zwei Becken, die mit einem Rohrsystem und einer Pumpe verbunden sind und erlaubt den Betrieb in beide Richtungen (vereinfachte «In-Out»-Sequenzen). Studiert wurde der Einfluss des Abflusses, der Zyklendauer, dem Quotienten zwischen Pump- und Turbinerzyklus sowie der initialen Sedimentkonzentration und der Höhe

des Einlaufbauwerks. Letzteres konnte im Modell auf drei Positionen über dem Beckenboden eingebaut werden.

Der Abfluss wurde mit einem Durchflussmesser kontrolliert und über die gesamte Versuchsdauer konstant gehalten. Die Geschwindigkeitsfelder im Hauptbecken wurden mit 16 Ultrasonic Velocity Profilers (UVP, 2 MHz), die Konzentration in beiden Becken mit einer Trübesonde gemessen. Die

Feinsedimente wurden mithilfe von gemahlene Nusschalen simuliert, welche optimale Eigenschaften (Korndurchmesser und Dichte) für eine repräsentative Modellierung von Verlandungsprozessen aufweisen.

In Vorversuchen mit Klarwasser wurde das Verhalten des eintretenden Wasserstrahls beschrieben. Die Versuchsreihen mit Feststoffen zeigen, dass sich deren Absetzen nicht komplett verhindern, dank der «In-Out»-Sequenzen jedoch wesentlich verzögern lässt, so dass ein Teil der Sedimente durch den Triebwasserweg abgeführt werden kann.

Ähnlich wie im Prototyp variiert die Konzentration in Abhängigkeit der Pumpspeicheraktivität. Basierend auf den Versuchsergebnissen wurden schliesslich weitere Parameter definiert und in Abhängigkeit der zu Beginn genannten Variablen beschrieben, um zu einem besseren Verständnis der Verlandungsvorgänge in Pumpspeicherwerken beizutragen. Damit trägt das Projekt dazu bei, Strategien zur Reduktion der Verlandungserscheinungen in Becken von Pumpspeicheranlagen zu entwickeln.

## Nationale Zusammenarbeit

Die nationale Zusammenarbeit im Jahr 2011 war sehr stark beeinflusst von den Ereignissen in Fukushima. Unmittelbar nach der Reaktorkatastrophe wurden als Konsequenz des geplanten Ausstiegs aus der Kernenergie eine Reihe von Initiativen gestartet, mit denen verschiedene Möglichkeiten untersucht werden sollen, um die zukünftige Energieversorgung der Schweiz sicherzustellen. Unterschiedliche Expertengruppen innerhalb des Bundesamts für Energie arbeiten an Strategien und Szenarien für die zukünftige Stromversorgung der Schweiz [6]. Die Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften erstellt ein Positionspapier zur zukünftigen Stromversorgung der Schweiz. Die Erwartungen an die Wasserkraft sind dabei hoch, in der Öffentlichkeit wurden teilweise unrealistische Erwartungen geäussert. Die Diskussionen innerhalb verschiedener Expertengruppen ergaben die übereinstimmende Einschätzung, dass die in den Szenarien formulierten Produktionserwartungen nur schwer realisiert werden können, wenn sich die bestehenden Rahmenbedingungen nicht ändern. Die Programmleitung war aktiv in diese Arbeiten eingebunden, aber auch die meisten Verantwortlichen der einzelnen Forschungsprojekte waren direkt in diesen Gremien involviert. Verstärkt wurde die Programmleitung in diesem Jahr auch zu verschiedenen Veranstaltungen eingeladen, um dort über die Perspektiven und die Hemmnisse der Wasserkraftnutzung in der Schweiz zu referieren.

Auf der Programmebene wurden wie in den Vorjahren wissenschaftliche Begleitgruppen für einige laufende

Forschungsprojekte etabliert. Diese Gruppen treffen normalerweise ein- bis zweimal jährlich zusammen, um über den Projektfortschritt informiert zu werden und die weitere Vorgehensweise zu erörtern. Zum Teil sind sie integraler Bestandteil des Projektes mit einem wesentlichen Einfluss auf den Verlauf der Arbeiten bei grösseren Projekten. Zum Beispiel besteht die Begleitgruppe zum Projekt Fischabstiege aus einer international und interdisziplinär besetzten Gruppe aus Projektnehmern, externen Wissenschaftlern, Vertretern der beteiligten Wasserkraftwerke und Behördenvertretern. In anderen Fällen dienen Begleitgruppen eher der Sicherstellung der Umsetzung von Forschungsergebnissen in die Praxis.

Das Forschungsprojekt Sustainable Sedimentation in Pumped Storage Plants ist Teil des Projekts HydroNet – Modern Methodologies for Design, Manufacturing and Operation of pumped storage power plants. Schweizweit forschen sieben Institute in den Bereichen Hydrodynamik, Elektronik, Hydraulik, Umwelt und Datentransfer, um Lösungsansätze für die Überwachung und die Vorhersage relevanter Phänomene in Pumpspeicherkraftwerken zu finden.

Die einzelnen Projekte des Forschungsprogramms Wasserkraft sind national gut vernetzt, weil sie meistens aus verschiedenen Förderquellen finanziert sind und neben verschiedenen Wasserkraftbetreiberfirmen auch andere Institutionen beteiligt sind. In den meisten Fällen wird interdisziplinär geforscht.

## Internationale Zusammenarbeit

An der internationalen Arbeitsgruppe der Alpenkonvention – Platform Water Management in the Alps – ist die die Programmleitung weiterhin beteiligt. Dort werden Richtlinien für Fragen wie Kleinwasserkraftnutzung, Sedimentbewirtschaftung oder Schwall-Sunk Betrieb in Arbeitsgruppen mit Vertretern aller Alpenländer erarbeitet. Die Ergebnisse sollen den Mitgliedsländern bei der Umsetzung eigener Strategien helfen. Die Schweiz wirkt zwar mit, da sie die Alpenschutzkonvention unterzeichnet hat, allerdings hat sie das Energie-Protokoll nie ratifiziert.

Auch im Jahr 2011 wurde die Zusammenarbeit zwischen dem norwegischen «Centre for Environmental Design of Renewable Energy» und dem Forschungsprogramm Wasserkraft des BFE weitergeführt. Die Programmleitung ist hier als Mitglied der International Scientific Advisory Group tätig. Leider gibt es nach wie vor keine in die einzelnen Projekte hineinreichende Zusammenarbeit,

obwohl zwischen der Schweiz und Norwegen viele Ähnlichkeiten bei den offenen Fragen bestehen. Dies trifft insbesondere im Bereich der Speicherkraftwerke und ihrer ökologischen Auswirkungen zu. Aber auch bei den technischen Auswirkungen der veränderten Betriebsweise von Speicherkraftwerken gäbe es Ansatzpunkte für eine engere Zusammenarbeit.

Projektbezogene Kooperationen wurden im Jahr 2011 im Projekt Fischabstieg aufgebaut. Dieses Projekt wird zum Teil vom Verband Aare Rheinwerke VAR getragen und finanziert. In diesem Verband sind unter anderem die Wasserrechtsbesitzer der Kraftwerke Hochrhein zwischen Bodensee und Basel zusammengeschlossen. Da die Kraftwerke am Hochrhein zum grössten Teil Grenzkraftwerke zwischen der Schweiz und Deutschland sind, sind hier deutsche Betreibergesellschaften massgeblich beteiligt.

## Referenzen

- [1] BFE (2007). *Energieforschungsprogramm Wasserkraft für die Jahre 2008 – 2011.*
- [2] BFE (2011). *Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2010.*
- [3] Bölli, M. (2011): *Forschung und Entwicklung - Neue Konzepte für Ultra-Niederdruck-Kraftwerke.* Newsletter Nr. 15, Programm Kleinwasserkraftwerke, November 2011.
- [4] CORE/BFE (2007). *Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 – 2011.*
- [5] Eichenberger, P. und Scherrer, I. (2011): *Neue Konzepte für Ultra-Niederdruck-Kraftwerke.* Wasser, Energie, Luft, Heft 3, September 2011.
- [6] SATW (2011). *Zukunft der Stromversorgung Schweiz (Entwurfassung), Bericht der Schweizerischen Akademie der Technischen Wissenschaften SATW (Stand 2011), unveröffentlicht.*
- [7] Schröder, U. und Weidmann, Y (2010): *GIS-gestützte Berechnung des hydroelektrischen Potenzials von Fliessgewässern in der Schweiz – Einfluss von Höhenmodell und Gewässernetz.* Angewandte Geoinformatik 2010, Beiträge zum 22. AGIS-Symposium Salzburg, Wichmann Verlag, Seite 310-315.
- [8] Schröder U. (2010): *Das hydroelektrische Potenzial der Schweiz als Planungsgrundlage für den Ausbau der Kleinwasserkraft.* OTTI, Tagungsband zum 13. Internationalen Anwenderforum Kleinwasserkraftwerke, September 2010, Seite 22-27.
- [9] Schröder U. (2011): *Ermittlung des Wasserkraftpotenzials in der Schweiz.* Wasserwirtschaft 7-8/2011, Seite 19-23.
- [10] Schürmann, A. und Eichenberger, P.: *Messsystem zur Detektierung und Quantifizierung von Geschiebetrieb.* Tagungsband 14. Internationales Anwenderforum Kleinwasserkraftwerke, September 2011, Innsbruck.
- [11] Schürmann, A.; Wiget, M. und Eichenberger, P. (2011): *Messsystem zur Detektierung und Quantifizierung von Geschiebetrieb.* WasserWirtschaft Heft Nr. 7-8, 2011.

## Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(\* IEA-Klassifikation)

- BEWÄLTIGUNG VON GESCHIEBE AN KLEINWASSERKRAFTANLAGEN - ERFOLGSKONTROLLE VON AUSGEFÜHRTEN BAULICHEN UND BETRIEBLICHEN MASSNAHMEN**

R+D 3.6.2\*

Lead:	Entegra Wasserkraft AG	Funding:	BFE
Contact:	Eichenberger Peter peter.eichenberger@entegra.ch	Period:	2010–2011

Abstract: Schweizer Mittellandflüsse werden zunehmend durch Niederdruck-Wasserkraftanlagen genutzt. In diesen Gewässern tritt häufig während Hochwässern starker Geschiebetrieb auf. Wenn Geschiebe in die Triebwerkszuleitungen gelangt, führt dies zu Betriebsstörungen oder Schäden. In diesem Projekt werden unterschiedlichen Strategien untersucht, wie der Geschiebeeintrag reduziert oder vermieden werden kann.
- DESIGN OF STEEL LINED PRESSURE TUNNELS AND SHAFTS**

R+D 3.6.1

Lead:	Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne	Funding:	BFE CCEM
Contact:	Schleiss Anton anton.schleiss@epfl.ch	Period:	2009–2011

Abstract: Die herkömmlichen Dimensionierungsansätze für stahlausgekleidete Hochdruckleitungen werden mithilfe von Modellversuchen überprüft und verbessert. Die Ergebnisse werden in numerische Modelle implementiert.
- ENTWURF UND BEMESSUNG VON SEDIMENTUMLEITSTOLLEN**

R+D 3.6.1

Lead:	Eidg. Technische Hochschule Zürich	Funding:	BFE SER
Contact:	Boes Robert boes@vaw.baug.ethz.ch	Period:	2011–2013

Abstract: Zur Reduktion der Verlandung von Speicherseen bei Wasserkraftanlagen wurden in den letzten Jahren in einigen Fällen Sedimentumleitstollen gebaut. Da es bisher weltweit hierzu wenig Erfahrung gibt, gleichzeitig aber der Bedarf nach einer langfristigen Speicherbewirtschaftung weltweit ansteigt, sind grundlegende Untersuchungen zur Bemessung solcher Anlagen notwendig. Dazu trägt dieses Projekt bei.
- ERHEBUNG DES KLEINWASSERKRAFTPOTENZIALS DER SCHWEIZ, TEIL A**

R+D 3.6.2

Lead:	Watergisweb AG	Funding:	BFE
Contact:	Schröder Udo u.schroeder@watergisweb.ch	Period:	2008–2012

Abstract: mithilfe von GIS unterstützten Modellen auf der Basis von digitalen Höhenmodellen und flächendeckenden Abflussdaten wird in diesem Projekt das Kleinwasserkraftpotenzial flächendeckend für die ganze Schweiz untersucht. Dabei wird für jedes einzelne Gewässer ab einer bestimmten Länge das auf summierte Linienpotenzial berechnet.
- ERHEBUNG DES KLEINWASSERKRAFTPOTENZIALS DER SCHWEIZ, TEIL B**

R+D 3.6.2

Lead:	Universität Bern	Funding:	BFE
Contact:	Weingartner Rolf rolf.weingartner@giub.unibe.ch	Period:	2008–2012

Abstract: In Ergänzung zum rein technischen Potenzial, welches im Teil A. untersucht wurde, werden hier zusätzlich Aspekte der Gewässerökologie, des Landschaftsschutzes und soziokulturelle Gesichtspunkte erfasst. Werden diese mit dem technischen Potenzial verschnitten, kann daraus das tatsächlich und unter ganzheitlichen Gesichtspunkten nutzbare Potenzial abgeleitet werden.
- ERHEBUNG DES KLEINWASSERKRAFTPOTENZIALS DER SCHWEIZ, TEIL C**

R+D 3.6.2

Lead:	Netzwerk Wasser im Berggebiet	Funding:	BFE
Contact:	Lehning Michael lehning@slf.ch	Period:	2008–2012

Abstract: Im Teilprojekt C der Studie zum Kleinwasserkraftpotenzial der Schweiz wird die Umsetzung der Untersuchungsergebnisse gemeinsam mit den Bergkantonen durchgeführt. Den Kantonen sollen die Ergebnisse und die Modellansätze als Entscheidungshilfe für ihre eigenen Kleinwasserkraftwerksstrategien dienen.
- EVALUATION VON ULTRA-NIEDERDRUCKKONZEPTEN FÜR SCHWEIZER FLÜSSE**

R+D 3.6.2

Lead:	Entegra Wasserkraft AG	Funding:	BFE
Contact:	Eichenberger Peter peter.eichenberger@entegra.ch	Period:	2009–2011

Abstract: Herkömmliche Turbinen sind für Fallhöhen unter 2 m nur bedingt geeignet. Es gibt viele ungenutzte Abstürze mit solchen geringen Fallhöhen, an denen bisher keine Wasserkraft genutzt wird. Die Studie zeigt einen Vergleich und eine Bewertung der heute verfügbaren Wasserkraftmaschinen für den Ultra Niederdruck Bereich.

## ● HYDROPOWER DESIGN UNDER UNCERTAINTIES

R+D 3.6.1

Lead: Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne

Funding: BFE

Contact: Schleiss Anton anton.schleiss@epfl.ch

Period: 2011–2014

Abstract: Wasserkraftanlagen haben sehr hohe Investitionskosten und müssen sich über extrem lange Zeiträume amortisieren. Die Unsicherheiten zum Beispiel bezüglich der Strompreisentwicklung oder des Einflusses des Klimawandel auf das Wasserangebot sowie andere Risiken müssen bei der Planung besser berücksichtigt werden. Hierzu werden Methoden entwickelt.

## ● LUFTEINTRAGSRATE IN DRUCKSYSTEME VON WASSERKRAFTANLAGEN INFOLGE EINLAUFWIRBEL

R+D 3.6.1

Lead: Eidg. Technische Hochschule Zürich

Funding: BFE STV SER

Contact: Boes Robert boes@vaw.baug.ethz.ch

Period: 2009–2013

Abstract: Durch die Rolle der Schweizer Wasserkraft für die Bereitstellung von Spitzenstrom im europäischen Verbundnetz haben sich die Anforderungen an die Bewirtschaftung der Speicher verändert. Die verfügbaren Speichervolumen werden soweit möglich vollständig ausgenutzt. In diesem Zusammenhang wird in diesem Projekt untersucht, ab welchen Überdeckungen der Einläufe zu den Triebwasserleitungen Luft eingezogen werden kann, da solche Luftblasen problematisch sein können.

## ● MASSNAHMEN ZUR GEWÄHRLEISTUNG EINES SCHONENDEN FISCHABSTIEGS

R+D 3.6.1

Lead: Eidg. Technische Hochschule Zürich

Funding: BFE SER VAR EAWAG

Contact: Boes Robert boes@vaw.baug.ethz.ch

Period: 2011–2014

Abstract: Während Fischaufstiege seit langem erprobt sind und erfahrungsgemäß gut funktionieren, ist die Frage des Fischabstiegs bisher stark vernachlässigt worden. In diesem Projekt sollen Konzepte und Methoden entwickelt werden, mit denen absteigende Fische sicher ins Unterwasser von Flusskraftwerken geleitet werden können, ohne dass sie in die Turbinen gelangen.

## ● PILOTANLAGE MÜNSTER (VS): UNIVERSALTURBINE FÜR WASSERVERSORGUNGEN

P+D 3.6.2

Lead: Stiftung Revita

Funding: BFE

Contact: Schindelholz Bruno info@revita.ch

Period: 2009–2012

Abstract: Die so genannte Universal Turbine ist eine Pelton Turbine, wie in einem Überdruckbehälter läuft. Der Druck in diesem Behälter entspricht dem Gegendruck, der für ein nachgeschaltete Wasserversorgung notwendig ist. Diese Turbinen werden daher in Wasserversorgungsanlagen eingesetzt. In diesem Projekt wurde ein Prototyp gebaut und erprobt.

## ● SCHWEBSTOFF-MONITORING UND VERSCHLEISS AN PELTON TURBINEN

R+D 3.6.1

Lead: Eidg. Technische Hochschule Zürich

Funding: BFE SER BKW GWK

Contact: Boes Robert boes@vaw.baug.ethz.ch

Period: 2011–2013

Abstract: Schwebstoffe im Triebwasser von Wasserkraftanlagen führen insbesondere bei Hochdruckanlagen zu Abrasionsschäden. In diesem Projekt werden neue Beschichtungen für die Schaufeln von Pelton Turbinen untersucht, die die Lebensdauer der Laufräder deutlich verlängern sollen.

## ● SUSTAINABLE SEDIMENTATION IN PUMPED STORAGE PLANTS

R+D 3.6.1

Lead: Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne

Funding: BFE CCEM

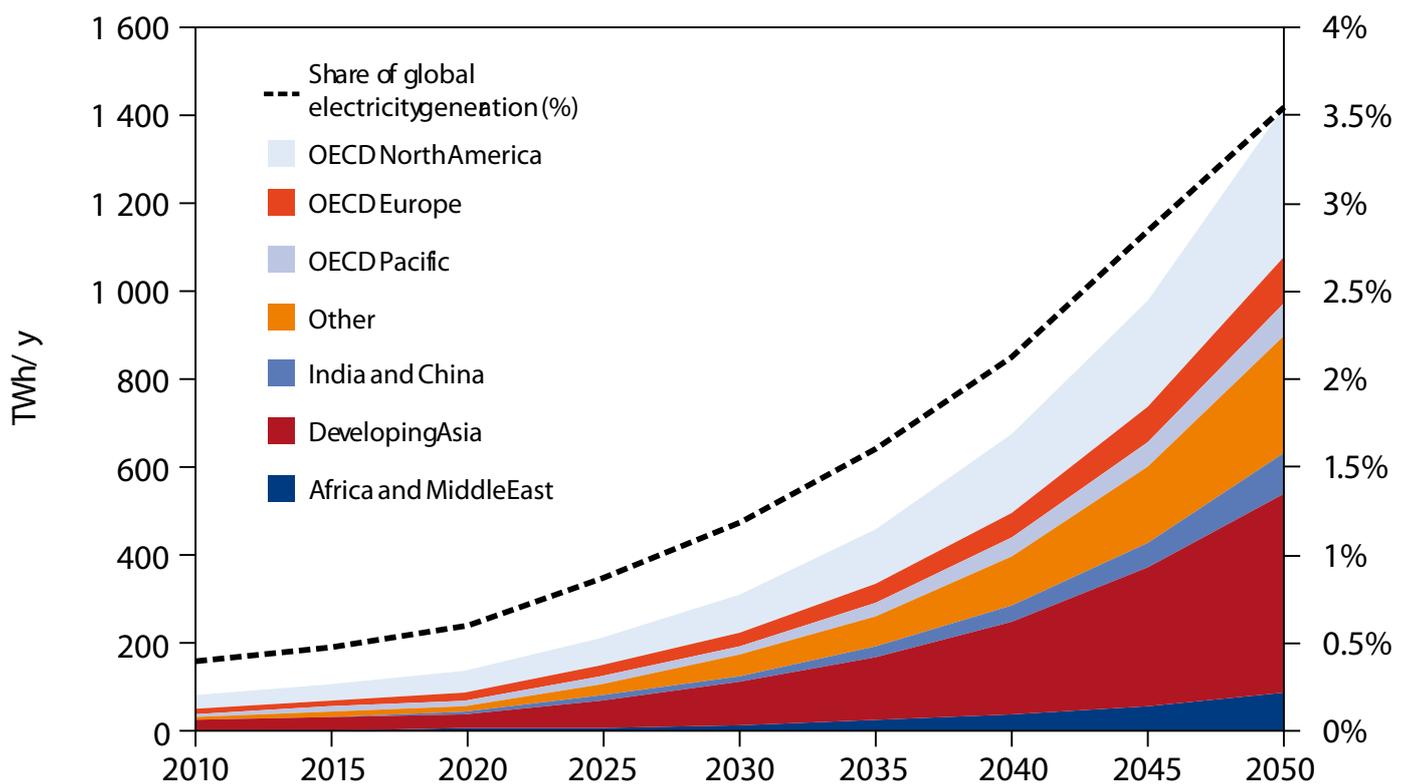
Contact: Schleiss Anton anton.schleiss@epfl.ch

Period: 2009–2012

Abstract: Beim Pump- und Turbinenbetrieb in Speicherkraftwerken wird nicht nur Wasser sondern auch suspendierte Stoffe bewegt. In Abhängigkeit von den sich ausbildenden Strömungsverhältnissen bleiben diese Stoffe in der Schwebelage oder setzen sich ab. Im Labor sowie an einem Prototyp werden diesen Vorgänge untersucht und aus den Ergebnissen numerische Modelle entwickelt und kalibriert, mithilfe derer die Verlandungsprozesse besser analysiert werden können.

Rudolf Minder

# Geothermie



**Titelbild:****IEA Geothermal Technology Roadmap**

Die Entwicklung der weltweiten geothermischen Stromproduktion nach der Roadmap der Internationalen Energie-Agentur IEA.

**BFE Forschungsprogramm Geothermie**

Überblicksbericht 2011

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
CH-3003 Bern

**Programmleiter BFE (Autor):**

Dr. Rudolf Minder, Minder Energy Consulting GmbH (rudolf.minder@bluewin.ch)

**Bereichsleiter BFE:**

Dr. Gunter Siddiqi (gunter.siddiqi@bfe.admin.ch)

<http://www.bfe.admin.ch/forschunggeothermie>

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

## Einleitung

Der Begriff geothermische Energie umfasst mehrere Arten von Ressourcen, welche sich bezüglich Nutzung und Entwicklungsstand stark unterscheiden (Figur nächste Seite). Die Technik der Erdwärmesondenanlagen (EWS) zur Beheizung von Gebäuden ist heute weitgehend ausgereift und die Systeme können sich erfolgreich am Markt behaupten. Im Jahr 2010 wurden rund 2'330'000 m Erdwärmesonden abgeteuft, davon sind ca. 40 % Sanierungen von Altbauten [1]. Für 2011 dürften sich ähnliche Zahlen ergeben. Der Markterfolg der EWS zeigt, dass die von der öffentlichen Hand zu finanzierenden Forschungsbedürfnisse dieser Technik weitgehend abgedeckt sind. Die Unterstützung im Bereich der Niedertemperatur- oder untiefen Geothermie zielt deshalb primär auf grosse und komplexe Anlagen, insbesondere für kombiniertes Heizen und Kühlen sowie auf Verbesserungen bezüglich Qualität, Effizienz und Wirtschaftlichkeit. Auch im Gebiet der tiefen EWS (> 300 m) sowie Geo-Strukturen wie z. B. Energiepfählen [2] sind weitere Forschungsprojekte von Interesse.

Die hydrothermalen Ressourcen (z. B. Heisswasser führende Aquifere und/oder Bruchstrukturen im Untergrund) sind im Gegensatz zu den EWS nur in speziellen Gebieten verfügbar, wo Wassermenge, Temperatur und Produktivität ausreichend sind. Je nach

Temperatur des Wassers kann die Wärme direkt zu Heizzwecken genutzt werden, bei sehr günstigen Verhältnissen ist auch eine Stromproduktion möglich. Wegen der geringen Zahl bisher realisierter Projekte besteht für Forschung und Entwicklung sowie Pilot- und Demonstrationsanlagen ein substantieller Bedarf.

Die dritte Hauptkategorie, die Technik der «Enhanced oder Engineered Geothermal Systems» (EGS) hat weltweit wie auch in der Schweiz ein sehr grosses Potenzial, da solche Systeme in vielen Regionen grundsätzlich realisierbar sind. Die Erfahrungen bezüglich der induzierten Seismizität mit dem Projekt in Basel haben auch gezeigt, dass für die Entwicklung von tiefliegenden Reservoiren noch wenig Erfahrung vorliegt, und dass in diesem Bereich noch grosse, langfristige Forschungsanstrengungen notwendig sind. Wegen des grossen Aufwands besonders wichtig ist auch die Teilnahme der Schweiz in internationalen Programmen wie dem IEA-Geothermal Implementing Agreement und der International Partnership for Geothermal Technology IPGT und auch den Aktivitäten der Europäischen Union. Die nachhaltige Gewinnung von Wärme aus einem in 5'000 m Tiefe liegenden Felsvolumen ist eine enorme Herausforderung und erfordert Kenntnisse aus den verschiedensten Disziplinen.

IEA Klassifikation: 3.5 Geothermal

Schweizer Klassifikation: 2.5 Geothermie

## Programmschwerpunkte

Die Schwerpunkte der Geothermie-Forschung lagen 2011 wiederum in der tiefen Geothermie, einerseits bei den hydrothermalen Quellen, andererseits bei den Enhanced Geothermal Systems (EGS). Im Bereich der untierten Geothermie beschränken sich die Forschungsarbeiten auf besondere, noch nicht am Markt etablierte Anwendungen, sowie auf Fragen der Effizienz und der Qualitätssicherung.

Für die Nutzung tief liegender hydrothermalen Ressourcen besteht Forschungsbedarf bei den geophysikalischen Methoden der Prospektion um das Fündigkeitsrisiko zu reduzieren. Von grosser Bedeutung ist neben der eigentlichen Forschung die Realisierung von Pilot- und Demonstrationsanlagen (P+D). Mit der Unterstützung mehrerer Projekte in verschiedenen Regionen der Schweiz sowie auch im Ausland sollen – in Zusammenarbeit mit Kantonen, Gemeinden und der Privatwirtschaft - in den nächsten Jahren erste Projekte für die kombinierte Strom- und Wärmeerzeugung realisiert werden. Langfristig wird – wegen des grossen Potenzials – laut IEA weltweit, aber auch lokal in der Schweiz grosse Hoffnung auf die Technik der Enhanced / Engineered Geothermal Systems (EGS) gesetzt.

### Rückblick und Bewertung 2011

Bei der geothermischen Forschung ergaben sich im 2011 gegenüber den Vorjahren keine grundlegenden Ver-

schiebungen in den Prioritäten, wie sie im Detailkonzept 2008–2012 des Forschungsprogramms Geothermie ausgeführt sind. Nach wie vor lag der Fokus auf den Aspekten der tiefen Geothermie. Bei den tiefen hydrothermalen Ressourcen befinden sich derzeit einige Projekte in verschiedenen Stadien der Bearbeitung. Somit können voraussichtlich in den nächsten Jahren erste Anlagen realisiert werden, was für die Geothermie in der Schweiz einen wichtigen Meilenstein bedeutet. Im vergangenen Jahr wurde auch das erste Gesuch für eine Bürgschaft zur Risikoabsicherung gemäss Energiegesetz für das Geothermie-Projekt in Lavey-les-Bains [3] bewilligt. Wichtige Fortschritte wurden auch bei andern Projekten erzielt, beispielsweise beim Projekt der Stadt St. Gallen [4].

Die Forschung im Gebiet der Enhanced Geothermal Systems (EGS) ist langfristig ausgelegt. Die Erfahrungen mit dem Projekt DHM Basel und auch mit Projekten in Deutschland haben gezeigt, dass den Risiko-Aspekten grosse Bedeutung zukommt und dass in diesem Bereich auch forschungsmässig noch viel Arbeit zu leisten ist. Grosse Fortschritte wurden in der Aufarbeitung des Basler Projektes durch das Projekt GEOTHERM [5] erzielt. Aus dieser Sicht bewährt sich die verstärkte internationale Vernetzung mittels Organisationen wie der Internationalen Energie-Agentur IEA [6] oder der International Partnership for Geothermal Technology IPGT [7].

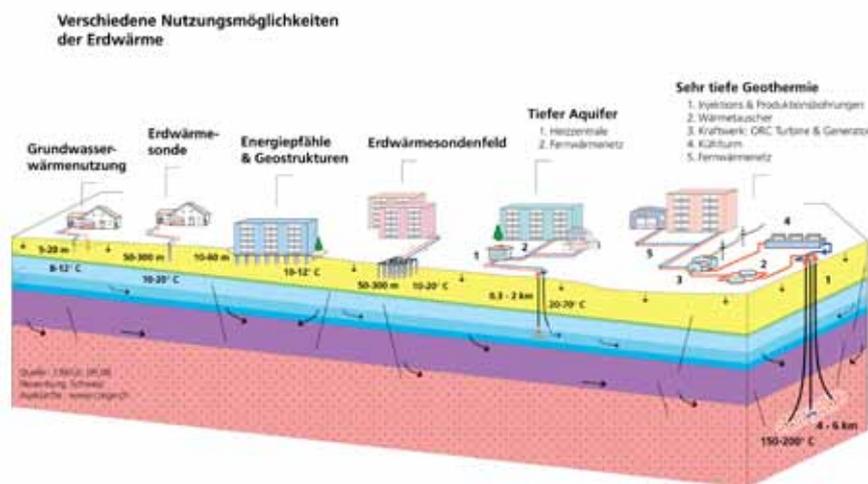
Bei der untierten Geothermie wurden insbesondere Projekte mit tiefen Erdwärmesonden – im Bereich von 300–1'000 m – unterstützt. Mit solchen Sonden kann geothermische Energie auch in Gebieten gefördert werden, welche sich für den Einsatz der üblichen, 100–200 m tiefen EWS nicht eignen. Damit kann längerfristig der EWS-Markt weiter ausgeweitet werden.

### Ausblick

Für 2012 sind keine grundsätzlichen Änderungen geplant. Das Detailkonzept für die Jahre 2013–2016 wird die Priorisierung auf hydrothermale Geothermie und Enhanced / Engineered Geothermal Systems fortsetzen. Von kurzfristig höchster Priorität ist es, im hydrothermalen Bereich erste Erfolge zu erzielen und damit die praktische Nutzbarmachung dieser Ressource nachzuweisen. Bei verschiedenen Projekten haben sich Investoren interessiert gezeigt bzw. teilweise bereits Finanzierungszusagen gemacht.

Im Bereich der Enhanced Geothermal Systems soll die Mitwirkung von Schweizer Forschern in verschiedenen Arbeitsgruppen der IPGT intensiviert werden. Neben der Förderung der Forschung ist dabei die Förderung von Pilotanlagen von entscheidender Bedeutung.

Neben der Unterstützung von Forschungs- sowie P+D-Projekten in der Schweiz ist auch eine weitere Intensivierung der internationalen Zusammenarbeit geplant. Die Schweiz beteiligt sich am europäischen Projekt «Geothermal ERA-NET», welches von der EU-Kommission bewilligt wurde und folgende Länder umfasst: Island (Federführung), Deutschland, Frankreich, Italien, Holland, Ungarn, Slowakei und die Türkei. Ziel des 4-jährigen Programms ist es, die Zusammenarbeit und Koordination der nationalen Forschungs- und Entwicklungs-Institutionen zu verbessern und ein kohärentes europäisches Forschungs- und Entwicklungsprogramm anzustreben.



Verschiedenen Nutzungsarten der geothermischen Energie (Quelle: S. Cattin, CREGE).

## Highlights aus Forschung und Entwicklung

### Induced seismicity: Bi-value mapping / monitoring

Hydraulische Stimulationen sind bei EGS-Systemen notwendig, um die Wärme des tiefen, festen und wasserundurchlässigen Untergrunds zu erschliessen. Dies geschah auch 2006 in Basel, wobei die dadurch erzeugten Erdbebenstösse zum Abbruch des Projekts führten. Seit 2008 werden unter der Federführung der ETH Zürich in einem gross angelegten Forschungsprogramm GEOTHERM [5] die in Basel erfassten Messdaten ausgewertet und Lehren für zukünftige Projekte gezogen. 2011 wurde ein wichtiger Meilenstein erzielt, als Forschende der ETH Zürich mittels einer detaillierten Analyse neue Wege aufgezeigt haben, wie die Sicherheit und die Erfolgchancen einer hydraulischen Stimulation erhöht werden können. Zum Einen wurden durch Analyse der Spektren der Erdbebenwellen aus dem Jahre 2006 die Spannungsabfälle während der Erdbeben bestimmt. Erdbeben entstehen in dem Moment, wenn die Festigkeit des Gesteins geringer ist als die Spannungen im Gestein. Dabei wurde festgestellt, dass die Spannungsabfälle – ein Massstab für die frei gesetzte Energie - grösser werden, je weiter weg man sich vom Bohrloch entfernt. Für die Geologie um das Basler Bohrloch scheint eine Distanz von rund 300 m eine Schwelle darzustellen, über die nicht hinaus stimuliert werden sollte um die Wahrscheinlichkeit grösserer Erdbeben zu verringern.

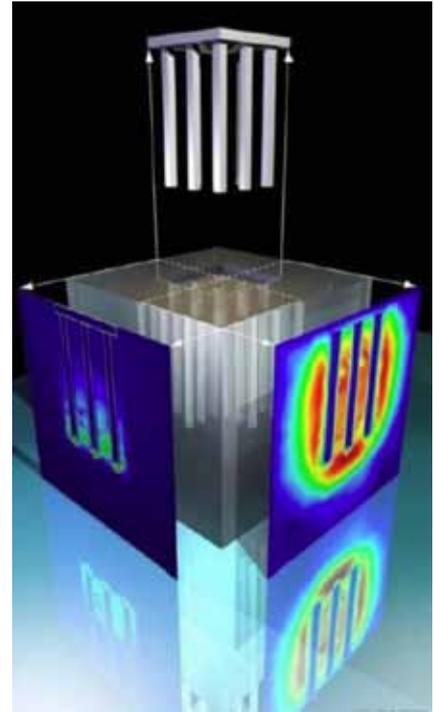
Eine weitere Analyse machte sich die Tatsache zu Nutze, dass Anzahl und Stärke von – sowohl natürlichen als auch vom Menschen induzierten – Erdbeben in einer Zone in einem logarithmischen Zusammenhang stehen: es gibt eine sehr viel grössere Anzahl kleiner als grosser Erdbeben. Dieses Phänomen macht sich die Erdbebenvorhersage zu Nutze. Beobachtet man die Anzahl von Erdbeben und deren Grösse, kann man, ähnlich wie bei der Wettervorhersage, kurzfristige Vorhersagen über das Auftreten der nächsten Erdbeben machen. Forschende der ETH Zürich haben an Hand des Basler Datensatzes ein 6-stündiges Vorhersagemodell entwickelt, welches Projektbetreibern frühzeitig erlauben soll, die hydraulische Stimulation zu moderieren oder gar zu stoppen, bevor ein

Schadensereignis eintritt. Ein «Epidemic Type Aftershock Sequence»-Modell wurde erfolgreich weiter entwickelt, um eine 6-stündige Vorhersage zur Menge und Stärke von Erdbeben während einer hydraulischen Stimulation zu machen. Das Modell wird kontinuierlich mit den während der Stimulation erzeugten Erdbeben aufdatiert und erlaubt so eine Vorhersage des seismischen Gefährdungspotenzial. Die Untersuchungen zeigen, dass das Erdbebenrisiko durch geringere Stimulationsdistanzen reduziert werden kann.

### Energy piles (EPFL) [2]

Im Labor für Bodenmechanik an der EPFL in Lausanne erarbeitet ein Team von Forschende daran, Empfehlungen zur optimalen und zuverlässigen Konstruktion und Auslegung von Energiepfählen zu machen. Dazu gehört auch die Entwicklung eines neuen Berechnungsprogramms. Bei der Dimensionierung von Energiepfählen und anderen Geostrukturen wurden Berechnungen bisher üblicherweise nur mit einem empirischen Ansatz zum Wärmeaustausch durchgeführt, ohne die mechanischen Effekte der Temperaturschwankungen vollumfänglich zu berücksichtigen. Eine optimale Dimensionierung sollte allerdings die thermomechanischen Effekte mit einbeziehen. Die herkömmliche Auslegung basiert auf den thermischen Eigenschaften. Aus geotechnischer Sicht beruht die Auslegung bisher auf Erfahrung und Empirie. Dabei ist das Verständnis des gekoppelten thermisch-mechanischen Verhaltens noch sehr rudimentär.

Um zu verbesserten, wissenschaftlich fundierten Verfahren für die Auslegung von Energiepfählen zu gelangen ist es notwendig, die Wechselwirkungen von Energiepfählen und Boden, den Einfluss der Temperatur und des Porenwassers sowie auch die nicht-linearen Eigenschaften des Energiepfählsystems zu messen und zu modellieren. Die Forscher der EPFL untersuchen die Auslegung der Energiepfähle unter den Gesichtspunkten der Verformungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und der Tragfähigkeit. Sowohl Messungen an Energiepfählen, als auch numerische



Figur 1: Auslegung und Design von Energiepfählen (Quelle: EPFL).

Modelle, welche mit experimentell gemessenen Parametern unterlegt sind, demonstrieren, dass thermische Spannungen und Verformungen nicht zu vernachlässigende Einwirkungen auf die Stabilität der Energiepfähle und deren Leistung haben. Das von der EPFL entwickelte numerische Werkzeug modelliert erfolgreich die mechanischen und thermischen Spannungen und Verformungen in den Energiepfählen. Die Veröffentlichung der EPFL zu diesem Thema wurde 2011 mit einem Preis des Educational Trust des US-amerikanischen Deep Foundations Institute ausgezeichnet.

## Pilot- und Demonstrationsprojekte

### Direkte Nutzung der Geothermie – Tiefenbohrung Schlattingen [8]

Der Thurgauer Familienbetrieb Grob Gemüse- und Landbau in Schlattingen TG benötigt für den Gemüseanbau ganzjährig Energie. Im Jahr 2010 betrug der Energiebedarf ca. 15 Mio. kWh und wurde zu ca.  $\frac{3}{4}$  mit Gas und zu ca.  $\frac{1}{4}$  mit Heizöl gedeckt. Der damit verbundene jährliche CO<sub>2</sub>-Ausstoss liegt bei rund 4'000 t. Die Unternehmung beabsichtigt, einen grossen Anteil des Wärmebedarfs mit geothermischer Energie zu decken um folgende Ziele zu erreichen:

- Verbesserung des ökologischen Umfeldes durch den Einsatz einer erneuerbaren Energiequelle für einen noch naturnäheren Gemüseanbau
- Erreichen einer Versorgungs- und Preissicherheit sowie einer Unabhängigkeit von fossilen Energierohstoffen.

Auf Grund verschiedenen Vorabklärungen und einer Machbarkeitsstudie wurde davon ausgegangen, dass im Raum Schlattingen zwei Schichten heisses Grundwasser führen können. Im Muschelkalk, in einer Tiefe von ca. 1'200 m sind Temperaturen von 55–

60 °C zu erwarten, im Permokarbon / Kristallin, in einer Tiefe von ca. 1'300–1'500 m betragen die erwarteten Temperaturen ca. 65 °C.

Am 25. September 2011 wurde in der Geothermiebohrung Schlattingen die Endteufe von 1'508 m erreicht. In den für eine geothermische Nutzung möglichen geologischen Zielhorizonten wurden anschliessend hydraulische Packertests und Temperaturmessungen durchgeführt. Die Messungen bestätigten die prognostizierte Temperatur von 65 °C. Die hydraulischen Messungen zeigten jedoch, dass in keinem der wasserführenden Horizonte ausreichende Wasserzuflüsse vorhanden sind, um das Mindest-Kriterium der Fündigkeit - eine Fließrate von 7,9 l/s – zu erreichen. Jedoch liessen die Bohrkern- und Bohrlochmessungen vermuten, dass sich die Fördermengen in den porösen und geklüfteten Gesteinsserien des Oberen Muschelkalkes (Trigonodus-Dolomit und Hauptmuschelkalk) sowie des obersten Dolomits des Mittleren Muschelkalkes mittels geeigneter Säuerungsmassnahmen stark erhöhen lassen. In der Folge wurde deshalb diese Gesteinsformation in drei Säuerungsschritten behandelt.

Die nach der Säuerung durchgeführten Pumpversuche zeigten, dass sich

die angestrebte minimale Ergiebigkeit von 7,9 l/s bei einer machbaren Absenkungshöhe erreichen lässt. Ob weitere Säuerungsmassnahmen zu einer weiteren Steigerung der förderbaren Wassermenge führen und es erlauben, den Vollerfolg von 12,9 l/s zu erreichen, ist noch offen.

Das Bohrloch unterhalb des nun genutzten Horizonts, d. h. unterhalb der Basis des obersten Dolomits des Mittleren Muschelkalkes wird demzufolge nicht mehr benötigt. Es wurde deshalb ab dieser Tiefe von knapp 1'200 m bis zur Bohrlochsohle (1'508 m) rückzementiert. Anschliessend wurde die verbliebene offene Bohrlochstrecke ein gelochtes 5"-Stahlrohr (sogenannter 5"-Liner) mit Packer eingebaut. Im oberen Teil des Bohrloches auf eine Tiefe von ca. 300–400 m innerhalb der 7"-Verrohrung wird eine Pumpe eingebaut, um das heisse Wasser an die Oberfläche zu fördern.

Die Bohrung Schlattingen ermöglichte es, hydraulische und felsmechanische Parameter aus zwei potenziellen Aquiferen, die sich im tieferen Untergrund der Schweiz für eine geothermische Nutzung eignen, zu erheben. Diese Daten ergänzen substantiell den bestehenden Datensatz des tieferen Untergrundes im Kanton Thurgau, aber auch den regionalen Datensatz der Ostschweiz. Aus diesem Grund beteiligte sich das Bundesamt für Energie an den Kosten dieser Untersuchungen.



Figur 2: Der Bohrplatz der Tiefenbohrung Schlattingen (Quelle: Grob Gemüse- und Landbau).

## Nationale Zusammenarbeit

Im Berichtsjahr wurde insbesondere mit den nachstehend aufgeführten Schweizer Institutionen zusammengearbeitet. Im Weiteren wurde wiederum ein «Round Table»-Anlass gemeinsam mit geothermie.ch organisiert und das Forschungsprogramm Geothermie an verschiedenen Konferenzen und Tagungen vorgestellt.

### 1 - Universitäten und Fachhochschulen:

ETHZ (Departemente für Maschinenbau und Erdwissenschaften), Uni Basel, Université de Neuchâtel und Laboratoire Suisse de Géothermie CREGE, Neuchâtel, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Wädenswil, EPFL (Département de génie civil, Institut des sols, roches et fondations), Scuola universitaria della Svizzera italiana SUPSI (Istituto di Sostenibilità Applicata all'Ambiente Costruito).

### 2 - Stromindustrie und Wärmeversorgung:

Axpo AG, Neue Energien, Glattbrugg, Sol-E Suisse AG, Bern, Geo-Energie Suisse AG, Basel, Services Industriels de Genève, Services Industriels de Lausanne, Canton de Vaud: service de l'environnement et de l'énergie, Technische Betriebe St Gallen, Stadtwerk Winterthur, Gemeinde Landschaft Davos.

### 2 - Bundesämter, Agenturen und Fachverbände:

Swisstopo, Bundesamt für Umwelt, Schweizerischer Erdbendienst SED, Agentur für erneuerbare Energien und

Energieeffizienz, Aktion für vernünftige Energiepolitik Schweiz, Geothermie.ch, SBF, Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz (FWS) u. a.

### 3 - Energiefachstellen verschiedener Kantone

### 4 - Runder Tisch:

Am 20. September 2011 wurde gemeinsam mit Geothermie.ch ein «Round Table» zum Stand von Tiefengeothermie-Projekten in der Schweiz und benachbarten Regionen durchgeführt mit dem Ziel der verbesserten gegenseitigen Information der verschiedenen Akteure. Insbesondere ergab sich ein Informationsaustausch und Diskussion bezüglich der Risikogarantie des Bundes für Geothermie-Projekte, des Bedarf der Kantone für eine Vollzugshilfe für Tiefengeothermie-Projekte sowie allgemein über Probleme, Risiken und Potenziale.

### 5- Wissens- und Technologietransfer:

Auch im Bereich Wissens- und Technologietransfer wurden verschiedene Vorhaben unterstützt, so z. B. ein Kurs an der Universität Neuenburg [9] (Certificate of Advanced Studies: Exploration & Development of Deep Geothermal Systems) [4], und die Journée Romande de Géothermie in Yverdon.

## Internationale Zusammenarbeit

### International Energy Agency (IEA) [6]:

Das «Geothermal Implementing Agreement GIA» bietet einen ausgezeichneten Rahmen international zu den folgenden Themen zu kooperieren; (1) Umweltaspekte geothermischer Projekte, (2) Enhanced Geothermal Systems, (3) Zukünftige Bohrtechnologien und (4) direkte Nutzung geothermischer Ressourcen. Das GIA ist derzeit in der dritten 5-Jahresperiode, welche am 31. März 2013 abläuft und voraussichtlich verlängert wird. Ziele sind, die existierende Technologien zu verbessern und neue Technologien zu entwickeln, den Know-how-Transfer zu intensivieren, Informationen verfügbar zu machen und die Vorteile der Nutzung geothermischer Ressourcen zu kommunizieren. Derzeit umfasst das GIA 20 Mitglieder; 14 Länder, die EU sowie 5 Sponsoren

Um der Geothermie – einer im Angesicht des enormen Potenzials notorisch unterschätzte erneuerbare Ressource – eine bessere Positionierung zu ermöglichen, hat das IEA-Sekretariat 2011 eine «Geothermal Technology

Roadmap» erarbeitet, welche die erwartete Entwicklung der geothermischen Energiequellen weltweit aufzeigt. Die Schweiz hat sowohl personelle als auch finanzielle Ressourcen dafür zur Verfügung gestellt. Die IEA Roadmap wurde im Sommer 2011 publiziert [10].

### International Partnership for Geothermal Technology IPGT [2]:

Diese Partnerschaft wurde von den Gründerstaaten Australien, Island und der USA im August 2008 gegründet, im Oktober 2010 trat die Schweiz der Partnerschaft bei. Im Jahr 2011 schloss sich auch Neuseeland der IPGT an. Die IPGT basiert auf einem Staatsvertrag, der bezweckt, gemeinsame spezifische F+E- und P+D-Projekte durchzuführen. Die Organisation will die Entwicklung der Tiefengeothermie vorantreiben – insbesondere im EGS-Bereich. Die Schwerpunkte, welche von 7 Working Groups bearbeitet werden, umfassen (1) kostengünstige Bohrtechnologien, (2) zonale Isolation und Packertech-

nologie, (3) Hochtemperatur-Messinstrumente, (4) Stimulationsmethoden, (5) Numerische Simulationen, (6) Explorationstechnologien und (7) induzierte Seismizität. Für die Schweiz stehen im Lichte der Erfahrungen des Basler EGS-Projektes die Stimulationsmethoden und die induzierte Seismizität im Vordergrund.

*EGS-Pilotanlage in Soultz-sous-Forêts, France [11]:*

Das EGS-Projekt in Soultz befindet sich seit 2010 in einer Produktions- und Testphase. Einerseits wird das Projekt von einem deutsch-französischen Industriekonsortium betrieben, andererseits haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler Zugang durch ein wissenschaftliches Begleitprogramm. Die Schweiz finanziert über das Bundesamt für Energie eine Forschergruppe um die Deep Heat Mining Association. Separat haben universitäre Forschungseinrichtungen Kooperationsverträge mit dem EGS-Projekt abgeschlossen. Seit Dezember 2009 und teilweise im Jahr 2010 wurden Zirkulationstests durchgeführt. Im März 2010 erfolgte der offizielle «Kick-off» dieser Phase; das wissenschaftliche Begleitprogramm

umfasst das Studium des Reservoirs während einer längerfristigen Zirkulation sowie die Untersuchung des Betriebsverhaltens der Untergrund- und Produktionsanlagen. Wegen Problemen mit den Förderpumpen musste der Betrieb des Kraftwerks verschiedentlich unterbrochen werden. Die schweizerischen Beiträge haben sich 2011 hauptsächlich auf die Arbeiten des Geothermielabors der Universität Neuenburg konzentriert, und dort insbesondere auf die numerische Simulation des Flussverhaltens im Reservoir.

*US Department of Energy – Geothermal Technologies Program [12]*

Um die internationale Zusammenarbeit mit dem in der Geothermieforschung sehr aktiven Programm des US-amerikanischen Department of Energy (DoE) zu fördern, hat das BFE einer Einladung des DoE Folge geleistet, an einem Peer Review des US-amerikanischen Geothermie-Forschungsprogramms mitzuwirken.

## Referenzen

[1] Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz FWS: [www.fws.ch](http://www.fws.ch)

[2] Laboratoire de mécanique des sols, EPFL: <http://lms.epfl.ch/>, *Understanding the Thermo-Mechanical Behaviour of Energy Piles*, Laloui, Lyesse ; Di Donna, Alice, *Civil Engineering*, vol. 164, 2011

[3] Website des Pilotprojekts Lavey-les-Bains: <http://www.agepp.ch>

[4] Website des Pilotprojekts St Gallen: [www.geothermie.stadt.sg.ch/](http://www.geothermie.stadt.sg.ch/)

[5] Website des Projekts Geotherm an der ETHZ: [www.cces.ethz.ch/projects/nature/geotherm](http://www.cces.ethz.ch/projects/nature/geotherm)

[6] International Energy Agency, *Implementing Agreement for a Co-operative Programme on Geothermal Energy Research and Technology*: [www.iea-gia.org](http://www.iea-gia.org)

[7] International Partnership for Geothermal Technology <http://internationalgeothermal.org>

[8] Website der Firma Grob, Schlattingen: [www.grob-gemuese.ch](http://www.grob-gemuese.ch)

[9] Website der Universität Neuchâtel: <http://www2.unine.ch/chyn/unine>

[10] IEA Geothermal Roadmap: [www.iea.org/papers/2011/Geothermal\\_Roadmap.pdf](http://www.iea.org/papers/2011/Geothermal_Roadmap.pdf)

[11] Website des EGS-Pilotprojekts Soultz-sous-Fôrets: [www.soultz.net](http://www.soultz.net)

[12] [www1.eere.energy.gov/geothermal/pdfs/gtp\\_peer\\_review\\_plenary\\_deck\\_20110606.pdf](http://www1.eere.energy.gov/geothermal/pdfs/gtp_peer_review_plenary_deck_20110606.pdf)

## Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(\* IEA-Klassifikation)

- CONSTRUCTIVE RECOMMENDATIONS FOR OPTIMIZED AND RELIABLE HEAT EXCHANGER PILE SYSTEMS** 3.5\*

Lead: EPFL/DGC/LMS, Ecublens	Funding: BFE
Contact: Laloui Lyesse <a href="mailto:lyesse.laloui@epfl.ch">lyesse.laloui@epfl.ch</a>	Period: 2010–2014

Abstract: Heat exchanger piles are combining structural functions with energy management functions. They use the energy naturally present in the ground to heat or cool buildings. For years, the dimensioning of heat exchanger pile installations has relied on heat transfer calculations only. There is currently no method for the geotechnical design taking into account the effects of temperature cycles applied to the pile/soil system.
- EGS PILOT PLANT: EUROPEAN GEOTHERMAL PROJECT FOR THE CONSTRUCTION OF A SCIENTIFIC PILOT PLANT BASED ON AN ENHANCED GEOTH** 3.5

Lead: Deep Heat Mining Association	Funding: BFE
Contact: Vuataz François-D. <a href="mailto:francois.vuataz@unine.ch">francois.vuataz@unine.ch</a>	Period: 2007–2012

Abstract: The Soultz project of the European Union is the most advanced deep EGS project worldwide with regard to research and development. After 22 years of research, a pilot power plant was inaugurated in June 2008. Thanks to a careful monitoring of all reservoir parameters, the coming project phase will bring for the first time a wealth of data on the continuous production/injection exploitation of the EGS reservoir.
- ERFOLGSKONTROLLE HEIZEN UND KÜHLEN IM GEWERBEBAU** 3.5

Lead: Eberhard & Partner AG	Funding: BFE
Contact: Eberhard Mark <a href="mailto:eberhard@eberhard-partner.ch">eberhard@eberhard-partner.ch</a>	Period: 2008–2011

Abstract: Ziel des Projektes ist die praktische Überprüfung der auf Simulationen basierenden Erhebungen und Empfehlungen der über den Fussboden wirkenden Heizung und passiven Kühlung mit Erdsonden. Mit der Integration einer Messvorrichtung in die bereits bereitgestellte Geräteschaft wird es möglich, das System hinsichtlich Energieverbrauch, Energieeffizienz, thermischer Behaglichkeit, Temperaturdifferenzen, Taupunkt zu überprüfen.
- 3D-RESERVOIRMODELL REGION BASEL FÜR EINE ENERGIE-RELEVANTE NUTZUNG (Z. B. GEOTHERMIE, CARBON STORAGE)** 3.5

Lead: Universität Basel	Funding: BFE
Contact: Huggenberger Peter <a href="mailto:peter.huggenberger@unibas.ch">peter.huggenberger@unibas.ch</a>	Period: 2009–2011

Abstract: Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines geologischen 3D-Modells der Region Basel als neuartiges Werkzeug für die Tiefenreservoirbewirtschaftung und Raumplanung. In der Vorbereitung von Geothermie-Projekten kann das Reservoirmodell als Planungsinstrument eingesetzt werden, insbesondere im Hinblick auf die Evaluierung geothermischer Verfahren (EGS, Doublette u.a.), sein.
- GEOTHERM - GEOTH. RESERVOIR PROCESSES: RESEARCH TOWARDS THE CREATION AND SUSTAINABLE USE OF ENHANCED GEOTHERMAL SYSTEMS** 3.5

Lead: ETHZ Geologisches Inst.	Funding: BFE
Contact: Evans Keith Frederick <a href="mailto:keith.evans@erdw.ethz.ch">keith.evans@erdw.ethz.ch</a>	Period: 2009–2012

Abstract: A consortium of research groups from ETH Zürich, EPF Lausanne, the Paul Scherrer Institute and the University of Bonn, collaborate in a comprehensive program of basic research on key aspects of Enhanced Geothermal Systems (EGSs), with a focus on the system to be developed in Basel in December 2006. The work will contribute to understanding and developing an alternative and sustainable energy resource free of CO<sub>2</sub>-emission.
- GEOTHERMISCHE RESSOURCENANALYSE IM BEREICH KGZ DAVOS** 3.5

Lead: Landschaft Davos Gemeinde	Funding: BFE
Contact: Calonder Gian-Paul <a href="mailto:gian-paul.calonder@davos.gr.ch">gian-paul.calonder@davos.gr.ch</a>	Period: 2009–2012

Abstract: Für die Wärmeversorgung der Erweiterung des Kongresszentrums Davos soll das geothermische Potenzial abgeklärt und bei positiven Ergebnissen genutzt werden, mit dem Ziel, den CO<sub>2</sub>-Austoss der erwähnten Objekte massiv zu reduzieren. Weil die Nutzung der Erdwärme über ein Erdsondenfeld nicht realisiert werden kann, muss sich die Nutzung auf tiefere Schichten konzentrieren.
- MANUEL "GEOCOOLING"** 3.5

Lead: SUPSI, Isaac	Funding: BFE
Contact: Pahud Daniel <a href="mailto:daniel.pahud@supsi.ch">daniel.pahud@supsi.ch</a>	Period: 2005–2011

Abstract: Le projet de recherche "rafraichissement par geocooling : bases pour un manuel de dimensionnement" a mis en évidence le manque des connaissances actuelles relatives à l'intégration de ce genre de système dans un bâtiment et de son interaction avec ce dernier, et par voie de conséquence sur le potentiel d'utilisation de ce type de système. L'objectif principal du présent projet est de combler ces lacunes et de rédiger un manuel sur la thématique.

● **MODELLING STIMULATION OF GEOTHERMAL WELLS** 3.5

Lead:	CREGE Centre de recherche en géothermie, Neuchâtel	Funding:	BFE
Contact:	Vuataz François-D. francois.vuataz@unine.ch	Period:	2008–2011

Abstract: The main objective of the work is to use coupled thermal-hydraulic-chemical numerical models patterned after the geothermal system at Berlin (El Salvador), to explore chemical and hydrological implications of reinjecting the used fluid into the reservoir as well as mineral scaling and the rate at which it occurs and its dissolution by acid mixtures injection.

● **NACHMESSUNGEN UND AUFWÄLTIGUNG GEOTHERMIEBOHRUNG BASEL 1 (PROJEKT DEEP HEAT MINING)** 3.5

Lead:	Geopower Basel AG	Funding:	BFE
Contact:	Ladner Florentin florentin.ladner@geothermal.ch	Period:	2008–2011

Abstract: Im Rahmen des DHM-Projektes wurde 2006 die Bohrung Basel 1 auf 5'000m Tiefe abgeteuft. Im Anschluss daran wurde der offene Bohrlochbereich hydraulisch stimuliert, was zu mehreren an der Oberfläche spürbaren Erschütterungen führte. Der Stimulationsprozess wurde daraufhin abgebrochen und das Projekt wurde suspendiert und auf Grund einer Risikoanalyse Ende 2009 definitiv abgebrochen.

● **OPTIMIERUNG VON ERDWÄRMESONDEN** 3.5

Lead:	Zürcher Hochschule für angew. Wissenschaften, Wädenswil	Funding:	BFE
Contact:	Hubbuch Markus hubb@zhaw.ch	Period:	2009–2014

Abstract: Der Stromverbrauch einer Erdwärmesonden-Wärmepumpen-Anlage wird wesentlich von der Jahresarbeitszahl (JAZ) bestimmt. Mit der Optimierung der Sondenbauweise soll eine deutliche Erhöhung der JAZ von Wärmepumpen mit Erdwärmesonden erreicht werden. Für die sichere Planung optimierter Anlagen werden die nötigen Grundlagen erarbeitet und im Internet verfügbar gemacht ([www.erdsondenoptimierung.ch](http://www.erdsondenoptimierung.ch)).

● **PILOTANLAGE ZUR ENTWICKLUNG VON TIEFENBOHR-VERFAHREN MITTELS HYDROTHERMALER FLAMME** 3.5

Lead:	Institut für Verfahrenstechnik IPE, ETH Zürich	Funding:	BFE
Contact:	Rudolf von Rohr Philipp vonrohr@ipe.mavt.ethz.ch	Period:	2009–2012

Abstract: Die Kosten von Bohrungen haben einen entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung der tiefen Geothermie. Die Entwicklung von kostengünstigen Alternativen zu den konventionellen mechanischen Bohrverfahren ist deshalb von grossem Interesse. Bohr-Verfahren mit hydro-thermaler Flamme, englisch als thermal spallation drilling bezeichnet, ist eine der aussichtsreichsten Möglichkeiten, in Zukunft kostengünstige Tiefbohrungen zu erstellen.

● **TIEFE GEOTHERMIE WINTERTHUR** 3.5

Lead:	Stadtwerk Winterthur	Funding:	BFE
Contact:	Schüpbach Beat Beat.Schuepbach@win.ch	Period:	2009–2010

Abstract: Mit der Machbarkeitsstudie "Tiefe Geothermie Winterthur" soll abgeklärt werden ob die Nutzung von tiefer Geothermie zur Gewinnung von Strom und Wärme in Winterthur erfolgsversprechend ist und was erforderlich ist, um die Erfolgchancen für die Erschliessung von tief liegenden geothermischen Ressourcen zu maximieren und wo aus Sicht der geologischen Verhältnisse, der Energieabnehmer sowie der Machbarkeit von Tiefenbohrungen geeignete Standorte wären.

● **UTILISATION DE GÉOTHERMIE PROFONDE POUR LE CHAUFFAGE DE GRANDS BÂTIMENTS AVEC DES POMPES À CHALEUR À TRÈS HAUTE PERFORMANCE** 3.5

Lead:	Planair SA, La Sagne	Funding:	BFE
Contact:	Rognon Fabrice fabrice.rognon@planair.ch	Period:	2009–2012

Abstract: Le but visé consiste à définir et caractériser les techniques pour utiliser les ressources géothermiques dans la tranche de profondeur de 300 à 800 mètres pour des bâtiments de puissance thermique à partir de 100kW environ. Actuellement, pour ces bâtiments, la source de chaleur est généralement un champ de sondes géothermiques verticales classiques ce qui pose plusieurs problèmes.

● **ERSTELLUNG EINER GEOTECHNISCHEN VORGEHENSWEISE / WEGLEITUNG FÜR EWS-BOHRUNGEN IN GEBIETEN MIT POTENZIELL GIPS- UND ANHYDRITHALTIGEN GESTEINEN** 3.5

Lead:	Eberhard & Partner	Funding:	BFE
Contact:	Oliver Sachs sachs@eberhard-partner.ch	Period:	2012

Abstract: In der Stadt Staufen i. Br. (Deutschland) führten EWS-Bohrungen zu Hebungsschäden an einer Vielzahl von Gebäuden in der Altstadt. Die Ereignisse führten zu einer erheblichen Verunsicherung sowie einer signifikanten Kritik an der untiefen Geothermie im In- und Ausland. Für die Hebungen wurden aufquellende anhydrithaltige Gesteinsschichten des Gipskeupers verantwortlich gemacht. In verschiedenen Regionen der Schweiz liegen vergleichbare lithologische und geologische Verhältnisse vor.

● **SPALLATION BOHREN: WECHSELWIRKUNG GESTEIN-FLAMME**

3.5

Lead: ETHZ

Funding: BFE

Contact: Rudolf von Rohr Philipp vonrohr@ipe.mavt.ethz.ch

Period: 2011–2014

Abstract: Das Verhalten einer Flamme beim Auftreffen auf unterschiedliches kristallines Gestein soll untersucht werden im Hinblick auf die Verwendung als Bohrsystem insbesondere für geothermische Anwendungen. Die Besonderheit besteht darin, dass die Flamme bei Drücken oberhalb 221 bar brennt. In teilweise bestehenden Anlagensystemen werden dabei folgende Parameter speziell untersucht: Temperatur, Wärmemenge und Einfluss auf Partikelgrösse.

● **GEOHERMIE-BOHRUNG SCHLATTINGEN**

3.5

Lead: Grob Gemüse- und Landbau

Funding: BFE

Contact: Hansjörg Grob info@grob-gemuese.ch

Period: 2011

Abstract: Die Bohrung Schlattigen konnte durch das Rotliegende bis ins Kristallin abgeteuft werden, dadurch ergibt sich die Möglichkeit hydraulische und felsmechanische Parameter aus zwei potentiellen Aquiferen, die sich im tieferen Untergrund der Schweiz für eine geothermische Nutzung eignen, zu erheben. Diese Daten ergänzen in idealer Weise den bestehenden Datensatz des tieferen Untergrundes im Kanton Thurgau.



Robert Horbaty

# Windenergie



**Titelbild:****Ermittlung von Turbulenzen in einem Windpark**

Ein neuartiger Ansatz wurde an der ETH Zürich entwickelt: Mittels eines UAV (Unmanned Aerial Vehicle) werden die Windgeschwindigkeit und Windturbulenzen in Windparks ermittelt.

**BFE Forschungsprogramm Windenergie**

Überblicksbericht 2011

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
CH-3003 Bern

**Programmleiter BFE (Autor):**

Robert Horbaty, ENCO Energie-Consulting AG (robert.horbaty@enco-ag.ch)

**Bereichsleiter BFE:**

Dr. Katja Maus (katja.maus@bfe.admin.ch)

<http://www.bfe.admin.ch/forschungwindenergie>

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

## Einleitung

Der weltweite Markt für Windkraftanlagen ist 2011 um 42 GW gewachsen, gegenüber 38 GW im Jahre 2010. Aufgrund von Auswertungen der WWEA (World Wind Energy Association) liegt die installierte Leistung heute bei 239 GW, genug um 3 % des weltweiten Elektrizitätsbedarfs zu decken [1]. Mit zusätzlichen 18 GW hat erneut China am meisten zugebaut, gefolgt von den USA und Indien.

Auch in der Schweiz hat der starke Zubau von Anlagen im vergangenen Jahr zu einer markanten Steigerung der Windstromproduktion geführt. Real wurden im Kalenderjahr 70 Mio. kWh grüner Strom produziert. Trotz mässigen Windverhältnissen hat sich damit die Produktion gegenüber dem Vorjahr verdoppelt. Mit 30 grossen Windturbinen ist die Anzahl der Anlagen in der Schweiz noch gering. Gleichwohl überschritt die Windstromproduktion in zwei Standortkantonen erstmals die Prozentmarke. Im Kanton Uri wurden rund 1 % und im Jura fast 4 % des kantonalen Stromverbrauchs mit Windstrom gedeckt [2].

Limitierende Faktoren für den weiteren Ausbau der Windenergie in der Schweiz sind:

- Diskussionen um Standortbewilligungen, um die generelle Akzeptanz von Windenergieprojekten und um Umweltauswirkungen von Anlagen;

- turbulente Windverhältnisse aufgrund komplexen Geländes, was einen hohen Aufwand bei Standortabklärungen erfordert, insbesondere auch an höheren Lagen im Gebirge;
- harsche klimatische Verhältnisse können Vereisung von Rotorblättern verursachen, was zu einem reduzierten Energieertrag führt.

Das Forschungsprogramm Windenergie des Bundesamtes für Energie konzentriert deshalb die limitierten Mittel auf diese Bereiche, weil hier auch im internationalen Vergleich substanzielles Know-how erarbeitet werden kann. Entsprechende Projekte werden durch Forschungsinstitutionen (z. B. ETHZ, EPFL oder ZHAW), von anderen Institutionen (z. B. MeteoSchweiz oder Vogelwarte Sempach) oder von privaten Unternehmen (z. B. New Energy Scout) mit hoher fachlicher Kompetenz bearbeitet.

Eine Studie der Fa. McKinsey [3] geht davon aus, dass bis 2020 der Windenergiemarkt weltweit 250 Mrd. CHF betragen wird. Vor dem Hintergrund einer vertieften Cleantech-Strategie scheint es deshalb notwendig, dass die Schweizer Wirtschaft auch an diesem Wachstumsmarkt partizipiert, sei es als Projektentwickler, als Planungsexperten oder als Komponentenhersteller. Forschungsaktivitäten und der Bau von Pilot- und Demonstrationsanlagen zur Unterstützung dieser Aktivitäten sind unerlässlich.

IEA Klassifikation: 3.2 Wind Energy

Schweizer Klassifikation: 2.6 Windenergie

## Programmschwerpunkte

Basierend auf dem Konzept des Energieforschungsprogramms Windenergie aus dem Jahre 2008 [4] stellen sich die Forschungsschwerpunkte wie folgt dar:

- Entwickeln von Anlagekomponenten für die Nutzung von Windenergie unter spezifisch schweizerischen Verhältnissen durch die einheimische Industrie, wie z. B. Reduktion der Lasten mit neuen Werkstoffen, Erhöhung des Energieertrags bei tiefen Windgeschwindigkeiten und Einsatz der Nanotechnologie gegen Verschmutzung und Vereisung;
- Erhöhung der Verfügbarkeit und des Energieertrages von Windkraftanlagen (WKA) an extremen Standorten durch Erarbeiten von Planungs-Know-how für komplexe Terrains, Tests an extremen Standorten durch Auswertung von Betriebserfahrungen und durch Erarbeiten von Empfehlungen;
- Erhöhung des «Wertes» der Windenergie, Optimierung der Integration von Windkraftanlagen in die Stromversorgung durch Fore- und Nowcasting der Energieproduktion aus Wind, durch Netzregulierung mit hohem Anteil an Windenergie und durch Optimierung der Bedingungen für intermittierende Produktionsanlagen im Netz;
- Erhöhung der Akzeptanz für Windenergie unter Einbezug sozial- und umweltwissenschaftlicher Kompetenz, z. B. mit Ermitteln von Erfolgsfaktoren und -strategien;
- ergänzend wird mit Pilot- und Demonstrationsprojekten die Lücke zwischen den eigentlichen Forschungsaktivitäten und der Anwendung in der Praxis geschlossen.

### Rückblick und Bewertung 2011 / Ausblick

Anlässlich eines breit angelegten Workshops am 12.9.2011 des Forschungsprogramms Windenergie zusammen mit der Schweizer Windenergievereinigung Suisse Eole, an welcher rund 40 Personen teilnahmen, wurde der Branche in der Schweiz die Möglichkeit geboten, ihre Anliegen und Forschungsbedürfnisse direkt zu formulieren [5]. Grundsätzlich sollen obige Schwerpunkte weiter verfolgt werden, spezifisch wurde u. a. erwähnt:

- Erhöhung der Genauigkeit der Windkarte Schweiz v. a. in komplexem Gelände. Eventuell auch gezielt für Gebiete mit aktuellen Messungen und besonderer Relevanz (z. B. Waadt);
- Erarbeitung einer standardisierten Genauigkeits-/Unsicherheitsbewertung von Windgutachten, inkl. Verbesserung der Langzeitkorrelation und Bereitstellung von Langzeitdaten;
- Bilden eines Expertenpools mit dem Ausland, insbesondere zu den Themen soziale Akzeptanz und Fledermaus- und Vogelschutz. Teilweise ist das Ausland schon sehr viel weiter als die Schweiz;
- Teststandorte (in den Alpen und im Jura) mit hohen Messmasten für Systemvergleiche (z. B. Lidar/Sodar, Evaluation Modellierungssoftware in komplexem Gelände, Evaluation Anti-Icing-Massnahmen, Tests mit neuen Technologien im Triebstrang).

Diese Vorschläge wurden teilweise bereits im Rahmen von neuen Projekten konkretisiert, werden aber sicher Eingang finden in das sich zurzeit in Erarbeitung befindende Energieforschungskonzept des Bundes 2013–2016 und in das Detailkonzept des Energieforschungsprogramm «Windenergie».

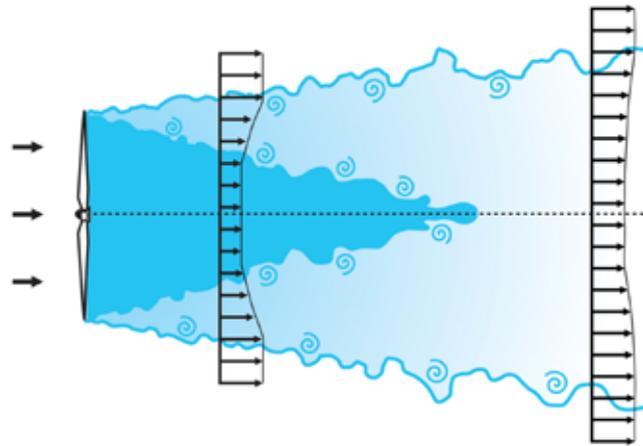
Mit den Forschungsaktivitäten in den Bereichen «Betrieb von Windkraftanlagen unter turbulenten und vereisenden Bedingungen» und «Sozialer Akzeptanz von Windkraftanlagen» hat sich die Schweiz internationales Renommee erarbeitet und ist u. a. über die IEA (Internationale Energie-Agentur) gut vernetzt. Das ausgewiesene Interesse der internationalen Windenergieszene an den Schweizer Resultaten unterstreicht die Qualität der durchgeführten Forschungsvorhaben.

## Highlights aus Forschung und Entwicklung

### Development of wind turbines for safe operation in alpine environments

Die Ziele dieses Projektes waren die Verluste der Leistung von Windkraftanlagen aufgrund von Turbulenzen zu quantifizieren, die Strömungsphänomene, welche für diese Verluste verantwortlich sind, zu verstehen, und Massnahmen vorzuschlagen, welche diese Verluste reduzieren könnten. Dank Experimenten mit einer neuen «Sub-scale model wind turbine test facility» an der ETHZ konnten diese Ziele im Wesentlichen erreicht werden.

Um Strategien zur Reduzierung der Verluste aufgrund von Windschatteneffekten aufzuzeigen, wurde ein neues Strömungsmodell für die Vorhersage der Geschwindigkeitsprofile in Windkraftanlagen auf der Basis der «free shear flow theory» entwickelt. Das Modell ergibt einen mittleren Fehler von nur 3,6 % in der vorhergesagten Leistung der Windkraftanlage, im Vergleich zu 7–12 % Fehler für die häufiger verwendeten Strömungsmodelle. Dieses Strömungsmodell kann auch in die heute verwendete Software zur Standortevaluierung von Windkraftanlagen integriert werden und dient zu genaueren Vorhersagen des möglichen Energieertrages.



Figur 2: Schematische Darstellung des Mischprozesses in der Strömung hinter dem Rotor, (der hellblaue Bereich zeigt den ungestörten Bereich der Strömung).

Die Experimente zeigten auch, dass durch die Erhöhung der Turbulenzintensität von 0 auf 2,5 %, die durch Windschatteneffekte beeinflusste Zone von 8 auf 4 Rotordurchmessern reduziert wird. Aus Sicht der Optimierung der Energieproduktion in Windparks auf einem vorgegebenen Gelände können die Windkraftanlagen dichter installiert werden, als die heutige Norm aussagt.

Allerdings sind weitere Studien erforderlich, um die Auswirkungen des engeren Abstands auf die Lebensdauer der Windkraftanlagen zu ermitteln.

Diese vertieften Abklärungen werden im neuen Projekt der ETH «Siting of wind Turbines in Complex Terrain – Effects of Inclined Freestream Flow and Elevated Freestream Turbulence» weiter verfolgt.

### Verifizierung der theoretischen Leistungskurve einer neuen Windturbine

Die Firma AIGILE-Windpower hat ein neues Horizontalachs-Windturbinenkonzept entwickelt. Ziel des Projektes war es, die effektive Leistung und den



Figur 1: 2011 wurde die höchst gelegene Windkraftanlage (2'465 m.ü.M.) beim Griessee am Nufenenpass durch die Fa. Swiss Winds errichtet (Quelle: Swiss Winds / Scheuerle).



Figur 3: Versuchsaufbau zur Ausmessung des neuartigen Windturbinenkonzeptes auf dem Militärflugplatz Dübendorf (Quelle: AGILE Windpower AG).

Wirkungsgrad an einem voll funktionsfähigen Prototypen zu analysieren. Der Versuchsaufbau bestand aus einer Zelle der A4-Prototypenturbine. Diese Zelle wurde auf einem Lastwagenausleger montiert. Um die Turbine verschiedenen Windverhältnissen auszusetzen, fuhr der Lastwagen mit montiertem Versuchsaufbau in gleichbleibender Geschwindigkeit die Versuchsstrecke auf dem Militärflugplatz Dübendorf ab. Dabei wurden die elektrischen Leistungsabgabe in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit (Leistungskenn-

linie) und das Verhältniss zwischen Wirkungsgrad und Leistungsbeiwert gemessen.

Die ersten Erkenntnisse aus den Versuchen sind positiv. Daraus geht hervor, dass sich die AGILE-Turbine in der Charakteristik so verhält, wie die Modelle, die ursprünglich im Windkanal getestet wurden. Dies bestätigt, dass die Funktionsweise des neuen Antriebsprinzips in grösseren Anlagen skaliert werden kann, dies bei deutlich reduziertem Projektrisiko. In den Tests wurden auch

die erwarteten hohen Leistungen gemessen. Eine genaue Leistungskennlinie kann aber erst mit einem neuen Forschungsmodell, welches im Windkanal unter stabilen Bedingungen ausgemessen wird, ermittelt werden.

### SwissKitePower – Novel Wind Energy Extraction Technology

Um die Machbarkeit des Konzepts unter Beweis zu stellen, wird von der Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW zunächst ein «Kite Power Technology-Demonstrator» getestet, entworfen und gebaut. Die Entwicklung eines für die Stromerzeugung optimierten Drachens mit einem neuartigen Design wird an der EMPA verfolgt. An der ETH Zürich wird die Automatisierung des Systems entwickelt, mit der Vision einer völlig autonomen Stromerzeugung auf der Basis von «Kite-Power». Sowohl der Drache als auch die Steuerung werden auf dem Demonstrator bezüglich ihrer Leistung und ihrer Zuverlässigkeit geprüft.

Gleichzeitig wird eine detaillierte Analyse der Grundlagen dieser neuen Technologie durchgeführt. Es soll eine Vision entwickelt werden, wie ein Kite-Kraftwerk aussehen könnte, wobei der Schwerpunkt auf Themen wie Prinzip der Stromerzeugung, Skalierbarkeit, Betriebshöhe, Sicherheit, geeignete



Figur 4: Versuchsaufbau des «Kite Power Technology-Demonstrator» an der Fachhochschule Nordwestschweiz (Quelle: FHNW).

Standorte und Energiekosten liegen wird. Aufbauend auf den Ergebnissen dieses Projekts soll ein grösseres Kite-Kraftwerk entwickelt, gebaut und an einem geeigneten Standort ans Netz angeschlossen werden.

### Teststandorte für Windkraftanlagen und Windmessungen im komplexen Gelände der Schweiz

Anlässlich der Forschungskonferenz des Programms Windenergie vom 12.9.2011 wurde durch die anwesenden Experten die Notwendigkeit eines Teststandorts in der Schweiz unterstrichen. Im Rahmen eines Vorprojektes wurden nachfolgende Forschungsaspekte ermittelt:

- Einfluss komplexer Topografie auf die Anströmung von Windkraftanlagen, vor allem auf Grund der Ausprägung von Schräganströmung, Windscherung, Turbulenz und Böigkeit. Neben konventionellen Methoden wurde auch der Einsatz von gondelbasierten LiDAR-Messsystemen untersucht. Entsprechende Gerätevarianten wurden hinsichtlich deren Eignung im komplexen Gelände verglichen und Testvorhaben skizziert.
- Einfluss klimatischer Bedingungen, insbesondere Vereisung. Dies ist bereits Gegenstand der Forschung in der Schweiz (Gütsch und St. Brais) und könnte weiter vertieft werden. Ferner stellt die reduzierte Luftdichte einen interessanten Untersuchungsaspekt dar.
- Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Antransport und der Geländekomplexität im Hinblick auf potenzielle Teststandorte, sowie Stand der Technik und Abschätzung künftiger Entwicklungen.

Es wurden Anforderungen an einen zentralen Teststandort definiert, und Vorschläge für Kriterien abgeleitet. Darauf basierend wurde eine Methodik entwickelt, mit der potenzielle Teststandorte identifiziert werden können. Die Methodik wurde mit einem exemplarischen Fallbeispiel ver-



Figur 5: Transportkombinationen zur Erschliessung von schwierig zugänglichen Standorten im Gebirge mit kippbaren Flügeladaptern (Quelle: New Energy Scout).

deutlicht. Bestehende Standorte in der Schweiz wurden grob auf deren Eignung als Teststandort untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Standorte Gütsch und Griessee zwar die interessantesten Testbedingungen aufweisen, die Antransportverhältnisse jedoch als sehr schwierig einzustufen sind. Die Jura-Standorte eignen sich als dezentrale Teststandorte besonders für die Untersuchung von Vereisung (bereits durchgeführt). Ein Teststandort für Windkraftanlagen könnte grossen Nutzen für die Forschung, für die betroffene Region, für Hersteller, sowie für Projektentwickler und für Betreiber bringen. Eine Vielzahl von Forschungsvorhaben von Universitäten, ETH und

Fachhochschulen werden dadurch möglich und erlauben der Schweiz, sich in einer immerinteressanter werdenden Nische im Windkraftgeschäft einen Vorsprung zu erarbeiten.

Neben dem Teststandort für Windkraftanlagen wurden ebenfalls die Rahmenbedingungen und der Nutzen von Teststandorten für Windmessungen untersucht. Im Austausch mit verschiedenen Forschungseinrichtungen und Geräteherstellern zeigte sich, dass ein solcher Teststandort für die Verbesserung und Weiterentwicklung von konventioneller Messtechnik, sowie von optischen Messsystemen sehr interessant wäre.

## Pilot- und Demonstrationsprojekte

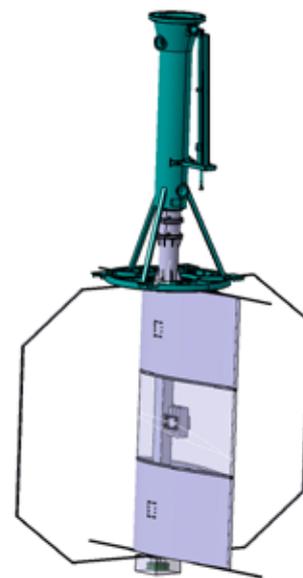
### Windkanalversuchsaufbau für Profilmessungen an Windkraftanlagen

Um das Bedürfnis der Industrie an gesicherten aerodynamischen Profildaten für grosse Windkraftanlagen zu befriedigen, wurde für den Windkanal der RUAG Aviation in Emmen ein Versuchsaufbau konzipiert und in Betrieb genommen, der die spezifischen Anforderungen von Horizontalachsen-Windkraftanlagen optimal berücksichtigt. Auch die Leistungsverminderung der Profile, die durch Verunreinigung, Eis oder Regen verursacht werden, können quantifiziert werden.

Für die aerodynamische Optimierung von Rotorblättern von Horizontalachsen-Windturbinen sind gesicherte Kenntnisse der Profileigenschaften von grosser Bedeutung. Im Gegensatz zu den Anwendungen im Luftfahrtbereich, wo normalerweise von einer stetigen Anströmung ausgegangen werden kann, variiert bei Windturbinen sowohl der lokale Anstellwinkel, als auch die Geschwindigkeit periodisch als Funktion der Drehung des Rotors. Es ist bekannt, dass solche dynamischen

Effekte die aerodynamischen Charakteristiken des Profils sehr stark beeinflussen, im Besonderen auch bei den sehr hohen Anstellwinkeln, wie sie bei Windkraftanlagen auftreten (Stichwort «dynamic stall»). Auch numerische Verfahren sind heute und auch in näherer Zukunft nicht in der Lage zuverlässige Daten zu diesen dynamischen Vorgängen zu liefern, oder brauchen zumindest experimentelle Daten zur Validierung.

Der Windkanal in Emmen hat eine geeignete Messstrecke und bietet wegen seines Aufbaus eine relativ einfache Möglichkeit, grosse Profile von Windkraftanlagen einzuspannen. Die RUAG Aviation hat für ihren Windkanal einen neuen Versuchsaufbau entwickelt und implementiert, der Profilmessungen bei hohen Reynoldszahlen und auch unter Berücksichtigung dynamischer Effekte ermöglicht. Neben dem Nutzen für die Entwicklung von neuen Blattprofilen und -geometrien kann auch die Beeinträchtigung der Leistung durch Störfaktoren ermittelt werden. So kann zum Beispiel der Einfluss von Profilveränderungen, verursacht durch



Figur 6: Darstellung des Konzepts für Windkanalversuche im Large Subsonic Wind Tunnel Emmen. Das Windblattprofil kann über die gesamte Kanalhöhe von 5 m eingebaut werden.

Regen, Eis oder Verschmutzung durch Insekten auf die Leistungsfähigkeit des Profils gemessen werden.

## Nationale Zusammenarbeit

An regelmässigen Treffen des Programmleiters mit dem CORE-Paten [6] des Forschungsprogramms, der BFE-Forschungsbereichsleiterin, dem BFE-Verantwortlichen für Marktentwicklung, sowie dem Geschäftsführer der Schweizerischen Windenergievereinigung «Suisse Eole» wird die Entwicklung des Programms mit den Zielen der CORE und den Anliegen von EnergieSchweiz abgestimmt. Im Rahmen eines Firmenbeirates von Suisse Eole können sich die Mitglieder des Verbandes auch zu Fragen der Forschung äussern. Zusätzlich wurde am 12.9.2011 eine Konferenz zu neuen Inhalten der Windenergieforschung durchgeführt [5].

Die Kooperationen mit anderen BFE Forschungsprogrammen wurden im Berichtsjahr weiter geführt. Kontakte zu den Forschungsprogrammen «Elektrizitätstechnologien und -anwendungen» und «Energie-Wirtschaft-Gesellschaft» stehen im Vordergrund.

Die EPFL (Laboratoire de Systèmes Energétiques, Lasen) [7] betreut Windenergie-Projekte, insbesondere auch im Zusammenhang mit der Entwicklungszusammenarbeit.

Das Labor für Strömungsmaschinen an der ETHZ [8] ermittelt die Einflüsse von Vereisung, Böen und Turbulen-

zen auf die Performance von Windturbinen im komplexen Gelände.

An der Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften (ZHAW) arbeitet eine an der Entwicklung von Nano-Oberflächen zur Verhinderung von Vereisung der Rotorblätter [9].

Sowohl an der Haute Ecole Arc Ingénierie in Neuchâtel [10] als auch an der Fachhochschule Nordwestschweiz in Windisch [11] arbeiten Fachleute an Projekten zur Stromerzeugung mit Flugdrachen «Swiss Kite-Power».

Der Dreh- und Angelpunkt für die Förderung der Windenergie in der Schweiz ist Suisse Eole [12].

Experten vom Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz [13] und vom WSL – Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF [14] haben substantiell am Projekte «Vereisungskarte» mitgearbeitet.

Sämtliche Planungsinstrumente, insbesondere ein Map-Server mit allen relevanten Aussagen zu möglichen Windenergiestandorten sind auf der Website von Suisse Eole vorhanden [15].

## Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit findet im Rahmen des IEA Implementing Agreement Wind statt [16]:

### *Task 11: Base Technology Information Exchange*

Eine Teilnahme steht allen Interessenten aus der Schweiz offen ([http://www.ieawind.org/task\\_11/task\\_11\\_homepage.html](http://www.ieawind.org/task_11/task_11_homepage.html)).

### *Task 19: Wind Energy in Cold Climates*

Seit 2002 beteiligt sich die Schweiz am IEA-Projekt Wind Energy in Cold Climates (WECO). Der Schweizer Vertreter ist Meteotest (<http://arcticwind.vtt.fi/>).

### *Task 26: Cost of Wind Energy*

Da dies einen zentralen Zusammenhang mit der Kostendeckende Einspeisevergütung hat, nimmt der Ver-

antwortliche beim BFE für Marktentwicklung daran teil ([http://www.ieawind.org/task\\_26.html](http://www.ieawind.org/task_26.html)).

### *Task 28: Social Acceptance of Wind Energy Projects*

Im Jahre 2007 wurden Aktivitäten aus dem Forschungsprogramm Windenergie lanciert, um innerhalb der IEA einen neuen Task Social Acceptance zu starten. Es partizipieren Kanada, Dänemark, Deutschland, Finnland, Irland, Japan, Holland, Norwegen, die Schweiz und die USA. Operating Agent ist Robert Horbaty, Programmleiter des Forschungsprogramms Windenergie aus der Schweiz ([www.socialacceptance.ch/](http://www.socialacceptance.ch/); [www.ieawind.org/Summary\\_Page\\_28.html](http://www.ieawind.org/Summary_Page_28.html)). Basierend auf dem Schlussbericht des Tasks wurde innerhalb der IEA der Beschluss gefasst, dieses Vorhaben weiter zu führen.

## Referenzen

[1] World Wind Energy Association, [www.wwindea.org](http://www.wwindea.org).

[2] Schweizerische Vereinigung für Windenergie, [www.suisse-eole.ch/de/infothek/medienmitteilungen.html](http://www.suisse-eole.ch/de/infothek/medienmitteilungen.html).

[3] McKinsey & Company, Zürich, 2010, Marco Ziegler, Reto Bättig, [www.mckinsey.com/locations/swiss/news\\_publications/pdf/Wettbewerbsfaktor\\_Energie.pdf](http://www.mckinsey.com/locations/swiss/news_publications/pdf/Wettbewerbsfaktor_Energie.pdf).

[4] Konzept des Energieforschungsprogramms Windenergie für die Jahre 2008 – 2011, [www.bfe.admin.ch/forschung-windenergie/index.html?lang=de&dossier\\_id=01157](http://www.bfe.admin.ch/forschung-windenergie/index.html?lang=de&dossier_id=01157).

[5] Workshop Forschungsprogramm Windenergie vom 12.9.2011, [www.bfe.admin.ch/forschungwindenergie/index.html?lang=de&dossier\\_id=05111](http://www.bfe.admin.ch/forschungwindenergie/index.html?lang=de&dossier_id=05111).

[6] Commission fédérale pour la recherche énergétique.

[7] EPFL Lausanne, Laboratoire de systèmes énergétiques  
Lesen: <http://lasen.epfl.ch/page39406.html>.

[8] Prof. R. Abhari, Dr. N. Chokani, Laboratory for Energy Conversion an der ETH Zürich, [www.lec.ethz.ch](http://www.lec.ethz.ch).

[9] Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften,

Winterthur, Martina Hirayama ([martina.hirayama@zhwin.ch](mailto:martina.hirayama@zhwin.ch)), [www.zhaw.ch](http://www.zhaw.ch).

[10] Haute Ecole Arc Ingénierie in Neuchâtel, [www.kitves.com/consortium/Consortium\\_PublicView.aspx?department=7](http://www.kitves.com/consortium/Consortium_PublicView.aspx?department=7).

[11] Fachhochschule Nordwestschweiz in Windisch, <http://web.fhnw.ch/technik/projekte/eit/Herbst2010/BernWass/>.

[12] Schweizerische Vereinigung für Windenergie, Suisse Eole: [www.suisse-eole.ch](http://www.suisse-eole.ch).

[13] Phillipe Steiner, Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, Krähbühlstrasse 58, CH-8044 Zürich, [www.meteoschweiz.ch](http://www.meteoschweiz.ch).

[14] Thomas Grünewald, Walter Steinkogler, Michael Lehning, WSL - Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Flüelastrasse 11, CH-7260 Davos Dorf, [www.slf.ch](http://www.slf.ch).

[15] [www.wind-data.ch/windkarte/](http://www.wind-data.ch/windkarte/).

[16] Patricia Weis-Taylor, ([pwt\\_communications@comcast.net](mailto:pwt_communications@comcast.net)), [www.ieawind.org](http://www.ieawind.org) NREL IEA-Implementing Agreement on Wind Energy Research and Development, [www.ieawind.org/](http://www.ieawind.org/).

## Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(\* IEA-Klassifikation)

- AUSWERTUNG CODE OF CONDUCT** R&D 3.2\*

Lead: Nateco	Funding: BFE
Contact: Buser Hans <a href="mailto:nateco@nateco.ch">nateco@nateco.ch</a>	Period: 2011
Abstract: Analyse des Projektablaufes und der Projektergebnisse von Code of Conduct".	
- PARTIZIPATION AN DER COST ACTION ES1002** R+D 3.2

Lead: METEOTEST	Funding: BFE
Contact: Cattin René <a href="mailto:rene.cattin@meteotest.ch">rene.cattin@meteotest.ch</a>	Period: 2011
Abstract: Short-Term High Resolution: Wind and Solar Energy Production Forecasts.	
- SITING OF WIND TURBINES IN COMPLEX TERRAIN - EFFECTS OF INCLINED FREESTREAM FLOW AND ELEVATED FREESTREAM TURBULENCE** R+D 3.2

Lead: ETH Zürich	Funding: BFE
Contact: Chokani Ndaona <a href="mailto:chokani@lec.mavt.ethz.ch">chokani@lec.mavt.ethz.ch</a>	Period: 2011–2013
Abstract: The specific objectives of this project are to quantify the effects of inclined freestream flow and elevated freestream turbulence levels on the performance of wind turbines to quantify the uncertainty in the predicted performance of a wind turbine that is sited in complex terrain to provide guidelines for the siting of wind turbines in complex terrain, specifically in Switzerland.	
- SWISSKITEPOWER - NOVEL WIND ENERGY EXTRA** R+D 3.2

Lead: Fachhochschule Nordwestschweiz	Funding: BFE
Contact: Houle Corey <a href="mailto:corey.houle@fhnw.ch">corey.houle@fhnw.ch</a>	Period: 2011–2012
Abstract: The long term goal of the SwissKitePower project is to install and operate a Kite Power Plant within Switzerland. A fully functioning prototype will be developed as a technology demonstrator to prove the functionality of the technology and to provide experimental data for model validation.	
- TESTSTANDORTE FÜR WINDKRAFTANLAGEN UND WINDMESSUNGEN IM KOMPLEXEN GELÄNDE DER SCHWEIZ** R+D 3.2

Lead: New Energy Scout	Funding: BFE
Contact: Dietl Michael <a href="mailto:m.dietl@newenergyscout.com">m.dietl@newenergyscout.com</a>	Period: 2011
Abstract: Im Rahmen der Vorstudie sollen Voruntersuchungen zu folgenden Themen ausgeführt werden: a) Teststandorte für Windkraftanlagen im komplexen Gelände der Schweiz, b) Möglichkeiten zur experimentellen Untersuchung des Anströmbereichs von Windturbinen im komplexen Gelände mittels gondelbasiertem LiDAR, c) Voruntersuchungen zum Teststandort für Windmessungen im komplexen Gelände der Schweiz.	
- AIRFOIL-BASED SOLUTION FOR VESSEL ON-BOARD ENERGY PRODUCTION DESTINED TO TRACTION AND AUXILIARY SERVICES (KITVES)** R+D 3.2

Lead: Haute Ecole Arc Ingenierie	Funding: FP7
Contact: Zaquini Leonello <a href="mailto:leonello.zaquini@ha-arc.ch">leonello.zaquini@ha-arc.ch</a>	Period: 2008–2012
Abstract: KiteVes solution is based on the on-board realisation of a wind-powered generator, capable to harvest the altitude wind. The kites will be equipped with sensors. The data will be transmitted to a control unit (placed on the vessel) which pilot motors (also placed on the vessel).	
- HIGH POWER, HIGH RELIABILITY OFFSHORE WIND TECHNOLOGY (HIPRWIND)** R+D 3.2

Lead: ABB Schweiz	Funding: FP7
Contact: Aperldoorn Oscar <a href="mailto:oscar.aperdoorn@ch.abb.com">oscar.aperdoorn@ch.abb.com</a>	Period: 2010–2016
Abstract: The aim of the HIPRWIND project is to develop and test new solutions for very large offshore wind turbines at an industrial scale. The project addresses critical issues of offshore WT technology such as extreme reliability, remote maintenance and grid integration with particular emphasis on floating wind turbines, where weight and size limitations of onshore designs can be overcome.	

- **VEREISUNG WEA ST. BRAIS** R+D 3.2
- |          |   |          |           |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead:    | Meteotest                               | Funding: | BFE       |
| Contact: | Cattin René<br>rene.cattin@meteotest.ch | Period:  | 2009–2011 |
- Abstract: Im September 2009 wurden zwei Windenergieanlagen in St. Brais im Kanton Jura errichtet. Die Verfügbarkeit dieser WEA wurde innerhalb des Projekts genutzt um Erkenntnisse über das Betriebsverhalten unter vereisenden Bedingungen zu evaluieren. Der Produktionsverlust einer WEA ohne Blattheizung wurde mit ca. 10% der Jahresproduktion beziffert.
- **AUSWIRKUNGEN VON WKA AUF VOGELWELT** R+D 3.2
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | Vogelwarte Sempach                           | Funding: | BFE       |
| Contact: | Liechti Felix<br>felix.liechti@vogelwarte.ch | Period:  | 2009–2014 |
- Abstract: Vergleichende Studie, Auswirkung WKA auf Vogelwelt (Zugvögel und ansitzende Vögel), Jura, Gotthard, Schwyberg. Aufgrund der Literaturobachtung sind Konflikte in erster Linie dort zu erwarten, wo gefährdete Arten offener Landschaften betroffen sind oder wo sich Zugvögel aufgrund topographischer Bedingungen konzentrieren. Der Standortwahl ist deshalb höchstes Gewicht einzuräumen, um Konflikte mit der Vogelwelt möglichst zu vermeiden.
- **DEVELOPMENT OF WIND TURBINES FOR SAFE OPERATION IN ALPINE ENVIRONMENT** R+D 3.2
- |          |                                  |          |           |
|----------|----------------------------------|----------|-----------|
| Lead:    | ETH Zürich                       | Funding: | BFE       |
| Contact: | Abhari Reza S.<br>abhari@ethz.ch | Period:  | 2008–2011 |
- Abstract: Dieses Projekt fokussierte sich auf die Quantifizierung der Energieertragsverluste aufgrund von Abschattungseffekten in Windparks. Die Arbeit bestanden in Experimenten in der dynamischen Windkraftanlagen Test-Einrichtung an der ETHZ und in CFD-Studien. Einerseits um die Strömungsphänomene in Windparks besser zu verstehen, andererseits aber auch um Strategien und Massnahmen zu entwickeln, womit diese Verluste reduziert werden können.
- **ELEKTRISCHE ANSTELLWINKELSTEUERUNG VERTICAL ACHSEN WIND TURBINEN** R+D 3.2
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs NTB | Funding: | KTI       |
| Contact: | Piai Guido<br>guido.piai@ntb.ch                  | Period:  | 2010–2011 |
- Abstract: Bei den heutigen Vertikalachs-Windturbinen der Fa. Envergate GmbH erfolgt die Anstellwinkelsteuerung der Flügel auf mechanischer Basis, was dazu führt, dass diese träge auf die Windveränderung reagieren. Bei den zukünftigen Windkraftanlagen sollte dies auf elektronischer Basis funktioniert. Die Anstellwinkelsteuerung der Flügel erfolgt dadurch viel schneller und genauer, die Anlage kann dadurch mit höheren Windgeschwindigkeiten betrieben werden.
- **IEA TASK 26: "COST OF WIND ENERGY"** 3.2
- |          |   |          |           |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead:    | NREL - National Renewable Energy Laboratory       | Funding: | BFE       |
| Contact: | Geissmann Markus<br>markus.geissmann@bfe.admin.ch | Period:  | 2009–2011 |
- Abstract: Beitrag zur Teilnahme an den Aktivitäten des IEA Wind Tasks 26 durch Schweizer Experten: Cost of Wind energy
- **NICHTVEREISENDE BESCHICHTUNGEN FÜR ROTORBLÄTTER VON WINDENERGIEANLAGEN** R+D 3.2
- |          |  |          |           |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead:    | Zürcher Hochschule Winterthur                | Funding: | BFE       |
| Contact: | Hirayama Martina<br>martina.hirayama@zhaw.ch | Period:  | 2008–2011 |
- Abstract: Die Vereisung der Windenergieanlagen ist ein schwerwiegendes Problem bei der Energieerzeugung aus Wind. Als attraktive Lösung ist eine Beschichtung denkbar, welche die Vereisung gar nicht oder nur verzögert zulässt.
- **PARTIZIPATION AM IEA WIND TASK 19: "COLD CLIMATE"** 3.2
- |          |   |          |           |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead:    | Meteotest                               | Funding: | BFE       |
| Contact: | Cattin René<br>rene.cattin@meteotest.ch | Period:  | 2002–2011 |
- Abstract: Teilnahme an der Arbeitsgruppe / Erfahrungsaustausch zum Thema Windenergie im kalten Klima, Verteilung der Information in der Schweiz

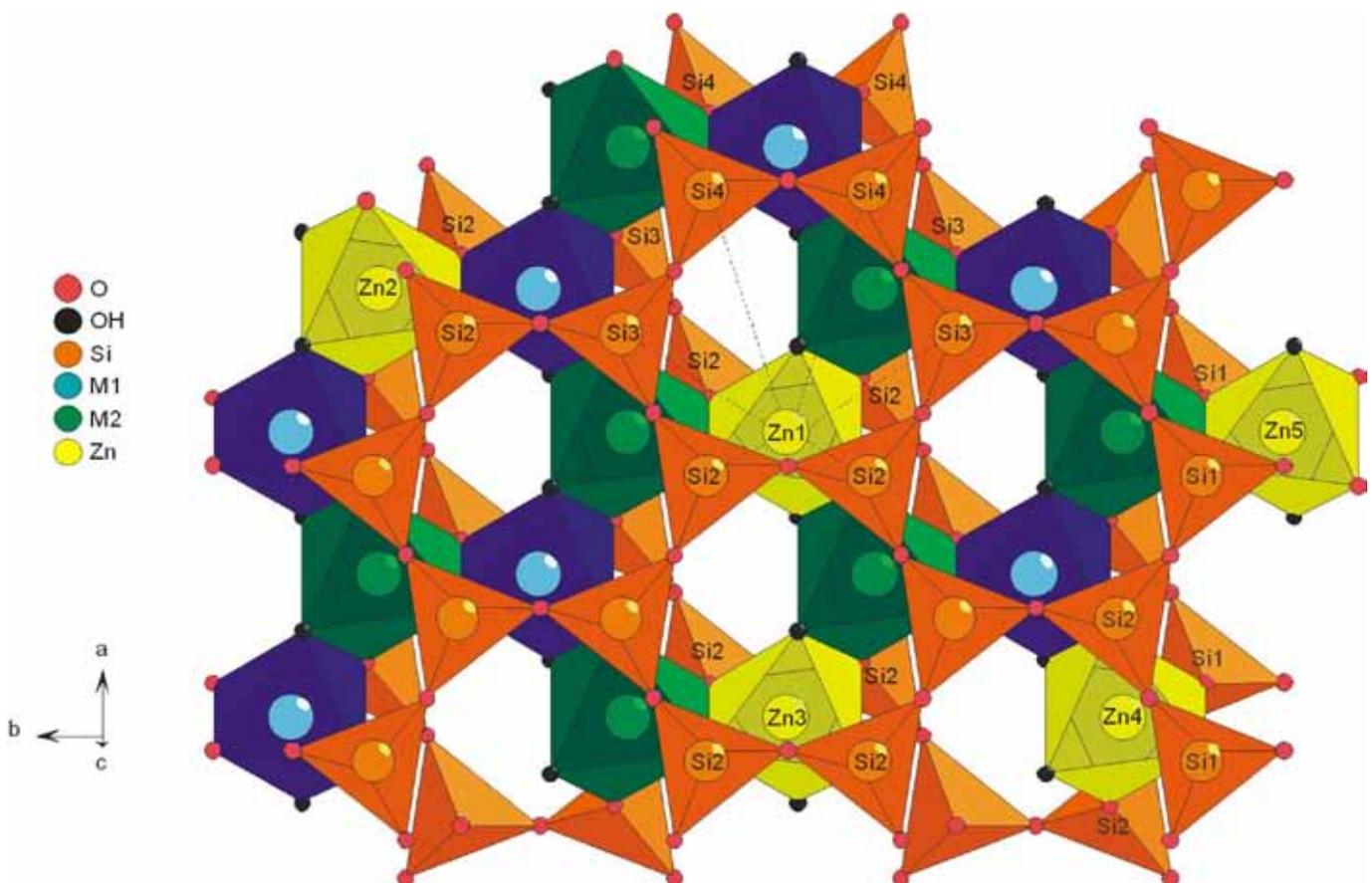
- **TEILNAHME AM IEA IMPLEMENTING AGREEMENT R&D WIND ENERGY TASK 28 "SOCIAL ACCEPTANCE"** 3.2
- |           |   |          |           |
|-----------|---|----------|-----------|
| Lead:     | ENCO AG   | Funding: | BFE       |
| Contact:  | Maus Katja robert.horbaty@enco-ag.ch  | Period:  | 2002–2011 |
| Abstract: | Beitrag zur Teilnahme an den Aktivitäten des IEA Wind Tasks 28: "Social Acceptance", Erfahrungsaustausch zur Sozialen Akzeptanz von Windenergie |          |           |
- **TEILNAHME AM IEA IMPLEMENTING AGREEMENT R&D WIND ENERGY TASK 11: "BASE TECHNOLOGY INFORMATION EXCHANGE"** 3.2
- |           |   |          |           |
|-----------|---|----------|-----------|
| Lead:     | NREL - National Renewable Energy Laboratory   | Funding: | BFE       |
| Contact:  | Maus Katja katja.maus@bfe.admin.ch  | Period:  | 2002–2011 |
| Abstract: | Beitrag zur Teilnahme an den Aktivitäten des IEA Wind Tasks 11: "Base Technology Information Exchange", Erfahrungsaustausch zum Thema Windenergie |          |           |
- **VEREISUNGSKARTE DER SCHWEIZ** R+D 3.2
- |           |  |          |           |
|-----------|--|----------|-----------|
| Lead:     | Meteotest  | Funding: | BFE       |
| Contact:  | Cattin René rene.cattin@meteotest.ch   | Period:  | 2009–2011 |
| Abstract: | In diesem Projekt wurde eine Karte der meteorologischen Vereisungshäufigkeit in der Schweiz erstellt. Flächendeckende Informationen über Wolkenwasser, Temperatur und Wind aus Analysen des operationellen Wettervorhersagemodells COSMO-2 der MeteoSchweiz dienten zur Berechnung der Vereisungshäufigkeiten. Diese wurden auf Grundlage von Messungen verifiziert. |          |           |
- **WINDKANALVERSUCHSAUFBAU FÜR PROFILMESSUNGEN FÜR WINDKRAFTANLAGEN** P+D 3.2
- |           |   |          |           |
|-----------|---|----------|-----------|
| Lead:     | RUAG  | Funding: | BFE       |
| Contact:  | Guillaume Michel michel.guillaume@ruag.com  | Period:  | 2011–2013 |
| Abstract: | Ziel des Projektes ist die Implementation und die Inbetriebnahme eines Versuchsaufbaus für Profilmessungen für Windkraftanlagen im Large Subsonic Wind Tunnel Emmen (LWTE-Windkanal) der RUAG Aviation in Emmen. Der Versuchsaufbau soll die spezifischen Anforderungen von Horizontalachsen-Windmaschinen optimal berücksichtigen und es ermöglichen, Messungen an Profilen im Massstab 2:1 bei einer Reynoldszahl von 10 Mio durchzuführen. |          |           |
- **VERIFIZIERUNG DER THEORETISCHEN LEISTUNGSKURVE EINER NEUEN WINDTURBINE** P+D 3.2
- |           |   |          |           |
|-----------|---|----------|-----------|
| Lead:     | Agile Wind Power AG   | Funding: | BFE       |
| Contact:  | Richter Patrick patrick.richter@agilewindpower.com  | Period:  | 2011–2012 |
| Abstract: | Ziel dieses Projektes ist es, die effektive Leistung und den Wirkungsgrad eines neuartigen Windkraft-Turbinenkonzepts am einem voll funktionsfähigen Prototyp zu analysieren. |          |           |
- **EINBEZUG VON LOKALER TOPOGRAPHIE, GEBÄUDEPROFILIEN UND VEGETATION IN EIN WINDENERGIE-PLANUNGSTOOL** R+D 3.2
- |           |   |          |           |
|-----------|---|----------|-----------|
| Lead:     | Fachhochschule Nordwestschweiz  | Funding: | KTI       |
| Contact:  | Heiniger Kurt kurt.heiniger@fhnw.ch   | Period:  | 2011–2012 |
| Abstract: | Ziel ist es, ein Planungstool für Ertragsvorhersage und Detailplanung von Windkraftanlagen zu entwickeln. Das Modul soll deutlich über die state-of-the-art Modelle hinausgehen, welche vor allem die oberen atmosphärischen Schichten ab 50 - 70 m Höhe gut abbilden. Mit dem zukünftigen Tool soll auch das Potential bodennaher Windsysteme betrachtet werden können (Höhenbereich < 30m, kleinräumiger Topographie, Vegetation und Bebauung). |          |           |
- **MICRO WINDTURBINEN IM URBANEN UMFELD** R+D 3.2
- |           |   |          |           |
|-----------|---|----------|-----------|
| Lead:     | Zürcher Hochschule Winterthur   | Funding: | KTI       |
| Contact:  | Escala Marina marina.escala@zhaw.ch   | Period:  | 2011–2012 |
| Abstract: | Es soll die Stromproduktion einer Mikrowindturbine (ca. 200W) mit Windverhältnisse verglichen, die Leistungskurve unter realen, turbulenten Verhältnissen gemessen und mit der theoretischen Leistungskurve verglichen werden. Eine solche Turbine ist ausserordentlich kompakt und leise, dadurch auch im urbanen Gebiet einsetzbar. |          |           |



**Kernenergie  
Énergie Nucléaire**



# Kerntechnik und Nukleare Sicherheit



**Titelbild:****Sorption von radioaktiven Elementen an Tonmineralien in radioaktiven Endlagern**

Illustration von Zink-Komplexen inkorporiert in Montmorillonit und Zink-Komplexe sorbiert an oktaedrischen Positionen (Zn<sub>2</sub>-Zn<sub>5</sub>) (M1 kennzeichnet trans- and M2 cis-oktaedrische Aluminium-Positionen).

Eine ausführliche Darstellung der Aktivitäten und Forschungsprojekte am PSI-Departement für Kernenergie und Nukleare Sicherheit findet sich auf der Webseite <http://nes.web.psi.ch>.

**BFE Forschungsprogramm Kerntechnik und Nukleare Sicherheit**

Überblicksbericht 2011

**Auftraggeber:**

Paul Scherrer Institut  
CH-5232 Villigen PSI

**Programmleiter BFE (Autor):**

Dr. Jean-Marc Cavedon, Paul Scherrer Institut (jean-marc.cavedon@psi.ch)

**Bereichsleiter BFE:**

Dr. Michael Moser (michael.moser@bfe.admin.ch)

Reiner Mailänder

# Regulatorische Sicherheitsforschung



**Titelbild:****Das neue Besucherzentrum des Felslabors Mont Terri bei St-Ursanne (JU)**

Im September 2011 wurde das Besucherzentrum des Felslabors Mont Terri [1] eröffnet. Der neu errichtete Bau neben dem Bahnhof St-Ursanne beherbergt einen Vortragssaal und eine moderne Ausstellung, die der Bevölkerung die Forschung im internationalen Labor näher bringt. 14 Organisationen aus acht Ländern erforschen im Felslabor die Eigenschaften des Opalinustons, der als Wirtgestein für die Lagerung radioaktiver Abfälle vorgesehen ist. Das Besucherzentrum wird von den drei Schweizer Organisationen Swisstopo, ENSI und Nagra getragen, die im Felslabor auch eigene Forschungsprojekte betreiben. (Quelle: Swisstopo)

**BFE Forschungsprogramm Regulatorische Sicherheitsforschung**

Überblicksbericht 2011

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
CH-3003 Bern

**Programmleiter BFE (Autor):**

Dr. Reiner Mailänder, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI (reiner.mailaender@ensi.ch)

**Bereichsleiter BFE:**

Dr. Michael Moser (michael.moser@bfe.admin.ch)

<http://www.ensi.ch/sicherheitsforschung/>

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

## Einleitung

Das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI ist die Aufsichtsbehörde des Bundes für die Kernanlagen. Es prüft laufend die Sicherheit in den Kernkraftwerken und beaufsichtigt die Transporte und die Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle sowie die Arbeiten zur geologischen Tiefenlagerung. Das ENSI übt seine Aufsichtstätigkeit unabhängig von politischen und wirtschaftlichen Interessen aus. Oberstes Ziel der Aufsichtstätigkeit des ENSI ist der Schutz von Menschen und Umwelt vor Schäden durch Radioaktivität.

Bei der Wahrnehmung seiner Aufsichtstätigkeit ist es für das ENSI unerlässlich, im Bereich der Nuklearsicherheit auf dem Stand von Wissenschaft und Technik zu sein. Das ENSI verfolgt daher mit dem Programm «Regulatorische Sicherheitsforschung» vor allem die drei folgenden Ziele:

- Die Resultate von Forschungsprojekten sollen unmittelbar der laufenden Aufsichtstätigkeit des ENSI dienen. Forschungsergebnisse gehen einerseits in vom ENSI zu erstellende Richtlinien ein, die rechtliche Anforderungen in den Bereichen Kernenergie und Strahlenschutz konkretisieren. Andererseits zieht das ENSI auch für konkrete Einzelentscheide die Ergebnisse von Forschungsprojekten als Grundlage heran.

- Die vom ENSI geförderten Forschungsprojekte dienen dem Kompetenzerhalt nicht nur innerhalb des ENSI, sondern darüber hinaus auch bei Forschungsinstitutionen. Das ENSI fördert mit diesen Forschungsprojekten insbesondere die Ausbildung im Bereich der nuklearen Sicherheit.
- Nicht zuletzt dienen Forschungsprojekte der internationalen Vernetzung des ENSI und der schweizerischen Forschung. Der internationale Austausch ist im Bereich der nuklearen Sicherheit ausserordentlich wichtig. Die Projekte des Forschungsprogramms werden grossteils von Organisationen aus verschiedenen Ländern finanziert oder zumindest in Kooperation mit internationalen Partnern durchgeführt. So erhält das ENSI auch Resultate, die in der Schweiz alleine nicht erzielt werden könnten. Dazu muss das ENSI auch eigene Beiträge leisten können. Das ENSI ist in über 70 internationalen Gremien vertreten. In vielen von diesen werden Forschungsprojekte gesteuert und deren Ergebnisse in internationale Standards umgesetzt.

Zur Strategie des ENSI gehört es, dass jedes Forschungsprojekt durch eine Expertin oder einen Experten aus den ENSI-Fachsektionen begleitet wird. So

fliessen die im Projekt gewonnenen Erfahrungen in die Aufsichtstätigkeit ein und dienen damit direkt der Sicherheit. Gerade die Projektbegleitung verschafft den Fachsektionen auch die Möglichkeit, ihre Kompetenzen zu erhalten und weiter zu entwickeln.

Das Forschungsprogramm trägt zur Bewältigung der zentralen Herausforderungen des ENSI bei. Zu diesen zählen insbesondere der Langzeitbetrieb der bestehenden Kernkraftwerke und die Entsorgung der radioaktiven Abfälle. Aufgrund des Entscheids der Politik, dass keine neuen Kernkraftwerke gebaut werden dürfen, hat das ENSI seine Forschung entsprechend ausgerichtet und Projekte angepasst. Indessen ist davon auszugehen, dass sich weiterer Forschungsbedarf aus der Aufarbeitung des Unfalls von Fukushima ergibt.

Den Herausforderungen trägt das ENSI in den Programmschwerpunkten Rechnung. Die vom Bund geförderten Projekte stellen nur einen Teil des Forschungsprogramms dar. Der überwiegende Teil der Kosten wird vom ENSI den Beaufsichtigten in Rechnung gestellt.

IEA Klassifikation: 4.1.4 Nuclear supporting technology  
Schweizer Klassifikation: 3.1.1 Sicherheit

## Programmschwerpunkte

### Brennstoffe und Materialien

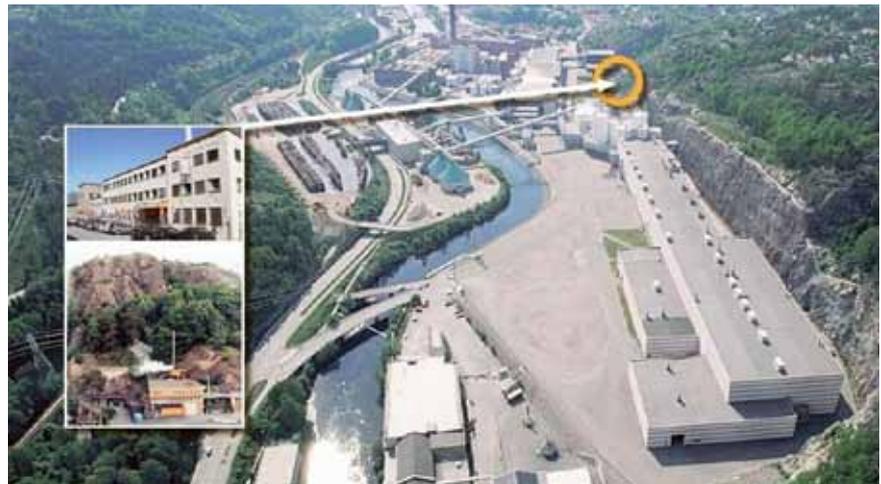
Dieser Themenbereich beschäftigt sich mit dem Reaktorkern sowie den Strukturmaterialien der wichtigsten gestaffelten Barrieren, welche den Brennstoff und den Reaktorkern umgeben und die radioaktiven Stoffe einschliessen. Die Brennelemente werden mehrere Jahre im Reaktorkern eingesetzt, bevor sie abgebrannt sind und ausgetauscht werden; beim Brennstoff und den Brennstab-Hüllrohren stehen deshalb die Anforderungen während dem Normalbetrieb und während bestimmten Störfällen im Mittelpunkt. Anders ist dies bei den wenigen nicht austauschbaren Komponenten des Primärkreislaufs, vor allem dem Reaktordruckbehälter, sowie beim Sicherheitsbehälter, dem so genannten Containment; bei diesen sind vor allem die Prozesse der Materialalterung entscheidend. Im Hinblick auf den Langzeitbetrieb der Kernkraftwerke muss gewährleistet sein, dass für alle Anforderungen weiterhin ausreichende Sicherheitsmargen vorhanden sind.

### Datenbanken zu Schäden und internen Ereignissen

Die Projekte in diesem Bereich werden von der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung OECD koordiniert. Sie fördern den internationalen Erfahrungsaustausch über Störfälle in Kernkraftwerken sowie über Schäden an Komponenten, die Störfälle auslösen können. Dazu werden themenspezifische Datenbanken aufgebaut, in die systematisch Schadensfälle und Ereignisse aus den teilnehmenden OECD-Staaten eingegeben werden. Die Daten werden anschliessend ausgewertet mit dem Ziel, auf der Basis einer grösseren Anzahl von Fällen systematische Hinweise auf Schadens- bzw. Störfallursachen zu erhalten. Ein Zusammenschluss auf internationaler Basis ist dazu notwendig, weil die relevanten Ereignisse und Schäden in Kernkraftwerken selten sind.

### Externe Ereignisse

Neben den Schäden, die durch Ereignisse innerhalb eines Kernkraftwerks entstehen können, berücksichtigen die



Figur 1: Der Standort des OECD Halden Reactor Projects in Halden (HRP), Südnorwegen [2]. Der Reaktor befindet sich in einer Felskaverne und liefert beim Betrieb auch Dampf an die benachbarte Papierfabrik. Das HRP hat zwei Stossrichtungen: Brennstoff- und Materialverhalten sowie Mensch-Technik-Organisation. Neben dem Versuchsreaktor stehen dem Projekt dazu eine Werkstatt zur Herstellung instrumentierter Brennstoff-Versuchsanordnungen, ein Labor zur Interaktion von Mensch und Maschine (Man-Machine Laboratory) sowie ein Simulationszentrum (Virtual Reality Centre) zur Verfügung. (Quelle: Halden Reactor Project).

Sicherheitsanalysen für Kernkraftwerke auch Ereignisse, die eine Anlage von aussen treffen können. Das ENSI unterstützt zu diesem Bereich mehrheitlich internationale Projekte unter Federführung der OECD, der Internationalen Atomenergie-Agentur IAEA und der finnischen Forschungseinrichtung VTT. Einerseits wird die Robustheit von sicherheitsrelevanten elektrischen Systemen gegenüber den Auswirkungen von Überspannungen betrachtet; diese können vom Hochspannungsbereich ausgehen und sich wegen ihres hohen Energiegehalts auf eine grosse Zahl von Kraftwerkssystemen negativ auswirken. Andererseits geht es um die Auswirkungen von Erdbeben und Flugzeugabstürzen auf die Tragwerke von sicherheitsrelevanten Gebäuden. Weil dabei aufwändige Experimente und Simulationen durchgeführt werden, ist die internationale Zusammenarbeit wichtig. Zugleich wird der Erfahrungsaustausch zwischen den Ländern gefördert. Neu und speziell auf die Schweizer Verhältnisse zugeschnitten ist schliesslich die Expertengruppe Starkbeben des Schweizerischen Erdbebendienstes SED.

### Menschliche Faktoren

Übergeordnetes Ziel in diesem Bereich ist die Reduktion der Unsicher-

heit menschlicher Handlungen bei der probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA), die das Risiko von Störfällen in Kernkraftwerken quantitativ erfasst. Der Bereich umfasst vor allem zwei Schwerpunkte. Einerseits geht es um den Einfluss menschlicher Handlungen auf Störfälle und deren Beherrschung. Dabei wird vor allem die Zuverlässigkeit des Operateurverhaltens unter verschiedenen Bedingungen mit der so genannten Human Reliability Analysis (HRA) untersucht. Während die versehentliche Unterlassung erforderlicher Eingriffe relativ gut untersucht ist, sind fehlerhafte Handlungen, welche den Verlauf eines Störfalls negativ beeinflussen können, weniger gut erforscht. Diese so genannten Errors of Commission werden daher im Projekt HRA systematisch identifiziert und quantifiziert. Zweiter Schwerpunkt ist der Einfluss der Kontrollraumgestaltung auf die Leistung der Operateure (Human-System Interface), der insbesondere im Halden Reactor Project [2] untersucht wird (Figur 1).

### Systemverhalten und Störfallabläufe

Dieser Bereich betrifft die in der Reaktoranlage und im Containment ablaufenden Prozesse, ausgehend vom Normalbetrieb über Änderungen des

Reaktorverhaltens, die bei Störfällen in kurzer Zeit ablaufen können, bis hin zu Kernschmelz-Unfällen. Für so genannte deterministische Sicherheitsanalysen werden Computermodelle dieser Vorgänge erstellt und mit Hilfe von Experimenten validiert. Sie dienen auch als Grundlage für die quantitative Ermittlung des Anlagenrisikos in probabilistischen Sicherheitsanalysen. Zunehmend werden verschiedene Modelle gekoppelt, um das Anlageverhalten umfassender simulieren zu können. Eine solche Modellkopplung wird insbesondere im Projekt PASSPORT vorgenommen; dabei geht es um das Zusammenspiel der physikalischen Vorgänge, welche in der Reaktoranlage einerseits und dem umgebenden Containment andererseits ablaufen. Ursprünglich im Hinblick auf passive Systeme neuer Reaktoren konzipiert, wurde PASSPORT im Jahre 2011 neu ausgerichtet, um Störfallabläufe in bestehenden Reaktoren genauer betrachten zu können.

### Strahlenschutz

Die Arbeiten im Bereich Strahlenschutz umfassen ein breites Spektrum anwendungsbezogener Themen. Sie reichen von der Überprüfung und Kalibrierung von Messsystemen für ionisierende Strahlung und der von Helikoptern aus durchgeführten Messung der Ortsdosisleistung in der Umgebung von Kernanlagen (Aeroradiometrie) bis hin zur Entwicklung neuer Analysemethoden für Radionuklide. Zudem trägt die Mitarbeit an internationalen Normen zur länderübergreifenden Harmonisierung im Strahlenschutz bei. Mit diesen Aktivitäten wird der Strahlenschutz in den Schweiz auf dem Stand der Technik gehalten und die Ausbildung von Nachwuchskräften gefördert.

### Entsorgung

Mit dem Fortschreiten des Verfahrens gemäss dem Sachplan geologische Tiefenlager wird auch die Forschung im Bereich Entsorgung immer wichtiger. Bei der geologischen Tiefenlagerung

radioaktiver Abfälle spielt die Untersuchung geeigneter Gesteinsformationen eine zentrale Rolle. Dazu werden hydrogeologische, geochemische und felsmechanische Eigenschaften des Opalinustons im Felslabor Mont Terri [1] untersucht. Die Auslegung eines Tiefenlagers und dessen Überwachung wird ebenso beleuchtet wie die Eigenschaften der darin einzulagernden Abfälle. Zudem werden die in einem Tiefenlager ablaufenden physikalisch-chemischen Prozesse betrachtet, darunter insbesondere die Gasentwicklung. Darüber hinaus beschäftigen sich Projekte mit langfristigen Prozessen, welche die Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers beeinträchtigen können, nämlich der Tiefenerosion durch Gletscher und neu auch mit der Abtragung infolge tektonischer Hebung der Landschaft.

**Ein ausführlicher Jahresbericht findet sich im Erfahrungs- und Forschungsbericht 2011 des ENSI ([www.ensi.ch](http://www.ensi.ch)).**

## Nationale Zusammenarbeit

Der wichtigste inländische Partner des ENSI beim Programm «Regulatorische Sicherheitsforschung» ist mit Abstand das Paul Scherrer Institut PSI, insbesondere der PSI-Bereich Nukleare Energie und Sicherheit NES. Das PSI hat im Rahmen der internationalen Nuklearsicherheit einen ausgezeichneten Ruf und trägt wesentlich dazu

bei, dass die Schweiz international eine massgebende Rolle bei der Weiterentwicklung der Sicherheitsvorgaben spielt. Bei den vom Bund geförderten Projekten arbeitet das ENSI darüber hinaus mit Swisstopo zusammen, die das internationale Forschungsprojekt Mont Terri [1] koordiniert.

## Internationale Zusammenarbeit

Der wichtigste internationale Partner des ENSI bei der Forschung ist die Kernenergieagentur NEA der OECD. Die NEA-Mitgliedsstaaten verfügen zusammen über ca. 85 % der weltweiten nuklearen Stromerzeugungskapazität. Die NEA mit Sitz in Paris unterstützt ihre Mitgliedsländer bei der Weiterentwicklung der technischen, wissenschaftlichen und rechtlichen Grundlagen.

Folgende vom Bund geförderte Projekte werden durch mehrere internationale Partner finanziert: OECD Halden Reactor Project [2], OECD CODAP, OECD ICDE, OECD COMPSIS, OECD FIRE, MSWI, OECD MCCI, OECD Clay Club, Mont Terri Project [1]. Darüber hinaus kooperieren folgende vom Bund geförderte Projekte mit internationalen Partnern: KORA, Generischer Strahlenschutz.

## Referenzen

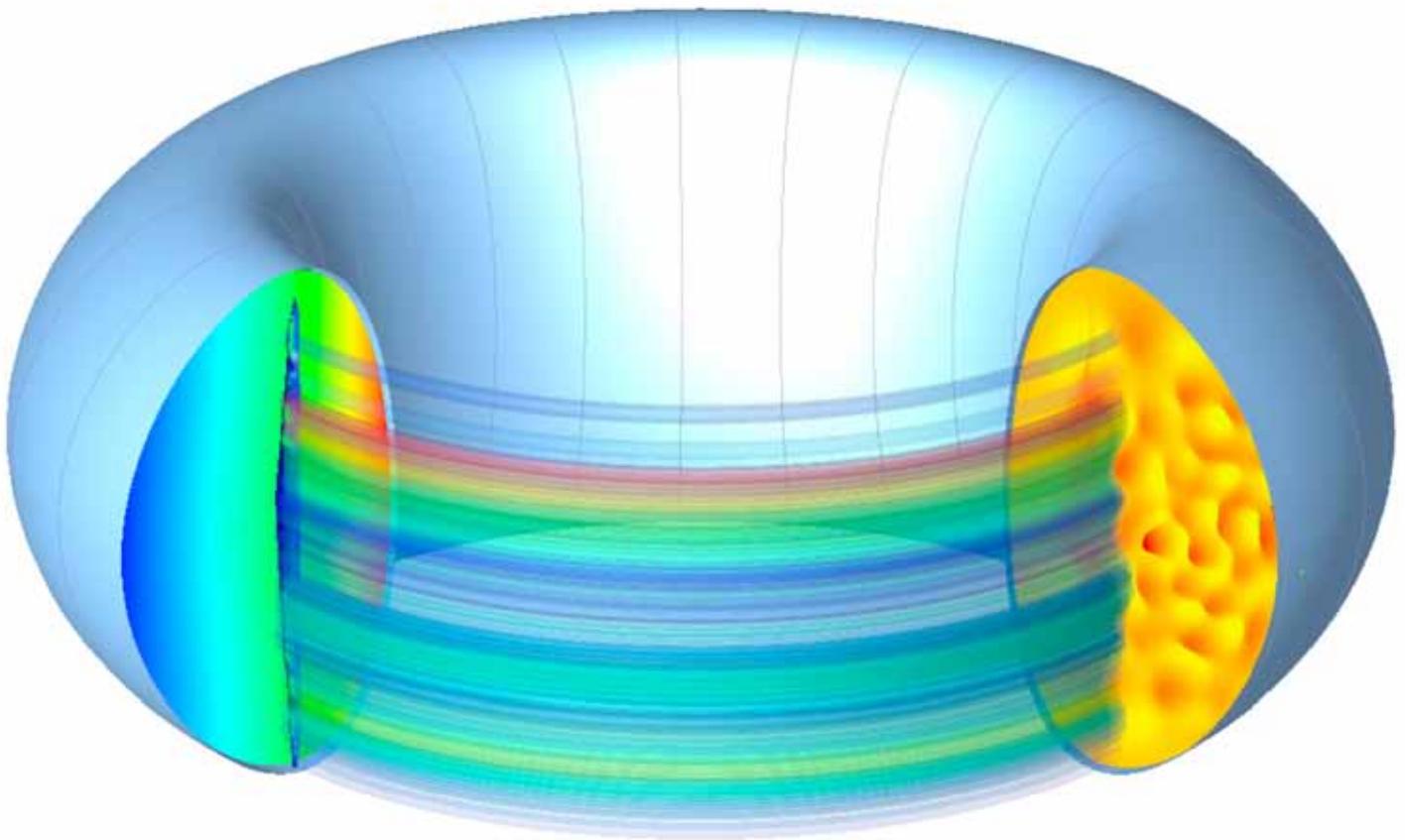
[1] Mont Terri Projekt (<http://www.mont-terri.ch/>)

[2] OECD/NEA Halden Reactor Project (<http://www.oecd-nea.org/jointproj/halden.html>)



M. Q. Tran, L. Villard, L. Marot et C. Vaucher (coordinateur)

# Fusion thermonucléaire contrôlée



**Page de couverture :**

**Application d'ondes RF dans le tokamak JET, dans le but de contrôler les oscillations répétitives en dent-de-scie au cœur du plasma**

**Programme de recherche OFEN Fusion thermonucléaire contrôlée**

Rapport de synthèse 2011

**Mandant :**

Office fédéral de l'énergie OFEN  
CH-3003 Berne

**Chef de programme :**

Claude Vaucher (coordinateur), Secrétariat à l'éducation et à la recherche (SER) (claude.vaucher@sbf.admin.ch)

**Chef de domaine de l'OFEN :**

Dr. Michael Moser (michael.moser@bfe.admin.ch)

**Auteurs :**

Dr. M.Q. Tran (EPFL), Dr. L. Villard (EPFL) et Dr. L. Marot (Uni Bâle)

<http://crppwww.epfl.ch>

L'auteur de ce rapport porte seul la responsabilité de son contenu et de ses conclusions.

## Introduction

Il n'existe pas à proprement parler de programme fusion thermonucléaire en Suisse. Depuis 1978, les activités de fusion sont fortement liées aux programmes de recherche européen Euratom (Communauté européenne de l'énergie atomique), notamment sa partie concernant la fusion thermonucléaire. La Suisse participe à ces efforts et développe des connaissances dans la physique des plasmas et les technologies de fusion pour obtenir une source d'énergie pratiquement sans limite.

La fusion devrait ainsi produire une énorme quantité d'énergie presque sans production de CO<sub>2</sub>. Le combustible est disponible en grande quantité et bien réparti sur terre. Un réacteur de fusion est intrinsèquement sûr et sa puissance peut être transformée en chaleur, électricité ou utilisée pour la production d'hydrogène. Une centaine d'années après son déclassement, le matériel activé devrait être entièrement recyclé et non radioactif.

Tous ces avantages doivent être mis en regard d'une difficulté majeure: la fusion nucléaire nécessite des conditions extrêmes pour sa mise en service. Le défi est autant physique que technologique. Le programme européen de recherche sur la fusion s'est concentré dès son début sur le développement de l'électricité. Depuis près de 40 ans, cette stratégie a été suivie avec ténacité par Euratom.

L'Europe dans son ensemble se trouve à la pointe de la connaissance dans l'énergie de fusion. Avec la construction du Tore européen commun (Joint European Torus, JET), auquel la Suisse a également participé comme partenaire

à part entière, l'Europe était bien préparée pour la prochaine génération de réacteur expérimental de Fusion ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Cet immense projet est la seule étape restante entre les expériences d'aujourd'hui et DEMO, un projet d'usine de démonstration. Ce dernier devrait être le premier réacteur à fusion produisant de l'électricité et prouver la viabilité économique de l'énergie de fusion.

En fin de compte, ITER prouvera la faisabilité technique de la fusion en répondant à la question : est-ce vraiment possible de créer l'énergie du soleil sur terre ? De son côté, DEMO prouvera sa faisabilité économique en fournissant une réponse à cette interrogation : la fusion thermonucléaire est-elle rentable ?

Classification de l'AIE : 4.2 Nuclear Fusion

Classification Suisse: 3.2 Fusion

## Centres de gravité du programme

### ITER

Comme annoncé en 2010, le budget de Fusion for Energy (F4E) pour la phase de construction d'ITER a été augmenté à 6,6 milliards d'Euros. Pour les deux dernières années (2012 et 2013) du 7ème Programme Cadre, l'augmentation par rapport à la somme prévue initialement est de 1,3 milliard d'€ : le budget fusion pour 2012 et 2013 s'élève à 2,209 milliards d'€. Le financement a été décidé par l'Union Européenne à la fin de l'année 2011.

### Coopération européenne dans le cadre d'Euratom

L'opération de JET a redémarré en 2011. Le financement des années 2012 et 2013 du programme de fusion (voir plus haut) devra couvrir tous les éléments du programme : programme des Associations, programme de l'European Fusion Development Agreement (EFDA). Le programme de l'EFDA inclut l'exploitation de JET et des activités en vue des réacteurs de démonstration DEMO. Ces dernières ont été déjà lancées en 2011

Le budget européen pour les Associations est en baisse continue depuis 2008. L'Euratom s'attend à ce que les pays contribuent davantage à leurs

programmes nationaux, pour lui permettre de concentrer ses ressources financières sur le projet ITER. Il en résulte que la contribution européenne aux activités des laboratoires nationaux est, elle aussi, en baisse d'une manière significative. Par exemple, pour la Suisse, la contribution européenne a passé à 65% de sa valeur de 2008.

### Euratom et la Suisse

L'accord de coopération entre la Confédération Suisse et Euratom dans le domaine de la fusion, conclu le 14 septembre 1978, est un accord-cadre de durée illimitée. L'association de la Suisse à l'Euratom nécessite par contre un renouvellement pour 2012 et 2013. Trois accords généraux d'exécution fixent les modalités d'exécution avec Euratom : l'Accord sur la Mobilité qui encourage et facilite les échanges de personnel dans le cadre de la fusion, le Contrat d'Association et l'European Fusion Development Agreement (EFDA). Ces deux derniers accords règlent les modalités de collaboration entre les laboratoires suisses associés au programme fusion d'une part, et Euratom et les autres laboratoires européens d'autre part. De plus EFDA, à travers des « Implementing Agreements », permet à la Suisse de participer à l'ex-

ploitation de grandes infrastructures communes. En 2009 deux Implementing Agreements sont en force : le JET Implementing Agreement qui règle l'utilisation du tokamak européen JET et le High Performance Computer Implementing Agreement (HPC-IA). Le HPC-IA a été mis en œuvre en 2009 et permet aux laboratoires européens de fusion d'exploiter un ordinateur européen extrêmement performant dédié seulement à la R&D en fusion. La Suisse a signé le HPC-IA en 2010. Cet IA a permis à la Suisse d'avoir accès à environ 20 millions d'heures CPU sur le serveur européen HPC-FF dédié à la fusion (ce qui correspond à environ 28% des capacités du HPC-FF) pour des projets où ses chercheurs sont soit « Principal Investigator » soit « Co Principal Investigator ». Un IA sur les activités visant un réacteur de fusion du type DEMO (Power Plant Physics and Technology Implementing Agreement) a été soumis à la Suisse pour signature.

Un autre point saillant est la livraison d'un super-ordinateur réservé à la fusion à Rokkasho dans le cadre de l'Approche Elargie. L'Union Européenne (y compris la Suisse) et le Japon seront les principaux utilisateurs de ce super-ordinateur (Voir plus bas).

## Highlights Recherche et Développement

### Le CRPP : l'Association Suisse/EURATOM et ITER

En 2011, le CRPP a continué à participer aux activités scientifiques et technologiques du programme EURATOM ainsi qu'au projet ITER, notamment au travers de l'agence domestique européenne Fusion for Energy F4E. Ses recherches en matière de fusion thermonucléaire contrôlée sont effectuées essentiellement sur deux sites : à l'EPFL, les activités portent sur la physique du confinement magnétique, avec le tokamak TCV, l'expérience de base TORPEX, la théorie et la simulation numérique, la technologie de la fusion liée au chauffage du plasma et la génération de courant par ondes hyper-fréquences ; au PSI, les activités sont consacrées à la supraconductivité et aux matériaux. De plus, le CRPP participe aux expériences sur le Joint European Torus (JET), qui reste à ce jour la plus grande expérience de fusion magnétique au monde en opération.

Le TCV (Tokamak à configuration variable) est la plus grande installation expérimentale exploitée sur le site de l'EPFL. Elle présente deux propriétés uniques au monde : d'une part, la grande flexibilité de sa conception et de son mode d'opération permet la création et le contrôle de plasmas de formes très différentes, ce qui s'avère essentiel pour vérifier les simulations numériques et planifier la géométrie optimale du cœur des futurs réacteurs de fusion ; d'autre part, le système d'injection d'ondes millimétriques afin de chauffer le plasma et générer du courant est caractérisé par une grande souplesse et permet d'orienter la puissance injectée selon des profils spécifiques. C'est en utilisant ces caractéristiques uniques que les recherches sur le TCV se poursuivent. La campagne expérimentale 2011 a été particulièrement intense, interrompue seulement pour de brèves périodes pour des interventions techniques.

### Résultats obtenus sur TCV

Le contrôle des « Edge Localized Modes » (ELM) par l'application de chauffage cyclotronique électronique (ECH). Il est bien connu que, sous certaines conditions, une région de turbulence réduite peut apparaître près du

bord du plasma, formant ainsi une « barrière de transport », avec des gradients très élevés de température et de densité, établissant ainsi un régime de confinement amélioré appelé « mode H ». Dans ce régime, on observe que le plasma est sujet à des instabilités répétitives (ELMs) qui s'accompagnent de bouffées de chaleur et de particules qui s'échappent du plasma et peuvent potentiellement endommager la première paroi de la chambre à vide. Cette problématique a été identifiée comme une des plus critiques pour le succès d'ITER et est l'objet d'intenses recherches. Sur TCV, en injectant des ondes ECH près du bord, il a été démontré, pour la première fois, que la fréquence de répétition des ELMs pouvait être doublée et que la quantité d'énergie expulsée par chaque ELM était réduite d'un facteur 2.

Dans des expériences similaires mais où la puissance ECH au bord était modulée en temps réel avec les ELMs, il a été démontré qu'il était possible de réduire considérablement la dispersion statistique de la fréquence de répétition des ELMs (ceux-ci étant de nature erratique), et en particulier d'éviter l'apparition d'ELMs « géants », particulièrement dommageables pour l'opération d'un réacteur.

L'opération en « mode H » est essentielle au succès d'ITER, d'où l'importance d'établir des scénarios et de caractériser les conditions d'accès à ce mode de confinement amélioré. Dans les premières phases d'exploitation d'ITER, il est prévu d'opérer avec de l'hélium afin d'éviter la production de neutrons. Le seuil de puissance nécessaire pour accéder au « mode H » dépend de la composition isotopique mais il y a peu d'observations à ce jour dans les tokamaks. Ce seuil a été mesuré sur TCV, et les résultats montrent une valeur plus élevée de 30% pour un plasma d'hélium que pour le deutérium.

Sur TCV, il a été montré que le seuil de puissance nécessaire à l'accès au « mode H » pouvait varier jusqu'à 60% en faisant varier la géométrie du divergeur, plus précisément en variant la longueur de la séparatrice entre son point X et la paroi.

On observe souvent que le plasma des tokamaks est en rotation dans la direc-

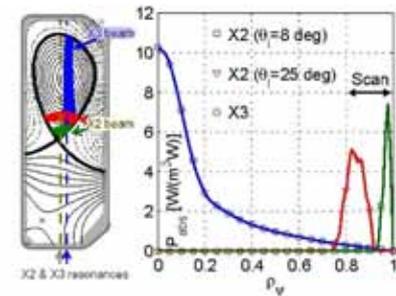


Figure 1 : Expériences de contrôle des ELMs par injection d'ondes RF près du bord du plasma. L'image de gauche montre une coupe du tokamak TCV et des surfaces magnétiques, la séparatrice étant en gras, et des faisceaux d'ondes millimétriques utilisés : X3 pour chauffer le centre (bleu), X2 pour chauffer le bord (rouge et vert). L'image de droite montre les profils de déposition de puissance.

tion toroidale. La rotation, et notamment son cisaillement, peut avoir un effet stabilisant sur la turbulence, d'où l'intérêt de comprendre les mécanismes en jeu. Poursuivant une recherche dans laquelle TCV a joué un rôle pionnier dans les dernières années, nous avons étudié l'effet de la relaxation interne du plasma (appelée « dent-de-scie ») sur la rotation du plasma : le profil de vitesse change systématiquement, avec une augmentation à l'intérieur du rayon de la dent-de-scie et une diminution à l'extérieur. De plus, en vue de positionner le plasma de façon plus favorable pour la mesure de ces vitesses de rotation, un scénario « mode-H » approprié a été développé.

L'influence de la largeur du profil de déposition de puissance sur la qualité du confinement, dans des décharges chauffées par ondes cyclotroniques électroniques (ECH), a été investiguée en détail. Il a été montré que les profils larges ne sont pas meilleurs de ce point de vue, alors que déposer la puissance bien au centre s'avère bénéfique.

Des progrès significatifs ont été accomplis sur l'expérience TCV concernant le contrôle des profils du plasma et des instabilités, qui sont tous deux essentiels pour l'opération d'ITER. Une nouvelle technique de contrôle en temps réel des phénomènes de relaxation récurrente du centre du plasma (« dents-de-scie ») a été développée. Il a été possible de déclencher des dents-de-scie selon une séquence prédéfinie.

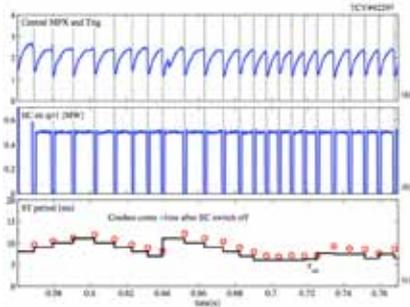


Figure 2 : Contrôle des « dents-de-scie » dans le tokamak TCV. Par l'application modulée de puissance radiofréquence (milieu), il a été possible de déclencher les dents-de-scie (en haut) selon une séquence préprogrammée (en bas).

Contrôler les « dents-de-scie » est important pour ITER, car ces relaxations internes du plasma peuvent à leur tour déclencher d'autres instabilités, les « neoclassical tearing modes » (NTMs), qui conduisent à une dégradation des performances et de la qualité du confinement magnétique.

Contrôler le profil de courant dans un réacteur de fusion est essentiel pour l'opération dans certains scénarios. En même temps, contrôler d'autres paramètres du plasma est désirable. Sur TCV, grâce à l'application, en une boucle de rétroaction, de la puissance radiofréquence de 2 gyrotrons orientés de façon appropriée, il a été possible de contrôler simultanément l'inductance interne (qui dépend de la largeur du profil de courant) et la température électronique, selon des séquences prédéterminées. Cette technique ouvre de nombreuses perspectives pour l'opération de scénarios avancés.

La configuration dite « snowflake », démontrée ces dernières années pour la première fois par des expériences sur TCV, a été créée pour tenter de résoudre le problème de l'évacuation de puissance de sortie du plasma. Elle offre de nombreux avantages potentiels, une de ceux-ci étant de répartir le flux de puissance sur 4 secteurs (« strike points ») au lieu de 2 dans les configurations standard. La campagne expérimentale de 2011 a permis de mesurer les flux de chaleur aux différents « strike points » : plus la configuration s'approche d'un « snowflake », plus la puissance sur les secteurs additionnels augmente. C'est le cas aussi

pour la puissance instantanée évacuée lors des relaxations du bord (ELMs).

Une autre façon d'atténuer le problème de la puissance éjectée lors de relaxations du bord (ELMs) est de modifier la forme du plasma. Le tokamak TCV est actuellement le seul au monde capable d'explorer en particulier des triangularités négatives. Il a été démontré que pour celles-ci, la fréquence de répétition des ELMs croît d'un facteur 3, alors que la puissance éjectée par ELM décroît d'un facteur 3, par rapport à des plasmas de triangularité positive.

### Théorie et simulation numérique

Les activités du groupe de théorie et simulation numérique portent sur les domaines suivants : la turbulence et le transport de chaleur et de particules dans les tokamaks, l'analyse de l'équilibre et de la stabilité MHD (magnéto-hydrodynamique) des tokamaks et stellarators, l'application d'ondes radiofréquence et la prospection et l'optimisation de nouvelles configurations de confinement magnétique.

La présence d'ions rapides, créés par exemple par le chauffage RF, l'injection de faisceaux de neutres ou par le processus de fusion, a pour effet de provoquer des relaxations « dents-de-scie » géantes au cœur du tokamak, pouvant conduire à une dégradation du confinement, voire même des disruptions (termination brutale de la décharge). Par des simulations numériques intégrant de façon consistante le calcul de la propagation d'ondes, leur absorption, la génération d'ions rapides et l'effet sur la stabilité des dents-de-scie (voir figure en page de titre), nous avons pu démontrer qu'il était possible de contrôler celles-ci en jouant sur la direction de propagation des ondes RF. Ces simulations confirment complètement des expériences réalisées avec succès sur JET. La simulation numérique prédit que ce scénario sera efficace sur ITER.

Des simulations numériques de la turbulence causée par les gradients de température ionique (ITG) ont permis de mettre en évidence un effet synergétique entre les collisions entre ions et les instabilités de petite échelle qui sous-tendent l'état turbulent : le flux

de chaleur avec collisions et micro-turbulence est systématiquement supérieur à la somme du flux causé par les collisions seules et du flux causé par la micro-turbulence sans collisions. Le rôle central des écoulements zonaux, générés par la microturbulence, mais eux-mêmes sujets à une instabilité limitant leur cisaillement, a été mis en évidence.

Les tokamaks, bien que nominalemment axisymétriques, peuvent être le siège de brisures spontanées de symétrie : dans certaines circonstances, un nouvel équilibre peut apparaître avec une déformation hélicoïdale importante du plasma par rapport au cas axisymétrique. Ceci est d'importance cruciale notamment pour certains scénarios envisagés pour ITER. En effet, cette

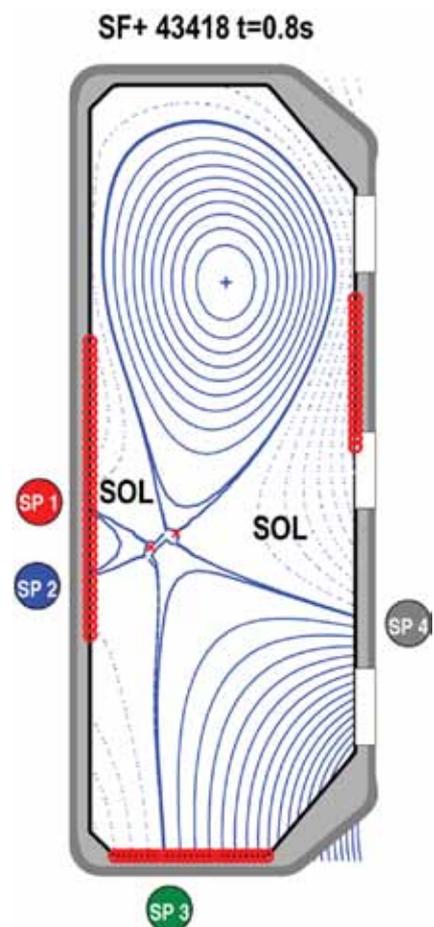


Figure 3 : Un instantané d'une simulation de la turbulence, montrant ici les perturbations de densité (à gauche). Le transport de chaleur avec turbulence+collisions (losanges) est supérieur à la somme du transport collisionnel (traitillés rouges) et du transport turbulent sans collisions (bleu).

rupture de symétrie implique des propriétés très différentes pour le confinement des particules du plasma. Grâce à des simulations numériques, nous avons pu reproduire des structures hélicoïdales similaires aux observations expérimentales, notamment sur JET.

Des simulations numériques de la turbulence dans le bord du plasma ont montré des effets importants de la composante magnétique des perturbations. En augmentant la pression, ces perturbations augmentent d'amplitude, et le transport s'en trouve augmenté.

Le programme de recherches conduit sur la machine TORPEX est motivée par l'étude de la turbulence telle qu'elle a lieu dans le bord du plasma du tokamak, dans un environnement similaire, mais dont la relative simplicité, par rapport au tokamak, a l'avantage de permettre des mesures in situ à haute résolution spatio-temporelle. Mentionnons en particulier :

Des mesures in situ des profils de courant parallèle au champ magnétique ont été faites au voisinage des filaments de plasmas, ou « blobs », couramment observés dans les expériences de confinement magnétique. Elles ont permis de valider les modèles théoriques développés par le CRPP pour la propagation de ces filaments.

Par l'application d'électrodes au bord du plasma, il a été possible de démontrer qu'il était possible d'influencer la dynamique des blobs.

Un bon confinement des ions rapides est essentiel au bon fonctionnement d'un réacteur de fusion. Le transport d'ions rapides dans le plasma a été mesuré dans TORPEX et comparé avec des simulations numériques. L'effet de la turbulence a ainsi pu être mis en évidence.

L'application de méthodes d'imagerie rapide a permis l'étude non invasive de la turbulence, et en particulier de la dynamique des blobs. Ce diagnostic a permis d'obtenir des mesures à haute résolution (spatiale et temporelle) dans un large domaine de paramètres du plasma, fournissant ainsi les bases pour des comparaisons détaillées entre théorie et expérience.

### Fusion Technology Materials

Le groupe Fusion Technology Materials, localisé au PSI, a pour objectif principal l'étude des effets des dégâts provoqués par l'irradiation des matériaux structurels entourant les futurs réacteurs de fusion. Dans ces machines, les neutrons de fusion à haute énergie produiront des cascades de déplacements et des transmutations nucléaires, ce qui affecte les propriétés de ces matériaux. Les activités de Recherche et Développement (R&D) se sont portées en particulier sur :

L'amélioration des propriétés de ductilité et de résistance aux hautes températures d'alliages d'acier à activation réduite, comprenant une optimisation des conditions de fabrication et une caractérisation détaillée de leur nano- et microstructure, ainsi que de leurs propriétés mécaniques après soumission à irradiation.

Le développement de matériaux structurels à base de tungstène, avec en particulier la production d'un nouvel alliage aux propriétés prometteuses.

Les travaux de simulation numérique se sont portés notamment sur la modélisation par dynamique moléculaire des dommages d'irradiation dans des alliages métalliques, tels que les dislocations, les lacunes et les bulles d'hélium.

La participation à plusieurs actions collaboratives et de coordination pour la science des matériaux pour l'énergie de fusion, permettant en outre d'éta-



Figure 5 : Vue du CFTM dans le laboratoire d'essai.

blir une base de données de taille statistiquement significative sur la microstructure des aciers à faible activation.

### Superconductivity

Le groupe Superconductivity, localisé au PSI, a été actif principalement pour le test des supraconducteurs pour ITER sur l'installation SULTAN, pour la préparation d'une nouvelle installation de test (EDIPO), ainsi que pour des activités de R&D sur les supraconducteurs à haute température envisagés pour DEMO. Le test des supraconducteurs a reçu une attention toute particulière de la part de la communauté de la fusion, et a été la priorité.

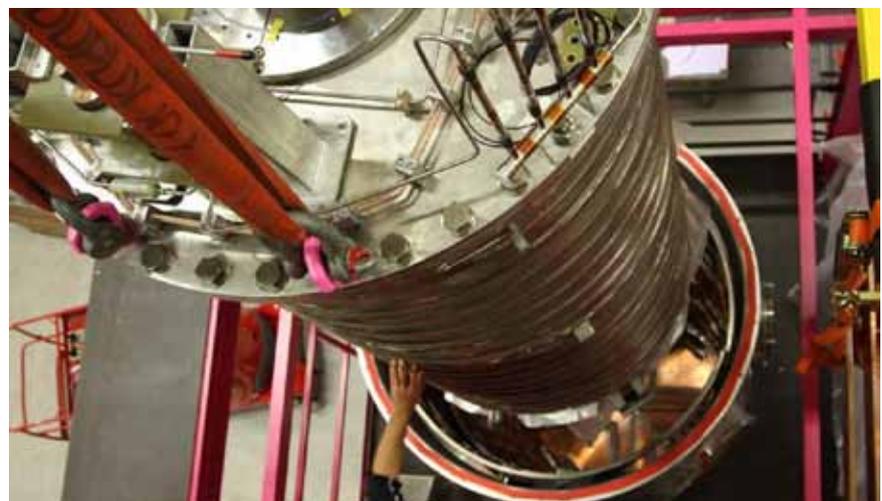


Figure 4 : Insertion de l'assemblage des bobines de la nouvelle installation de test EDIPO dans la chambre à vide.

SULTAN a été en opération pratiquement ininterrompue et un nombre record de campagnes de tests a pu être effectué. Ceux-ci ont été conduits sous contrats bilatéraux avec les différentes agences nationales et avec l'organisation internationale ITER elle-même. Ils ont concerné tant les conducteurs des bobines du champ torique, celles du champ poloïdal, celles de correction, ainsi que le solénoïde central. L'ensemble des bobines pour EDIPO a été reçu et installé (Figure 6).

Une feuille de route pour le développement de supraconducteurs à haute température et leur utilisation dans les réacteurs de fusion du futur a été établie par le projet « Power Plant Physics and Technology » de l'EFDA. Le CRPP s'est penché en particulier sur les problèmes de stabilisation électrique, la protection en cas de « quench » (perte accidentelle de l'état supraconducteur) et la caractérisation des échantillons.

### Gyrotron

Le groupe gyrotron poursuit ses activités dans le développement de sources RF millimétriques. L'application de telles ondes est en effet une composante essentielle pour le fonctionnement d'un réacteur de fusion. Le groupe est impliqué dans plusieurs programmes de recherche dans lesquels des gyrotrons sont utilisés : le chauffage EC (electron cyclotron) de TCV, le système EC du stellarateur W7X et celui d'ITER. Un effort significatif a porté sur l'extension des capacités de la simulation numérique de sources RF de haute puissance.

Un nouveau code de simulation numérique a été développé et appliqué à l'étude d'interactions statiques et dynamiques pouvant induire des pertes de l'ordre de 10% dans la puissance RF émise. Il a aussi été appliqué au phénomène d'émission de fréquences d'oscillation parasites, ainsi que pour le design détaillé des gyrotrons d'1MW prévus pour un upgrade futur du système EC de TCV.

De nouvelles structures permettant d'éviter des instabilités qui peuvent apparaître dans le tube du gyrotron ont été proposées, étudiées et simulées.

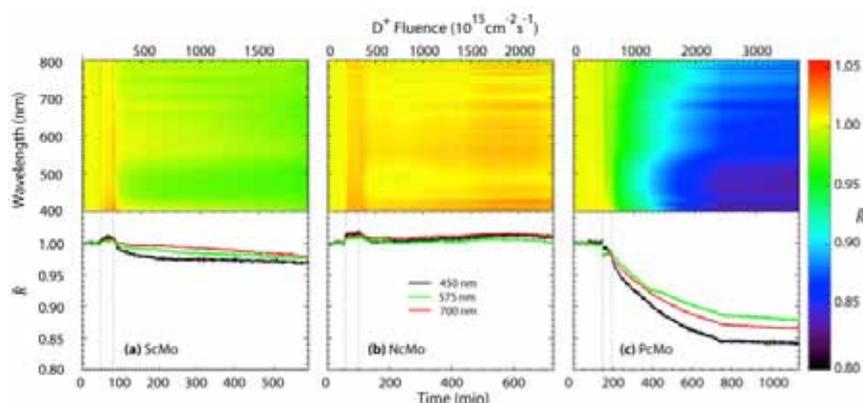


Figure 6 : Time evolution of the reflectivity spectrum of (a) ScMo, (b) NcMo and (c) PcMo, between 400 and 800 nm during deuterium exposure, relative to the first time slice. The dashed vertical lines indicate the plasma switch-on, followed by the application of a  $-200V$  bias. The bottom panels show time traces corresponding to three wavelengths, including 450, 575 and 700 nm.

La simulation numérique a permis d'optimiser des composants passifs utilisés dans la physique des ondes millimétriques. Ce projet a bénéficié d'une activité de type « spin-off » dans le domaine des gyrotrons pour les appareils de résonance magnétique nucléaire.

Le CRPP a aussi participé au développement spectaculaire des moyens de calcul à haute performance (HPC). Il est actif tant au niveau de l'EPFL, avec notamment le projet CADMOS BlueGene/P, qu'au niveau Suisse avec le projet « HP2C » du CSCS, au niveau européen avec le serveur « HPC-FF » de l'EFDA, et au niveau mondial avec le Computational Simulation Centre (CSC) de l'IFERC (Rokkasho, Japon) dans le cadre de l'Approche Elargie. Ce dernier vient de mettre en opération un serveur de plus de 1 PetaFlops dédié à la recherche en fusion (serveur Helios), et le CRPP a été sélectionné pour être parmi les tous premiers utilisateurs dans le cadre d'un projet pilote (Lighthouse Project).

Toutes ces activités de recherche ont abouti en 2011 à une centaine d'articles dans des revues scientifiques à comité de lecture et à une centaine de communications lors de congrès internationaux, dont plusieurs en tant que papiers invités.

L'excellence scientifique se manifeste aussi dans la formation : le CRPP a environ 35 doctorants dont une dizaine d'entre eux ont obtenu en 2011 leur titre de doctorat. Enfin, en 2011, le CRPP a maintenu ses tâches d'ensei-

gnement de base et ses nombreuses activités de relations publiques visant à expliquer la physique des plasmas et la fusion contrôlée à des non-spécialistes.

### Relation avec ITER

Le CRPP a activement participé à l'exploitation du tokamak Européen JET. Des expériences récentes, effectués dans des campagnes dirigées par du personnel scientifique du CRPP, ont permis de contrôler des phénomènes de relaxation interne, appelés « dents-de-scie » et susceptibles de déclencher d'autres instabilités dégradant la qualité du confinement. Les ions rapides sont en effet susceptibles de créer des conditions dans lesquelles les « dents-de-scie » sont géantes, et il est important de pouvoir les éviter. L'analyse théorique détaillée s'est poursuivie et a montré un excellent accord avec les expériences. De plus, des prédictions ont été faites pour ITER, démontrant leur potentiel. D'autres modes peuvent être déstabilisés par les ions rapides dans un réacteur de fusion ; c'est pourquoi la mesure de leur fréquence et de leur amortissement est essentielle. Grâce aux travaux du CRPP, ces modes peuvent être détectés de façon routinière sur JET et leur longueur d'onde automatiquement identifiée, ce qui a permis l'accumulation d'une riche base de données de résultats, y compris aux longueurs d'ondes potentiellement les plus dangereuses pour ITER.

## Collaboration Internationale

Collaboration dans le cadre de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) [9]

La Suisse est signataire de l'Implementing Agreement sur les matériaux pour les réacteurs de fusion. Elle participe également aux autres Implementing Agreements à

travers l'Euratom. Elle est représentée au Fusion Power Coordinating Committee.

A travers l'Euratom, le CRPP poursuit des collaborations avec les laboratoires de fusion du monde entier.

## Références

[1] Site internet CRPP : <http://crppwww.epfl.ch>

[2] Site internet Universität Basel : <http://pages.unibas.ch/phys-esca>

[3] Site internet Joint Undertaking F4E : [http://fusionforenergy.europa.eu/index\\_en.htm](http://fusionforenergy.europa.eu/index_en.htm), Informations sur le Joint Undertaking  $\square$ Fusion For Energy $\square$  et ses activités, incluant des appels d'offres ou des offres d'emplois

[4] Site internet ITER-industry : <http://www.iter-industry.ch> Informations sur les offres d'emplois et sur les appels d'offres en relation avec le projet ITER ou sur la recherche européen dans le domaine de la fusion

[5] Site internet EFDA : <http://www.efda.org>, Informations sur la recherche européenne dans le domaine de la fusion

[6] Site internet ITER : <http://www.iter.org>, Informations sur le projet ITER

[7] Site internet JET : <http://www.jet.efda.org>, Informations sur le Joint European Torus JET

[8] L. Marot, P. Oelhafen, Universität Basel : Studies related to plasma-wall interaction in ITER (RA/JB), <http://pages.unibas.ch/phys-esca/fusion.html>

[9] Site internet des Accords d'exécution en fusion nucléaire de l'AIE : <http://www.iaea.org/Textbase/techno/technologies/fusion.asp>



Simone Brander

# Radioaktive Abfälle



**Titelbild:**

**Testnische des ENSI RC-Experimentes im Felslabor  
Mont Terri (Quelle: ENSI)**

**BFE Forschungsprogramm Radioaktive Abfälle**

Überblicksbericht 2011

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
CH-3003 Bern

**Programmleiter BFE (Autor):**

Simone Brander, Bundesamt für Energie (simone.brandner@bfe.admin.ch)

**Bereichsleiter BFE:**

Simone Brander (simone.brandner@bfe.admin.ch)

<http://www.bfe.admin.ch/forschungradioaktiveabfaelle>

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

## Einleitung

Das Forschungsprogramm Radioaktive Abfälle hat zum Zweck, die regulatorischen Forschungstätigkeiten des Bundes zu koordinieren. Im Rahmen des Forschungsprogramms werden neben technisch-naturwissenschaftlichen Projekten auch solche aus geistes- und sozialwissenschaftlichen Bereichen durchgeführt. Das Programm wurde von einer Arbeitsgruppe aus Vertreterinnen und Vertretern des Bundesamtes für Energie (BFE), der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) (seit 2009 Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI), der Kommission Nukleare Entsorgung (KNE), der Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA) sowie einer Fachhochschule in den Jahren 2006/07 erarbeitet und mit der Arbeitsgruppe des Bundes für die nukleare Entsorgung (Agneb) konsolidiert. Eine Ad-hoc-Untergruppe der Agneb entwarf im April 2008 einen Zeitplan für die anstehenden Forschungsprojekte und diskutierte die Abhängigkeiten der einzelnen Forschungsprojekte untereinander. An der Agneb-Sitzung vom 12. September 2008 wurde das Forschungsprogramm Radioaktive Abfälle verabschiedet. Mit diesem ist der

Forschungsbedarf im Bereich Entsorgung radioaktiver Abfälle des Bundes bis ca. 2013 abgedeckt. Das BFE betreut die geisteswissenschaftlichen Projekte und das ENSI die regulatorische Sicherheitsforschung. Sowohl das BFE als auch das ENSI initiieren die Projekte in ihrem Bereich, vergeben die Aufträge und stellen die Finanzierung sicher. Die Agneb begleitet und koordiniert die Umsetzung und Aktualisierung des Forschungsprogramms Radioaktive Abfälle. Die einzelnen Forschungsprojekte werden wissenschaftlich begleitet. In diesen Begleitgruppen sind je nach Projekt die entsprechenden Bundesstellen vertreten und/oder Hochschulen sowie weitere Expertinnen und Experten. Im Jahr 2011 bildeten die Themen Abfallbewirtschaftung im Vergleich, Lagerauslegung, Monitoringkonzepte und -einrichtungen (ENSI), sowie Werthaltungen und Meinungen (BFE) die Schwerpunkte des Forschungsprogramms.

IEA Klassifikation: 4.1 Nuclear  
Schweizer Klassifikation: 3.1.2 Radioaktive Abfälle

## Programmschwerpunkte

Das Forschungsprogramm Radioaktive Abfälle umfasst für die Jahre 2008–2012 die folgenden Schwerpunkte:

- Langzeitaspekte: Beobachtungsphase, Wissenserhalt, Markierungskonzepte;
- Sachplanverfahren geologische Tiefenlager: Kommunikation mit der Gesellschaft;
- Wahrnehmung, Meinungsbildung und Akzeptanz: Werthaltungen und Meinungen;
- Lagerkonzepte: Abfallbewirtschaftung im Vergleich, Schutz der Umwelt, Pilotlager, Monitoringkonzepte, Schnell-/Selbstverschluss, erleichterte Rückholbarkeit, materialwissenschaftliche Fragen, Sicherheitskriterien für lange Zeiträume, Folgen aus Ungewissheiten über Parameter;
- Ethik/Recht: Umweltpolitische Fragen, Schutzziele, Gesellschaftliche Veränderung und Entsorgung.

### Ausblick

Im Jahr 2012 wird das BFE das Projekt «Gesellschaftliche Veränderung und Entsorgung aus dem Schwerpunkt Ethik/Recht» starten und durchführen.

Das Projekt «Abfallbewirtschaftung im Vergleich» wird im Jahr 2012 abgeschlossen werden.

Im Jahr 2012 werden bei den Projekten «Lagerauslegung, Pilotlager: Auslegung und Inventar, Monitoringkonzept und -einrichtungen» die in den drei Projektplänen aufgezeigten Arbeitspakete gestartet. Zu den geplanten Arbeitssitzungen und Kolloquien sollen nationale wie internationale Expertinnen und Experten beigezogen werden, um ein möglichst umfassendes Bild von Fachmeinungen zu den aufgeworfenen Fragen einzuholen. Die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete werden ausgewertet und dokumentiert.

## Highlights aus Forschung und Entwicklung

### Wissenserhalt und Markierungskonzepte

Der Bund hat gemäss Kernenergiegesetz (KEG) und -verordnung dafür zu sorgen, dass die Informationen über Tiefenlager langfristig erhalten bleiben. Nach Artikel 40 Absatz 7 des KEG schreibt der Bundesrat «die dauerhafte Markierung des Lagers vor». Damit sollen Informationen über die Lage und den Inhalt eines Tiefenlagers lange über dessen Verschluss hinaus erhalten bleiben.

Um die Markierungsfrage auf internationaler Ebene koordiniert anzugehen, beteiligt sich die Schweiz an einem Projekt der Nuklearen Energieagentur (NEA) – einem spezialisierten Organ der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD). Ziel dieses Projekts ist es, bis ins Jahr 2013 ein gemeinsames Dokument zu erarbeiten, welches verschiedene Themenbereiche abdecken soll, damit – basierend auf den selben internationalen Standards – jedes Land einen passenden Aktionsplan zusammenstellen kann.

Am 24. und 25. Februar 2011 traf sich die Arbeitsgruppe zu einer Sitzung in Paris, diskutierte die gemeinsamen Ziele, das weitere Vorgehen und die Planung des Workshops im Oktober 2011.

Um sich eine Übersicht über die rechtlichen Grundlagen, die unterschiedlichen Zeithorizonte und den Stand der Umsetzung der Markierung in den einzelnen OECD-Länder sowie über die Bedürfnisse der Arbeitsgruppenmitglieder in Bezug auf die zu führende internationale Diskussion zur Markierung zu verschaffen, beantworteten die mitarbeitenden Länder im Laufe des Jahres 2011 zwei Fragebogen zuhanden der NEA.

Vom 11.–13. Oktober 2011 traf sich die Arbeitsgruppe zu einem Workshop in Paris. Ziel war es, Fachpersonen aus möglichst unterschiedlichen Disziplinen einzuladen, die einen Beitrag zur Markierung und zum Wissenserhalt von geologischen Tiefenlagern leisten können. So beschäftigte sich die Arbeitsgruppe mit so unterschiedlichen Themen wie Archäologie, Sozialwissenschaften (Geschichte), Wissensmanagement, Wissenserhaltung und

Wissensverlust bei konventionellen Deponien und über Archive. Die Schweiz war mit Präsentationen über das Bundesarchiv, zur BFE-Literaturstudie zur Markierung, zum Vergleich zwischen konventionellen und radioaktiven Abfällen und zum Wissensverlust über konventionelle Deponien vertreten. Die Ergebnisse des Workshops werden ausgewertet und sollen an einer weiteren Sitzung im Frühling 2012 diskutiert werden.

### Werthaltungen und Meinungen

Im Frühling 2010 wurde das Forschungsprojekt «Werthaltungen und Meinungen in der Entsorgung radioaktiver Abfälle» gestartet. Das Forschungsprojekt dient dazu, neue und aktuelle Informationen über die Werte- und Meinungslandschaft bezüglich der Entsorgungsthematik in der Schweiz zu gewinnen. Im Mai 2011 traf sich die Begleitgruppe zur vierten und letzten Sitzung. Das Projektteam der ETH präsentierte die Ergebnisse der durchgeführten Interviews. Insgesamt wurden 42 Personen aus betroffenen und nicht-betroffenen Gemeinden interviewt. Die Interviews wurden summarisch transkribiert und mit einer Inhaltsanalyse aufgearbeitet. Es wurde eine Rangliste mit den Häufigkeiten der genannten Themen mit einem Wertebezug erstellt. Die fünf meistgenannten Themen sind Sicherheit und Kontrolle, Information der Bevölkerung, Vertrauen und Konfidenz, Standort und Standortfindungsprozess sowie Verantwortung. Es zeigte sich, dass weitere Kategorien ohne direkten Werte-Bezug gebildet werden konnten: Sachzwang, Energiestrategie, Mitgestaltung und Mitentscheidung.

An der 9. Schweizerischen Energieforschungskonferenz im November 2011 wurden die Ergebnisse des Forschungsprojekts vom Projektteam der ETH vorgestellt und gleichzeitig der Schlussbericht zum Forschungsprojekt veröffentlicht. Weiter wurde mit der Erarbeitung einer Broschüre für die Verantwortlichen in den Standortregionen des Sachplanprozesses begonnen, welche aufgrund der Forschungsergebnisse konkrete Hinweise und Tipps enthalten soll, wie die Mei-

nungen der breiten Bevölkerung in die laufenden Diskussionen einbezogen werden kann.

### Abfallbewirtschaftung im Vergleich

Das ENSI bearbeitet das Projekt «Abfallbewirtschaftung im Vergleich» zusammen mit dem Bundesamt für Umwelt (BAFU), dem Bundesamt für Gesundheit (BAG), sowie der Kommission für nukleare Sicherheit (KNS). Für spezifische Fragestellungen wurden Spezialistinnen und Spezialisten der Nuklearindustrie (Abfallproduzierende und die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra) einbezogen. Das Projekt beinhaltet strategische und technisch-wissenschaftliche Überlegungen zur aktuellen Bewirtschaftung der radioaktiven und nicht radioaktiven Abfälle. Sie betreffen unter anderem die Abfallminimierung, den Umgang mit Organikahaltigen radioaktiven Abfällen und die Verbringung metallischer Werkstoffe in geologische Tiefenlager.

Die Zielsetzung für das Projekt «Abfallbewirtschaftung im Vergleich» ist eine systematische Analyse der heutigen Bewirtschaftungspraxis für radioaktive und nicht radioaktive Abfälle. Es wird geprüft, ob relevante Regelungen und Prinzipien des Umweltschutzgesetzes in der Gesetzgebung zur Bewirtschaftung radioaktiver Abfälle nicht oder nur ungenügend berücksichtigt werden. Die Studie soll aufzeigen, wo bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle diesbezüglich Handlungsbedarf besteht und welche Massnahmen angezeigt sind. In Bereichen, wo kein Handlungsbedarf besteht, soll die Studie dafür überzeugende Begründungen liefern.

Im Berichtsjahr wurden die vorgesehenen Arbeiten bezüglich Vermeidungspotenzial und Behandlungsverfahren mit einem Fachgespräch am Paul Scherrer Institut (PSI, Sektion Rückbau und Entsorgung) in Bezug auf die Bewirtschaftung der radioaktiven Abfälle aus dem Zuständigkeitsbereich des BAG (Medizin, Industrie und Forschung) abgeschlossen. Im Hinblick auf eine möglichst geringe Gasproduktionsrate im geologischen Tiefenlager

stand einmal mehr die Vermeidung metallischer Abfälle im Vordergrund. Wichtige Behandlungsverfahren zu diesem Ziel sind Abfalltrennung, Wiederverwertung, Abklinglagerung und Freimessung. Brennbar (organische) Abfälle werden kompaktiert und anschliessend in der Plasma-Anlage des ZWILAG (Würenlingen) verbrannt. Der Einsatz von radioaktivem Graphit aus dem DIORIT-Forschungsreaktor als Zuschlagstoff für Zementmörtel und dessen Verwendung zur Konditionierung von metallischen DIORIT-Abfällen stellt ein innovatives, eigens am PSI entwickeltes Verfahren dar. Die Ausbildung der Mitarbeitenden in Hinblick auf die Vermeidung radioaktiver Abfälle hat am PSI einen hohen Stellenwert. Das Inventar der Stilllegungsabfälle aus den Grossforschungsanlagen (PSI-West und CERN) wird derzeit in Zusammenarbeit mit der Nagra überarbeitet und dokumentiert.

Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus den jetzt abgeschlossenen Arbeiten wurden in einem Berichtsentwurf zusammengefasst und den Projektpartnern am 24. Oktober 2011 anlässlich der vierten Projektsitzung vorgestellt. Die Bereinigung des Schlussberichts ist bis April 2012 vorgesehen.

## **Lagerauslegung, Pilotlager: Auslegung und Inventar, Monitoringkonzept und einrichtungen**

Die Kernenergieverordnung (KEV, Art. 64) gibt vor, dass die untertägigen Anlagen eines geologischen Tiefenlagers für radioaktive Abfälle ein Hauptlager, ein Pilotlager und Testbereiche umfassen. Das Pilotlager enthält einen kleinen, aber repräsentativen Anteil des Lagerinventars. Hier wird nach der Einlagerung das Verhalten der Abfälle, der Verfüllung und des Wirtgesteins bis zum Ablauf der Beobachtungsphase überwacht. Die Ergebnisse dienen der Erhärtung des Sicherheitsnachweises und müssen auf die Verhältnisse im Hauptlager übertragbar sein.

Das Kernenergiegesetz (KEG, Art. 3) fordert vor dem Verschluss eines Tiefenlagers eine Beobachtungsphase, zu der die Anforderungen in der KEV (Art. 68) konkretisiert werden. Der Standort

des Lagers wird jedoch bereits vor den Bauarbeiten in einem Felslabor überwacht. Das Monitoring während der einzelnen Lagerphasen kann einerseits von der Oberfläche aus, andererseits auf Lagerniveau, d. h. im Hauptlager, in den Testbereichen (Felslabor) und anhand der Messinstrumentierung um das Pilotlager erfolgen. Die Ergebnisse dieser Überwachung dienen der Erhärtung des Sicherheitsnachweises und bilden die Grundlage für den Entscheid über den endgültigen Verschluss des Tiefenlagers.

Im Hinblick auf die Konkretisierung dieser gesetzlichen Anforderungen, aber auch als wichtige Vorbereitung für die Platzierung eines untertägigen Lagers, der Zugangsbauwerke und Oberflächenanlagen im Rahmen des Sachplans geologische Tiefenlager, hat das ENSI im Jahre 2010 drei Projekte gestartet. Diese gegenseitig eng miteinander verknüpften Projekte tragen die Titel «Lagerauslegung, Pilotlager: Auslegung und Inventar» und «Monitoringkonzept und einrichtungen». Die Projekte befassen sich mit folgenden Aspekten:

Das Projekt «Pilotlager: Auslegung und Inventar» untersucht die notwendigen Anforderungen an das Pilotlager, an dessen Platzierung, Bestückung und die wichtigsten zu überwachenden Parameter. Das Projekt dauert bis Mitte 2013. Im Berichtsjahr wurden die damals von der EKRA formulierten Anforderungen an ein Pilotlager (diese wurden später in KEG/KEV übernommen) mit ehemaligen EKRA-Mitgliedern diskutiert und über den aktuellen Stand zum Monitoringprogramm der Andra und zum laufende Monitoring-Projekt MoDeRn (Monitoring Developments for Safe Repository Operation and Staged Closure) des 7. EU-Rahmenprogrammes informiert.

Das Projekt «Monitoringkonzept und -einrichtungen» fokussiert auf alle Schritte der Überwachung, angefangen von der dem Bau eines Felslabors vorangehenden Umweltüberwachung bis zur Möglichkeit, nach Verschluss des Lagers die Überwachung fortzusetzen. Das Projekt soll dem ENSI einen möglichst breiten und vollständigen Überblick über mögliche Monitoringkonzepte und Techniken verschaffen. Es soll zudem Entscheidungsgrundla-

gen liefern, die für die Festlegung der Anforderungen an die Überwachung eines Pilotlagers gestellt werden. Die Aktivitäten des Projekts laufen parallel zu den Aktivitäten und Resultaten des internationalen EU-Forschungsprogramms MoDeRn, das sich mit allen Aspekten des Monitorings im Umfeld eines geologischen Tiefenlagers auseinandersetzt. Im Berichtsjahr wurden die Aktivitäten von MoDeRn verfolgt, verknüpft mit der Teilnahme an einem internationalen Workshop, wo Monitoringstrategien und neue technologische Entwicklungen diskutiert wurden. Das schweizerische Projekt dauert unter Berücksichtigung der Dauer des EU-Projekts MoDeRn bis Ende 2013.

Das Projekt Lagerauslegung schliesslich beschäftigt sich mit den Grundzügen der Auslegung der verschiedenen Lagerteile, wobei die lokale geologische Situation und die Eigenschaften des gewählten Wirtgesteins zu berücksichtigen sind. Das Projekt dauert bis Mitte 2013. Beteiligt sind Vertreter des ENSI und seiner Expertinnen und Experten (ETH Zürich, Basler & Hofmann), der Kantone und der Nagra. Im Berichtsjahr wurde anlässlich mehrerer Sitzungen eine Frageliste von ca. 60 Fragen erarbeitet, die sowohl übergeordnete Aspekte als auch Aspekte spezifisch für die beiden Lager für schwach- und mittelaktive sowie für hochaktive Abfälle umfassen. Bei der Beantwortung der Fragen wurde in Vorbereitung zur Etappe 2 des Sachplans geologische Tiefenlager und der Veröffentlichung der Standortvorschläge der Nagra für Oberflächenanlagen die Aspekte zu den Zugangsbauwerken (Schacht und/oder Rampe) intensiv diskutiert. Es wurde festgehalten, dass Schächte und Rampen grundsätzlich bautechnisch machbar sind und keine grundlegenden Sicherheitsbedenken zu Schacht oder Rampe vorhanden sind. Dies ist eine wichtige Voraussetzung dafür, dass Oberflächenanlagen auch ausserhalb der geologischen Standortgebiete (im so genannten Planungssperimeter um die Standortgebiete) platziert werden können.

## Nationale Zusammenarbeit

Im Auftrag der Agneb führt das BFE das Forschungssekretariat des Forschungsprogramms Radioaktive Abfälle. Das Forschungssekretariat stellt im Hinblick auf die Umsetzung der geplanten Forschungsprojekte die Koor-

dination mit dem ENSI und den anderen Bundesstellen sicher. Die Agneb wurde am 2. September 2011 über die Ergebnisse des Forschungsprojektes «Werthaltungen und Meinungen» informiert.

## Internationale Zusammenarbeit

### OECD/NEA – Radioactive Waste Management Committee

Im März 2011 fand das 44. Treffen des Radioactive Waste Management Committee (RWMC) der OECD/NEA in Paris (F) statt. Inhaltliche Schwerpunkte bildeten die Themen «Markierung und Dokumentation», «Strahlenschutzprinzipien und -kriterien für die geologische Tiefenlagerung» sowie «Nationale Entsorgungsprogramme der Mitgliedstaaten». Die Berichterstattung aus diversen Arbeitsgruppen sowie aktuelle Informationen über die Fortschritte und Arbeiten im Bereich Entsorgung der Mitgliedstaaten sowie der IAEA, der OECD und der EU ergänzten die drei Schwerpunkte und ermöglichten den gegenseitigen Erfahrungsaustausch.

### OECD/NEA – Forum on Stakeholder Confidence

Nach Frankreich (2009) fand in Schweden unter dem Thema «Actual Implementation of a Spent Nuclear Repository: Seizing Opportunities» vom 4.–6. Mai 2011 in Östhammar ein nationaler Workshop statt. Zu Beginn wurden nebst der Vorstellung der beiden Gemeinden Oskarshamn und Östhammar, das schwedische Entsorgungsprogramm erläutert. Die beiden Gemeinden standen in der Auswahl für ein HAA-Lager, der Entscheid fiel auf die letztere Gemeinde. Interessant war aus Schweizer Optik unter anderem, dass Umweltorganisationen, die gewisse Kriterien erfüllen, Beiträge für ihre Arbeit aus dem Entsorgungsfonds («Nuclear Waste Fund») erhalten, sowie das grosse Vertrauen aller Beteiligten in die Sicherheitsbehörde (SSM).

Vom 13.–15. September fand in Paris das 12. jährliche Treffen statt. Themen waren nebst dem Informationsaustausch über die Tätigkeiten des RWMC und Berichte aus den Mitgliedsländern u. a. die Situation in Japan nach dem Reaktorunglück in Fukushima, der Einsatz von «Social Media» im Einbezug von Stakeholderinnen und Stakeholdern sowie Methoden für frühen Einbezugs Betroffener.

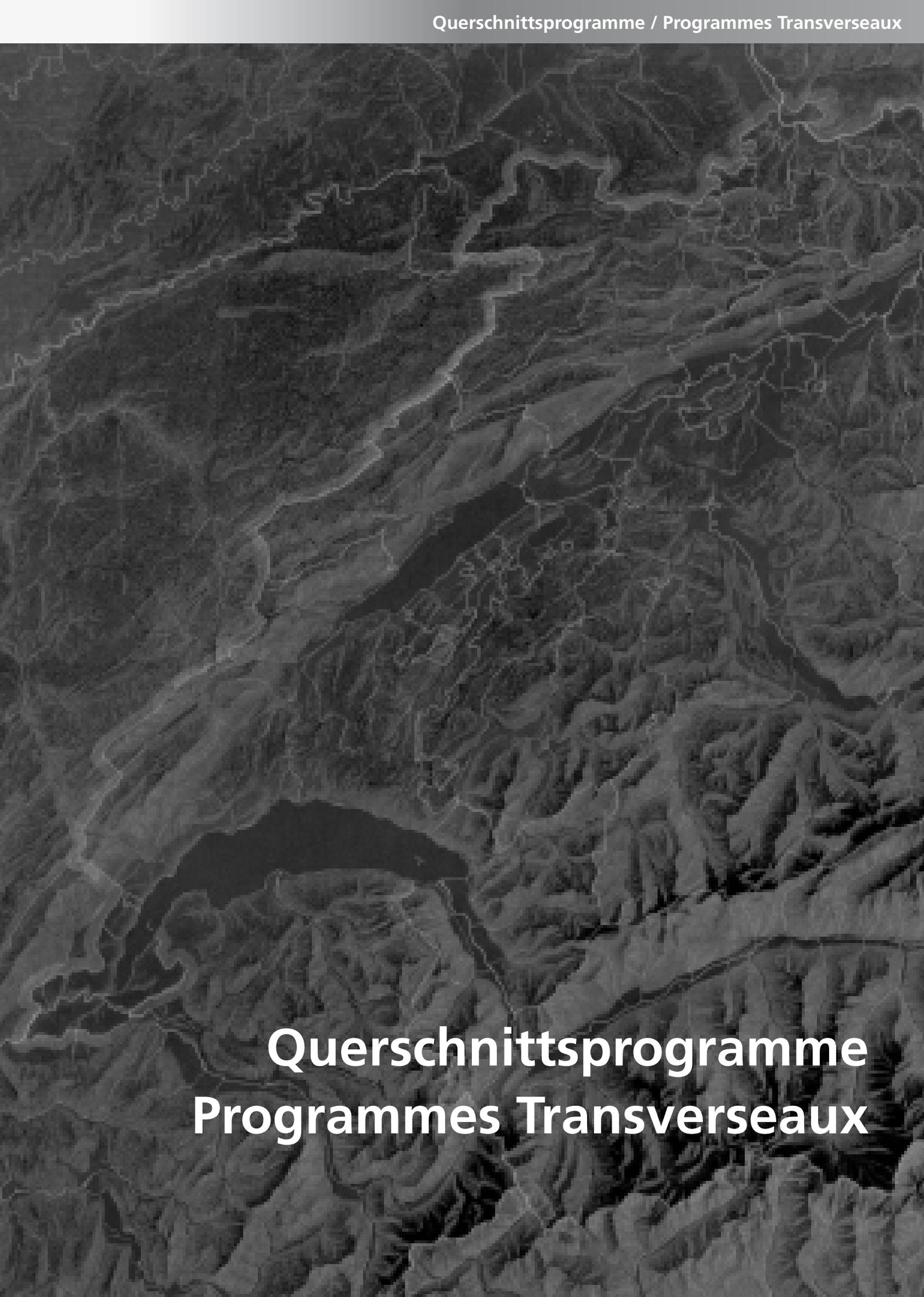
### Internationale Zusammenarbeit: ENSI

Die Mitarbeit in internationalen Arbeitsgruppen bietet dem ENSI Gelegenheit, alle relevanten Fragestellungen im Bereich der Entsorgung in geologischen Tiefenlagern im europäischen Rahmen zu verfolgen und bezüglich Stand von Wissenschaft und Forschung über die aktuellen Entwicklungen informiert zu bleiben. Die Resultate dieser Arbeiten fliessen in die Begutachtung im Rahmen des Sachplans geologische Tiefenlager ein.

Neben der Beteiligung des ENSI an der internationalen Forschung im Felslabor Mont Terri engagiert sich das ENSI im Rahmen internationaler Programme zur Entsorgung (EU-Projekte) und arbeitet in verschiedenen internationalen Gremien mit. Das 2009 gestartete vierjährige Forschungsprojekt FORGE («fate of repository gases») der Europäischen Union dient der Erforschung der in einem geologischen Tiefenlager durch Korrosion oder Zersetzung produzierten Gase, dem damit verbundenen Gasdruckaufbau und dem Abtransport des Gases durch ein wenig durchlässiges Medium (z. B. ein tonreiches Gestein). 2010 und 2011 wurden Vergleichsrechnungen von den teilnehmenden Gruppen durchgeführt. Dabei wurde der zweidimensionale Gastransport in einem geologischen Tiefenlager modelliert. Der Vergleich der Ergebnisse zeigte, dass die Berechnungen des ENSI einem internationalen hohen Standard entsprechen. Im Rahmen eines Forschungsprojekts verfolgt das ENSI eng die Aktivitäten am vierjährigen EU-Forschungsprogramm MoDeRn («monitoring developments for safe repository operation and staged closure», 2009–2013). Im Rahmen dieser Mitarbeit verfolgt das ENSI die Monitoringkonzepte und -strategien, sowie die technischen Entwicklungen auf dem Gebiet der Umweltüberwachung und Messtechnik. Im Rahmen der OECD-NEA Arbeitsgruppe IGSC («Integration Group for the Safety Case») beschäftigt sich die Untergruppe «Working Group on Measurements and Physical Understanding of Groundwater Flow through Argillaceous Media» oder kurz «Clay Club» genannt, mit spezifischen Aspekten des Stofftransportes in Tongesteinen, dem in der Schweiz bevorzugten Wirtgestein für die geologische Tiefenlagerung. In dieser Untergruppe sind Behörden (u. a. das ENSI) und Organisationen aus neun Ländern vertreten, die sich mit der si-

chere Entsorgung radioaktiver Abfälle in Tongesteinen befassen. Ziel des Clay Clubs ist es, den internationalen Stand der Wissenschaft in der Tongesteinsforschung zu verfolgen, den Kenntnisstand der sicherheitsrelevanten Prozesse und Parameter von Tongesteinen zu diskutieren, allfällige Lücken zu erkennen und mit gemeinsamen Projekten zu schliessen. 2011 stand der Abschluss zwei vom «Clay Club» initiierten Review- und Syntheseberichte («CLAYTRAC: Natural Tracer Profiles Across Argillaceous Formations» und «SELF-SEALING of Fractures in Argillaceous Formations») im Vordergrund der Arbeiten. Der Clay Club führte ferner im September 2011 eine internationale Fachtagung zum Thema «Imaging and Nano Scale Characterisation of Clays» an der technischen Hochschule in Karlsruhe (D) durch. Die Tagung zeigte, dass der Stofftransport in Tongesteinen stark vom Konsolidierungsgrad des Gesteins, von der Porosität und Architektur des Porenraumes, der Permeabilität,

der Wasserchemie sowie der Tonmineralogie (Sorptionsprozesse, Quellvermögen) abhängt. Zum besseren Verständnis des Stofftransportes ist ein Einblick in den Nano-Skalenbereich notwendig. Ziel des Workshops war es deshalb, den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik auf diesem Gebiet aufzuzeigen. Die heute verfügbaren Techniken sind klassische röntgenographische-elektronenmikroskopische-spektroskopische Methoden. Dazu kommen Neuentwicklungen, wo Spallationsneutronen- oder Synchrotron-Quellen zur Analyse von Nanostrukturen in Tongesteinen verwendet werden. Für das ENSI stellt die Mitarbeit im Clay Club eine wichtige internationale Informationsplattform für die Tongesteinsforschung dar, in der Vertreterinnen und Vertreter der Hochschulen, der Industrie, der Fachbehörden sowie der Endlagerprojektanden ihr Wissen einbringen und austauschen können.

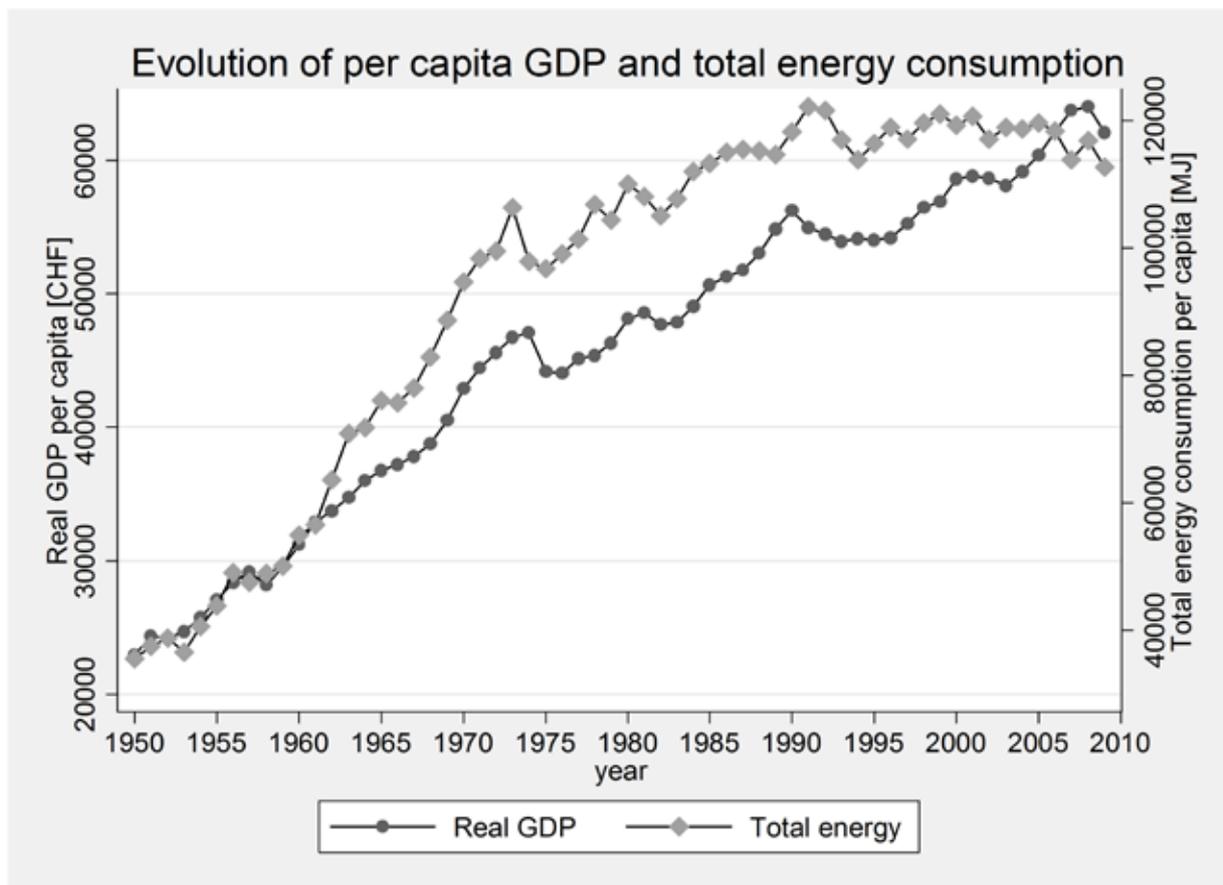


**Querschnittsprogramme  
Programmes Transverseaux**



Nicole Mathys

# Energie – Wirtschaft – Gesellschaft



**Titelbild:****Wie können Wachstum und Energiekonsum entkoppelt werden?**

Eine Erhöhung der Energieeffizienz ist zwingend notwendig, um die Ziele der neuen Energiestrategie 2050 des Bundes zu erreichen.

**BFE Forschungsprogramm Energie–Wirtschaft–Gesellschaft**

Überblicksbericht 2011

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
CH–3003 Bern

**Programmleiter BFE (Autor):**

Dr. Nicole A. Mathys, BFE (Nicole.Mathys@bfe.admin.ch)

**Bereichsleiter BFE:**

Dr. Nicole A. Mathys (nicole.mathys@bfe.admin.ch)

[www.ewg-bfe.ch](http://www.ewg-bfe.ch)

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

## Einleitung

Es sind Individuen und Firmen, welche in ihrem Alltag Energie verbrauchen und energierelevante Investitionen tätigen. Im Forschungsprogramm Energie–Wirtschaft–Gesellschaft (EWG) werden ökonomische, soziologische, psychologische sowie politologische Fragestellungen bezüglich der Umwandlung, der Verteilung und der Nutzung von Energie untersucht. Ziel ist es, Marktversagen sowie gesellschaftlich ungewollte Situationen zu identifizieren und geeignete energiepolitische Instrumente zu entwickeln, welche bestimmte energiepolitische Ziele, zum grösstmöglichen gesamtwirtschaftlichen Wohlstand führen. Das Forschungsprogramm dient sowohl der Erarbeitung neuer als auch der Überprüfung bestehender politischer Instrumente.

Als Querschnittsprogramm befasst sich EWG also mit der ganzen Wertschöpfungskette der Energie. Auf der Umwandlungsseite erlaubt dies, die verschiedenen Energietechnologien, sowohl für effiziente Energienutzung als auch erneuerbare und konventionelle Energien nebeneinander zu stellen. Auf der Konsumentenseite wird energierelevantes Verhalten detailliert analysiert und es wird versucht, die treibenden Ursachen des Energieverbrauches zu identifizieren.

Energiemärkte weisen verschiedene Unvollkommenheiten auf, was dazu führen kann, dass nur durch Intervention des Staates volkswirtschaftlich effiziente Resultate möglich sind. In diesen Fällen ist die Intervention des Staates nötig. Marktlücken können

zum Beispiel durch folgende Aspekte hervorgerufen werden. (i) Energie ist ein essenzielles Gut, das heisst: für jede wirtschaftliche Aktivität wird Energie benötigt. Dadurch steht nicht nur der Preis, sondern auch die Versorgungssicherheit und der Service Public im Fokus. (ii) Leitungsgebundene Energieträger haben die Eigenschaft eines natürlichen Monopols, da der Bau von parallelen Netzen nicht wirtschaftlich ist. (iii) Viele Entscheide sind durch lange Investitions- und Nutzungsdauern gekennzeichnet. In solchen Fällen müssen die Akteure langfristige Prognosen annehmen. Dies bringt zwei Arten von Schwierigkeiten mit sich. Erstens muss mit Unsicherheit umgegangen werden und zweitens müssen Geldflüsse in der Gegenwart mit solchen in der Zukunft verglichen werden. (iv) Viele technische Energiesysteme bergen die Gefahr massiver Unfälle. Unfälle, welche nicht durch den Verursacher getragen werden können und die öffentliche Sicherheit beeinträchtigen können. Der Staat ist daran interessiert, diese Risiken zu minimieren. (v) Die Nutzung vieler Energieträger führt zu Emissionen von Schadstoffen. Zurzeit sind die negativen Effekte dieser Emissionen noch nicht in den Preisen reflektiert (Externalität), was zu nicht optimalen Anreizen bei den Akteuren führt. (vi) Die oben genannten Schadstoffemissionen (z.B. CO<sub>2</sub>-Emissionen) und die Knappheit der fossilen Energieträger rücken schlussendlich auch Entscheidungen betreffend der Generationengerechtigkeit ins Licht. Energiepolitik ist aus all diesen Gründen nötig. Sie versucht gleichzeitig so verschiedene

Ziele wie Versorgungssicherheit, Preiswürdigkeit, gesellschaftliche Gerechtigkeit und Umweltverträglichkeit zu erfüllen.

Die in den nächsten Jahren und Jahrzehnten anstehenden Änderungen des Energiesystems und somit der Gesellschaft und der Wirtschaft werden zu Strukturänderungen und damit zu gesellschaftlichem Nutzen aber auch volkswirtschaftlichen Kosten führen. Die Identifikation von optimalen Instrumenten, welche die gewollten Anreize geben, zur Zielerreichung führen und gleichzeitig die Kosten für die Volkswirtschaft so niedrig wie möglich halten, ist daher unerlässlich. Ein besseres Verständnis von Aspekten, welche über die technischen Möglichkeiten hinaus gehen und das individuelle und unternehmerische Verhalten und somit die Märkte beeinflussen, ist die nötige Basis für die Konzipierung effizienter Massnahmen.

Das im Forschungsprogramm erarbeitete Wissen ist die Grundlage für die Behandlung sowohl politischer Geschäfte als auch für die längerfristige Ausrichtung der Energiepolitik und die Weiterentwicklung der internationalen Energieforschung.

IEA Klassifikation: 7.2 Other

Schweizer Klassifikation: 4.1 Energiewirtschaftliche Grundlagen

## Programmschwerpunkte

Das Forschungsprogramm EWG befasst sich mit den energiepolitischen Rahmenbedingungen und dem Verhalten der Akteure in den drei Wirtschaftssektoren «Haushalte» (Gebäude und Elektrogeräte), «Verkehr», «Dienstleistungen und Industrie», wie sie auch den Perspektivmodellen zu Grunde liegen. Dazu kommt der Schwerpunkt «Energiewandlungssektor», in welchem spezifische Fragen betreffend der Strom- und Wärmezeugung sowie der Energieverteilung adressiert werden. Forschungsarbeiten im Bereich «Innovation und Adoption» sollen zu einem besseren Verständnis der Generierung und Übernahme von neuen Technologien und Konzepten führen. Studien, welche politische, ökonomische und sozialen Rahmenbedingungen und deren Effekte sektorübergreifend analysieren, sind im Bereich «Sektor übergreifende Energiepolitik» zusammengefasst. Da dieselben Akteure auf verschiedenen Märkten tätig sind und die knappen Ressourcen in verschiedenen Bereichen verwendet werden können, ist es wichtig, das Verhalten der Marktakteure und das Zusammenspiel der Märkte besser zu verstehen. Zusätzlich werden verschiedene energierelevante Inputdaten und Informationen erarbeitet und den Forschern zur Verfügung gestellt. Dies erlaubt es, vergleichbare Ausgangslagen zu schaffen.

Das Forschungsprogramm EWG initiiert und begleitet sowohl angewandte Forschungsarbeiten an den Hochschulen, als auch politiknahe Projekte bei Beratungsfirmen. Über die letzten Jahre wurde der Anteil an Forschungsarbeiten an den Hochschulen signifikant erhöht.

### Rückblick und Bewertung 2011

Das Forschungsprogramm hat auch dieses Jahr eine breite Palette an Projekten in folgenden drei Schwerpunkten unterstützt und eng begleitet: Erstens sind verschiedene energieökonomische Modelle, jedes mit einem spezifischen Fokus, im Aufbau oder bereits aufgebaut worden. Die Modelle sollen es erlauben, die Effekte energiepolitischer Instrumente auf die Energiemärkte und die Schweizer Volkswirtschaft besser abschätzen zu können (siehe Highlight B). Zweitens soll besser verstanden werden, wie es innovative Projektideen bei KMU im Energiebereich auf den Markt schaffen und wieviel Einsparung mit neuen Technologien bei den Konsumenten tatsächlich erreicht werden kann (siehe Highlight A und C). Drittens werden verschiedene Grundlageninformationen für den Energiebereich erarbeitet. Erste Antworten auf folgende Fragen sollen gegeben werden können: Wie gross ist die wirtschaftliche Bedeutung

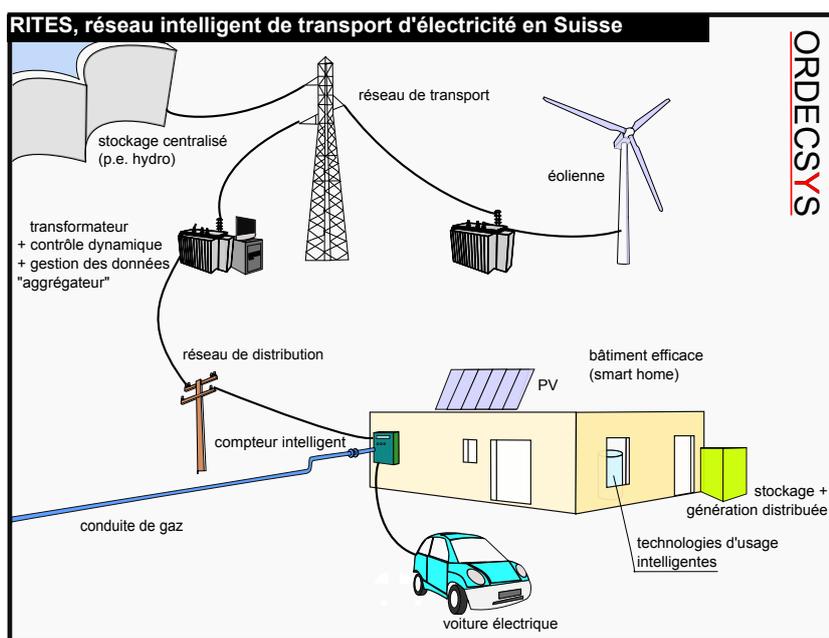
von erneuerbaren Energien? Wie sind die Energiesektoren mit dem Rest der Volkswirtschaft verknüpft? Wie reagiert der internationale Handel auf Preisänderungen und wie gut kann die Industrie Energie mit anderen Inputs substituieren? Solche Informationen werden dann zum Teil wieder in den energieökonomischen Modelle verwendet.

Zusätzlich laufen Projekte im Bereich Konsumverhalten und Gebäudesanierungen. Das Treffen «Experiments for Energy Insights» wurde bereits zum dritten Mal an der ETH Zürich durchgeführt. Doktoranden aus fünf Forscherteams und verschiedenen Disziplinen stellten den Stand ihrer Forschung vor und diskutierten spezifische Annahmen. Dieses Jahr wurden ebenfalls die Hauptarbeiten für eine Spezialpublikation zu Energiemodellierungen im Swiss Journal of Economics and Statistics zusammen mit der EPFL Lausanne geleistet.

### Ausblick

Im Fokus stehen die Herausforderungen der neuen Energiestrategie 2050 des Bundesrates und deren Umsetzung durch optimale energiepolitische Instrumente. Da das Energiesystem und damit auch die Wirtschaft grundlegend revolutioniert werden müssen, stehen Infrastrukturinvestitionen an und kommt neuen Technologien eine grosse Bedeutung zu. Anfang 2012 werden Ausschreibungen zu folgenden Themen stattfinden:

Feldstudien erlauben es, die Beweggründe realer Entscheidungen besser zu verstehen: Was sind die Treiber beim Kauf von langlebigen Konsumgütern? Wie können neue Technologien effizient eingesetzt werden? Ökonometrische Schätzungen geben Hinweise auf die Reaktion der Haushalte und der Wirtschaft auf veränderte Preise. Wie kann die Energiewende gesellschaftlich gemeistert werden? Wie kann Wohlstand gemessen werden und wie hängt er mit dem Energiekonsum und dem Energiesystem zusammen? Wie kann der Nutzen von Versorgungssicherheit ausgewiesen werden? Welche Auswirkungen haben «Principal-Agent-Situationen» im Energiekontext?



Was können Speichertechnologien und ein intelligentes Netz für den Weg in die neue Energiezukunft beitragen?

## Highlights aus Forschung und Entwicklung

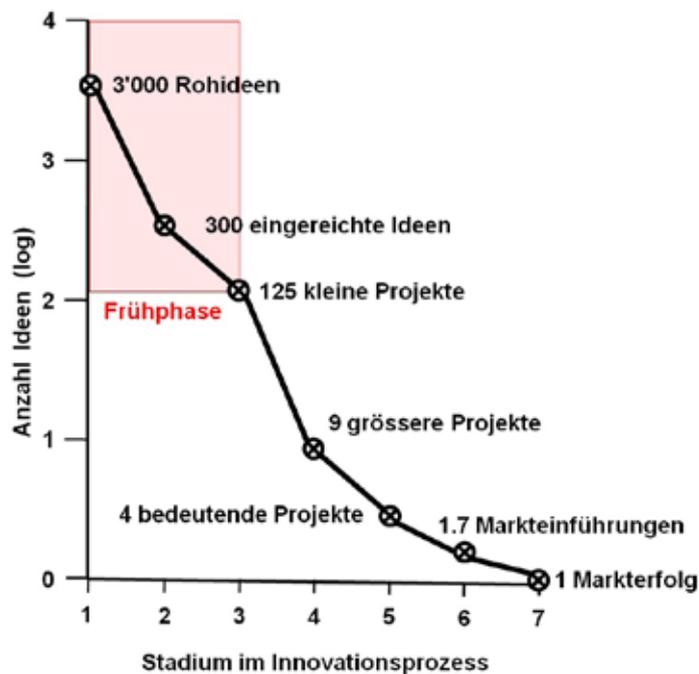
Die Energiewirtschaft, die KMU und die Konsumenten werden je einen signifikanten Beitrag zum Gelingen der Umsetzung der neuen Energiestrategie des Bundes leisten. Die folgenden drei Highlights untersuchen dazu folgende wichtige Fragestellungen: Wie finden innovative Produktideen in unseren KMUs ihren Weg auf den Markt? Wie beeinflussen die energiepolitischen und wettbewerbslichen Rahmenbedingungen Investitionen in neue Kraftwerke? Wie reagieren Konsumenten auf verschiedene Anreizmechanismen und Darstellungsarten von Verbrauchsinformationen?

### InnoPower: Untersuchung der Frühphase von Produktinnovationen bei KMU im Energiesektor

Ausgangspunkt dieses Projektes ist die Erkenntnis, dass die Schweiz beim Anteil der innovativ tätigen KMU international einen Spitzenplatz einnimmt. Im Zuge des Umbruchs im Energiesektor ergeben sich für KMU vermehrt Möglichkeiten, ihre angestammten Kompetenzen in den Bereich der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz zu übertragen.

Aufgrund früherer Forschungsarbeiten besteht ein gutes Verständnis der Prozesse im Bereich der Entwicklung sowie der Vermarktung neuer Produkte durch etablierte Unternehmen des Energiesektors. Wenig Beachtung wurde bis anhin jedoch der Frage geschenkt, wie sich KMU von ausserhalb des Energiesektors in einer frühen Phase dafür entscheiden, mittels innovativer Produkte in diesen Markt einzutreten. Basierend auf Forschungsergebnissen anderer Branchen ist davon auszugehen, dass der überwiegende Anteil entsprechender Innovationsideen niemals zur Umsetzung gelangt, da Projekte in einer frühen, noch nicht förderungswürdigen Phase abgebrochen werden. Abbildung 1 verdeutlicht diesen Umstand.

Das Ziel der Forschungsarbeit bestand folglich darin, Ansatzpunkte zur Steigerung der Anzahl und Qualität innovativer Produktideen von KMU für den Energiesektor herauszuarbeiten. In einem ersten Schritt wurde mittels Fall-



Selektionsprozess für Innovationsideen in der Frühphase (Stevens & Burley, 1997)

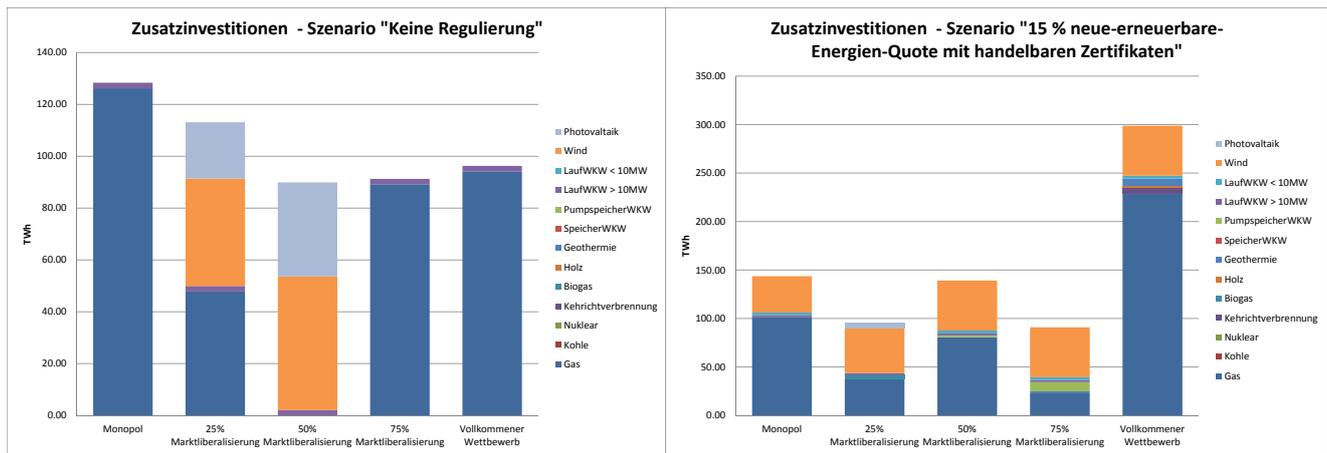
Figur 1: Von der Idee zum Markterfolg.

studien erfolgreicher Unternehmen ein Verständnis des frühen Innovationsprozesses innovativer KMU geschaffen (Prozesse der Ideenfindung, -bewertung und -selektion). Bei der Untersuchung wurde ein Fokus auf Unternehmen gelegt, welche im untersuchten Zeitraum erstmals mit einer Produktinnovation im Energiesektor aufgefallen sind. Bei grösseren KMU sowie technologischen Start-ups wurde dabei ein eher Methoden-gestütztes Vorgehen vorgefunden, wie es auch für Grossunternehmen charakteristisch und in der Literatur gut dokumentiert ist. Diese Unternehmen erstellen in der Regel einen Business Plan und klären bereits in einer frühen Phase technische Machbarkeit und potenzielle Marktnachfrage mittels strukturierter Prozesse ab. Sie treten oft mit klaren Fragestellungen an Hochschulen heran und profitieren vom Zugang zu technischer Expertise und Marktdaten.

Die Untersuchung hat zudem einige von der bestehenden Forschung abweichende Erkenntnis zutage gefördert. Kleine bis mittelgrosse KMU weichen oft sehr stark von dem oben beschriebenen Vorgehen ab und lassen sich bei der Suche nach Innovationsideen

stärker von der Intuition und Erfahrung einer oder weniger zentraler Personen im Unternehmen leiten. Formalisierte Prozesse und Entscheidungskriterien werden oftmals nicht angewendet. Bei der Evaluierung von Innovationsideen stehen weniger objektive Kriterien als vielmehr die subjektiv empfundene Machbarkeit, basierend auf den im Unternehmen vorhandenen Kompetenzen, im Vordergrund. Diese ebenfalls erfolgreichen Unternehmen verfolgen in der Frühphase somit eine alternative, in der Forschung noch wenig untersuchte Vorgehensweise.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde in einer zweiten Phase ein stärker auf unternehmerische Erfahrung und heuristische Entscheidungsfindung ausgerichtetes Modell der frühen Innovationsphase entwickelt. Anstelle von Prognose und Planung legt dieses grösseren Wert auf eine Beschränkung des Verlustrisikos, die unmittelbare Kontrolle von Ressourcen, die Erhaltung der Flexibilität sowie eine frühe Einbindung externer Partner. Das Modell wurde mittels einer Umfrage bei Geschäftsführern produzierender KMU getestet. Hierfür wurde eine Datenbank von rund 500 unabhängigen



Figur 2: Zusatzinvestitionen

Schweizer KMU aus allen Bereichen des Energiesektors aufgebaut. Auswahlkriterium war das Vorliegen mindestens einer Produktinnovation im Sinne einer Neuproduktentwicklung oder einer erheblichen Anpassung eines bestehenden Produktes in den letzten 5 Jahren. Zudem sollte das Unternehmen dabei eine bestehende Kompetenz erstmals in seiner Geschichte für eine Anwendung im Bereich erneuerbare Energien oder Energieeffizienz genutzt haben. Die Umfrage, welche mit einer Rücklaufquote von knapp über 30 % abgeschlossen wurde, bestätigte den Eindruck aus den Fallstudien. So kam ein strukturiertes, methodengestütztes Vorgehen in der Frühphase verstärkt bei Unternehmen im Grössenbereich von 1 bis 10 sowie bei solchen mit mehr als 50 Mitarbeitenden zum Einsatz. Unternehmen im Bereich von 10

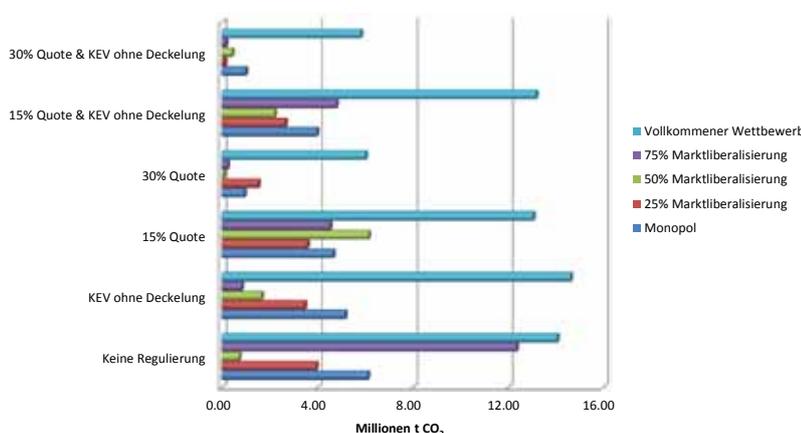
bis 50 Mitarbeitenden setzten hingegen stärker auf ein iteratives und inkrementelles Vorgehen.

Ansatzpunkte zur Unterstützung der letzteren Gruppe von Unternehmen in der Frühphase sind weniger konkrete technische Abklärungen als vielmehr die Sensibilisierung auf die Chancen des Energiesektors und das proaktive Aufzeigen potenzieller neuer Anwendungsfelder. Zudem profitieren diese Unternehmen von der Mitarbeit an Projekten mit ungewöhnlichen technischen Anforderungen sowie Möglichkeiten des Austausches mit potenziellen Anwendern im Energiesektor.

### Wirkung von Energie-, Klima- und Wettbewerbspolitik auf Technologiewahl im Schweizer Energiemarkt

Ein Ziel der energiepolitischen Strategie der Schweiz ist ein diversifiziertes Energieportfolio inklusive erneuerbarer Energieträger. Die Technologiewahl ist aber eine privatwirtschaftliche Investitionsentscheidung, die auf der Basis wirtschaftspolitischer Rahmenbedingungen getroffen wird. Energie-, Klima- und Wettbewerbspolitik beeinflussen Rahmenbedingungen und Risiken und bieten daher einen Weg zur Zielerreichung. Wie sich die Wirkungen verschiedener Massnahmen im Hinblick auf Diversität und technischen Fortschritt überlagern, ist aber bislang nicht systematisch untersucht worden. Das Projekt befasst sich deshalb mit Aus- sowie Wechselwirkungen politischer Massnahmen (Atomausstieg, Klimapolitik, Technologieförderung sowie Marktliberalisierung) auf die Investitions- und Produktionsentscheidungen im Stromsektor. Ziel der Studie ist die Abbildung von Wechselwirkungen energiepolitischer Massnahmen sowie die Identifikation von Massnahmen, die einen wesentlichen Einfluss auf die Technologiewahl besitzen. Die Technologiewahl wurde zur Darstellung des Investitions- und Produktionsverhaltens von Stromproduzenten unter Kosten-, Wetter- und Nachfrageunsicherheit mikroökonomisch modelliert. Investitionsoptionen werden über technologiespezifische Kostenstrukturen inklusive Risiken dargestellt. Auch die wetterabhängige Volatilität des Ener-

Auswirkungen der Regulierungsinstrumente auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen - Stromangebotsvariante "Neue Energiepolitik"

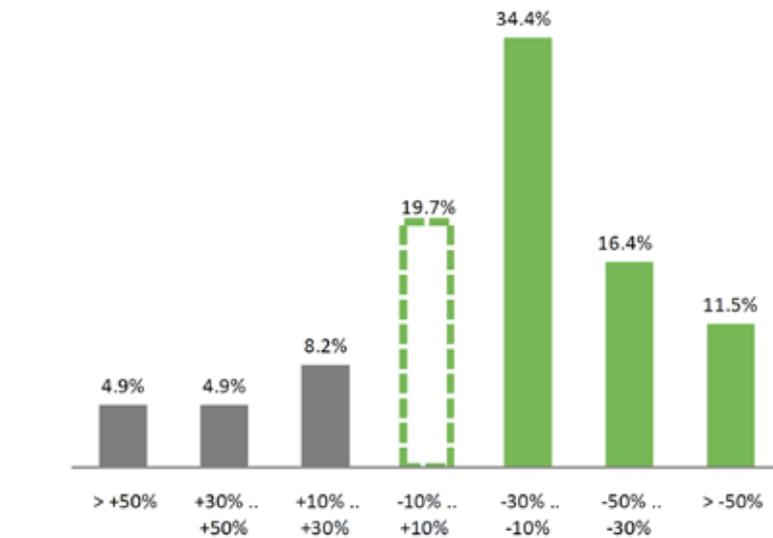


Figur 3: CO<sub>2</sub>-Emissionen.

gieoutputs von erneuerbaren Energieformen (z.B. Wind) und eine veränderliche Elektrizitätsnachfrage sind dabei berücksichtigt. Der Einbezug von Unsicherheit ist wichtig, weil Kosten- und Absatzrisiken eine erhebliche Wirkung auf die Energieträgerwahl haben und ein determinierender Faktor technologischer Diversifikation sind. In einem zweiten Schritt wurde das Modell für die Schweiz aggregiert und kalibriert. Die politischen Szenarien werden über Klima- (CO<sub>2</sub>-Abgabe), Energiepolitik (Ausstieg aus der Kernenergie, KEV ohne Deckelung, Labeling, Quoten mit handelbaren Energiezertifikaten und Elektrizitätsabgabe) und Wettbewerbspolitik (zunehmende Marktliberalisierung der Stromproduktion) abgebildet und numerisch simuliert.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein portfoliotheoretischer Mean-Variance-Ansatz (Ansatz, um ein optimales Risiko-Rendite-Verhältnis zu finden) zur Betrachtung nationaler Kraftwerkparks verwendbar ist. Allerdings sind gegenüber der typischen finanzmathematischen Methode Anpassungen an den Energiemarkt notwendig. Dies um die Möglichkeiten von Stromproduzenten zur Regulierung des Einsatzes von Kraftwerkskapazitäten als Reaktion auf Kosten- und Nachfrageschwankungen angemessen zu berücksichtigen.

Die Resultate der numerischen Analyse zeigen deutliche Wechselwirkungen zwischen Energie-, Klima- und Wettbewerbspolitik auf. In allen Szenarien investieren marktbeherrschende Firmen bevorzugt in die profitabelsten Technologien. Da diese Firmen aber das gesamte Investitionsverhalten im Energiesektor strategisch beeinflussen können, haben Regulierungsinstrumente



Figur 4: Änderung des täglichen Wasser- und Energieverbrauchs pro Haushalt nach Einsetzen der Verbrauchsanzeige in Prozent der Teilnehmer.

in unvollständig liberalisierten Energiemärkten auch unbeabsichtigte Auswirkungen. Markteingriffe verändern die Profitabilität einzelner Energieträger und dadurch die Diversifikationsanreize für Stromproduzenten. Dies kann dazu führen, dass marktbeherrschende Firmen unter Regulierung in Energieformen investieren, in welche ohne Regulierung nur kleine Firmen ohne Marktmacht investiert hätten. Dies wiederum kann zur Verdrängung bis hin zum paradoxen Effekt einer Abnahme von erneuerbaren Energien durch die Technologieförderung führen. Mit zunehmender Marktliberalisierung nehmen die unbeabsichtigten Effekte der Energiepolitik aber ab und Instrumente wirken wie beabsichtigt. Am stärksten werden Investitionen in neue erneuerbare Energien über Mengenvorgaben gefördert. Wird die Deckelung bei der

KEV aufgehoben, erübrigt sich das freiwillige Labeling grüner Energie, falls die am Markt erzielbaren Label-Zuschläge unter den Vergütungsansätzen der KEV liegen. Auswirkungen des Ausstiegs aus der Kernenergie hängen ebenso von Liberalisierung wie auch Regulierung ab. Nukleare Kapazitäten werden, falls möglich, in den meisten Szenarien durch Gaskraftwerke ersetzt, was einen erheblichen Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen zur Folge hat.

Das Projekt zeigt erstmals, wie wichtig es ist, die Themenfelder Energie-, Klima- und Wettbewerbspolitik im Energiebereich gemeinsam zu diskutieren, da sich die Ausübung von Marktmacht signifikant auf die Wirkungsweise von Regulierungsinstrumenten und den Erfolg der Förderung erneuerbarer Energien auswirkt.

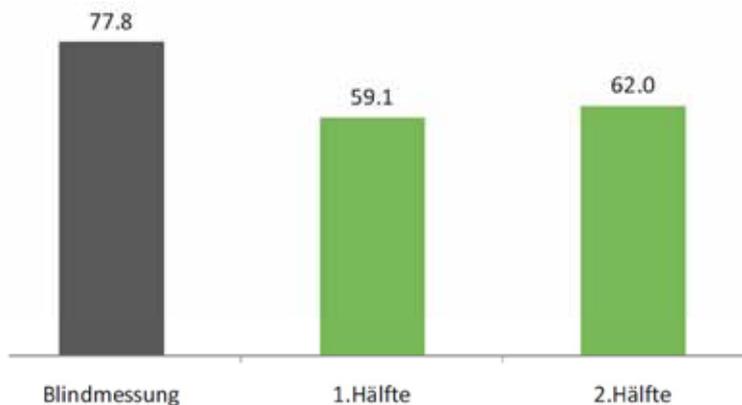
## Pilot- und Demonstrationsprojekte

### Energieeffizienz und Lastverschiebung in Haushalten durch zeitnahe Verbrauchsinformationen

Die Schweiz verfolgt ehrgeizige Energieeffizienz- und Klimaschutzziele. Nachhaltige Formen der Bereitstellung von Wärme und Elektrizität sowie der Einsatz effizienter Technologien auf

Verbraucherseite bilden eine wesentliche Voraussetzung für die Zielerreichung. Darüber hinaus wird der Energieverbrauch zu einem grossen Teil durch das Verhalten der Konsumenten bestimmt. Ob etwa ein Hauseigentümer in zusätzliche Wärmedämmung investiert, Privatpersonen sorgsam mit Warmwasser umgehen, Konsumenten Fahrzeuge mit besonders niedrigen

Emissionswerten bevorzugen oder lastvariable Stromtarife eine Akzeptanz am Markt erfahren, entscheidet letztendlich der Verbraucher – und hat, wegen der Vielzahl der Optionen, einen wesentlichen Anteil an einer nachhaltigen Entwicklung. In diesem Forschungsprojekt wurden verschiedene Massnahmen untersucht und entwickelt, die ein nachhaltiges Verhalten



Figur 5: Durchschnittliche Volumenentnahme pro Tag im Zeitverlauf (Liter).

der Bürger fördern.

Als Datenquellen zur Untersuchung effizienzsteigernder Massnahmen und zur Lastverschiebung beim Elektrizitätsverbrauch dienten das Smart-Metering-Pilotprojekt «iSmart» der BKW FMB Energie AG, die Energieeffizienz-Onlineportale des ETH-Startups BEN Energy AG, eine repräsentative Befragung von 538 Schweizern, sowie eine Feldstudie mit Echtzeit-Verbrauchsanzeigen für die Warmwassernutzung des Unternehmens Amphiro AG. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen: Konsumenten passen ihren Energieverbrauch beim Erhalt von Feedbackinformationen mitunter in erheblichem Masse an, es besteht eine prinzipielle Bereitschaft zu Lastverschiebung beim Strombezug, und das Wissen, welche Haushaltsgeräte hierzu in Frage kommen, ist bei einem ausreichend grossen Kundenkreis vorhanden. Zudem besteht ein Interesse an Tarifen, die eine nachhaltige Nutzung von Energie fördern. Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) können in diesem Zusammenhang einen wichtigen Beitrag zur Motivation und Unterstützung privater Haushalte bezüglich eines nachhaltigen Einsatzes von Ressourcen leisten.

Die Forschungsergebnisse zeigen jedoch auch, dass die Bereitschaft, sich für eine nachhaltige Energienutzung einzusetzen, stark von Details bei der Umsetzung der Massnahmen und der flankierenden Anreizmechanismen abhängt. So liessen sich bei Darstellungen der jeweiligen persönlichen Verbräuche signifikante Unterschiede

in den Einspareffekten nachweisen, je nachdem, ob vermeintlich kleine Änderungen in der Art der Verbrauchsdarstellung stattfanden. Beispielsweise führte deskriptives Feedback (sinngemäss «Ihr Verbrauch im Vergleich zum Durchschnitt ähnlicher Haushalte») zu einer deutlichen Reduktion bei Vielverbrauchern aber zu einer Steigerung bei Haushalten mit einem von Anfang an niedrigen Verbrauch. Der unerwünschte Effekt konnte jedoch durch alleinigen injunktiven Feedback (sinngemäss «Ihr Verhalten ist wünschenswert») aufgehoben werden. Weiter liessen sich mit geschickt gewählten Funktionen in Energieeffizienz-Onlineportalen signifikante zusätzliche Einsparpotenziale erzielen, etwa durch die Möglichkeit, konkrete Sparziele zu definieren, die Verwendung von Defaults (Voreinstellungen) zur Unterstützung bei der Festlegung ambitionierten, aber noch realistischer Ziele oder die geschickte Wahl von Vergleichshaushalten. Anreize wie Bonuspunkte und Gewinnspiele bilden zudem kostengünstige Massnahmen, um einen effizienten Umgang mit Energie zu fördern.

Neben den Anreizmechanismen und Darstellungsarten spielt der Kontext, in dem Nutzer Verbrauchsinformationen erhalten, eine wichtige Rolle. Wenn Feedback zeitnah erfolgte (im Idealfall während der Handlung), die Informationen ohne Aufwand zugänglich waren (direkt am Ort des Handelns) und der Nutzer grossen direkten Einfluss auf den Verbrauch hatte, liessen sich erhebliche Effekte beobachten. So erzielte eine Anzeige des Warmwasserverbrauchs, welche die Nutzer direkt

in der Dusche anbringen konnten, im Feldversuch mit 160 Personen und 3'164 Duschvorgänge Einsparungen von durchschnittliche 210 kWh pro Jahr und Haushalt bei der Warmwassernutzung. Dies entspricht ca. 20 % des Energieverbrauchs beim Duschen und damit weit mehr als bei in der Literatur dokumentierten Effekten durch weniger zeitnahes Feedback. Der Einsparungseffekt liess sich überraschenderweise sowohl für Teilnehmer nachweisen, welche zu Beginn der Studie angaben, Wasser sparen zu wollen, als auch für diejenigen Nutzer, die keine Absicht zur Verbrauchsreduktion erklärten.

Insgesamt zeigen die Studien, dass «Grüne Informationstechnologie» zur Visualisierung und Abrechnung von Verbräuchen die gewünschten Wirkungen erzielen können, die Grösse der Effekte jedoch stark von der Ausgestaltung des Feedbacks, dem Kontext der Informationsvermittlung und den flankierenden Anreizmechanismen abhängt. Massnahmen, die rein auf das rationale Kundenverhalten abzielen, greifen zu kurz. Sollen Smart-Metering-Infrastrukturen zu den erhofften Effekten bei Privatkunden führen, bedarf es eines geschickten Zusammenspiels von IKT und Verhaltenswissenschaften.

## Nationale Zusammenarbeit

Im Rahmen des Forschungsprogramms Energie–Wirtschaft–Gesellschaft wird eine intensive Zusammenarbeit mit privaten Forschungsstellen, Universitäten, Fachhochschulen, Instituten, anderen BFE-Forschungsprogrammen, anderen Bundesämtern und Kompetenzzentren gepflegt. Weiter wird auf eine intensivere Vernetzung unter den Forschungsstellen grossen Wert gelegt und es werden regelmässig themenspezifische Workshops durchgeführt. Das Forschungsprogramm unterstützt ebenfalls internationale Konferenzen, welche durch Schweizer Institute organisiert werden. Der Einbezug und die Zusammenarbeit mit den Kantonen und den interessierten Fachverbänden sind ebenfalls sehr wichtig.

Die Projekte des Forschungsprogramms werden von speziell eingesetzten Begleitgruppen betreut. Damit kann die vorhandene Fachkompetenz aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik optimal berücksichtigt werden, und die Umsetzung der Forschungsergebnisse wird erleichtert. Die Forschungsergebnisse kommen nebst der Wissenschaft den Kantonen, der Energiewirtschaft sowie verschiedenen Verbänden und Organisationen zugute. Zur Kommunikation der Schlussberichte werden Resultate jeweils unter Interessierten gestreut, an Fachtagungen und akademischen Konferenzen präsentiert und in Fachzeitschriften publiziert.

## Internationale Zusammenarbeit

In diversen Projekten sind internationale Hochschulinstitute oder Forschungsstellen direkt beauftragt oder indirekt beteiligt. Die Berücksichtigung der internationalen Forschungsliteratur und der rege Austausch an Fachkongressen, in Zeitschriften usw. stellt dabei eine Selbstverständlichkeit dar.

Die Schweiz beteiligt sich weiter an folgenden IEA Implementing Agreements:

- Energy Technology Systems Analysis Program (ETSAP) ([www.iea-etsap.org](http://www.iea-etsap.org))
- Demand Side Management (DSM), Task XXIV: Closing the Loop
- Co-Operative Programme on Smart Grids (ISGAN)

## Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(\* IEA-Klassifikation)

- |   |  |          |           |
|---|--|----------|-----------|
| <b>●</b>  | <b>ENERGIEINVESTITIONEN UND HETEROGENE PRÄFERENZEN</b>                             | R+D      | 7*        |
| Lead:   | other  | Funding: | BFE       |
| Contact:  | Urs Fischbacher <span style="float: right;">urs.fischbacher@uni-konstanz.de</span> | Period:  | 2008–2011 |
| Abstract: Was macht Personen aus, die in Energieeffizienz investieren und welche Konsequenzen ergeben sich daraus für Fördermassnahmen? Wir kombinieren Methoden der Experimentalökonomik mit Umfragen und testen inwiefern Grosszügigkeit, Ungleichheitsaversion, Zeit-, und Risiko-Präferenzen für Investitionen in Energieeffizienz relevant sind. |  |          |           |
- |   |  |          |           |
|---|--|----------|-----------|
| <b>●</b>  | <b>RESSOURCENERHALTENDE UND ENERGIEEFFIZIENTE ERNEUERUNG DES VORMODERNEN SCHWEIZER GEBÄUDEBESTANDES (RECORE)</b> | P+D      | 7         |
| Lead:   | ETH Zürich   | Funding: | BFE       |
| Contact:  | Uta Hassler <span style="float: right;">hassler@arch.ethz.ch</span>  | Period:  | 2011–2012 |
| Abstract: Die heute üblichen undifferenzierten Erneuerungsstrategien führen im vor-modernen Gebäudebestand oft zu unkontrollierten Energieeinsparungen und Ressourcenverlustsrisiken. . Am vormodernen Bestand Basel-Stadt wrd ein differenzierter, kontrollierter Absenkpfad entwickelt und validiert. |  |          |           |
- |  |  |          |           |
|--|--|----------|-----------|
| <b>●</b>   | <b>ETEM-SG: RITES</b>  | R+D      | 7         |
| Lead:  | ORDECSYS   | Funding: | BFE       |
| Contact:   | Alain HAURIE <span style="float: right;">ahaurie@ordecsys.com</span> | Period:  | 2011–2012 |
| Abstract: On développe une analyse basée sur le modèle énergétique bottom-up et régional ETEM-SG qui intègre la représentation des technologies de réseau intelligentes (smart grids) et leur lien avec l'exploitation efficace des énergies renouvelables. Le modèle retenu est compatible avec les modélisations ETEM et TIMES déjà entreprises pour le canton de Genève et la Suisse. Il comportera aussi une analyse du risque via une technique d'optimisation robuste. |  |          |           |
- |   |   |          |           |
|---|---|----------|-----------|
| <b>●</b>  | <b>RESSOURCENIMPACT NEUER ARBEITSFORMEN</b>                                   | R+D      | 7         |
| Lead:   | Ernst Basler & Partner  | Funding: | BFE       |
| Contact:  | Ingrid Kissling-Näf <span style="float: right;">ingrid.kissling@ebp.ch</span> | Period:  | 2011–2012 |
| Abstract: Neue Arbeitsformen werden sehr oft mit einer höheren Lebens- und Arbeitsqualität und einer gesteigerten Produktivität in Verbindung gebracht. Im Rahmen eines BFE-Forschungsprojekts untersucht EBP zusammen mit der Hochschule in Luzern für den Home Office Day 2012, wie die wirtschaftlichen und ökologischen Effekte von verschiedenen Arbeitsformen für verschiedene Unternehmensgrößen aussehen. |   |          |           |
- |   |   |          |           |
|---|---|----------|-----------|
| <b>●</b>  | <b>ELASTICITÉS-PRIX DE L'OFFRE DES EXPORTATIONS</b>                 |          | 7         |
| Lead:   | Uni Neuchâtel   | Funding: | BFE       |
| Contact:  | Mehdi Farsi <span style="float: right;">mehdi.farsi@unine.ch</span> | Period:  | 2011–2012 |
| Abstract: Présentation sous différents agrégats des élasticité-prix de l'offre des exportations suisses, estimées par l'approche de la maximisation du PIB. Les valeurs agrégées des élasticités sont utilisés pour caractériser la réponse de l'offre des exportations suisses aux changements des prix. |   |          |           |
- |  |   |          |           |
|--|---|----------|-----------|
| <b>●</b>   | <b>INNOPOWER: UNTERSUCHUNG DER FRÜHPHASE VON PRODUKTINNOVATIONEN BEI KMU IM ENERGIESEKTOR</b> | P+D      | 7         |
| Lead:  | Uni St.Gallen   | Funding: | BFE       |
| Contact:   | Martin Bader <span style="float: right;">martin.bader@unisg.ch</span>                         | Period:  | 2008–2011 |
| Abstract: Ziel des Projektes ist es, ein besseres Verständnis der Aktivitäten von KMU in der Frühphase der Produktinnovation zu erlangen. Diese umfassen das Identifizieren von Opportunitäten, die Ideengenerierung, frühe Selektions- und Entscheidungsprozesse sowie die Rolle der zwischen- und überbetriebliche Kooperation. Die Fragestellungen werden anhand von im Energiesektor tätigen Schweizer KMU untersucht. |   |          |           |
- |   |  |          |           |
|---|--|----------|-----------|
| <b>●</b>  | <b>MEHR SCHEIN ALS SEIN? DIE IRRFÜHRENDE WIRKUNG VON SYMBOLISCH BEDEUTSAMEN VERHALTENSWEISEN AUF DIE ENERGIEVERBRAUCHSEINSCHÄTZUNG</b> | R+D      | 7         |
| Lead:   | ETH Zürich   | Funding: | BFE       |
| Contact:  | Michael Siegrist <span style="float: right;">msiegrist@ethz.ch</span>  | Period:  | 2009–2011 |
| Abstract: Menschen tendieren dazu, für Energieverbrauchseinschätzungen einfache Faustregeln heranzuziehen. Symbolisch bedeutsamen Verhaltensweisen kommt dabei eine wichtige Rolle zu. In verschiedenen Experimenten wurde gezeigt, zu welchen Fehleinschätzungen in Bezug auf Energiefreundlichkeit und Energieverbrauch die Übergewichtung von symbolisch bedeutsamen Verhaltensweisen führen kann. Die Stabilität des Effekts konnte eindrücklich demonstriert werden. |  |          |           |

- |   |  |          |           |
|---|--|----------|-----------|
| <b>●</b>  | <b>KUNDENSPEZIFISCHE ENERGIEVERBRAUCHSINFORMATIONEN FÜR ENERGIESPAREN UND LASTVERSCHIEBUNG</b> | R+D      | 7         |
| Lead:   | ETH Zürich   | Funding: | BFE       |
| Contact:  | Thorsten Staake <span style="float: right;">tstaake@ethz.ch</span>                             | Period:  | 2010–2012 |
| Abstract: In der Studie "Kundenspezifische Energieverbrauchsdaten für Energiesparen und Lastverschiebung" untersucht das Bits to Energy Lab der ETH Zürich/Universität St.Gallen gemeinsam mit den BKW FMB, in welcher Form Informationen über den Energieverbrauch an den Kunden präsentiert werden sollen, um diesen für Energiesparen und Lastverschiebung zu begeistern. Desweiteren wird untersucht, inwiefern unterschiedliche Anreizmechanismen zu höheren Energieeinsparungen beim Kunden führen. |  |          |           |
- |  |   |          |           |
|--|---|----------|-----------|
| <b>●</b>   | <b>FORSCHUNGSPROJEKT CITE - WEITERENTWICKLUNGEN</b>                     | P+D      | 7         |
| Lead:  | ETH Zürich  | Funding: | BFE       |
| Contact:   | Lucas Bretschger <span style="float: right;">lbretschger@ethz.ch</span> | Period:  | 2011–2013 |
| Abstract: Im Rahmen dieses Projektes soll das an der ETH entwickelte Computable Induced Technical Change and Energy (CITE) Model (vgl. Projekt 101844) schrittweise weiter ausgebaut werden. Im Vordergrund steht dabei zuerst eine Verfeinerung des Energiesektors, basierend auf der kürzlich erstellten Energie-Input-Output Tabelle. Konkret sollen im Modell dabei in Zukunft mehrere fossile (Öl, Gas, Fernwärme) und nicht-fossile (Kernenergie, Wasser, Biomasse, "neue" Erneuerbare) Energieträger unterschieden werden können. |   |          |           |
- |  |   |          |           |
|--|---|----------|-----------|
| <b>●</b>   | <b>ENERGIEBEZOGENE DIFFERENZIERUNG DER INPUT-OUTPUT-TABELLE 2008</b>          | R+D      | 7         |
| Lead:  | Rütter+Partner  | Funding: | BFE       |
| Contact:   | Carsten Nathani <span style="float: right;">carsten.nathani@ruetter.ch</span> | Period:  | 2011–2012 |
| Abstract: Input-Output-Tabellen (IOT) stellen eine wichtige ökonomische Datenbasis für energiewirtschaftliche Analysen dar (u.a. mit CGE-Modellen). Das Projekt verbessert die Abbildung der energie- und transportbezogenen Transaktionen in der Schweizerischen IOT 2008. Zudem werden die Energie- und Verkehrsbranchen in der IOT deutlich stärker disaggregiert als in der publizierten IOT. Die energiebezogene IOT wird der Allgemeinheit zur Verfügung gestellt. |   |          |           |
- |   |   |          |           |
|---|---|----------|-----------|
| <b>●</b>  | <b>VOLKSWIRTSCHAFTLICHE BEDEUTUNG ERNEUERBARER ENERGIEN IN DER SCHWEIZ</b>    | R+D      | 7         |
| Lead:   | Rütter+Partner  | Funding: | BFE       |
| Contact:  | Carsten Nathani <span style="float: right;">carsten.nathani@ruetter.ch</span> | Period:  | 2010–2012 |
| Abstract: Im Projekt wird untersucht, welche wirtschaftliche Bedeutung die Nutzung erneuerbarer Energien heute in der Schweiz hat und wie sie sich voraussichtlich bis zum Jahr 2020 entwickeln wird. |   |          |           |
- |   |  |          |                     |
|---|--|----------|---------------------|
| <b>●</b>  | <b>SWISS TIMES ENERGY SYSTEM MODEL (STEM) FOR TRANSITION SCENARIO ANALYSES</b> | R+D      | 7                   |
| Lead:   | Paul Scherrer Institute (PSI)  | Funding: | BFE + PSI (in-kind) |
| Contact:  | Hal Turton <span style="float: right;">hal.turton@psi.ch</span>                | Period:  | 2010–2013           |
| Abstract: Das Ziel dieses Projektes ist das Verständnis zukünftige Entwicklungsmöglichkeiten des Schweizer Energiesystems, auf der Basis von Entwicklung und Anwendung eines technologiereichen "bottom-up" Energiemodells, STEM. STEM soll genutzt werden um Szenarien mit Strukturänderungen im Energiesystem zu untersuchen, um die Wirksamkeit zukünftige Energietechnologien und Infrastrukturoptionen zu analysieren. |  |          |                     |
- |  |  |          |           |
|--|--|----------|-----------|
| <b>●</b>   | <b>DIE WIRKUNG VON ENERGIE-, KLIMA- UND WETTBEWERBSPOLITIK AUF TECHNISCHEM FORTSCHRITT UND DIVERSITÄT IN DER SCHWEIZER ENERGIEVERSORGUNG</b> | R+D      | 7         |
| Lead:  | Uni Basel  | Funding: | BFE       |
| Contact:   | Frank Krysiak <span style="float: right;">frank.krysiak@unibas.ch</span>   | Period:  | 2008–2011 |
| Abstract: Das Projekt analysiert welchen Einfluss politische Massnahmen und wirtschaftliche Faktoren auf die Diversifikation des schweizerischen Energieportfolios besitzen. Dazu wird das Investitionsverhalten von Stromproduzenten - in Abhängigkeit von Kosten, Risiken sowie politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen - in einem mikroökonomischen Modell untersucht. |  |          |           |
- |  |   |          |           |
|--|---|----------|-----------|
| <b>●</b>   | <b>ZEITPRÄFERENZEN UND ENERGIESPAREN</b>                                      | R+D      | 7         |
| Lead:  | ETH Zürich  | Funding: | BFE       |
| Contact:   | Andreas Diekmann <span style="float: right;">diekmann@soz.gess.ethz.ch</span> | Period:  | 2009–2012 |
| Abstract: Entscheidungen über energiesparende Investitionen in Privathaushalten fallen aus ökonomischer Sicht oft nicht rational aus. Dadurch gehen teilweise hohe Einsparpotentiale verloren. Dieses Projekt geht den Ursachen solcher Entscheidungen anhand einer erneuten Befragung der Teilnehmer des Schweizer Umweltsurveys 2007 nach. Der Schwerpunkt der Studie liegt auf der Bedeutung von Zeitpräferenzen für das Energiesparen in Privathaushalten. |   |          |           |

- **SUBSTITUTION ELASTICITIES IN SWISS MANUFACTURING SECTORS BETWEEN ENERGY, CAPITAL AND LABOR** R+D 7

Lead:	other	Funding:	BFE
Contact:	Daniel Müller <a href="mailto:daniel.mueller@wirtschaftsstudien.ch">daniel.mueller@wirtschaftsstudien.ch</a>	Period:	2011–2012

Abstract: Ziel des Projekts ist die Schätzung von Substitutionselastizitäten für Schweizer Industriesektoren. Dabei schätzen wir einerseits Preiselastizitäten auf der Grundlage einer translog Kostenfunktion. Zusätzlich schätzen wir auch die technischen Elastizitäten auf der Grundlage einer nested CES Produktionsfunktion. Die Schätzergebnisse der technischen Elastizitäten können in CGE Modellen mit dem Fokus Schweiz verwendet werden.
- **ELECTRICITY MARKETS AND TRADE IN SWITZERLAND AND IST NEIGHBOURING COUNTRIES: BUILDING A COUPLED TECHNO-ECONOMIC MODELING FRAMEWORK (ELECTRA)** R+D 7

Lead:	Econability F. Vöhringer	Funding:	BFE
Contact:	Frank Vöhringer <a href="mailto:voehringer@econability.com">voehringer@econability.com</a>	Period:	2011–2013

Abstract: ELECTRA entwickelt ein gekoppeltes Simulationsmodell für Szenarien, die den Schweizer Stromsektor betreffen. Es wird u.a. den (inter-)nationalen Stromhandel in stündlicher Auflösung simulieren können. Dazu bildet ein Strommodell (neben der Schweiz) Erzeugung und Übertragung in den vier Nachbarländern ab. Gekoppelt werden das neue internationale Strommodell CROSSTEM, das Schweizer Gleichgewichtsmodell GENESwIS und das Welthandelsmodell GEMINI-E3.
- **SMART METERING, BERATUNG ODER SOZIALER VERGLEICH - WAS BEEINFLUSST DEN ELEKTRIZITÄTSVERBRAUCH?** R+D 7

Lead:	Uni Lausanne	Funding:	BFE
Contact:	Rafael Lalive <a href="mailto:Rafael.Lalive@unil.ch">Rafael.Lalive@unil.ch</a>	Period:	2010–2013

Abstract: Das Projekt untersucht die Rolle von Information auf den Elektrizitätsverbrauch von Haushalten. Die Studie analysiert dreierlei Arten von Information: Kontinuierliche und detaillierte Information über den eigenen Stromkonsum mittels eines Smart Meters, (ii) Informationsgewinn durch eine professionelle Energieberatung und (iii) Zugang zu Informationen zum Stromkonsum von vergleichbaren Haushalten.
- **TECHNOLOGICAL SUCCESSION AND SUBSTITUTION ELASTICITIES** R+D 7

Lead:	ETH Zürich / KOF	Funding:	BFE
Contact:	Peter Egger <a href="mailto:egger@kof.ethz.ch">egger@kof.ethz.ch</a>	Period:	2010–2013

Abstract: Wir erweitern ein strukturelles allgemeines Gleichgewichtsmodell des internationalen Handels nach Eaton-Kortum um den Energie-Sektor. Wir verwenden Daten von 32 OECD Ländern und kalibrieren das Modell mit heimischen Energiepreisen um die Interdependenzen zwischen länderspezifischer Energieproduktivität, Energienachfrage und Handelsliberalisierung zu untersuchen.

## Eidgenössische Energieforschungskommission (CORE) Commission fédérale pour la recherche énergétique (CORE)

Mitglied / membre	Vertreter von / représentant de
Dr. Tony Kaiser (Präsident) <i>Alstom Power, Future</i>	Grossindustrie
Alexandre Closset <i>Belenos Cleanpower (Swatchgroup)</i>	Start-up, innovative KMU
Dr. Monica Duca Widmer. <i>EcoRisana SA</i>	Ingenieurbüros, KMU
Prof. Dr. Heinz Gutscher <i>Universität Zürich</i>	Universitäten, Sozialwissenschaft
Antoinette Hunziker-Ebnetter <i>Forma Future Invest AG, CEO</i>	Investoren, Venture Capital
Prof. Dr. Etique Michel <i>École d'Ingénieurs du Canton du Vaud, Directeur</i>	Fachhochschulen
Dr. Nosedá Corrado <i>Direttore AGE SA</i>	Energiewirtschaft (Wasser und Gas)
Dr. George Allan Lustgarten <i>Technology and Business Consulting, CEO</i>	Consulting
Prof. Dr. Martha Christina Lux-Steiner <i>Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie (HZB), Institutsleitung Heterogene Materialsysteme</i>	Universitäten, internationale Beziehungen
Prof. Dr. Hans-Björn Püttgen <i>Energy Center EPFL, Directeur</i>	EPF-Lausanne
Prof. Dr. Louis Schlapbach	SNF, Kommission für Technologie und Innovation
Regierungsrat Stefan Sutter <i>Vorsteher Bau- und Umweltdepartement Appenzell I.</i>	Vertretung Kantone
Dr. Manfred Thumann <i>Konzernleitung Axpo Holding AG</i>	Energiewirtschaft (Elektrizität)
Prof. Dr. Alexander Wokaun <i>Paul Scherrer Institut, Leiter Forschungsbereich allgemeine Energie</i>	PSI, ETH Zürich, Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften, Novatlantis
Prof. Frank Krysiak <i>Professor für Umweltökonomie</i>	Universitäten, Umweltpolitik und Ökonomie
Beobachter / observateur	Amt / Office
Dr. Rolf Schmitz <i>Leiter Sektion Energieforschung</i>	BFE
Daniel Zürcher <i>Leiter Sektion Innovation</i>	BAFU
Dr. Andreas Werthmüller <i>Wissenschaftlicher Berater Multilaterale</i>	SBF
Alain Dietrich <i>Stv. Abteilungsleiter F&amp;E-Projektförderung und WTT</i>	KTI

## BFE-Forschungs- und Marktbereiche (2011) Domaines de l'OFEN pour la recherche et le marché (2011)

		Forschung <i>Recherche</i>		Markt <i>Marché</i>
	Programm <i>Programme</i>	Programmleiter <i>Chef de Programme</i>	BFE-Bereichsleiter <i>Responsable OFEN</i>	BFE-Bereichsleiter <i>Responsable OFEN</i>
Effiziente Energienutzung <i>Utilisation efficace de l'énergie</i>	1.1 Energie in Gebäuden <i>Energie dans les bâtiments</i>	C. Filleux (R. Moser)	A. Eckmanns	O. Meile
	1.2 Verkehr <i>Transports</i>	M. Pulfer	M. Pulfer	H. Scherrer
	1.3 Akkumulatoren und Superkondensatoren <i>Accumulateurs et supercondensateurs</i>			-
	1.4 Verfahrenstechnische Prozesse (VTP) <i>Technologie des procédés</i>	M. Pulfer (M. Spirig)	M. Moser	M. Stettler
	1.5 Elektrizitätstechnologien und -anwendungen <i>Technologies et utilisations de l'électricité</i>	R. Brüniger		F. Frey
	1.6 Netze <i>Réseaux</i>	M. Moser		-
	1.7 Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) <i>Couplage chaleur-force (CCF)</i>	T. Kopp (S. Renz)	A. Eckmanns (S. Hermle)	M. Muller
	1.8 Verbrennung <i>Combustion</i>	S. Renz	S. Hermle	
	1.9 Kraftwerk 2020 und Carbon Capture & Storage (CCS) <i>Centrales à gaz 2020 et CCS</i>	P. Jansohn	G. Siddiqi	
	1.10 Brennstoffzellen <i>Piles à combustible</i>	S. Oberholzer	S. Oberholzer	-
Erneuerbare Energie <i>Sources d'énergie renouvelables</i>	2.1 Wasserstoff <i>Hydrogène</i>	S. Oberholzer	S. Oberholzer	-
	2.2 Photovoltaik <i>Photovoltaïque</i>	S. Nowak		U. Wolfer
	2.3 Solare Hochtemperaturprozesse <i>Processus solaires à haute température</i>	P. Renaud		
	2.4 Solarwärme und Wärmespeicherung <i>Chaleur solaire et stockage de chaleur</i>	J.-C. Hadorn	A. Eckmanns (S. Hermle)	M. Muller
	2.5 Wärmepumpen und Kälte <i>Pompe à chaleur et froid</i>	T. Kopp (S. Renz)		
	2.6 Holzenergie <i>Énergie du bois</i>	S. Hermle	S. Hermle	D. Binggeli
	2.7 Biomasse (ohne Holz) <i>Biomasse (sans le bois)</i>			B. Guggisberg
	2.8 Wasserkraft <i>Force hydraulique</i>	K. Jorde	M. Moser	B. Guggisberg
	2.9 Geothermie <i>Géothermie</i>	R. Minder	G. Siddiqi	M. Geissmann
	2.10 Windenergie <i>Énergie éolienne</i>	R. Horbaty	K. Maus	
	2.11 Talsperren <i>Barrages</i>	G. Darbre	G. Darbre	-
Kernenergie <i>Énergie nucléaire</i>	3.1 Kerntechnik und Nukleare Sicherheit <i>Technique et sécurité nucléaires</i>	J.-M. Cavedon	M. Moser <sup>1)</sup>	-
	3.2 Regulatorische Sicherheitsforschung <i>Recherche réglementaire en sécurité nucléaire</i>	R. Mailänder		-
	3.3 Kernfusion <i>Fusion nucléaire</i>	C. Vaucher		-
	3.4 Radioaktive Abfälle <i>Déchets radioactifs</i>	S. Brander		S. Brander
EWG / WTT <i>EES / TST</i>	4.1 Energie – Wirtschaft – Gesellschaft (EWG) <i>Énergie – Économie – Société (EES)</i>	N. Mathys		
	4.2 Wissens- und Technologietransfer (WTT) <i>Transfert scientifique</i>	Y. Calisesi		

<sup>1)</sup> Das BFE hat hier hauptsächlich die Rolle der Auskunftsstelle. Die Betreuung der Forschung des Bereichs 3.1 obliegt dem PSI, die des Bereichs 3.2 dem ENSI und die des Bereichs 3.3 dem SBF. L'OFEN a ici un rôle de répondant. La gestion de la recherche du domaine 3.1 est du ressort du PSI, celle du domaine 3.2 de l'IFSN et celle du domaine 3.3 du SER.

## Adressen der BFE-BereichsleiterInnen Adresses des responsables de domaines à l'OFEN

**Daniel Binggeli**, Tel. 031 322 68 23

**Simone Brander**, Tel. 031 325 85 57

**Dr. Yasmine Calisesi**, Tel. 031 322 53 21

**Georges Darbre**, Tel. 031 325 54 91

**Andreas Eckmanns**, Tel. 031 322 54 61

**Felix Frey**, Tel. 031 322 56 44

**Markus Geissmann**, Tel. 031 322 56 10

**Bruno Guggisberg**, Tel. 031 322 56 40

**Dr. Sandra Hermle**, Tel. 031 325 89 22

**Dr. Katja Maus**, Tel. 031 322 39 78

**Rita Kobler**, Tel. 031 323 30 14

**Dr. Nicole Mathys**, Tel. 031 325 54 45

**Olivier Meile**, Tel. 031 322 56 99

**Dr. Michael Moser**, Tel. 031 325 36 23

**Marc Muller**, Tel. 031 322 47 56

**Dr. Stefan Oberholzer**, Tel. 031 325 89 20

**Martin Pulfer**, Tel. 031 322 49 06

**Hermann Scherrer**, Tel. 031 322 56 70

**Dr. Rolf Schmitz**, Tel. 031 322 56 58

**Dr. Gunter Siddiqi**, Tel. 031 322 53 24

**Martin Stettler**, Tel. 031 322 55 53

**Urs Wolfer**, Tel. 031 322 56 39

Postanschrift: BFE, 3003 Bern / Adresse commune : OFEN, 3003 Berne

E-mail: Vorname.Name@bfe.admin.ch / prénom.nom@bfe.admin.ch; Fax: 031 323 25 00

## Adressen der Programmleiter ausserhalb des BFE Adresses des chefs de programmes à l'extérieurs de l'OFEN

### **Roland Brüniger**

R. Brüniger AG, Zwillikerstr. 8, 8913 Ottenbach.

Tel. 044 760 00 66 – Fax : 044 760 00 68.

roland.brueiniger@r-brueniger-ag.ch

### **Dr. Jean-Marc Cavedon**

PSI, 5232 Villigen – PSI.

Tel. 056 310 27 24 – Fax : 056 310 44 81.

Jean-Marc.Cavedon@psi.ch

### **Jean-Christophe Hadorn**

Base Consultants SA .

8 Rue du Nant, c.p. 6268, 1211 Genève 6.

Tel. 022 840 20 80 – Fax : 022 840 20 81.

jchadorn@baseconsultants.com

### **Robert Horbaty**

ENCO Energie-Consulting AG.

Munzschstrasse 4, 4410 Liestal.

Tel. 061 965 99 00 – Fax : 061 965 99 01.

robert.horbaty@enco-ag.ch

### **Dr. Peter Jansohn**

PSI, 5232 Villigen-PSI.

Tel. 056 310 28 71 – Fax : 056 310 26 24.

peter.jansohn@psi.ch

### **Dr. Klaus Jorde**

entec ag.

St. Leonhardstr. 59, 9000 St. Gallen.

Tel. 071 228 10 20 – Fax : 071 228 10 30.

jorde@entec.ch

### **Prof. Dr. Thomas Kopp**

HSR Hochschule für Technik Rapperswil.

Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil.

Tel. 055 222 49 23 – Fax : 055 222 44 00.

thomas.kopp@hsr.ch

### **Dr. Reiner Mailänder**

ENSI, Industriestrasse 19, 5200 Brugg.

Tel. 056 460 86 19 – Fax : 056 460 84 99.

reiner.mailaender@ensi.ch

### **Dr. Rudolf Minder**

Minder Energy Consulting .

Ruchweid 22, 8917 Oberlunkhofen.

Tel. 056 640 14 64 – Fax : 056 640 14 60

rudolf.minder@bluewin.ch

### **Rolf Moser**

Enerconom AG

Weyermannsstrasse 20, Postfach 6022, 3001 Bern.

Tel. 031 380 33 39 - Fax : 031 380 33 66

moser@enerconom.ch

### **Dr. Stefan Nowak**

NET Nowak Energie & Technologie AG.

Waldweg 8, 1717 St.Ursen.

Tel. 026 494 00 30 – Fax : 026 494 00 34.

stefan.nowak@netenergy.ch

### **Pierre Renaud**

Planair SA, Crêt 108 a, 2314 La Sagne NE.

Tel. 032 933 88 40 – Fax : 032 933 88 50

pierre.renaud@planair.ch

### **Stephan Renz**

Beratung Thoma & Renz .

Elisabethenstr. 44, Postfach, 4010 Basel.

Tel. 061 271 76 36 – Fax : 061 272 57 95

renz.btr@swissonline.ch

### **Claude Vaucher**

SBF/SER, Hallwylstrasse 4, 3003 Bern.

Tel. 031 322 74 79 – Fax : 031 322 78 54 .

claudio.vaucher@sbf.admin.ch

Bundesamt für Energie BFE  
Energieforschung  
3003 Bern

Office fédéral de l'énergie OFEN  
Recherche énergétique  
3003 Berne

[www.energy-research.ch](http://www.energy-research.ch)

