



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

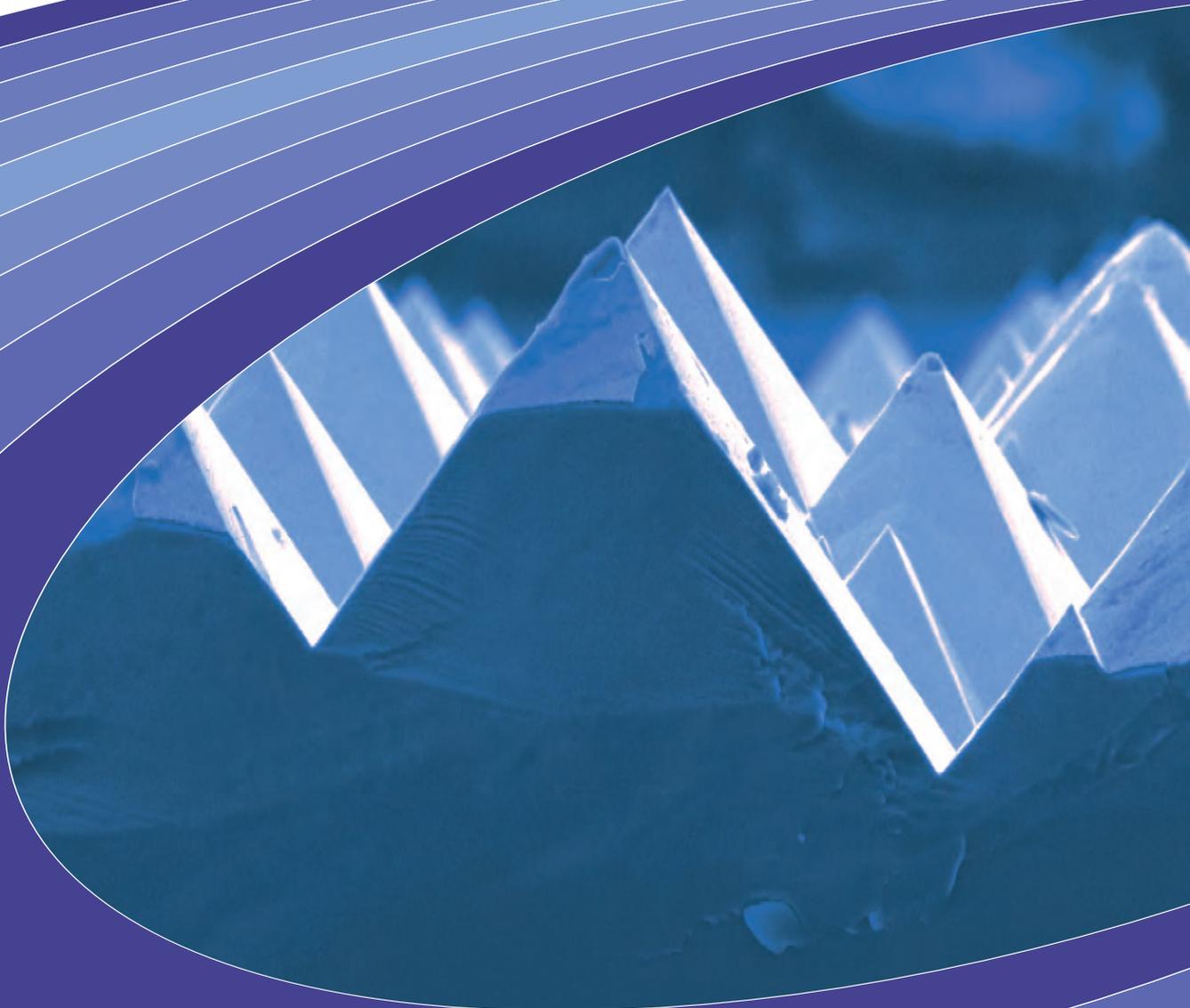
Swiss Confederation

Energieforschung 2013

Überblicksberichte

Recherche énergétique 2013

Rapports de synthèse



Titelbild:

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Oberflächenstruktur einer Silizium-Heterojunctionsolarzelle, CSEM Neuchâtel.

Page de titre :

Image microscope électronique à balayage de la structure de surface d'une cellule solaire à hétérojonction, CSEM Neuchâtel.

Allgemeine Auskünfte: / Renseignements généraux :

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

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind allein die Autoren der einzelnen Berichte verantwortlich.

Les auteurs des différents rapports portent seuls la responsabilité du contenu et des conclusions.

www.energieforschung.ch
www.recherche-energetique.ch
www.energy-research.ch
www.bfe.admin.ch/cleantech

Juli / Juillet / July 2014

Energieforschung 2013

Recherche énergétique 2013

Energieforschung in der Schweiz / Recherche énergétique en Suisse	5
Energieforschungsprogramme 2012 / Programmes de recherche énergétique 2012	5

Überblicksberichte / Rapports de synthèse

Effiziente Energienutzung / Utilisation efficace de l'énergie

Energie in Gebäuden / Énergie dans les bâtiments	11
Verkehr und Akkumulatoren / Transport et Accumulateurs.....	23
Elektrizitätstechnologien und -anwendungen / Technologies et utilisations de l'électricité.....	33
Netze / Réseaux	45
Wärmepumpen und Kälte / Pompes à chaleur et Froid	57
Verbrennung und Wärme-Kraft-Kopplung / Combustion et Couplage chaleur-force	67
Kraftwerk 2020 und CCS / Centrale thermique 2020 et CCS	77
Brennstoffzellen / Piles à combustible	85
Industrielle Prozesse / Processus industriels.....	97

Erneuerbare Energien / Sources d'Énergie Renouvelables

Solarwärme und Wärmespeicherung / Chaleur solaire et Stockage de chaleur.....	107
Photovoltaik / Photovoltaïque	117
Solare Hochtemperaturprozesse / Solaire industriel à haute température	137
Wasserstoff / Hydrogène.....	149
Biomasse und Holzenergie / Biomasse et Énergie du bois	163
Wasserkraft / Force hydraulique	179
Geothermie / Géothermie	189
Windenergie / Énergie éolienne	199
Talsperren / Barrages.....	209

Kernenergie / Énergie Nucléaire

Kerntechnik und Nukleare Sicherheit / Technique et Sécurité nucléaires.....	213
Regulatorische Sicherheitsforschung / Recherche réglementaire en sécurité.....	215
Kernfusion / Fusion thermonucléaire contrôlée.....	225
Radioaktive Abfälle / Déchets radioactifs.....	231

Querschnittsprogramme / Programmes Transverseaux

Energie – Wirtschaft – Gesellschaft / Énergie – Économie – Société	239
--	-----

Energieforschung in der Schweiz

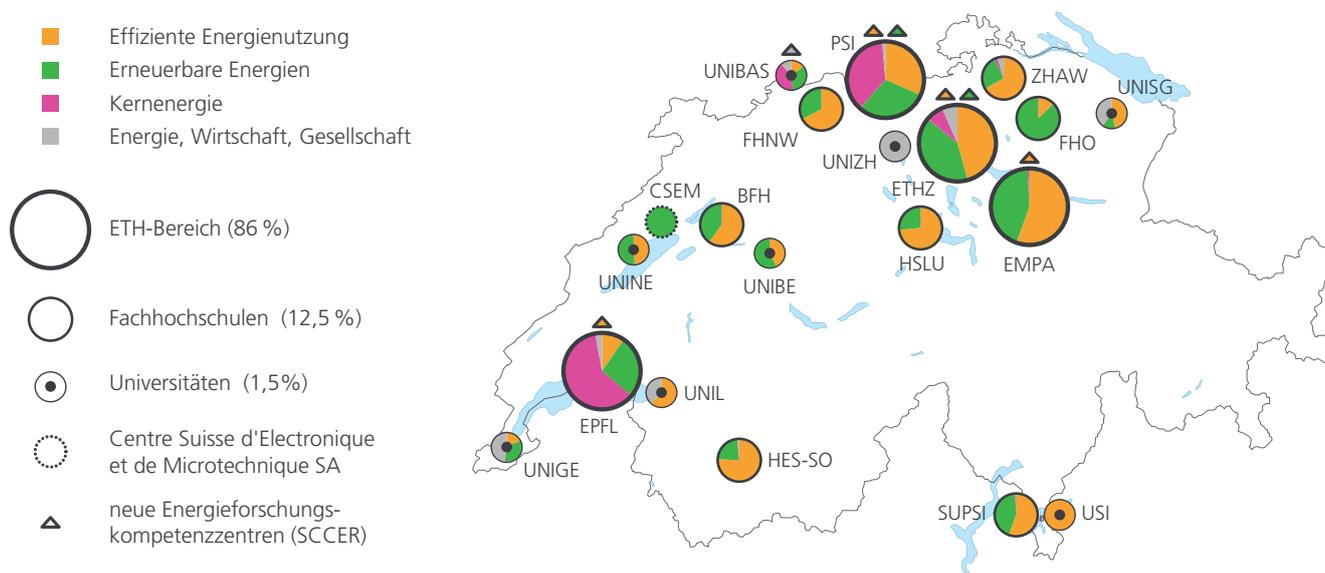
Recherche énergétique en Suisse

Innovation ist ein wesentlicher Faktor für die Wettbewerbsfähigkeit einer Volkswirtschaft. Dass die Schweiz hierbei in der Top-Liga mitspielen kann, wird regelmässig mit hervorragenden Platzierungen in internationalen Vergleichen bewiesen. So steht die Schweiz auch 2014 wieder an der Spitze der innovativsten Nationen Europas, wie die Ausgabe 2013 des «Innovation Union Scoreboard» zeigt. Auch weltweit behauptet sie sich an der Spitze des «Global Innovation Index». Der Schlüssel zur Innovation liegt in der Forschung, die ganz am Anfang neuer Erkenntnisse und Ideen steht, aus denen innovative und konkurrenzfähige Produkte entstehen.

Um ihre Spitzenposition zu halten, muss die Schweiz ihre Forschungsleistung kontinuierlich überprüfen, bestehende Lücken erkennen und, wo nötig, Forschungskapazitäten ausbauen. Dies gilt nach dem Entscheid von Bundesrat und Parlament, aus der Kernenergie auszusteigen, in besonderem Masse für die Energieforschung. Nach dem Ereignis in Fukushima hat der Bundesrat die Schweizer Forschungslandschaft analysiert und einen Aktionsplan zur Energieforschung erstellen lassen. In der Legislaturperiode 2013–2016 soll ein starker Ausbau der Forschungskapazitäten im Rahmen von sieben neuen Kompetenzzentren und an den Eidgenössischen Technischen Hochschulen vorangetrieben werden. Für die Förderung der Umsetzung von aussichtsreichen Forschungsideen in konkurrenzfähige und innovative Produkte und Dienstleistungen stehen jährlich rund 12 Mio. Franken zur Verfügung und die Mittel des Bundesamts für Energie im für Pilot- und Demonstrationsprojekte werden von jährlich rund 5 Mio. Franken auf 30 Mio. Franken aufgestockt. Schliesslich wurden neue Nationale Forschungsprogramme (NFP) mit einem Fördervolumen von 45 Mio. Franken über fünf Jahre dem Thema Energie gewidmet. Nach dem kontinuierlichen Rückgang der Ausgaben der öffentlichen Hand im Bereich der Energieforschung seit den frühen 1990er Jahren hat ab 2006 ein Umkehrtrend eingesetzt, der sich in den nächsten Jahren fortsetzen wird.

L'innovation est un facteur essentiel pour la compétitivité d'une économie nationale. Le classement exceptionnel de la Suisse dans les comparaisons internationales apporte régulièrement la preuve que notre pays joue dans une ligue supérieure. En 2014, la Suisse est à nouveau en tête des nations européennes les plus novatrices, comme le montre l'édition 2013 de l'« Innovation Union Scoreboard ». Au niveau international également, elle occupe la première place du « Global Innovation Index ». La clé de l'innovation réside dans la recherche à la base de toutes les nouvelles connaissances ou idées, qui génèrent des produits innovants et concurrentiels.

Pour consolider sa position de leader, la Suisse doit continuellement vérifier ses performances en matière de recherche, identifier les lacunes existantes et, le cas échéant, augmenter ses capacités de recherche. Suite à la décision de sortir du nucléaire prise par le Conseil fédéral et le Parlement, cela vaut avant tout pour la recherche énergétique. Après l'événement survenu à Fukushima, le Conseil fédéral a analysé le paysage suisse de la recherche et fait établir un plan d'action pour la recherche énergétique. Durant la législature 2013–2016, un fort développement des capacités de recherche doit être mené dans le cadre de sept nouveaux centres de compétences et dans les écoles polytechniques fédérales. Chaque année, environ 12 millions de francs sont mis à disposition pour encourager la transformation d'idées de recherche prometteuses en prestations et produits concurrentiels et innovants, tandis que les fonds de l'Office fédéral de l'énergie de quelque 5 millions de francs par an pour les projets pilotes et de démonstration sont portés à 30 millions. D'autre part, de nouveaux Programmes nationaux de recherche (PNR) d'un volume de soutien de 45 millions de francs sur cinq ans sont consacrés au thème de l'énergie. Après le recul continu des dépenses des collectivités publiques pour la recherche énergétique depuis le début des années 1990, on assiste depuis 2006 à un renversement de tendance qui se poursuivra ces prochaines années.



Aufwand in den vier Forschungsbereichen «Effiziente Energienutzung», «Erneuerbare Energien», «Kernenergie» und «Energie, Wirtschaft, Gesellschaft» an verschiedenen Schweizer Hochschulinstitutionen (Daten 2011). Im ETH-Bereich (ETH Zürich und Lausanne, Empa, PSI, Eawag und WSL) läuft der grösste Anteil der Schweizer Energieforschungsaktivitäten (86 %), gefolgt von den Fachhochschulen (12,5 %) und den kantonalen Universitäten (1,5 %).

Dépenses dans les quatre domaines de recherche «Efficacité énergétique», «Energies renouvelables», «Energie nucléaire» et «Energie, économie, société» dans diverses hautes écoles suisses (données 2011). La majeure partie des activités de recherche énergétique en Suisse (86 %) se déroule dans le domaine des EPF (EPF de Zurich et de Lausanne, LFEM, PSI, IFAEPE et WSL), suivi par les Hautes écoles spécialisées (12,5 %) et les universités cantonales (1,5 %).

Energieforschungsprogramme 2013

Programmes de recherche énergétique 2013



Energie in Gebäuden / Energie dans les bâtiments

www.bfe.admin.ch/forschunggebaeude

BFE Programmleiter: Rolf Moser (moser@enerconom.ch)

BFE Bereichsleiter: Andreas Eckmanns (andreas.eckmanns@bfe.admin.ch)



Akkumulatoren und Superkondensatoren / Accumulateurs et Supercondensateurs

www.bfe.admin.ch/forschungakkumulatoren

BFE Programmleiter: Martin Pulfer (martin.pulfer@bfe.admin.ch)

BFE Bereichsleiter: dito



Verkehr / Transport

www.bfe.admin.ch/forschungsverkehr

BFE Programmleiter: Martin Pulfer (martin.pulfer@bfe.admin.ch)

BFE Bereichsleiter: dito



Elektrizitätstechnologien und -anwendungen / Technologies et utilisations de l'électricité

www.bfe.admin.ch/forschungelektrizitaet

BFE Programmleiter: Roland Brüniger (roland.brueeniger@r-brueniger-ag.ch)

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

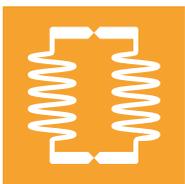


Netze / Réseaux

www.bfe.admin.ch/forschungnetze/

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

BFE Bereichsleiter: dito



Wärmepumpen und Kälte / Pompes à chaleur et Froid

www.bfe.admin.ch/forschungverbrennung

BFE Programmleiter: Stephan Renz (renz.btr@swissonline.ch)

BFE Bereichsleiter: Martin Pulfer (martin.pulfer@bfe.admin.ch)



Kraftwerk 2020 und Carbon Capture & Storage / Centrale thermique 2020 et Carbon Capture & Storage

www.bfe.admin.ch/forschungskraftwerk

BFE Programmleiter: Dr. Peter Jansohn (peter.jansohn@psi.ch)
BFE Bereichsleiter: Dr. Gunter Siddiqi (gunter.siddiqi@bfe.admin.ch)



Verbrennung und Wärme-Kraft-Kopplung / Combustion et Couplage chaleur-force

www.bfe.admin.ch/forschung/verbrennung

BFE Programmleiter: Stephan Renz (renz.btr@swissonline.ch)
BFE Bereichsleiterin: Dr. Sandra Hermle (sandra.hermle@bfe.admin.ch)



Brennstoffzellen / Piles à combustible

www.bfe.admin.ch/forschungsbrennstoffzellen

BFE Programmleiter: Dr. Stefan Oberholzer (stefan.oberholzer@bfe.admin.ch)
BFE Bereichsleiter: dito



Industrielle Prozesse / Processus industriels

www.bfe.admin.ch/forschungsverfahrenstechnik

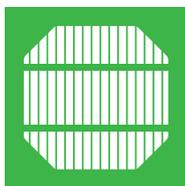
BFE Programmleiter: Dr. Michael Spirig (m.spirig@fomenta.ch)
BFE Bereichsleiter: Martin Pulfer (martin.pulfer@bfe.admin.ch)



Solarwärme und Wärmespeicherung / Chaleur solaire et Stockage de chaleur /

www.bfe.admin.ch/forschungsolarwaerme

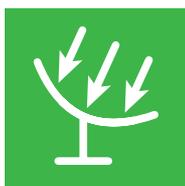
Chef de programme OFEN: Jean-Christophe Hadorn (jchadorn@baseconsultants.com)
Chef de domaine OFEN: Andreas Eckmanns (andreas.eckmanns@bfe.admin.ch)



Photovoltaik / Photovoltaïque

www.bfe.admin.ch/forschungphotovoltaik / www.photovoltaik.ch

BFE Programmleiter: Dr. Stefan Nowak (stefan.nowak@netenergy.ch)
BFE Bereichsleiter: Dr. Stefan Oberholzer (stefan.oberholzer@bfe.admin.ch)



Solare Hochtemperaturprozesse / Solaire industriel à haute température /

www.bfe.admin.ch/forschungindustriesolar

Chef de programme OFEN: Pierre Renaud (pierre.renaud@planair.ch)
Chef de domaine OFEN: Dr. Stefan Oberholzer (stefan.oberholzer@bfe.admin.ch)



Wasserstoff / Hydrogène

www.bfe.admin.ch/forschungwasserstoff

BFE Programmleiter: Dr. Stefan Oberholzer (stefan.oberholzer@bfe.admin.ch)
BFE Bereichsleiter: dito



Biomasse und Holzenergie / Biomasse et Énergie du bois

www.bfe.admin.ch/forschung/biomasse

BFE Programmleiterin: Dr. Sandra Hermle (sandra.hermle@bfe.admin.ch)
BFE Bereichsleiterin: dito



Wasserkraft / Force hydraulique

www.bfe.admin.ch/forschungwasserkraft

BFE Programmleiter: Dr. Klaus Jorde (klaus.jorde@kjconsult.net)
BFE Bereichsleiter: Dr. Michael Moser (michael.moser@bfe.admin.ch)



Geothermie / Géothermie

www.bfe.admin.ch/forschunggeothermie

BFE Programmleiter: Dr. Rudolf Minder (rudolf.minder@bluewin.ch)
BFE Bereichsleiter: Dr. Gunter Siddiqi (gunter.siddiqi@bfe.admin.ch)



Windenergie / Énergie éolienne

www.bfe.admin.ch/forschungwindenergie

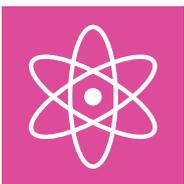
BFE Programmleiter: Robert Horbaty (robert.horbaty@enco-ag.ch)
BFE Bereichsleiterin: Dr. Katja Maus (katja.maus@bfe.admin.ch)



Talsperren / Barrages

www.bfe.admin.ch/talsperren

BFE Programmleiter: Dr. Georges Darbre (georges.darbre@bfe.admin.ch)
BFE Bereichsleiter: dito



Kerntechnik und nukleare Sicherheit / Technique et Sécurité nucléaires *

<http://nes.web.psi.ch>

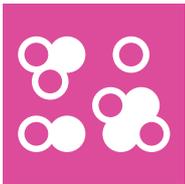
Programmleiter: Dr. Martin A. Zimmermann (martin.zimmermann@psi.ch)
BFE Bereichsleiter: Dr. Michael Moser (michael.moser@bfe.admin.ch)



Regulatorische Sicherheitsforschung / Recherche réglementaire en sécurité *

www.ensi.ch

Programmleiter: Dr. Reiner Mailänder (reiner.mailaender@ensi.ch)
BFE Bereichsleiter: Dr. Michael Moser (michael.moser@bfe.admin.ch)



Kernfusion / Fusion thermonucléaire contrôlée *

<http://crppwww.epfl.ch>

BFE Programmleiter: Claude Vaucher (claude.vaucher@sbfi.admin.ch)
BFE Bereichsleiter: Dr. Michael Moser (michael.moser@bfe.admin.ch)



Radioaktive Abfälle / Déchets radioactifs

www.bfe.admin.ch/forschungradioaktiveabfaelle

BFE Programmleiterin: Simone Brander (simone.brander@bfe.admin.ch)
BFE Bereichsleiterin: dito



Energie – Wirtschaft – Gesellschaft / Énergie – Économie – Société

www.ewg-bfe.ch

BFE Programmleiterin: Dr. Nicole A. Mathys (Nicole.Mathys@bfe.admin.ch)
BFE Bereichsleiterin: dito

* Die drei Forschungsprogramme *Kerntechnik und nukleare Sicherheit*, *Regulatorische Sicherheitsforschung* und *Kernfusion* werden nicht direkt vom Bundesamt für Energie (BFE) betreut. Das BFE hat lediglich die Rolle der Auskunftsstelle inne.



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

Bild vorherige Seite:

Nischenanwendungen als Wegbereiter spielen bei der Markteinführung der Brennstoffzellentechnologie eine wichtige Rolle. Im Projekt *hy.muve* der Empa und anderer Partner wurde ein praxistauglicher Brennstoffzellenantrieb entwickelt, mit welchem der energetische Verbrauch eines Wischfahrzeuges der Firma Bucher Schörfling gegenüber einem dieselmotorischen Antrieben halbiert werden konnte. Insbesondere wurden auch die Geräuschemissionen solcher Fahrzeuge erheblich reduziert. Das Fahrzeug war in den letzten Jahren in verschiedenen Schweizer Städten erfolgreich im Einsatz (www.Empa.ch/hy.muve).

Energie in Gebäuden



Titelbild:

SuRHiB Sustainable Renovation of Historical Buildings

Das faszinierende Material Aerogel, hier als Granulat, bildete einen wesentlichen Bestandteil im CCEM-Projekt SuRHiB, in dem unter Leitung der EMPA ein Aerogel-Dämmputz entwickelt wurde. Dieser wird mittlerweile auf dem Markt vertrieben. Das SuRHiB-Projekt lieferte in einem Beitrag der Berner Fachhochschule aber auch wichtige Grundlagen für Planer von Innendämmungen, wie sie bei der Sanierung von historischen Gebäuden zur Anwendung kommen. Diese ermöglichen die korrekte Bewertung des Feuchtehaushaltes bei Innendämmungen zur Vermeidung von Feuchteschäden. Dieser Projektteil wird 2014 fortgesetzt, wobei für die bisher auf Berechnungen basierenden Resultate der Praxisnachweis mittels Feuchtemessungen in Bauteilen erbracht werden soll. (Bildquelle: Fixit).

BFE Forschungsprogramm Energie in Gebäuden

Überblicksbericht 2013

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE

CH-3003 Bern

Programmleiter BFE (Autor):

Rolf Moser, Enerconom AG (moser@enerconom.ch)

Bereichsleiter BFE:

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

www.bfe.admin.ch/forschunggebaeude

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

Einleitung

Das Jahr 2013 steht energiepolitisch im Zeichen der bundesrätlichen Energiestrategie 2050. Mit dem Bekenntnis zum schrittweisen Ausstieg aus der Atomenergie, der weiteren Steigerung der Energieeffizienz und dem Ausbau der erneuerbaren Energie wurde die Diskussion über die Energiezukunft der Schweiz auf breiter Ebene lanciert.

Der Gebäudebereich hat nach wie vor einen wichtigen Stellenwert in dieser Strategie. Er ist auch weiterhin einer der zentralen Energiebezüger, wenn auch die Mobilität immer mehr an Gewicht gewinnt. Der Gebäudepark spielt zunehmend auch als Energie-Produzent eine Rolle. Insbesondere die dezentrale Elektrizitätserzeugung kann einen wesentlichen Beitrag zur zukünftigen Energieversorgung leisten. In Deutschland erbringt auf Gebäuden erzeugter Photovoltaikstrom mittlerweile einen spürbaren Beitrag zur Elektrizitätsversorgung.

Die erneuerbaren Energieträger haben auch in der Schweiz die wirtschaftliche

Realität erreicht. Aufgrund der weiterhin sinkenden Preise der Photovoltaik ist die flexible Produktionsmethode mittlerweile in vielen Projekten ein Thema; die Technik beginnt sich auch hierzulande durchzusetzen. Die in Nordeuropa bereits wesentlichen Beiträge aus erneuerbaren Energiequellen haben aber auch dazu geführt, dass die Stromflüsse auf dem europäischen Markt eine ganz andere Charakteristik aufweisen. Dies hat in besonderem Masse die Elektrizitätswerke getroffen, die bisher mit den Pumpspeicherwerken ein lukratives Geschäftsfeld aufgebaut hatten. Auch wenn die Speicherseen auch in Zukunft eine wichtige Rolle beim Ausgleich der Elektrizitätsflüsse spielen werden, ist ihr finanzieller Anreiz zumindest vorübergehend stark beeinträchtigt.

Angesichts der Speicherproblematik in Europa hat das bereits bekannte Thema der Energiespeicherung weiter an Brisanz gewonnen. Im Forschungsprogramm wurde das Projektportfolio zu

diesem Thema um weitere Projekte aufgestockt, unter anderem mit der Beurteilung der Bedeutung der Power-to-Gas Technologie für die Schweiz, das zusammen mit dem Forschungsprogramm Netze durchgeführt wird.

Auch der bereits im Vorjahr begonnene Ausbau des Themas Areale und Quartiere wird fortgeführt.

Das Forschungsprogramm «Energie in Gebäuden» steht Anfang 2014 vor einem Konsolidierungsjahr: Eine grosse Zahl neuer Projekte, die Ende 2013 ausgelöst wurden, binden den grössten Teil der für 2014 verfügbaren Mittel. Ein grosses Potenzial besteht hingegen noch bei den Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekten, für die 2014 ein nochmals höheres Budget zur Verfügung steht. Dies entspricht der Absicht des Bundesrates, den bereits bekannten energieeffizienten Technologien zum Marktdurchbruch zu verhelfen.

IEA Klassifikation: 1.2 Residential and commercial

Schweizer Klassifikation: 1.1 Energie in Gebäuden

Programmschwerpunkte

Für das Forschungsprogramm Energie in Gebäuden wurden im Vierjahresprogramm 2013–2016 folgende Schwerpunkte definiert:

1 Bauerneuerung hat Priorität vor Neubau: In den vergangenen Jahren hat sich die energetische Qualität von Neubauten stark verbessert. In den nächsten Jahren steht vermehrt die Verbesserung der bestehenden Gebäude im Fokus.

2 Technologie optimal nutzen: Aufgrund des abnehmenden Gewichtes des Heizenergiebedarfs gewinnen die Nebenbezüge wie z. B. Hilfsantriebe, Förderpumpen und insbesondere das Warmwasser stark an Gewicht. Auch der Energiebedarf für Kühlung wird in Zukunft ansteigen. Dabei ist es von zentraler Bedeutung, die Technik möglichst optimal auszulegen und zu betreiben.

3 Vom Gebäude zum Areal: Die Betrachtung geht weg vom Einzelteil hin zur systemischen Gesamtsicht. Die Systemgrenze wird über das Gebäude hinaus ausgedehnt zu Arealen, Siedlungen oder ganzen Städten. Dabei sind Themen der Arealversorgung, Abwärmenutzung, gegenseitige Beeinflussung des Klimas von Gebäuden (z. B. Beschattung) zu beachten.

4 Speicherkraftwerk Haus: Jedes Gebäude hat ein Potenzial als Kraftwerk. Energiequellen im Untergrund, der Umgebung oder Dach, wie auch die gekoppelte Erzeugung von Wärme und Elektrizität müssen in Zukunft konsequent genutzt werden. Um die damit einhergehende Fluktuation der Rückspeisung und des Verbrauchs von elektrischem Strom zu reduzieren, sollen vermehrt Energiespeichermöglichkeiten im Gebäude genutzt werden. Das System «Haus» wird zum Speicherkraftwerk.

5 Indirekter Energiebedarf: Die von den Gebäuden und seinen Nutzern indirekt beeinflussten Energieaspekte müssen bei der Beurteilung von Forschungs- und P+D-Themen in ihrer Gesamtheit dargestellt und beurteilt werden. Graue Energie und durch den Gebäudestandort bedingte Mobilität sind offensichtlich für den ökologischen Fussabdruck eines

Gebäudes entscheidend. Die Bewohner tragen mit ihrem Verhalten wesentlich zum Energieverbrauch bei.

Rückblick und Bewertung 2013

Aufgrund der Ende 2012 relativ vielen abgeschlossenen Projekte wurde es Anfang 2013 möglich, für das Forschungsprogramm einen Aufruf für neue Projekte zu lancieren. Dieser stiess auf ein grosses Interesse bei unseren Forschungspartnern: über 50 Vorschläge für neue Projekte wurden eingereicht. Von diesen wurden schliesslich 13 in Form neuer Projekte und 8 als neue P+D-Projekte umgesetzt. Ebenfalls konnten einige Vorschläge bei anderen Forschungsprogrammen und bei EnergieSchweiz eingespeist werden.

Die neuen Projekte bilden die aktuellen Schwerpunkte gut ab. Sie stammen aus allen fünf Schwerpunkten des Vierjahresprogrammes 2013–2016. Dank der guten Vernetzung unserer Forschungspartner behandeln sie aktuelle Themen von Minergie, MuKen2014, aus SIA-Normen und aus der Gebäudeerneuerung. Die Bedeutung der Fachhochschulen nimmt bei der Energieforschung im Programm immer mehr zu, trotzdem konnten auch einige Vorschläge privater Büros berücksichtigt werden.

Einige Beispiele von neuen Projekten seien hier beispielhaft erwähnt:

- Abbau von Hemmnissen für Sanierungen von Liegenschaften institutioneller Investoren;
- Nachhaltige Sanierung in Etappen;
- Analyse der 2000-Watt-Aspekte im städtebaulichen Planungsprozess;
- Ersatzstrategie für Elektro-Wassere warmer;
- Thermische Arealvernetzung;
- Regelstrategien für die Optimierung des Eigenverbrauchs von Gebäuden;
- Ausgeglichene Bilanzen im Quartier;
- Qualitätsschub für Ökobilanzdaten.

Damit hat sich das Portfolio der Projek-

te im Programm per Ende 2013 auf 53 Projekte gesteigert, von denen Ende Jahr 15 abgeschlossen werden. Die Zahl der Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte ist in den vergangenen Monaten angestiegen.

Ausblick

Durch die vielen neuen Projekte sind die finanziellen Mittel des Programms für das Jahr 2014 bereits weitgehend gebunden. Ein wesentlich grösserer Spielraum besteht bei P+D+L-Projekten, für die nochmals höhere Mittel zur Verfügung stehen. Es ist denn in diesem Bereich auch mit einem weiteren Anstieg der Projektmenge zu rechnen.

Im Jahr 2014 stehen die laufenden Projekte und deren Betreuung im Programm im Vordergrund. Auch die internationale Vernetzung wird weiter aktiv betreut und wenn möglich vertieft. Das Forschungsprogramm «Energie in Gebäuden» steht im thematischen Schwerpunkt einer Vielzahl von Aktivitäten der Energieforschung in der Schweiz und kann einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung der Normen und eines vertieften Know-hows der Architekten und Fachplaner in Richtung der 2000-Watt-Gesellschaft leisten.

Highlights aus Forschung und Entwicklung

Am Ende des Berichtsjahres 2013 umfasst die Projektliste das Forschungsprogramm «Energie in Gebäuden» 53 Projekte, davon werden 15 Ende 2013 abgeschlossen. 8 Projekte stammen aus dem Pilot- und Demonstrationsprogramm; Anfang 2014 werden weitere P+D+L-Projekte aufgestartet. Stellvertretend werden nachfolgend zwei Forschungs- und ein P+D-Projekt vorgestellt, die Ende Berichtsjahr abgeschlossen wurden.

SchoolVentCool

In einer Reihe mehrerer Forschungsprojekte wurde im Forschungsprogramm das Thema der Gebäudesanierung mit vorfabrizierten Fassaden-Modulen aufgegriffen. Die holzverarbeitende Industrie ist heute in der Lage, mittels intelligenter CAM-Holzbearbeitungsautomaten komplexe Aufgabenstellungen automatisiert zu lösen.

Im Forschungsprojekt CCEM-Advanced Retrofit wurden gemeinsam mit Industriepartnern und Handwerksbetrieben Lösungen für vorfabrizierte Fassadenmodule mit integrierten Lüftungsleitungen für zu erneuernde Mehrfamilienhäuser entwickelt. Im IEA-Programm «Energy in Buildings and Communities Programme» wurde 2006 bis 2011 der Annex 50 «Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Residential Buildings» durchgeführt, der dieses Thema für Ein- und Mehrfamilienhäuser aufgriff und in einen internationalen Kontext stellte.

Im Rahmen des europäischen Eracobuild-Programms war es im internationalen Forschungsprojekt SchoolVentCool das Ziel, dieses Konzept mit Hilfe der gemachten Erfahrungen auf Schulgebäude zu übertragen. Der höhere, flächenspezifische Frischluftbedarf in Schulgebäuden hat eine einschneidende Auswirkung auf die fassadenintegrierten Lüftungsleitungen und in Folge auch auf die Architektur. Insbesondere bei Gebäuden mit vielen Stockwerken wird die über die Fassade zugeführte Frischluft zum begrenzenden Element: Die Fläche in der Fassade genügt dann nicht mehr, die nötigen Lüftungsquerschnitte unter-

zubringen. Es war deshalb notwendig, mit dem System dezentraler Frischluftversorgung einen weiteren, ergänzenden Lösungsweg einzubinden. Unter Verwendung von typologischen Kriterien kann nun zwischen zwei Haupt-Lösungswegen entschieden werden, die vorwiegend den «kritischen Weg der Frischluftversorgung» berücksichtigen.

Am Demonstrationsprojekt Schulhaus Krummbach oberhalb Geuensee konnte die Machbarkeit der modularen, fassadenintegrierten Lüftungsführung für ein Objekt, das aus einem Wohnhaus mit angegliederten 3 Schulungsräumen besteht, bestens aufgezeigt werden. Diese Sanierung wurde durch das P+D-Programm des BFE unterstützt, es eignete sich aufgrund seiner begrenzten Grösse für die Lösung der fassadenintegrierten Lüftungsführung. Das Gebäude konnte Minergie-P-zertifiziert werden.

SuRHib Sustainable Renovation of Historical Buildings

SuRHib wurde als CCEM-Projekt (Kompetenzzentrum für Energie und Mobilität) im Jahre 2009 gestartet, um die Renovationsmöglichkeiten für historische Bauten zu verbessern. Im Zentrum stan-

den traditionelle Gebäude, die am Ende des 19. oder zu Beginn des 20. Jahrhunderts erstellt wurden.

Es war offensichtlich, dass diese Gebäude nicht mit konventionellen Baumeethoden renoviert werden konnten. Es braucht angepasste Technologien, um ihren architektonischen und handwerklichen Ausdruck zu erhalten.

Das Projekt wurde als Zusammenarbeit verschiedener namhafter Forschungspartner (ETH, EPFL, BFH, SUPSI) unter Federführung der EMPA konzipiert. In einer Serie von Arbeitspaketen wurden verschiedene Aspekte der Erneuerung historischer Bauten behandelt:

WP1: Bauweise und Zustand ausgewählter Fallbeispiele erhaltenswerter Wohnbauten;

WP2: Klimabelastung schützenswerter Fassaden;

WP3: Thermisch-hygrische Untersuchung heikler Details;

WP4: Entwicklung eines Hochleistungs-dämmputzes (KTI-Projekt);

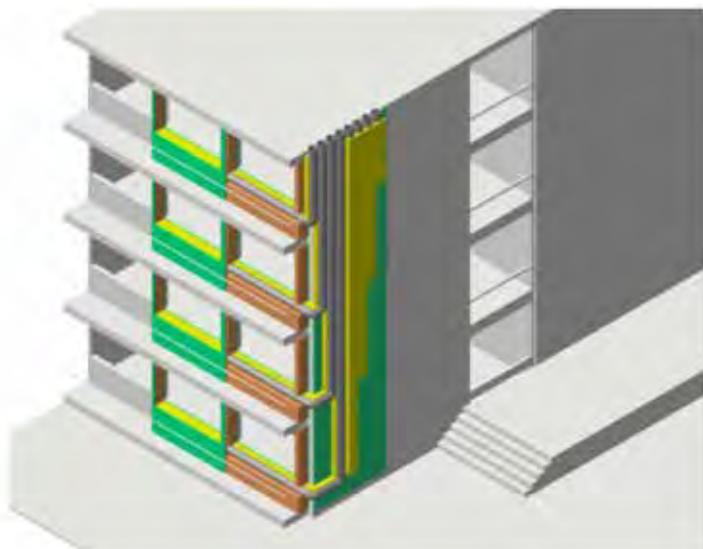
WP5: Entwicklung von Lösungen für robuste Innendämmungen;

WP6: Entwicklung von Gebäudetechnik-konzepten und Regelungsstrategien;



Figur 1: Vorfabrikation der Fassadenelemente für das Schulhaus Krummbach in Geuensee. Die Fassadenelemente werden millimetergenau vorgefertigt und mit Schafwolle gedämmt. Lüftungsrohre, elektrische Leitungen und Fenster werden fabrikseitig installiert. Auf der Baustelle werden die Installationen der einzelnen Module verbunden.

(Quelle: Schlussbericht P+D-Projekt 500648-01 Gesamterneuerung Wohn- und Schulhaus Krummbach, EMPA Januar 2012).



Figur 2: Übereckführung von Lüftungskanälen: Überecksituationen, bei denen ein Wandbereich opak ist, bieten die Möglichkeit, vertikale Hauptlüftungsleitungen zu den Geschossen zu verlegen, die dann horizontal abzweigen. Die Kanäle können von einer Zentrale im Keller oder auf dem Dach angespiesen werden.
(Quelle: Schlussbericht SchoolVentCool, FHNW und HSLU, Juli 2013).

WP7: Erstellung eines Katalogs von Musterlösungen zur Integration der Sonnenenergienutzung.

Die Finanzierung erfolgte im Rahmen des Forschungsprogramms Energie in Gebäuden, des P+D-Programmes, sowie

über ein KTI-Projekt. Neben weiteren Erkenntnissen stechen zwei wichtige Resultate des Projektes besonders hervor:

Feuchtehaushalt bei Innendämmungen: Im Rahmen eines umfassenden Analyse- und Simulationsprojektes wurden



Figur 3: Bewitterungsversuche für Aerogel-Dämmputz: An einem Teststand wurden Bewitterungsversuche in der Klimakammer und unter realen Umweltbedingungen durchgeführt. In den Putzschichten wurden Sonden eingebaut, die während den Versuchen die Temperatur und die Feuchte in der Dämmputzschicht erfassten (Quelle: Schlussbericht BFE-Projekt «Sustainable Renovation of Historical Buildings», CCEM, März 2013).

die thermisch-hygrischen Auswirkungen der Innendämmung untersucht. Diese reduzieren nicht nur die Wärmeverluste, sie behindern auch das Austrocknen der Wände. Gestaute Feuchtigkeit in Wänden kann wertvolle historische Fassaden in kurzer Zeit beschädigen. Um dies zu vermeiden, wurden die Schadensrisiken für verschiedene Materialien anhand von Simulationen detailliert bewertet und Richtlinien für sichere Innendämmungen entwickelt. Es ist geplant, die theoretischen Resultate im Rahmen eines Folgeprojektes ab Anfang 2014 an real sanierten Gebäuden messtechnisch zu verifizieren.

Entwicklung eines Hochleistungs-Wärmedämmputzes: Als weniger risikoreiche Technologie wurde ein Hochleistungsdämmputz entwickelt, welcher besser dämmt als eine herkömmliche Aussendämmung mit Polystyrolschaum, jedoch auf rein mineralischen, dampfdurchlässigen Materialien basiert. Die Entwicklung dieses neuartigen Putzes basiert auf Aerogelgranulat, welches für den Dämmputz eine Wärmeleitfähigkeit von weniger als $30 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ erlaubt. Die Herausforderung bestand darin, die Stabilität des Aerogel-Materials im Dämmputz während dem Produktions- und Anwendungsprozess zu erhalten. Die Entwicklungen wurden zusammen mit einem Industriepartner erfolgreich abgeschlossen. Der Dämmputz ist seit anfang 2013 unter dem Produktnamen Fixit 222 auf dem Markt verfügbar.

Bereits konnten diverse Demonstrationsgebäude realisiert werden. So wurde beispielsweise die zum Mehrfamilienhaus umgenutzte alte Mühle Sissach als eines der ersten historischen Gebäude mit dem Wärmedämmputz energetisch saniert.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Solare Plus-Energie-Sanierung in Wil SG

Solare Gebäudeerneuerungen besitzen ein grosses Potenzial für das Erreichen der Ziele der 2000-Watt-Gesellschaft. Sogar alte Gebäude können dank Sonnenenergie zu Plus-Energie-Bauten werden. Beim Haus der Familie Stahl in Wil wurde der entsprechende Umbau in kurzer Zeit, im bewohnten Zustand und mit einem hohen Komfort umgesetzt.

Das Gebäude blieb seit seiner Erstellung 1963 nahezu 50 Jahre lang unverändert. Die Aussenwände waren mit nicht tragendem Backsteinmauerwerk verblendet. Die Holzbalkendecke zum Dachraum war in der Balkenlage bescheiden mit Steinwolle gedämmt. Ansonsten besass das Gebäude keine eigentliche Dämmung. Kern des energetischen Konzeptes der Sanierung war eine konsequente Minimierung des Energiebedarfes. Diese sollte durch dichte Bauweise und eine sehr gute Wärmedämmung im Passivhausstandard, der Nutzung passiver solarer Energie und einer grosszügigen natürlichen Beleuchtung erreicht werden.

Die neue Gebäudetechnik verwendet nach Möglichkeit die natürlichen Ressourcen am Standort. Dies ist durch eine Erdsonden-Wärmepumpe, durch eine kontrollierte Wohnungslüftung und durch eine 9 kW-Photovoltaikanlage möglich.

Sowohl der Energiebedarf als auch die Produktion der Photovoltaikanlage wurde im Projekt detailliert ausgewertet. Daneben sollte aber auch die raumklimatischen Bedingungen erfasst werden, um die Auswirkungen auf die Nutzer besser zu verstehen. Das Endresultat dieser Auswertungen ist durchaus sehenswert: das Gebäude produzierte in einem Zeitraum eines Jahres Solarstrom von 7'686 kWh. Gleichzeitig lag der Bedarf für Heizung, Warmwasser, Hilfsstrom und Haushaltsstrom bei 5504 kWh.

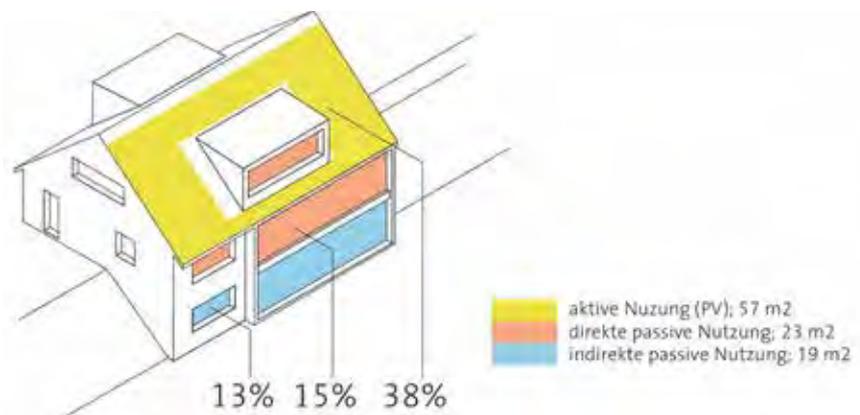
Es bleibt ein Überschuss von 2228 kWh, das Gebäude wird damit zum Kraftwerk. Auch bei einer res-triktiveren Bewertung der produzierten Elektrizität im Sommer zu Zeiten von Netzüberschüssen bleibt die Bilanz positiv.

Für das Gebäude wurde ebenfalls eine Beurteilung der Grauenergiebilanz vorgenommen. Auf Grundlage der SIA 2032 wurde die Grauenergie für das Sanierungsprojekt berechnet: die gesamte Grauenergiebelastung beträgt rund 250'000 kWh. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Nutzungsdauern der einzelnen Bauteile ergibt dies eine Energiemenge von

41 kWh pro m² Energiebezugsfläche und Jahr. Damit wird der Grenzwert für Graue

Energie des Standards «Minergie A» von 50 kWh/m²/a eingehalten.

Das Gebäude erfüllt somit insgesamt die Anforderungen des SIA Effizienzpfades Energie, dies bei einem nachweislich guten Komfort für die Nutzer. Der Mut der Bauherrschaft und die Innovativität der Architekten wurden in diesem Projekt mit einer positiven (Energie-)Bilanz belohnt.



Figur 5: Solargewinne: Von einem theoretischen Flächenpotenzial der südorientierten Flächen von 100 % werden im Projekt 66 % ausgenutzt, davon der grösste Teil für die Photovoltaikanlage auf dem Dach. Auch die passive Sonnennutzung ist ein zentraler Bestandteil des Konzeptes. (Quelle: Schlussbericht BFE-Projekt «Solare Plus-Energie-Sanierung», Dransfeld Architekten, November 2013).



Figur 4: Applikation des Aerogel-Dämmputzes: Der Dämmputz wird im Spritzverfahren wie ein üblicher Putz in mehreren Schichten aufgetragen. Die Isolationswirkung des Dämmputzes entspricht derjenigen eines konventionellen Dämmmaterials bei gleicher Isolationsstärke, wobei beim Dämmputz Schichtdicken bis zu ca. 8 cm möglich sind. (Quelle: Homepage Fixit).

Nationale Zusammenarbeit

Auch im vergangenen Jahr konnte die langjährige Zusammenarbeit des Forschungsprogramms «Energie in Gebäuden» mit den namhaften Forschungsteams in der Schweiz fortgeführt werden. Dies betrifft beispielsweise die Eidgenössisch Technische Hochschule Zürich (ETHZ) mit dem Forschungsteam von Prof. Dr. H.J. Leibundgut, die École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) mit dem Forschungsteam LESO von Prof. Dr. J.L. Scartezini und die Universität de Genève mit Prof. Dr. Bernard Lachal. 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 Forschungsprojekten beteiligt. Die Fachhochschule Nordwestschweiz (Teams von Prof. J. Bichsel und Prof. Dr. Th. Afjei) war ebenfalls mit mehreren Projekten beteiligt. Die langjährige Zusammenarbeit mit der Hochschule Luzern wurde weitergeführt, mit dem Zentrum für Integrale Gebäudetechnik von Prof. U.P. Menti, dem CC Typologie & Planung in Architektur von Prof. P. Schwehr oder der Abteilung Gebäudetechnik mit Prof. H. Manz. Es bestehen auch gute Kontakte zur italienischsprachigen Schweiz: 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)

wahrgenommen. Beim Brenet-Statusseminar 2012 und bei der CISBAT-Konferenz 2013 wirkt die Programmleitung auch im technischen Komitee mit.

Eine erfolgreiche Zusammenarbeit besteht mit dem Verein Energie-Cluster (www.energie-cluster.ch) im Rahmen der Innovationsgruppen Plusenergiegebäude und Hochleistungswärmedämmung. Die Programmleitung vertritt das BFE in der Begleitgruppe des Projektes «Use of Weather and Occupancy Forecasts for Optimal Building Climate Control» der ETHZ, MeteoSchweiz, der Empa und der Industrie.

Zur Sicherstellung der Umsetzung der aus der Forschung gewonnenen Erkenntnisse wird eine enge Zusammenarbeit mit dem Programm EnergieSchweiz gepflegt. Auf Programmebene werden sporadische Kontakte zu KTI, BAFU und Swisselectric Research gepflegt. Letztere beendete leider ihre Aktivitäten 2013.

Zur Absprache der Forschungsprojekte findet ein Austausch mit der Stadt Zürich statt, die in einem ähnlichen Bereich namhafte Unterstützung leistet. Eine weitere Plattform für eine nationale Absprache bilden halbjährliche Sitzungen mit der Begleitgruppe des Forschungsprogramms; diese wurde Anfang 2013 neu besetzt.

Internationale Zusammenarbeit

Diese findet hauptsächlich in Form der Beteiligung an den Implementing Agreements «Energy in Buildings and Communities Programme EBC» und «Solar Heating and Cooling SHC» der Internationalen Energieagentur (IEA) statt. Als Chair des EBC-Agreements und verantwortlicher Bereichsleiter des BFE verknüpft Andreas Eckmanns die nationale Forschung mit den Aktivitäten der IEA. Der Programmleiter Rolf Moser ist als Alternate der Schweiz ebenfalls in diese Zusammenarbeit eingebunden.

Die Beauftragten des Forschungsprogramms Energie in Gebäuden sind international gut vernetzt. Die Bereitschaft, in internationalen Forschungsprojekten mitzuwirken, ist gross. Die bisherigen Erfahrungen und der Nutzen dieser Zusammenarbeit für die Schweiz sind im Allgemeinen sehr positiv. Das Forschungsprogramm war 2013 in verschiedensten Projekten engagiert: Die FHNW vertritt die Schweiz im kombinierten EBC Annex 52/SHC Task 40 «Towards Net Zero

Energy Solar Buildings»; Die Firma Econcept und das LESBAT nehmen im EBC Annex 56 «Cost Effective Energy and Carbon Emissions and Optimization in Building Renovation» teil.

Für neue geplante EBC-Projekte sind verschiedene Schweizer Beteiligungen vorgesehen, so z. B. in den Annex's «New Generation Computational Tools for Building and Community Energy Systems», «Ventilative Cooling» oder «Implementation of Energy Strategies in Communities».

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», die beide Ende 2013 abgeschlossen wurden.

Referenzen

[1] Rolf Moser, Andreas Eckmanns: Konzept des Forschungsprogramm Energie in Gebäuden 2013–2016, Bundesamt für Energie, September 2012.

Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(* IEA-Klassifikation)

- 4-FAMILIENHAUS B35 IN ZERO-CARBON-LOWEX-TECHNOLOGIE**

P+D 1.2*

Lead:	HSLU	Funding:	BFE
Contact:	Rudolf Furter rudolf.furter@hslu.ch	Period:	2011-2013
Abstract:	Erfolgskontrolle des 4-Familienhaus B35 in Zero-Carbon-lowEx-Technologie.		
- 75%-AKTIV-SOLARHAUS (OHNE SAISONALE SPEICHERUNG)**

F+E 1.2

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.		
- AIR-ON, MULTIFUNKTIONALES RAUMLÜFTUNGS- UND KLIMAGERÄT - FELDMESSUNGEN IN MEHRFAMILIENHAUS IN WETZIKON**

F+E 1.2

Lead:	AirOn / HSLU	Funding:	BFE
Contact:	Adrian Peterhans adrian.peterhans@air-on.ch	Period:	2011-2013
Abstract:	Ein neu entwickeltes Einzelraumklimagerät soll im Labor, in einer Musterwohnung eines Sanierungsprojektes und in zwei normal genutzten Wohnungen ausgemessen werden. Mittels Simulationen wird das Gerät auf das Energieeinsparpotenzial in weiteren Situationen überprüft, sowie aufgrund der gemachten Erfahrungen weiter optimiert.		
- AUTOMATIC CONTROL OF AN ELECTROCHROMIC WINDOW**

F+E 1.2

Lead:	EPFL/ENAC/ICARE/LESO-PBX	Funding:	BFE
Contact:	Morel Nicolas nicolas.morel@epfl.ch	Period:	2009-2013
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.		
- 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:	2009-2013
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.		
- 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.		
- 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:	Pahud Daniel daniel.pahud@supsi.ch	Period:	2009-2013
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.		

● **IEA ECBCS, ANNEX 56 "ENERGY AND GHG OPTIMISED BUILDING RENOVATION"** F+E 1.2

Lead:	econcept AG	Funding:	BFE
Contact:	Ott Walter walter.ott@econcept.ch	Period:	2010-2014
Abstract:	Die Vorbereitungsphase bis Juni 2011 besteht in der Konzeption der methodologie für Subtask A.		

● **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 martin.jakob@tep-energy.ch	Period:	2010-2013
Abstract:	Die Ziele des Projekts sind Berechnung und Darstellung der spezifischen Primärenergie- und CO2-Vermeidungskosten und der CO2-Vermeidungs-potenziale 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:	Schueler Andreas andreas.schueler@epfl.ch	Period:	2009-2013
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.		

● **MEHRFAMILIENHAUS MIT ELEKTROMOBILITÄT IN RUPPERSWIL AG** F+E 1.2

Lead:	FHNW	Funding:	BFE
Contact:	Hall Monika 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".		

● **SURHIB - NACHHALTIGE ERNEUERUNG HISTORISCH WERTVOLLER BAUTEN** F+E 1.2

Lead:	Empa Building Technologies / BFH	Funding:	BFE
Contact:	Carmeliet Jan jan.carmeliet@empa.ch	Period:	2009-2013
Abstract:	The aim of this project is to evaluate and to further develop sustainable renovation technologies for historical buildings (end 19th – beginning 20th century).		

● **NULLENERGIE-GEBAUDE - 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 monika.hall@fhnw.ch	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.		

● **MEMPRODEC LL - OPEN ABSORPTION SYSTEM FOR AIR CONDITIONING USING MEMBRANE CONTACTORS** F+E 1.2

Lead:	CONDE ENGINEERING	Funding:	BFE
Contact:	Conde-Petit Manuel mconde.petit@mrc-eng.com	Period:	2010-2013
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 advantageously operated as an autonomous Air Handling Unit without need of any other refrigeration system.		

- **ECO-RENO - RÉNOVATION À FAIBLES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DANS LE DOMAINE DE L'HABITATION** F+E 1.2
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | HEIG-VD LESBAT | Funding: | BFE |
| Contact: | Citherlet Stéphane
stephane.citherlet@heig-vd.ch | 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.
- **SOLARE PLUS-ENERGIE SANIERUNG** F+E 1.2
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | Karin und Martin Stahl | Funding: | BFE |
| Contact: | Peter Dransfeld
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
- **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 | Period: | 2009-2014 |
- Abstract: 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. Durch den hohen Vorfertigungsgrad für die Bauhülle und Gebäudetechnik soll das Produkt, trotz den hohen Anforderungen, wirtschaftlich sein.
- **AKTIVA KÜHLEN ÜBER THERMISCH AKTIVIERTE AUSSENFLÄCHEN** F+E 1.2
- | | | | |
|----------|--------------------------------------|----------|-----------|
| Lead: | Fachhochschule Nordwestschweiz | Funding: | BFE |
| Contact: | Thomas Afjei
thomas.afjei@fhnw.ch | Period: | 2012-2015 |
- Abstract: Aktivierte Aussenflächen ersetzen Teile der konventionellen Gebäudehülle und fungieren als multifunktionale Komponenten zur Wärme- und Kälteerzeugung. Im Projekt AKTIVA werden Komponenten entwickelt, die sich speziell für den Kühlbetrieb eignen. Dazu werden abgestimmte hydraulische Schaltungen erarbeitet. Die Komponenten werden zunächst im Labormassstab getestet und im Anschluss in einem Feldtest vermessen.
- **ÖKOBILANZDATEN FÜR LÜFTUNG- UND WÄRMEANLAGEN** F+E 1.2
- | | | | |
|----------|---|----------|----------------|
| Lead: | büro für umweltchemie | Funding: | BFE+AHB Zürich |
| Contact: | Ueli Kasser
u.kasser@umweltchemie.ch | Period: | 2012-2013 |
- Abstract: Im Projekt werden die Ökobilanzdaten von Lüftungsanlagen (Basis: 10 Gebäude) und von Heizungsanlagen (Basis: 5 Gebäude) ermittelt. Die Daten werden anschliessend aufbereitet für die Darstellung auf der KBOB-Liste und für ecoinvent.
- **AEROGELS FROM SODIUM SILICATE: TOWARDS COST-EFFECTIVE MASS PRODUCTION TECHNOLOGIES** F+E 1.2
- | | | | |
|----------|--|----------|------------|
| Lead: | EMPA Dübendorf | Funding: | BFE+ EuFP7 |
| Contact: | Matthias Koebel
matthias.koebel@empa.ch | Period: | 2012-2015 |
- Abstract: This proposal outlines a concept that is likely to bring aerogel technology towards cost-effective mass production by developing a route for obtaining monolithic aerogels from sodium silicate (water glass) solutions using ambient pressure drying processes. A major challenge in this endeavour is that sodium silicate gels tend to be more fragile than those made from silicon alkoxide precursors.
- **TIEFE KOAXIAL-ERDSONDE** F+E 1.2
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | ETH Zürich | Funding: | BFE |
| Contact: | Leibundgut Hansjürg
leibundgut@hbt.arch.ethz.ch | Period: | 2012-2013 |
- Abstract: Es soll der Nachweis der Machbarkeit einer neuen Konstruktionsart einer Koaxial-Erdsonde mit gedämmtem Zentralrohr erbracht werden. Im Vorprojekt werden 3-D-Simulationen durchgeführt und die materialtechnische Machbarkeit soll nachgewiesen werden.

- | | | | |
|-----------|---|----------|-----------|
| ● | MONITORING EINER THERMISCHEN AREALVERNETZUNG IN KOMBINATION MIT EINEM ERDSONDENFELD | P+D | 1.2 |
| Lead: | HSLU | Funding: | BFE |
| Contact: | Dieter Lüthi dieter.luethi@hslu.ch | Period: | 2012-2015 |
| Abstract: | Nördlich des Bahnhofs Rotkreuz wird eine Überbauung mit bis zu 2'500 Arbeitsplätzen und Wohnraum für bis zu 1'500 Bewohnern realisiert. Dieses Areal wird mit einer thermischen Arealvernetzung (Anergienetz) in Kombination mit einem Erdsondenfeld ausgerüstet, die im P+D-Projekt untersucht werden. | | |
- | | | | |
|-----------|--|----------|-----------|
| ● | REDIMENSIONNEMENT DES CIRCULATEURS DE CHAUFFAGE, EAU CHAUDE ET FROID | F+E | 1.2 |
| Lead: | Bureau d'Etudes Keller-Burnier | Funding: | BFE |
| Contact: | Lucien Keller lucien.keller@sunrise.ch | Period: | 2012-2013 |
| Abstract: | Le projet cherche des méthodes pour le redimensionnement des circulateurs autres que ceux qui desservent un groupe indépendant de chauffage. Ce sont donc des pompes de groupe de chauffe-eau, de producteurs de chaleur, de froid et d'autres applications dans grandes bâtiments, qui peuvent être optimisées. | | |
- | | | | |
|-----------|--|----------|----------------|
| ● | ÖKOLOGISCH OPTIMALE DÄMMSTÄRKEN BEI WOHNBAUTEN | F+E | 1.2 |
| Lead: | HSLU | Funding: | BFE+AHB Zürich |
| Contact: | Heinrich Manz heinrich.manz@hslu.ch | Period: | 2012-2015 |
| Abstract: | Die ökologisch optimalen Dämmstärken bei Wohnbauten sollen – unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes – hinsichtlich Energie, Treibhausgaspotential und Umweltbelastung sowie in Abhängigkeit von Dämmmaterial, Standort, Heizsystem und Strommix ermittelt werden. | | |
- | | | | |
|-----------|--|----------|-----------|
| ● | TESTINSTALLATION MIT BEGLEITUNTERSUCHUNGEN FÜR OEKAG FLUID CONTROL VENTIL TYP V & S | P+D | 1.2 |
| Lead: | OEKAG | Funding: | BFE |
| Contact: | Giorgio C. Morandini info@oekag.com | Period: | 2012-2013 |
| Abstract: | Die untersuchten, neuartigen Ventile vermeiden die Wärmeverluste von Funktionsöffnungen. Mit der Installation unterschiedlicher Ventiltypen für Fortluftkanäle und Fallstrangentlüftungen auf einem grösseren Gebäude soll die Funktionstüchtigkeit unter realistischen Umwelteinflüssen überprüft werden. | | |
- | | | | |
|-----------|---|----------|-----------|
| ● | HYDROMECHANISCHE PRODUKTOPTIMIERUNGEN UND TESTINSTALLATION FÜR OEKAG ENERGYSTOP® VENTIL TYP W (DACHWASSERABLAUF MIT ENERGIEVERLUSTBREMSE) | P+D | 1.2 |
| Lead: | OEKAG | Funding: | BFE |
| Contact: | Giorgio C. Morandini info@oekag.com | Period: | 2012-2013 |
| Abstract: | Die untersuchten Ventile vermeiden die Wärmeverluste von Funktionsöffnungen. Im zweiten Pilotprojekt wird ein neuartiger Dachwassereinfluss untersucht. | | |
- | | | | |
|-----------|--|----------|-----------|
| ● | PLUSENERGIE-MFH MIT PRODUKTIONSOPTIMIERTEM VERBRAUCH | P+D | 1.2 |
| Lead: | Markus Portmann | Funding: | BFE |
| Contact: | Markus Portmann markus.portmann@e4plus.ch | Period: | 2012-2015 |
| Abstract: | Im Projekt soll aufgezeigt werden, wie mittels intelligenter Stromversorgung und intelligentem Stromverbrauch ein hoher Anteil des Bedarfs mit der gebäudeeigenen PV-Anlage gedeckt werden kann. Dazu werden die Betriebszeiten der Verbraucher optimiert und auf die Produktion abgestimmt. | | |
- | | | | |
|-----------|---|----------|-----------|
| ● | EFFILUFT – ELEKTROEFFIZIENZ VON MITTLEREN UND GROSSEN LÜFTUNGSANLAGEN | F+E | 1.2 |
| Lead: | HSLU | Funding: | BFE |
| Contact: | Christoph Dahinden christoph.dahinden@hslu.ch | Period: | 2013-2015 |
| Abstract: | In Verwaltungs- und Industriegebäuden wird bis zu einem Viertel der Elektrizität für die Luftförderung verwendet. Bei Messungen in der Stadt Zürich wurden die SIA-Grenzwerte bezüglich spezifischer Ventilatorleistung häufig deutlich überschritten. Bei der Antriebstechnik wird daher ein grosses Sparpotential vermutet. Neben der Bereitstellung von Daten werden im Projekt Massnahmen für neue und bestehende Anlagen entwickelt und erprobt. | | |

- **NEST - GANZHEITLICHE DYNAMISCHE TECHNOLOGIEPLATTFORM** P+D 1.2
- | | | | |
|----------|-------------------------------------|----------|-----------|
| Lead: | EMPA | Funding: | BFE |
| Contact: | Peter Richner peter.richner@empa.ch | Period: | 2013-2016 |
- Abstract: NEST ist eine modulare Forschungs- und Demonstrationsplattform des Empa-Eawag-Campus für zukunfts-trächtige Bau- und Gebäudetechnologien, Energieeffizienz im Bau, Betrieb und Rückbau. Als Zukunftslabor zum Leben und Arbeiten erlaubt es, neuartige Materialien und Komponenten sowie innovative Systeme unter Alltagsbedingungen zu testen und weiter zu entwickeln. NEST wird als "Living Lab" auch Gästezimmer und experimentelle Büroarbeitsplätze beherbergen.
- **ON STAGE - SUSTAINABLE TEMPORARY ARENA FOR GIGS AND EVENTS** P+D 1.2
- | | | | |
|----------|-----------------------------------|----------|-----------|
| Lead: | EPFL | Funding: | BFE |
| Contact: | Emmanuel Rey emmanuel.rey@epfl.ch | Period: | 2013-2015 |
- Abstract: Basé sur les résultats d'une recherche interdisciplinaire, le projet de démonstration "On STAGE" consiste à réaliser un nouveau type d'infrastructure événementielle, à la fois temporaire et durable. Basée sur l'usage de bois et de toile, son architecture bioclimatique concilie une grande efficacité énergétique, une intégration proactive de capteurs photovoltaïques, un confort accru pour les usagers et des impacts minimisés sur l'environnement.
- **IEA ANNEX 57 (EMBODIED ENERGY AND CARBON DIOXIDE EMISSIONS FOR BUILDING CONSTRUCTION): SCHWEIZER BEITRAG** F+E 1.2
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | Treeze | Funding: | BFE |
| Contact: | Rolf Frischknecht frischknecht@treeze.ch | Period: | 2013-2015 |
- Abstract: Im Rahmen des Schweizer Beitrags zum IEA Annex 57 „Evaluation of Embodied Energy and Carbon Dioxide Emissions for Building Construction“ wird eine Übersicht über Ansätze zur Berechnung der Grauen Energie erarbeitet, die Ansätze charakterisiert und ein gemeinsamer konsistenter Ansatz vorgeschlagen. Es werden Fallbeispiele realisierter Bauten analysiert und hinsichtlich Grauer Energie, Treibhausgas-Emissionen und Gesamtumweltbelastung ausgewertet.
- **SPEQUA – THERMISCHE UND ELEKTRISCHE SPEICHER IN GEBÄUDEN UND QUARTIEREN: SYSTEME, ANWENDUNG UND UMWELTBILANZ** F+E 1.2
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | Ökozentrum Langenbruck | Funding: | BFE |
| Contact: | Christian Gaegauf christian.gaegauf@oekozentrum.ch | Period: | 2013-2016 |
- Abstract: Dezentrale Energiespeicher spielen bei der Versorgung von Gebäuden und Quartieren mit erneuerbaren Energien eine zentrale Rolle. Speichersysteme sollen kurzzeitige aber auch saisonale Produktionsschwankungen ausgleichen. Das Projekt schafft eine Übersicht von thermischen und elektrischen Speichersystemen in Gebäudeclustern (Quartiere). Die Speichersysteme werden punkto Effizienz, Umweltverträglichkeit und technischer Einbindung charakterisiert.
- **GRENUL - MÖGLICHKEITEN UND GRENZEN VON GROSSEN NULLENERGIEGEBÄUDEN** F+E 1.2
- | | | | |
|----------|---------------------------------|----------|-----------|
| Lead: | FHNW | Funding: | BFE |
| Contact: | Monika Hall monika.hall@fhnw.ch | Period: | 2013-2014 |
- Abstract: Standards wie Minergie-A fordern eine Netto-Nulljahresbilanz. Für Einfamilienhäuser und kleine Mehrfamiliengebäude reicht der Platz für eine entsprechende PV-Anlage aus. Bei grösseren und grossen Gebäude wird das Verhältnis von Dachfläche zur Wohn-/Nutzfläche ungünstig. Eine Parameterstudie soll Aufschluss geben, welche Möglichkeiten die begrenzenden Faktoren der Geometrie und Lage auf die solare Energiegewinnung geben. Ziel ist es, daraus einen Katalog mit verschiedenen Parameterkombinationen abzuleiten.
- **ABLEG - ABLUFTANLAGEN IN DER ENERGETISCHEN GEBÄUDEERNEUERUNG** F+E 1.2
- | | | | |
|----------|---------------------------------------|----------|-----------|
| Lead: | FHNW | Funding: | BFE |
| Contact: | Heinrich Huber heinrich.huber@fhnw.ch | Period: | 2013-2015 |
- Abstract: Bei energetischen Sanierungen von Mehrfamilienhäusern sind Abluftanlagen eine Alternative zu Komfortlüftungen. Der energetische Nutzen ist aber unklar. So gehen schweizerische Normen von erhöhten Infiltrationsverlusten aus. Weiter bestehen Unsicherheiten bei der Filtrierung, der Luftführung und der Instandhaltung. Auf Basis von Felduntersuchungen und Vergleichen mit ausländischem Wissen sollen Unsicherheiten ausgeräumt werden.
- **GEPAMOD – ERWEITERUNG DES GEBÄUDEPARKMODELLS GEMÄSS SIA EFFIZIENZPFAD** 0 1.2
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | TEP Energy | Funding: | BFE |
| Contact: | Martin Jakob martin.jakob@tep-energy.ch | Period: | 2013-2015 |
- Abstract: Das Ziel des Projekts ist die Modellierung des Gebäudeparks der Schweiz bis 2050, um die Kompatibilität des SIA Effizienzpfades mit den gesamtschweizerischen Zielen der 2000-Watt-Gesellschaft und der Energiestrategie 2050 des Bundes zu prüfen und Grundlagen für anwendbare Kennwerte zu schaffen.

- QUALIBOB – QUALITÄTSSCHUB FÜR DIE KBOB-LISTE „ÖKOBILANZDATEN IM BAUBEREICH“**

F+E 1.9

Lead:	büro für umweltchemie	Funding:	BFE
Contact:	Ueli Kasser u.kasser@umweltchemie.ch	Period:	2013-2015

Abstract: Die KBOB-Liste „Ökobilanzdaten im Baubereich“ ist von grosser Bedeutung für Label-Nachweisinstrumente (Minergie- Eco, A) und entsprechende Software sowie andere Instrumente des nachhaltigen Bauens (z.B. eco-devis). Es ist deshalb wichtig, dass die KBOB-Liste vergleichbare Datensätze anbietet, die mit einheitlichen Qualitätsvorgaben erhoben wurden und alle wichtigen Baustoffe umfassen. Das vorliegende Projekt dient der weiteren Steigerung der Qualität der KBOB-Liste und erarbeitet wichtige fehlende Datensätze.
- 2000-W-STÄBAU – ANALYSE DER 2000-WATT-GESELLSCHAFTSASPEKTE IM STÄDTEBAULICHEN PLANUNGSPROZESS**

F+E 1.2

Lead:	Intep AG	Funding:	BFE
Contact:	Daniel Kellenberger kellenberger@intep.com	Period:	2013-2015

Abstract: Dieses Projekt enthält eine strukturierte Analyse der in den städtebaulichen Planungsprozessen verwendeten Instrumente hinsichtlich der Aspekte der 2000-Watt-Gesellschaft. Die Analyse begrenzt sich auf die Schweiz. Die Erkenntnisse werden klar und einfach verständlich, wenn möglich grafisch aufbereitet und den Interessierten zur Verfügung gestellt. Daraus folgernd wird auch ein möglicher zukünftiger Handlungsbedarf resultieren.
- GEMEN - GEBÄUDEPARK UND METHANGASNETZ**

F+E 1.2

Lead:	FHNW	Funding:	BFE
Contact:	René Kobler rene.kobler@fhnw.ch	Period:	2013-2015

Abstract: Das Forschungsprojekt GEMEN ist ein Startprojekt, in dem die Plausibilisierung der Anwendung von Power-to-Gas für Raumwärme und Warmwasser im Gebäudebereich untersucht wird. Das verbindende Element ist dabei das Gasnetz Schweiz. Die grundsätzlichen Wirkungsprinzipien von erneuerbarem Gas und dessen saisonalen Speicherung werden anhand eines Teils des Gebäudeparks untersucht und Potentiale für den Weg zur Energiewende aufgezeigt.
- COMPARE-RENOVE: RÉNOVATION THERMIQUE - DU CATALOGUE DE SOLUTIONS À LA PRATIQUE RÉELLE**

F+E 1.2

Lead:	UNIGE	Funding:	BFE
Contact:	Pierre Lachal bernard.lachal@unige.ch	Period:	2013-2016

Abstract: COMPARE-RENOVE s'intéresse à la performance réelle des rénovations thermiques dans une perspective d'amélioration et de diffusion des bonnes pratiques, fondé sur le benchmark d'un ensemble représentatif de rénovations d'immeubles d'habitations. En complément, et sur la base de retours d'expérience, on se focalisera sur deux solutions : a) la fermeture des balcons en loggia ; b) la récupération de chaleur sur air-vicié pour le préchauffage de l'ECS.
- HEMSAN - ABBAU VON HEMMNISSEN FÜR SANIERUNGEN VON LIEGENSCHAFTEN INSTITUTIONELLER INVESTOREN**

F+E 1.2

Lead:	Uni Zürich	Funding:	BFE
Contact:	Erika Meins erika.meins@ccrs.uzh.ch	Period:	2013-2015

Abstract: Gebäude verbrauchen rund 46 % der Gesamtenergie. Während Neubauten hohe energetische Standards erfüllen, wird das Sanierungspotenzial bestehender Gebäude schlecht genutzt. Erste Arbeiten zeigen, dass sich Hemmnis- und Anreizstrukturen in der Stadt Zürich je nach Eigentümergruppe stark unterscheiden. Das Projekt fokussiert auf dem ungenutzten Sanierungspotenzial institutioneller Investoren und zeigt auf, wie das beträchtliche Potenzial genutzt werden kann.
- PLUSQUA – AUSGEGLICHENEN ENERGIEBILANZEN IN STÄDTISCHEN QUARTIEREN MIT FOKUS AUF MASSNAHMEN FÜR EINZELNE GEBÄUDE**

F+E 1.2

Lead:	HSLU	Funding:	BFE
Contact:	Urs-Peter Menti urs-peter.menti@hslu.ch	Period:	2013-2014

Abstract: Auf Quartiersebene werden architektur-typologische, nutzungsspezifische und technische Interventionen auf Ihr Potential untersucht, eine möglichst ausgeglichene Energiebilanz zu erreichen. Die Interventionen sollen auch ein optimales Angleichen der Produktions- und der Bedarfsprofile auf Quartiersebene ermöglichen, um den Speicherbedarf zu minimieren.
- SANETAP – NACHHALTIGE SANIERUNG IN ETAPPEN**

F+E 1.2

Lead:	econcept AG	Funding:	BFE
Contact:	Walter Ott walter.ott@econcept.ch	Period:	2013-2015

Abstract: Etappierte Gebäudeerneuerungen riskieren bezüglich der langfristigen Zielsetzungen nicht nachhaltig zu sein. Zur Erforschung der Voraussetzungen, Einflussfaktoren, Chancen und Hemmnisse für nachhaltige etappierte Erneuerungen werden ihre Formen und ihre Bedeutung mit Kostenevaluationen, Interviews von Schlüsselpersonen und web-basierten Akteur-Befragungen untersucht und Erfolgsfaktoren, massgebliche Hemmnisse und Massnahmen zur Hemmnisüberwindung erarbeitet.

- **PERFORMANCE GLOBALE EN ÉCLAIRAGE** F+E 1.2
- | | | | |
|----------|----------------------------------|----------|-----------|
| Lead: | ESTIA AG | Funding: | BFE |
| Contact: | Bernhard Paule
paule@estia.ch | Period: | 2013-2014 |
- Abstract: Le projet a comme but, d'observer l'impact du comportement des utilisateurs des stores sur l'utilisation de l'éclairage artificiel. L'autonomie en éclairage naturel sera calculé et validé sur des bâtiments réels et sur un modèle en grandeur réelle (Hochschule Luzern). Le projet vise à faire des recommandations pour les planificateurs, les autorités normatives, le marché des stores et des automatismes en éclairage.
- **TARO THERMISCHE AREALVERNETZUNG - ENERGETISCHE OPTIMIERUNG ANHAND VON DYNAMISCHEN SYSTEMSIMULATIONEN** F+E 1.2
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | SPF Rapperswil | Funding: | BFE |
| Contact: | Matthias Rommel
matthias.rommel@hsr.ch | Period: | 2013-2016 |
- Abstract: Nahwärmenetze, welche Abwärme in Erdsondenfeldern speichern und auf tiefem Temperaturniveau als Quelle von dezentralen Wärmepumpen wieder zur Verfügung stellen, werden in dynamischen Simulationen abgebildet. Auf der Basis von realen Netzen werden Optimierungsvorschläge für den Betrieb und die Einbindung von erneuerbaren Energien ausgearbeitet.
- **SOLVAR-BWW TECHNOLOGIEVERGLEICH SOLARE BRAUCHWARMWASSERERWÄRMUNG: PHOTOVOLTAIK UND WÄRMEPUMPE IM VERGLEICH MIT SOLARTHERMIE** F+E 1.2
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | Ökozentrum Langenbruck | Funding: | BFE |
| Contact: | Michael Sattler
michael.sattler@oekozentrum.ch | Period: | 2013-2014 |
- Abstract: Die solare Brauchwarmwassererwärmung erfolgt aktuell fast ausschliesslich mit solarthermischen Systemen. Die Kombination von Photovoltaik und Wärmepumpe ist eine neuere Option der solaren Brauchwarmwassererwärmung. Abhängig von den Randbedingungen und Systemgrenzen weisen beide Systeme Vor- und Nachteile auf. Im vorliegenden Projekt werden die Technologievarianten untersucht und unter verschiedenen Randbedingungen miteinander verglichen.
- **MICRO3D – OPTIMISATION DE L'UTILISATION DE LA LUMIÈRE DU JOUR PAR FABRICATION DE MICROSTRUCTURES EN 3D ENCAPSULÉES** F+E 1.2
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | LESO EPFL | Funding: | BFE |
| Contact: | Andreas Schüler
andreas.schueler@epfl.ch | Period: | 2013-2015 |
- Abstract: Le système innovateur de vitrage proposé dans ce projet rempli plusieurs fonctions. En hiver, les gains solaires contribuent à une réduction de l'énergie de chauffage ; en été, le vitrage proposé bloque le rayonnement direct, et contribue à une réduction de l'énergie de climatisation. De plus, l'utilisation judicieuse de la lumière du jour permet d'économiser l'énergie utilisée pour l'éclairage électrique, et contribue au bien-être des utilisateurs.
- **SADLESS SYSTEMISCHE BETRACHTUNG VON BESCHATTUNGSSYSTEMEN MIT DEM FOKUS TAGESLICHT UND OPTIMIERUNG DER SIA 380/4** F+E 1.2
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | HSLU | Funding: | BFE |
| Contact: | Bjoern Schrader
bjoern.schrader@hslu.ch | Period: | 2013-2014 |
- Abstract: Das Projekt hat das Ziel, die Tageslichtfunktionalität und deren Potential zur Reduzierung der Volllaststunden der künstlichen Beleuchtung zu untersuchen. Dies soll mit Hilfe von lichttechnischen Messungen an einem sich um die eigene Achse drehenden Messraum durchgeführt werden. Die Resultate fliessen in die neue SIA 380/4 "Elektrische Energie im Hochbau - Beleuchtung" ein.
- **IEA-SHC TASK 50 ADVANCED LIGHTING SOLUTIONS FOR RETROFITTING BUILDINGS, DIRECTION DE LA SUBTASK C METHODS AND TOOLS** F+E 1.9
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | LESO EPFL | Funding: | BFE |
| Contact: | Jean-Louis Scartezzini
jean-louis.scartezzini@epfl.ch | Period: | 2013-2015 |
- Abstract: L'éclairage électrique est responsable d'un cinquième de la consommation globale d'électricité dans les pays de l'OCDE. Les activités prévues dans le cadre l'IEA-SHC Task 50 Advanced Lighting Solutions for Retrofitting Buildings visent à promouvoir et mettre en oeuvre des stratégies de rénovation d'enveloppes de bâtiment et d'installations d'éclairage artificiel, en vue de réduire la consommation d'électricité des bâtiments non résidentiels (industrie, tertiaire et commerce).
- **ERSEWW - STRATEGIE FÜR DEN ERSATZ VON ELEKTRO-WASSERERWÄRMERN** F+E 1.2
- | | | | |
|----------|--------------------------------------|----------|-----------|
| Lead: | HSLU | Funding: | BFE |
| Contact: | Benoit Sicre
benoit.sicre@hslu.ch | Period: | 2013-2015 |
- Abstract: Laut Beschluss des Bundesrates sind Elektrowassererwärmer bis 2025 durch energieeffiziente Technologien zu ersetzen. Es besteht heute für diesen Technologieumbau kein konkreter Umsetzungsplan. Ausgehend von einer Bestandsanalyse werden realisierbare, energieeffiziente und kostenminimierende Systemkonzepte erarbeitet. Hierfür werden reale Verbräuche gemessen. In einem Folgeprojekt sind diese Lösungen mit Partnern zu entwickeln und zu testen.

● **ROGEK - VORUNTERSUCHUNG ROBUSTHEITSBEWERTUNG VON INTEGRIERTEN GEBÄUDETECHNISCHEN KONZEPTEN IN VERWALTUNGSBAUTEN** F+E 1.2

Lead:	HSLU	Funding:	BFE
Contact:	Christian Struck christian.struck@hslu.ch	Period:	2013-2014

Abstract: Planer und Betreiber haben aktuell keine Möglichkeit, ihre integrierten gebäudetechnischen Konzepte auf Robustheit hinsichtlich des künftigen Nutzerverhalten und der Klimavariabilität zu testen. Das Projekt zielt darauf ab, die Grundlagen zur Robustheitsbewertung zur erarbeiten und deren Nutzen an drei aktuellen Fallstudien zu demonstrieren. Von den Ergebnissen werden Handlungsempfehlungen für die integrierte Planung abgeleitet.

● **OPTEG - REGELSTRATEGIEN FÜR DIE OPTIMIERUNG DES EIGENVERBRAUCHS VON GEBÄUDEN** F+E 1.2

Lead:	FHNW	Funding:	BFE
Contact:	David Zogg david.zogg@fhnw.ch	Period:	2013-2015

Abstract: In der Energiestrategie 2050 will der Bundesrat die Eigenverbrauchsregelung für Klein-Photovoltaikanlagen einführen. In diesem Projekt werden Regelstrategien zur Optimierung des Eigenverbrauchs unter Berücksichtigung der lokalen elektrischen wie auch thermischen Produktion, Speicherkapazität und des Verbrauchs untersucht. Die lokale thermische Speicherung in der Gebäudehülle über Wärmepumpen ist zentraler Projektbestandteil.

● **OPTIMIERUNG BESTEHENDER EINZELRAUM-HEIZUNGSREGELUNGEN MITTELS WETTERPROGNOSEBASIERTER KORREKTURALGORITHMEN – „EPINETTES 51“** P+D 1.2

Lead:	Pronoó GmbH	Funding:	BFE
Contact:	Urs Grossenbacher urs.grossenbacher@ines-energy.ch	Period:	2013-2014

Abstract: Wetterprognosedaten sollen dahingehend aufgearbeitet werden, dass diese in einen Temperaturoffset-Wert umgesetzt werden, welcher über ein bestehendes, internetgestütztes Einzelraumregelungssystem dem vom Benutzer eingestellten Raumtemperatursollwert hinzuaddiert wird. Damit kann die Energieeffizienz der Raumheizung verbessert werden, weil die Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes gezielt bewirtschaftet und die Nutzung der freien Wärme gesteigert wird.

Elektrizitätstechnologien und -anwendungen



Titelbild:

Funktionsmuster eines hoch effizienten 2-Watt-Routers

Die durchschnittliche Leistung eines Routers (Home Gateway) beträgt heute zwischen 7 und 10 Watt. Gemeinsam mit der Industrie konnte anhand eines Funktionsmusters nachgewiesen werden, dass es möglich ist, einen Home Gateway mit einer durchschnittlichen Leistung von 2 Watt zu bauen. Dies geht weit über die gesetzten Zielwerte des europäischen Code of Conduct hinaus, der periodisch verschärft wird und von der Industrie immer nur knapp eingehalten werden kann. Die Arbeiten zeigen, dass nebst einer sorgfältigen Hardware-Evaluation die Hard- und Software optimal aufeinander abgestimmt und intelligent miteinander verknüpft werden muss, um maximale Effizienzergebnisse zu erzielen (Quelle: Dr. Vogel Kommunikation).

BFE Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien und -anwendungen
Überblicksbericht 2013

Auftraggeber:
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern

Programmleiter BFE (Autor):
Roland Brüniger, R. Brüniger AG (roland.brueeniger@r-brueniger-ag.ch)

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

www.bfe.admin/forschungelektrizitaet/

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

Einleitung

Die Energiestrategie 2050 als Ganzes sowie das vorgeschlagene, etappierte Vorgehen stiessen bei der Vernehmlassung, die bis Ende Januar 2013 dauerte, mehrheitlich auf Zustimmung. In der Energiestrategie 2050 werden die Ziele und die vorgesehenen Massnahmen zur Umsetzung des Ausstiegs aus der Atomenergie beschrieben. Dabei steht neben dem Ausbau der erneuerbaren Energien und weiteren, flankierenden Massnahmen die Energieeffizienz im Vordergrund. Als quantitative Zielsetzung soll der durchschnittliche Energiebedarf pro Person und Jahr gegenüber dem Stand im Jahr 2000 bis 2035 um 43 Prozent reduziert werden. Der Gesamtstrombedarf ist bis 2020 um etwa 3 Prozent zu verringern und bis 2035 soll eine Reduktion um 13 Prozent erzielt werden. Die Botschaft zum ersten Massnahmenpaket der Energiestrategie 2050 hat der Bundesrat nun im September 2013 dem Parlament zur Beratung überwiesen.

Im Jahr 2010 sind in der Schweiz erstmals Verbrauchsvorschriften für Elektrogeräte erlassen worden. Auf den Herbst 2014 sind einerseits Verschärfungen der bestehenden Vorschriften vorgesehen und andererseits werden Energieverbrauchsvorschriften für weitere Elektrogeräte in Kraft gesetzt. Eine detaillierte, volkswirtschaftliche Analyse der geplanten Effizienzvorschriften hat aufgezeigt, dass diese in der Schweiz im Jahr 2020 zu einer Verringerung des Energiebedarfs um rund 750 GWh gegenüber der Referenzentwicklung ohne Einführung resp. Verschärfung der Vorschriften führen dürfte. Dies entspricht rund 1,3 Prozent des heutigen, jährlichen Stromverbrauchs in der Schweiz.

Mit dieser Ausrichtung der Energiepolitik werden auch die zukünftigen Forschungsaktivitäten nachhaltig beeinflusst. So werden mit dem «Aktionsplan Koordinierte Energieforschung Schweiz» [1] für die Jahre 2013–2016 insgesamt 202 Millionen Franken zur Stärkung der Forschung und Innovation im Energiebereich reserviert. Der Fokus wird dabei verstärkt auf die anwendungsorientierte Energieforschung gelegt. Die wichtigste der fünf identifizierten Stossrichtungen betrifft die Energieeffizienz.

Neben regulatorischen Massnahmen und diversen Anreiz- und Förderinstrumenten zur Erhöhung der Effizienz sind auch verstärkte Anstrengungen im Bereich neuer und effizienter Technologien unabdingbar. Erst die Verfügbarkeit dieser Technologien erlaubt es dem Gesetzgeber wiederum, verschärfende Vorgaben zu erlassen oder entsprechende Fördermassnahmen zu lancieren.

Im Hinblick auf die mit der Energiestrategie verbundenen, zukünftigen Herausforderungen ist es entscheidend, die verfügbaren finanziellen Mitteln des vorliegenden Forschungsprogramms in denjenigen Bereichen einzusetzen, in denen ein grosses 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 so genannte 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 ausgetauscht und relevante Erkenntnisse fliessen soweit möglich und zweckmässig in zukünftige Forschungsaktivitäten mit ein.

Die Energiestrategie 2050 kann nur erfolgreich umgesetzt werden, wenn sich auch die Wirtschaft und deren Verbände entsprechend engagieren. Mit verschiedenen Fach- und Industrieverbänden sind bereits entsprechende Kontakte und Kooperationen etabliert worden. Es ist erfreulich, dass im Jahr 2013 eine neue, gute Zusammenarbeit mit dem Schweizerischen Verband der Telekommunikation (asut) aufgebaut werden konnte. Die Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) dürfte bei der Energiewende eine tragende Rolle spielen und zwar einerseits als Mittel zur intelligenten Nutzung der Energie und andererseits müssen auch die IKT-Geräte entsprechend effizient gebaut werden. Der durch die Industrie im Jahr 2013 entwickelte 2-Watt-Router ist dazu ein ausgezeichnetes Beispiel. Damit konnte nachgewiesen werden, dass im Vergleich zu heute gängigen Geräten der Energiebedarf um etwa 80 % reduziert werden könnte.

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

Die Thermoelektrik ermöglicht die direkte Umwandlung von Wärme in Elektrizität. Weil damit die bei vielen Prozessen anfallende Abwärme in eine vielseitig nutzbare Energieform gewandelt werden kann, stellt sie einen wesentlichen Schwerpunkt im Programmbereich «Energiekonversion» dar. 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 könnte sich allenfalls zu einer alternativen Speichertechnologie entwickeln. Bisherige Ergebnisse zeigen aber auf, dass bis zu einer kommerziellen Nutzung noch ein erheblicher Aufwand betrieben werden muss.

Motoren stellen die grösste Verbraucherkategorie dar. Gemeinsam mit der Industrie werden deshalb in diversen Anwendungsgebieten Optimierungen erforscht. Da bei motorischen Anwen-

dungen der Einsatz von Umrichtern oft die Effizienz steigern kann, werden diese gleichermassen in die Forschungsaktivitäten einbezogen. Haushaltsgeräte machen ebenfalls einen relevanten Verbrauchsanteil aus, weshalb in diesem Bereich neuartige Technologien erforscht und Optimierungsarbeiten durchgeführt werden. Die Vakuumisolation als Querschnittstechnologie stellt dazu beispielsweise eine erfolgversprechende Einsparmöglichkeit dar. Auch Energieoptimierungen spezifischer Geräte werden untersucht. Im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik werden Grundlagen und Erkenntnisse bezüglich Smart Metering, Smart Home und Effizienzverbesserungen von Kommunikationsendgeräten erarbeitet. Schliesslich werden in Fortführung der internationalen Aktivitäten im Rahmen des IEA Implementing Agreements 4E *Efficient Electrical End Use Equipment* neues und bestehendes Wissen zur Energieeffizienz verschiedener elektrischer Geräte aufbereitet und verbreitet.

Rückblick und Bewertung 2013

Mit einer Grundlagenstudie konnte gezeigt werden, dass eine Gleichstromerschliessung im Wohn- und Gewerbebereich – trotz teilweise gegenteiligen Aussagen – keine oder nur marginale Stromeinsparungen mit sich bringt.

Untersuchungen im industriellen Umfeld haben aufgezeigt, dass der Einspareffekt durch Vakuumpaltisolationen enorm ist. Alleine Boiler und Warmwasserleitungen weisen damit ein geschätztes, jährliches Einsparpotenzial von ca. 3'000 GWh auf, was etwa 5 % des schweizerischen Stromverbrauchs entspricht.

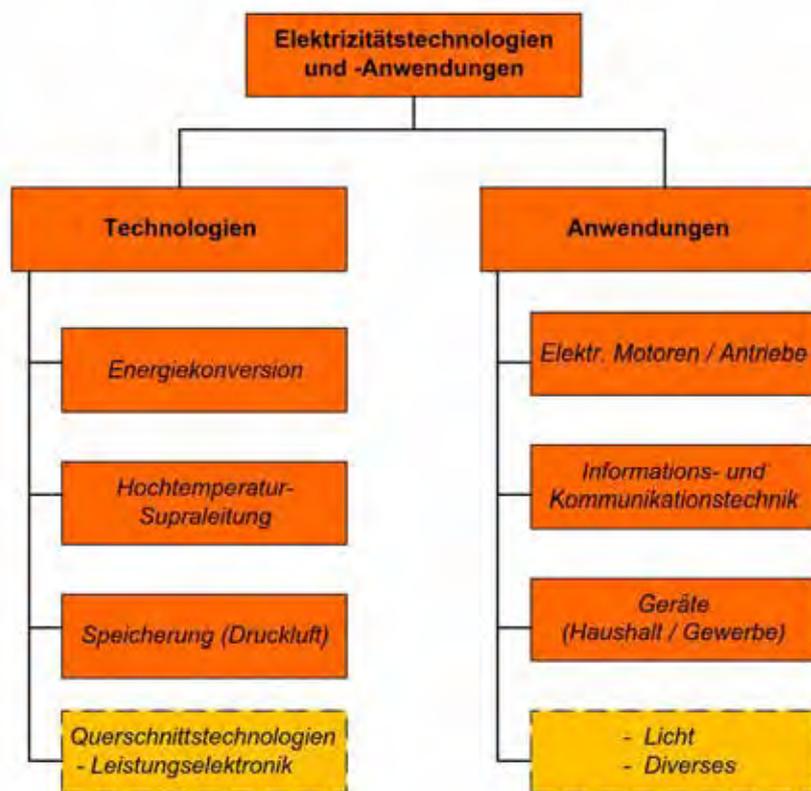
Die Verlängerung des IEA Implementing Agreements 4E *Efficient Electrical End Use Equipment* um weitere 5 Jahre bis 2019 wurde vorbereitet und durch die IEA genehmigt. Dabei wird eine thematische Ausweitung mit dem neuen Annex *Electronic Devices and Networks Annex (EDNA)* vorgenommen.

Eine Studie hat aufgezeigt, dass höchste Wirkungsgrade bei Industriemotoren auch ohne den Einsatz von Magneten mit seltenen Erden (Permanentmagnetmotoren) möglich sind. Bei Kleinmotoren bilden keramische Magnete eine Alternative. Dieses Material ist günstig zu kaufen und reichlich vorhanden. Im mittleren Leistungsbereich stellt der Reluktanzmotor mit Umformer und Vektorregelung eine sehr effiziente Alternative dar.

Ausblick

Nachdem 2012 ein Funktionsmuster einer Einzelraumwärmepumpe als Ersatz von Elektroheizungen entwickelt werden konnte, wurde das Projekt durch den damals involvierten Industriepartner aufgrund geänderter Prioritätensetzung abgebrochen. Intensive, zwischenzeitliche Bemühungen führten Ende 2013 dazu, dass ein neuer Industriepartner Interesse bekundete. Es ist zu hoffen, dass im 2014 diese Arbeiten weitergeführt werden können.

Internationale Studien zeigen auf, dass Transformatoren im Verteilnetz teilweise erhebliche Verluste aufweisen. Eine im Jahr 2013 gestartete Studie soll das



Figur 1: Programmstruktur (Quelle: R. Brüniger AG)

entsprechende Potenzial in der Schweiz aufzeigen. Ebenfalls soll eine gemeinsam mit der asut beauftragte Studie das Einsparpotenzial von Rechenzentren ausweisen und entsprechende Spar-

massnahmen vorschlagen. Die im Jahr 2013 gestarteten Forschungsanstrengungen mit einem Industriepartner zeigten in ersten Ansätzen, dass es technisch möglich sein sollte, einen A++++-Kühl-

schränk mit einer 50 % besseren Effizienz als heutige A+++-Modelle zu bauen. Konkrete Ergebnisse dazu werden im 2014 erwartet.

Highlights aus Forschung und Entwicklung

Vakuumpaltisolation – eine Technik mit grossem Potenzial

Im abgeschlossenen Projekt *Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte* [2] haben ausgiebige Berechnungen und Messungen an Funktionsmustern gezeigt, dass mit der Anwendung der Vakuumpaltisolation (VSI) der Wärmeverlust um bis zu 80 % gegenüber den heute besten Isolationslösungen reduziert werden kann. Weiter konnte gezeigt werden, dass sich die entstehenden Mehrkosten durch Anwendung einer derartigen Isolation mit grösster Wahrscheinlichkeit im wirtschaftlich akzeptablen Rahmen bewegen dürften.

Erste durchgeführte Überlegungen und Berechnungen zur Anwendung von VSI für grossvolumige Anwendungen lassen ferner vermuten, dass ähnlich grosse Einsparungsprozente auf wirtschaftliche Weise nicht nur im Bereich der Haushaltsgeräte, sondern auch in kommerziell genutzten Geräten sowie industriellen energieintensiven Prozessen realisiert werden können. Und dies nicht nur für Situationen mit relativ kleinem Temperaturunterschied von beispielsweise etwa 100 °C, sondern durchaus auch bei Anwendungen, bei welchen Temperaturunterschiede von mehreren 100 °C isoliert werden müssen.

In einer vertieften Forschungsarbeit [3] wurde dieser Fragestellung nachgegangen und eine Vielzahl von industriellen Prozessen wurde auf deren Einsparpotenzial hin untersucht. Zur Identifikation und Bewertung vielversprechender Anwendungen wurden spezifische Auswahlkriterien entwickelt. Diese berücksichtigen unterschiedliche Ausprägungen wie Temperaturbereich, Komplexität

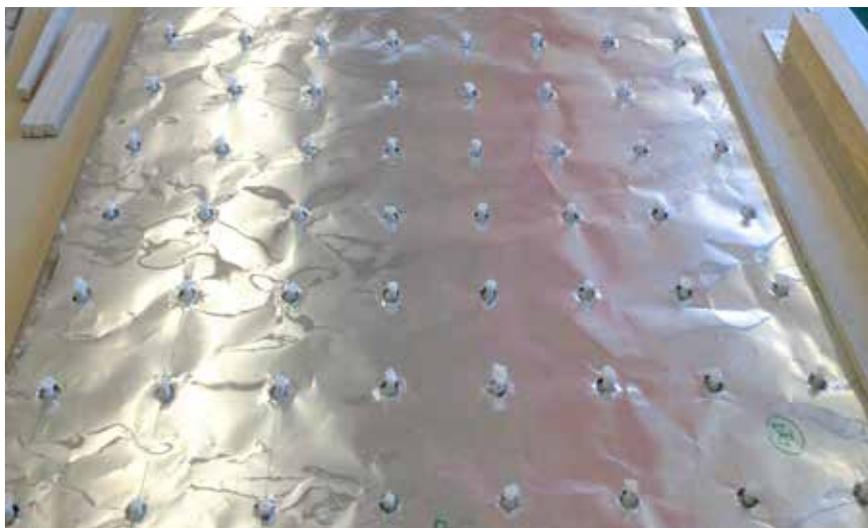
der trennenden Prozesswand, Einsparpotenzial und ferner eine vergleichende Abschätzung des Einspareffekts mit konventioneller Isolation anstelle einer VSI. Unter Berücksichtigung dieser Kriterien wurde anschliessend eine Vielzahl von industriellen Anwendungen einer entsprechenden Bewertung unterzogen. Dabei hat sich gezeigt, dass von mehreren hundert Anwendungen weit über die Hälfte aus verschiedensten Gründen nicht für einen sinnvollen Einsatz von VSI geeignet ist.

Ein wichtiges, bereits erwähntes Kriterium für die Nutzung der VSI stellt die Einfachheit der trennenden Prozesswand dar. Deshalb standen Prozesse mit nicht komplexen und geometrisch ähnlichen Formen im Vordergrund und aus diesem Grund konzentrierten sich die Arbeiten auf zylindrische (z. B. Rohre, Boiler) und kubische Formen (Tunnelöfen, Durchlauföfen und -bäder, gewerbliche Tief-

kühler). Anhand ausgewählter Beispiele konnten grosse gesamtschweizerische Einsparpotenziale aufgezeigt werden. Dabei wiesen Boiler mit etwa jährlich 1'650 GWh und Warmwasserleitungen in Gebäuden mit ebenfalls jährlich ca. 1'350 GWh die grössten Einsparpotenziale auf. Diese Ergebnisse beruhen primär auf der Tatsache, dass in der Schweiz über 8,5 Millionen Boiler und etwa 44'000 km Rohrleitungen installiert sind.

Aufgrund dieses enormen Einsparpotenzials werden nun in einer kürzlich gestarteten Fortsetzungsarbeit [4] technische Abklärungen im Bereich VSI für Rohranlagen durchgeführt. Dabei wird das Augenmerk nicht nur auf die Neuaninstallationen gelegt, sondern auch der Retrofit-Bereich wird einbezogen.

Neben den zylindrischen Anwendungen gibt es wie bereits erwähnt auch grosse Einsparpotenziale im Bereich von kubi-



Figur 2: Offenes 1x1 m grosses VSI-Testpanel mit symmetrisch angeordneten Distanzhaltern und dünner Aluminiumfolie (Quelle: Helbling AG).



Figur 3: Messaufbau des verschlossenen 1x1 m VSI-Testpanel zur Bestimmung des Temperaturverlaufs im thermischen Beharrungszustand (Quelle: Helbling AG)

schen Anwendungen (Kühlschränke, Gefrierschränke, gewerbliche Tiefkühler, etc.). Da für die Isolation von ebenen Flächen das Panel ein Grundelement darstellt, wurden dazu verschiedene technische Untersuchungen vorgenommen [5]. Themen wie Distanzhalter, Rand-Distanzhalter und die Einbringung einer zur Minderung des Energietransports durch Wärmestrahlung notwendi-

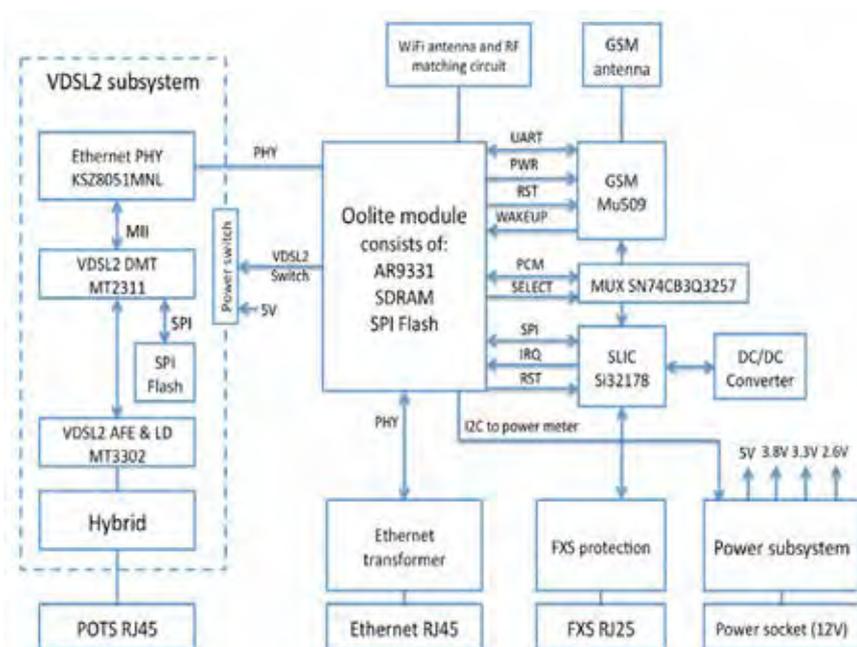
gen Folie standen dabei im Vordergrund. Im Rahmen der Arbeiten konnte eine Herstellvorrichtung für Distanzhalter konzipiert und gebaut werden. Sowohl Ball-Distanzhalter als auch Parallel-Filament-Distanzhalter wurden bezüglich ihrer Druckfestigkeit und ihrer Wärmeleitfähigkeit im Vakuum messtechnisch geprüft, wobei sich die Ball-Distanzhalter als sehr gut geeignet erwiesen. Be-

züglich thermisch guter, kostengünstiger Randaufbauten zeigte sich ein ca. 20 µm dickes Stahlband mit einem weichen Strang aus parallel verlaufenden Glasfasern zur Verstärkung als sehr gut geeignet. Versuche zeigten zudem, dass eine Verklebung von Randband und Grenz wand gasdicht möglich ist, wobei allerdings die «Eck-Problematik» noch nicht befriedigend gelöst werden konnte. Bezüglich der Strahlungsminderung dürfte mit einem ganzflächigen textilen Halter für die Aluminiumfolien ein entscheidender Schritt zur preisgünstigen Umsetzung gelungen sein. Trotz dieser ermutigenden Ergebnisse werden bis zu einer Kommerzialisierung noch grosse Anstrengungen erforderlich sein.

Energieeffizienz in der Informations- und Kommunikationstechnik

Unverändert steigt der Energiebedarf von informations- und kommunikationstechnischen Einrichtungen und Geräten. Der zugrundeliegende «Hunger» nach Kommunikation und Informationsdienstleistungen wächst sowohl im privaten als auch im geschäftlichen Bereich. Ebenfalls trägt der Umstand dazu bei, dass sich die Schweiz aktiv im internationalen Umfeld zunehmend als «Datentresor» positioniert und dadurch vermehrt energieintensive Rechenzentren gebaut werden. Um konkurrenzfähig zu bleiben, ist die Energieeffizienz deshalb auch aus wirtschaftlichen Gründen ein Thema.

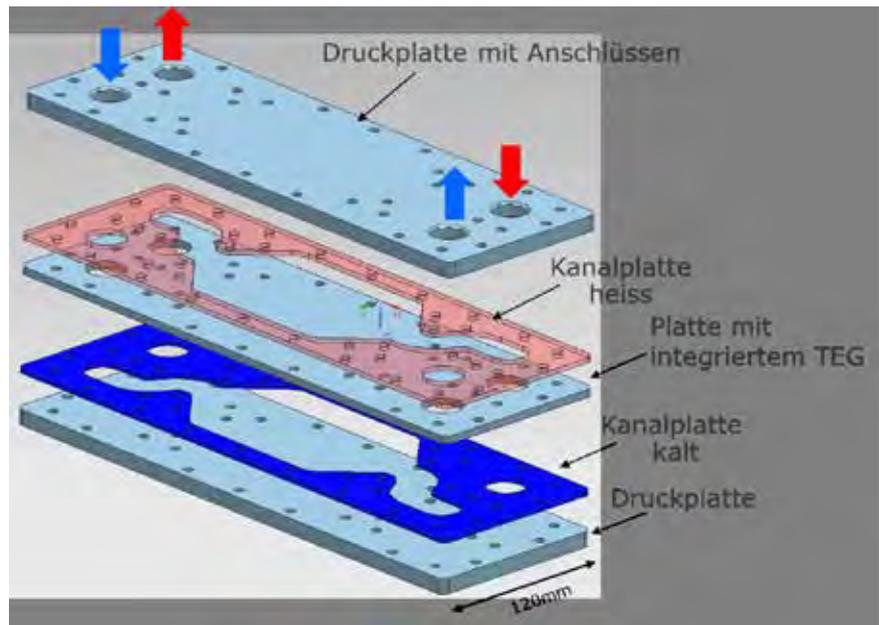
Eine grobe Abschätzung im Jahre 2013 hat gezeigt, dass in der Schweiz über 3 Millionen Modems/Routers und über 2 Millionen Settop-Boxen (digitales Fernsehen) installiert sind und dass diese einen jährlichen Verbrauch von gegen 500 GWh aufweisen. Wären all diese installierten Geräte energetisch optimal konfiguriert, ergäbe sich ein jährliches Einsparpotenzial von gegen 180 GWh. Geschickter wäre es natürlich, wenn bei den Geräten bereits bei der Entwicklung auf die Energieeffizienz geschaut würde, sodass sich das Gerät je nach Nutzung immer im bestmöglichen Energiemodus befindet.



Figur 4: Detailliertes Hardware-Design des 2-Watt-Routers (Quelle: Swisscom AG)

Was dabei energetisch möglich ist, konnte in einem Forschungsprojekt eindrücklich demonstriert werden [6]. Die Swisscom hat in Zusammenarbeit mit einem versierten Industriepartner einen Router gebaut, der eine durchschnittliche Leistung von weniger als 2 Watt aufweist. Dies entspricht etwa einem Fünftel der Leistung eines heute gängigen Routers. Für den Energiespar-Router haben die Entwickler konsequent die sparsamsten Bauteile ausgewählt. Dies allein hätte aber nicht gereicht, den durchschnittlichen Stromverbrauch auf einen Fünftel zu senken. Das ist den Entwicklern erst durch einen Kniff gelungen: Sie haben sich entschieden, einen Teilbereich des Routers in gebrauchsaarmen Zeiten nicht im Standby laufen zu lassen, sondern ihn ganz auszuschalten. Bei dem Teilbereich handelt es sich um das VDSL-Teilsystem, das im Router die Aufgabe hat, das aus der Telefonleitung eintreffende Hochfrequenzsignal zu demodulieren und in Datenpakete umzuwandeln bzw. die in die Gegenrichtung strömenden Datenpakete für die Übertragung im Telekom-Netz auf eine Trägerfrequenz im Hochfrequenzbereich aufzomodulieren. Durch die temporäre Stilllegung dieses VDSL-Teilsystems lässt sich Strom in erheblichem Mass einsparen.

Bei ausgeschaltetem VDSL-Teilsystem ist der Datentransport unterbrochen. Damit ein Haushalt trotzdem Telefon- und Internetdaten empfangen und senden kann, wird die Datenübertragung über ein zusätzlich eingebautes GSM-Modul sichergestellt. Dieses hat einen entscheidenden Vorteil: es braucht deutlich weniger Strom als das VDSL-System, weil GSM-Module für den Betrieb mittels Akkumulator ausgelegt sind und der Stromverbrauch über Jahre hinweg optimiert wurde. Der Energiespar-Router wird daher immer dann, wenn in einem Haushalt telefoniert oder gesurft wird, mit dem leistungsstarken, aber energieintensiven VDSL-Teilsystem betrieben. Dann hingegen, wenn nur Empfangsbereitschaft nötig ist bzw. wenn der Router nur in Ausnahmefällen genutzt wird – also in der Nacht oder bei Abwesenheit der Benutzer – geht die Verbindung über das energiesparende GSM-Modul, ohne dass der Kunde das feststellt. Die Telefonnummer bleibt immer diesel-



Figur 5: Design des TEG-Wärmetauscherprototypen. Durch Hinzufügen weiterer Kanalplatten und Platten mit integrierten TEGs ist das System modular erweiterbar (Quelle: greenTEG AG)

be, egal ob der Router das VDSL oder GSM nutzt. Es ist verständlich, dass die Leistungsfähigkeit bei der Nutzung des GSM-Moduls reduziert ist und sich diese Lösung damit primär für Benutzer mit moderatem Bandbreitenbedarf eignet.

Für 2014 ist beabsichtigt, den Router in einem Pilotversuch bei einer grösseren Anzahl Swisscom-Mitarbeitenden auf seine Praxistauglichkeit hin zu prüfen.

Thermoelektrik – eine Technik zur Nutzung von Abwärme

Thermoelektrische Generatoren (TEGs) ermöglichen es, Wärme direkt in Strom zu wandeln. Um das Potenzial dieser Technologie im Niedertemperaturbereich ($< 150\text{ °C}$) zu demonstrieren, wurde in einem entsprechenden Projekt [7] die Prototypen-Herstellung eines stromerzeugenden Wärmetauschers untersucht. Dies beinhaltete die Fertigung von TEGs, deren optimale Verpackung sowie deren Integration in einen Wärmetauscher. Die zur Herstellung der TEGs benötigte Produktionslinie konnte erfolgreich geplant, aufgebaut und in Betrieb genommen werden, so dass der benötigte Bedarf

an TEGs über den gesamten Zeitraum des Projektes gedeckt werden konnte. Gleichermassen wurde der Prozess zur Verpackung der TEGs entwickelt und in die Serienfertigung der TEG Module des Industriepartners integriert.

Das Design des Wärmetauschers wurde entsprechend vorgegebener Kriterien entworfen, so dass das Ergebnis ein modulares System ist, in welchem die Anzahl der integrierten TEGs variabel und einfach herzustellen ist. Mit dem aufgebauten Prototypen konnte dessen Konzept verifiziert sowie die Skalierbarkeit an einem zehnlagigen Aufbau demonstriert werden. Aus wirtschaftlichen Gründen wurden Optimierungsarbeiten am einlagigen Wärmetauscher durchgeführt. Dabei konnte eine signifikante Steigerung der generierten Leistung von 24 Milliwatt auf 1.03 Watt pro Lage erreicht werden. Mittels durchgeführter Simulation wurde gezeigt, dass durch weitere Optimierungsmassnahmen eine generierte Leistung von 4.7 Watt pro Lage erreichbar wäre. Damit ist das Ziel, 200 Watt generierte Leistung bei kompakter Bauweise, in Reichweite und wird Gegenstand zukünftiger Entwicklungsaktivitäten.

Die Abwärmenutzung wird ebenfalls im

Projekt mit der Firma HEXIS angestrebt [8]. Bei diesen Arbeiten soll mit einem spezifischen TEG-Modul die Abwärme von Brennstoffzellen im Bereich von bis zu 900 Grad genutzt und in Strom gewandelt werden. Damit soll der Gesamtwirkungsgrad der Brennstoffzelle erhöht werden. Die Arbeiten schreiten planmässig voran. Ein wichtiger Schwerpunkt dieser Arbeiten besteht darin, die Stabilität des thermoelektrischen Materials bei diesen Temperaturen zu gewährleisten.

Thermoelektrik wird auch zum so genannten *Energy Harvesting* genutzt. Mit einem 2013 gestarteten Projekt [9], welches im Rahmen eines EU-Innovationsprojekts mit nationalen und internationalen Partnern aus Industrie und Forschung durchgeführt wird, soll ein thermoelektrisch angetriebenes, intelligentes Heizungsventil entwickelt werden. Im Aufbau des intelligenten Heizungsventils stellt das thermoelektrische Energy Harvesting Modul die spezifische

und einzigartige Komponente dar, welche zurzeit nicht erhältlich ist. Dessen Entwicklung wird somit der Schlüssel zum Erfolg. Das zu entwickelnde Energy Harvesting Modul gewinnt die Energie aus der temporär anliegenden Differenz zwischen Raum- und Heizungsvorlauf-Temperatur und muss damit die Energieversorgung für das gesamte System bei allen denkbaren Anwendungsszenarien gewährleisten.

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 Zürich und Lausanne (ETHZ und EPFL) sowie mehrere Fachhochschulen werden immer wieder in Forschungsvorhaben einbezogen. So haben die EPFL, die Fachhochschulen Westschweiz (Sion), die Hochschule Luzern (iHomeLab) sowie die Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) in den Bereichen Motoren, Leistungselektronik, Smart Home und Thermoelektrik diverse Projektarbeiten geleistet.

Die Erforschung neuer Materialien im Bereich der Hochtemperatursupraleitung ist im vierten 4-Jahreszyklus des nationalen Forschungsschwerpunkts *Materials with Novel Electronic Properties* (MANEP) des schweizerischen Natio-

nalfonds miteingeschlossen. Die Aktivitäten haben im Juli 2009 begonnen und endeten 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 verschiedenen Elektrizitätswerken. In diversen Projekten wird ein enger Kontakt zu den schweizerischen Energieagenturen EnAW, eae und S.A.F.E [10] gepflegt und es werden, soweit zweckmässig, Branchenverbände wie z. B. swissT.net, Swissmem, asut, Swico, FEA eingebunden. Etablierte Kontakte und gemeinsame Projekte mit den SBB, der BLS und weiteren Bahngesellschaften ermöglichen es, im energieintensiven Bahnbereich effizienzsteigernde Aktivitäten zu unterstützen.

Zur Sicherstellung einer Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse wird ein enger Kontakt mit den Vertretern des Programms EnergieSchweiz [11] gepflegt.

Internationale Zusammenarbeit

Durch die Teilnahme am IEA Implementing Agreement *Assessing the Impact of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector* [12] 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 mit dem Fusionsprogramm ITER an der EPFL resp. am PSI in Villigen. 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 zwischen der EMPA und der University of South Florida und dem japanischen National Institute for Materials Science (NIMS).

Die Schweiz ist durch das IEA Implementing Agreement 4E [13] international stark vernetzt und hat mit der Leitung des Motoren-Annex zudem fachliche Verantwortung übernommen. Die im Frühling 2012 gestartete, enge Koopera-

tion zwischen Forschern aus Australien und der EPFL zur Lösung einer Reihe von technischen Fragen in Bezug auf Motorentest- und Effizienzklassenstandards hat sich sehr gut entwickelt. Die gewonnenen Erkenntnisse fliessen als technisch erhärtete Grundlagen in die Arbeiten der internationalen Standardisierung im Motorenbereich ein.

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

An der regelmässig stattfindenden, internationalen Konferenz *Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting* (EEDAL) treffen sich periodisch internationale Fachleute zu einem angeregten Wissens- und Erfahrungsaustausch. Nachdem diese Konferenz in verschiedenen europäischen Städten (Florenz, Neapel, Turin, Berlin, London, Kopenhagen, Coimbra) durchgeführt wurde, ist geplant, diesen unter dem Patronat der EU stehende Anlass im Jahr 2015 in der Schweiz zu organisieren.

Persönliche Kontakte zu verschiedenen Energieagenturen (insbesondere Dänemark, Niederlande, Österreich und Frankreich) sowie zu Schlüsselpersonen internationaler 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 Forschungszentrum (JRC) 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) ermöglichen. 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] T. Kaiser, B. Hotz-Hart, A. Wokaun: *Aktionsplan Koordinierte Energieforschung Schweiz* (24. April 2012)

[2] H. Tischhauser, G. Staufert: *Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte - Zylindrische Anwendungen, Schlussbericht* (2012)

[3] H. Tischhauser, G. Staufert: *Anwendungen und Potenziale von Vakuum Spalt Isolation, Schlussbericht* (2013)

[4] H. Tischhauser, G. Staufert: *Anwendung der Vakuum Spalt Isolation für Warmwasserrohre, Jahresbericht* (2013)

[5] H. Tischhauser, G. Staufert: *Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte – Bauelemente für Vakuumpanels, Schlussbericht* (2013)

[6] A. Martschitsch, T. Zielinski: *2-Watt-Router - Ultra Low Power Residential Gateway, Schlussbericht* (2013)

[7] F. Umbrecht, W. Glanz: *Prototyping of a Thermoelectric Power Generator, Schlussbericht* (2013)

[8] A. Heel, S. Populoh, P. Thiel, et al.: *Integration of high temperature thermoelectric converter for electricity generation in a solid oxide fuel cell system (HITTEC), Jahresbericht* (2013)

[9] T. Helbling, W. Glanz: *Entwicklung eines thermoelektrischen Energy Harvester Prototypen zur Stromversorgung eines intelligenten Heizungsventils, Jahresbericht* (2013)

[10] Internetseite der Energieagenturen www.energieagentur.ch und www.energie-agentur.ch und www.eae-geraete.ch

[11] Internetseite von EnergieSchweiz: www.energie-schweiz.ch

[12] Website des Implementing Agreements Assessing the Impact of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector: www.superconductivityiea.org

[13] Website des Implementing Agreements 4E: <http://www.iea-4e.org>

Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(* IEA-Klassifikation)

- 2-WATT PROTOTYPEN ROUTER**

Lead: **Swisscom AG**

Contact: **Andreas Martschitsch** andreas.martschitsch@swisscom.com

Abstract: Die heutigen Breitband Router benötigen allesamt ca. 7-10 Watt an elektrischer Leistung. Das Projekt hat mit innovativen Herstellern erfolgreich einen Prototypen eines Breitband-Routers gebaut, der die Bedürfnisse eines grossen Teils der Privatkunden erfüllt und im Durchschnitt eines Tageszyklus weniger als 2 Watt verbraucht.

R+D 1.2*

Funding:	BFE
Period:	2012–2013
- A++++ KÜHLSCHRANK**

Lead: **VZug Kühltechnik AG**

Contact: **Jochen Ganz** jochen.ganz@metallzug.ch

Abstract: Kühl- und Gefrierschränke sind trotz dem technischen Vorschritt der letzten Jahre nach wie vor relevante Stromverbraucher im Haushalt. Im Forschungsprojekt soll mit dem Aufbau eines Funktionsmusters aufgezeigt werden, was heute technologisch möglich ist bezüglich Energieeffizienz unter Berücksichtigung der Marktanforderungen wie No-Frost-Funktion und Mehrzonen-Kühlschränken.

R+D 1.2

Funding:	BFE
Period:	2012–2013
- ANWENDUNGEN UND POTENTIALE VON VAKUUM SPALT ISOLATIONEN**

Lead: **Helbling Technik AG**

Contact: **Hans Tischhauser** hans.tischhauser@helbling.ch

Abstract: Basierend auf diversen Projektergebnissen im Bereich thermischer Vakuum-Spalt-Isolation (VSI) für Haushaltsgeräte wurden weitere Anwendungen und deren Energiespar-Potenzial untersucht. Dabei standen Prozesse, Maschinen und Geräte aus industriellen Anwendungsgebieten im Vordergrund. Die identifizierten Potentiale sind enorm und betragen vereinzelt über 1'000 GWh pro Jahr.

R+D 1.2

Funding:	BFE
Period:	2012–2013
- ANWENDUNGEN UND POTENTIALE VON VAKUUM SPALT ISOLATIONEN (VSI) FÜR WARMWASSERROHRE**

Lead: **Helbling Technik AG**

Contact: **Hans Tischhauser** hans.tischhauser@helbling.ch

Abstract: Im Vorgängerprojekt "Anwendungen und Potenziale von Vakuum-Spalt-Isolation, VSI" wurde ein Einsparpotential im Bereich der schweizerischen Warmwasserleitungen von mehr als 1'000 GWh pro Jahr nachgewiesen. Mit dem Projekt sollen VSI-Ausführungen für Warmwasserleitungen entwickelt, theoretisch evaluiert und anhand von Funktionsmustern verifiziert werden.

R+D 1.2

Funding:	BFE
Period:	2013–2015
- CONCEPT ET POTENTIEL D'ÉCONOMIE D'ÉNERGIE D'UN TRANSFORMATEUR DE TRACTION ÉLECTRONIQUE « PETT » (POWER ELECTRONIC TRACTION TRANSFORMER)**

Lead: **ABB Sécheron SA**

Contact: **Christian Vetterli** christian.vetterli@ch.abb.com

Abstract: Développement et utilisation de la transformation AC à moyenne fréquence (domaine du kHz) à l'aide d'électronique de puissance afin de réduire le poids et le volume des composants magnétiques et d'accroître considérablement l'efficacité énergétique du système global de conversion HV AC – MV, LV DC dans le domaine ferroviaire. Planification et mise en place d'une campagne de simulation.

R+D 1.1

Funding:	BFE
Period:	2013–2015
- COST-EFFECTIVE AND RELIABLE THERMOELECTRIC CONVERTERS FOR INDUSTRIAL WASTE HEAT RECOVERY**

Lead: **EMPA**

Contact: **Anke Weidenkaff** 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:	2010–2014
- ENERGIEEFFIZIENZ EINES DC-HAUSES**

Lead: **iHomeLab**

Contact: **Stephan Tomek** stephan.tomek@hlsu.ch

Abstract: In verschiedenen Publikationen wird behauptet, dass durch den Umstieg von Wechsel- auf Gleichstrom (DC) die Energieeffizienz gesteigert werden könnte. Mit vorliegender Studie wurde analysiert, dass kein oder nur ein marginales Energieeinsparpotential durch die Umstellung oder Ergänzung mit DC in Wohn- und Geschäftsgebäuden realisiert werden kann.

R+D 1.2

Funding:	BFE
Period:	2012–2013

- ENERGIEEFFIZIENZ VON ELEKTRISCHEN MOTOREN IM KONTEXT VON DEMAND SIDE MANAGEMENT** R+D 1.1

Lead:	E4tech Sarl	Funding:	BFE
Contact:	franz.lehner@e4tech.com	Period:	2013

Abstract: Im Projekt wurden die möglichen Auswirkungen der Einführung von DSM Massnahmen auf die Effizienz von elektrischen Motoren untersucht. Dies schloss Detailbetrachtung von für die Schweiz relevanten Anwendungsbeispielen ein. Die Ergebnisse zeigten, dass die Auswirkungen allfälliger DSM-Massnahmen bezüglich Effizienz nicht relevant sind.
- ENERGY EFFICIENCY OF TELECOM NETWORKS** R+D 1.2

Lead:	FHNW	Funding:	BFE
Contact:	martin.streicher@fhnw.ch	Period:	2013–2014

Abstract: Heutige Telekommunikations-Provider offerieren „all-in-one-packages“ mit Telefon, TV, Internet und virtuellen, privaten Netzwerken. Dies verursacht einen erhöhten Energieverbrauch. In der Studie wird die aktuelle Infrastruktur untersucht sowie Veränderungen, verursacht durch Innovation und durch das Konsumerverhalten, analysiert und schliesslich das energetische Verbesserungspotential identifiziert.
- ENTWICKLUNG EINER HOCHEFFIZIENTEN >125LM/W LED LEUCHTENFAMILIE MIT AEROGELDIFFUSOR** R+D 1.2

Lead:	EMPA	Funding:	BFE
Contact:	matthias.koebel@empa.ch	Period:	2011–2013

Abstract: Im Rahmen dieses Projekts wurden Möglichkeiten für den Einatz von Aerogelmaterialien als Diffusor in Kombination mit Farbverschiebern (Lumineszenzmitteln) in der LED Beleuchtung untersucht. Einerseits wurde auf der Materialseite an neuartigen Kombinationen dieser zwei Komponenten geforscht, andererseits wurden mit dieser Technologie eigens Leuchtenprototypen entwickelt.
- ENTWICKLUNG EINES THERMOELEKTRISCHEN ENERGY HARVESTER PROTOTYPEN ZUR STROMVERSORGUNG EINES INTELLIGENTEN HEIZUNGSVENTILS** R+D 1.2

Lead:	greenTEG GmbH	Funding:	BFE
Contact:	wulf.glatz@greenteg.com	Period:	2013–2015

Abstract: Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines thermoelektrischen Energy Harvester Prototypen als Herzstück eines intelligenten Heizungsventils. Die Resultate sind essentiell für die geplante Produktentwicklung des Ventils, welche im Rahmen eines EU Innovationsprojektes mit nationalen und internationalen Partnern aus Industrie und Forschung durchgeführt wird.
- HITTEC: INTEGRATION OF HIGH TEMPERATURE THERMOELECTRIC CONVERTER FOR ELECTRICITY GENERATION IN A SOLID OXIDE FUEL CELL SYSTEM** R+D 6.1

Lead:	EMPA	Funding:	BFE
Contact:	andre.heel@empa.ch	Period:	2011–2016

Abstract: Im vorliegenden Projekt wird einerseits die thermoelektrische Materialentwicklung im Hochtemperaturbereich voranzutreiben und andererseits wird anhand einer konkreten, ersten Anwendung geprüft, ob mit dieser Technologie eine effektive Abwärmenutzung von Brennstoffzellen der Fa. Hexis realisiert werden kann. Dazu wird ein Modul für den Einbau in eine Brennstoffzelle als Prototyp gebaut und ausgemessen.
- HOCHEFFIZIENTE ISOLATION FÜR HAUSHALTSGERÄTE - BAUELEMENTE FÜR VAKUUMPANELS** R+D 1.2

Lead:	Helbling Technik AG	Funding:	BFE
Contact:	hans.tischhauser@helbling.ch	Period:	2012–2013

Abstract: Vor der Prototypen-Entwicklung von industriell fertigen, panelartigen oder kubischen Vakuumpalt Isolation (VSI) sind die Aufbauarten und Fertigungsmöglichkeiten der Bauelemente "Distanzhalter" und "Rand-Distanzhalter" im Detail abzuklären. Die Resultate bilden die Basis für die Prototyp-Entwicklung von beliebig geformten Bauteilen oder Geräten mit Vakuumpalt-Isolation.
- IEA IMPLEMENTING AGREEMENT 4E** R+D 1.2

Lead:	R. Brüniger AG	Funding:	BFE
Contact:	roland.brueeniger@r-brueniger-ag.ch	Period:	2008–2013

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 Schweiz engagiert sich aktiv in den Annexes Motoren, Mapping & Benchmarking sowie Standby. Die Standby-Thematik wird mit dem neuen Annex EDNA (Electronic Devices & Networks Annex) erweitert.

- | | | | |
|---|---|----------|-----------|
| ● | IEA IMPLEMENTING AGREEMENT HTSL | R+D | 7.2 |
| Lead: | R. Flükiger | Funding: | BFE |
| Contact: | René Flükiger
Rene.Flukiger@unige.ch | Period: | 2006–2013 |
| 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. | | | |
- | | | | |
|---|--|----------|-----------|
| ● | INDUSTRIETAUGLICHER PROTOTYP EINER MAGNETO-KALORISCHEN KRAFTMASCHINE (MKK) ZUR STROMERZEUGUNG | R+D | 6.1 |
| Lead: | FHNW | Funding: | BFE |
| Contact: | Kurt Heiniger
kurt.heiniger@fhnw.ch | Period: | 2013–2014 |
| Abstract: Eine magneto-kalorische Kraftmaschine (MKK), welche fähig ist, Energie aus Niedertemperatur-Abfallwärme zu gewinnen, gibt es gemäss einer im Jahr 2012 erstellten Studie noch nicht. Ziel dieses Projektes ist es, eine solche Maschine zu entwickeln und mit einem Prototypen aufzuzeigen, dass mithilfe dieser Technologie elektrische Energie aus "wertloser" industrieller Abwärme (< 100 °C) gewonnen werden kann. | | | |
- | | | | |
|---|--|----------|-----------|
| ● | KONZEPT/MACHBARKEITSSTUDIE EINES 50 KW-TEG-MODULS IM SCHWERINDUSTRIE-UMFELD | R+D | 6.1 |
| Lead: | Main GmbH | Funding: | BFE |
| Contact: | Heinrich Marti
marti@main-switzerland.com | Period: | 2013–2014 |
| Abstract: Die Projektziele umfassen die Erarbeitung eines Konzeptes und des Engineerings für ein integrales 50kW TEG-Modul unter Verwendung von bevorzugt kommerziell erhältlichen TEG-Modulen für die direkte Rückgewinnung von elektrische Energie aus Wärmeenergie im Umfeld der Schwerindustrie, respektive einer Giesserei oder einem Stahlwerk. | | | |
- | | | | |
|---|---|----------|-----------|
| ● | MARKTSTUDIE ZU BESTAND UND ENERGETISCHEM VERBESSERUNGS-POTENTIAL DER INSTALLIERTEN VERTEILTRANSFORMATOREN IN DER SCHWEIZ | R+D | 6.2 |
| Lead: | FHNW | Funding: | BFE |
| Contact: | Martin Streicher-Porte
martin.streicher@fhnw.ch | Period: | 2012–2013 |
| Abstract: Ziel der Studie ist eine Erfassung des aktuellen Bestandes an Verteiltransformatoren in den Netzebenen 5-7 in der Schweiz sowie die Erarbeitung und Abschätzung von Verbesserungs- und Einsparpotentialen durch den teilweisen oder vollständigen Ersatz der bestehenden Basis mittels hocheffizienter, neuer Verteiltransformatoren. | | | |
- | | | | |
|---|--|----------|-----------|
| ● | MESSMETHODEN ZUR STANDARDISIERTEN EFFIZIENZBESTIMMUNG HOCHEFFIZIENTER ELEKTRISCHER ANTRIEBE | R+D | 1.1 |
| Lead: | EPFL | Funding: | BFE |
| Contact: | Roland Wetter
roland.wetter@epfl.ch | Period: | 2012–2014 |
| Abstract: Im Rahmen des Projekts werden in Kooperation mit Australien eine Reihe von technischen Fragen in Bezug auf Motoren- und Antriebssystemtests- sowie Effizienzklassenstandards geprüft und gemessen, um belastbare technische Grundlagen für den Standardisierungsprozess verfügbar zu haben. | | | |
- | | | | |
|---|--|----------|-----------|
| ● | METALLE SELTENE ERDEN: ALTERNATIVEN FÜR EFFIZIENTE INDUSTRIEMOTOREN | R+D | 1.1 |
| Lead: | Circle Motoren AG | Funding: | BFE |
| Contact: | Markus Lindegger
info@circlemotor.ch | Period: | 2012–2013 |
| Abstract: Hocheffiziente Elektromotoren verfügen oft über Magnetmaterial aus seltenen Erden. Da diese Metalle in verschiedener Hinsicht problematisch sind, wurde untersucht, ob der Bau hocheffizienter Elektromotoren unter Verzicht von seltenen Erden Magneten möglich ist. | | | |
- | | | | |
|---|---|----------|-----------|
| ● | OPERATING AGENT: ANNEX "ELECTRIC MOTOR SYSTEMS" DES IMPLEMENTING AGREEMENTS 4E | R+D | 1.1 |
| Lead: | A+B International | Funding: | BFE |
| Contact: | Conrad U. Brunner
cub@cub.ch | Period: | 2010–2014 |
| Abstract: Der Electric Motor Systems Annex (EMSA) strebt an, 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. | | | |

- **PROTOTYP OF A THERMOELECTRIC POWER GENERATOR - POWERHEX** R+D 6.1

Lead: greenTEG GmbH	Funding: BFE
Contact: Wulf Glatz wulf.glatz@greenteg.com	Period: 2011–2013

Abstract: Thermoelektrische Generatoren (TEGs) ermöglichen Wärme direkt in Strom zu wandeln. Um das Potential dieser Technologie im Niedertemperaturbereich ($\leq 150^{\circ}\text{C}$) zu demonstrieren war das Ziel dieses Projektes die Herstellung eines stromerzeugenden Wärmetauscherprototypen. Dies beinhaltet die Fertigung von TEGs, deren Verpackung sowie deren Integration in einen Wärmetauscher. Die Ziele konnten erreicht werden.
- **PROTOTYP OF A THERMOELECTRIC POWER GENERATOR - POWERHEX V2** R+D 6.1

Lead: greenTEG GmbH	Funding: BFE
Contact: Wulf Glatz wulf.glatz@greenteg.com	Period: 2013–2015

Abstract: Ziel dieses Projektes ist es, durch Design- und Materialoptimierung des im Vorgängerprojekt entwickelten Systems die generierte Leistung von 1 Watt auf 4.5 Watt pro integriertem TEG/Lage zu steigern, um das angestrebte Ziel von generierten 200 Watt bei kompakter Bauweise und einem Temperaturbereich von 5°C bis 80°C zu erreichen.
- **REALYSE: LOAD RECOGNITION, ANALYSE AND BENCHMARK (NIALM)** R+D 1.2

Lead: iHomeLab	Funding: BFE
Contact: Alexander Klapproth alexander.klapproth@hslu.ch	Period: 2013–2015

Abstract: Mit dem Projekt soll das volle Potential von NIALM (Non Intrusive Appliance Load Monitoring) gezeigt werden. Dazu wird ein Messkonzept entwickelt und die NIALM-Algorithmen werden verfeinert. Zudem wird ein Showcase entwickelt, der zeigt, dass ein beliebiger Verbraucher mittels eines Messadapters analysiert und identifiziert werden kann.
- **TYPISCHER HAUSHALTS-STROMVERBRAUCH** R+D 1.2

Lead: ARENA	Funding: BFE
Contact: Jürg Nipkow juerg.nipkow@arena-energie.ch	Period: 2013

Abstract: Mit der Auswertung der Rohdaten der VSE-Haushalterhebung 2011 konnte ein aktueller Wertesatz des typischen Haushalt-Stromverbrauchs für neu definierte Haushaltstypen erstellt werden. Dank des umfangreichen Fragenkatalogs der damaligen VSE-Erhebung konnten zudem interessante Hintergrundinformationen zum Gerätebesitz wie auch zum Benutzerverhalten gewonnen werden.

Netze



Titelbild:

**Tiefkühlager der Migros-Verteilbetrieb Neuendorf AG (MVN)
(Quelle: MVN AG)**

Das Projekt «FlexLast» untersucht Möglichkeiten zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen (SDL) durch industrielle Lasten. Im Rahmen eines Feldversuchs wurde eine intelligente Steuerung entwickelt und implementiert, die es aufgrund aktueller Logistikdaten und Wetterprognosen erlaubt, den Strombezug des MVN-Tiefkühlagers in Neuendorf SO zeitlich zu steuern. Damit kann nach akzeptiertem Angebot am SDL-Markt einem von der nationalen Netzgesellschaft vorgegebenen Lastprofil nachgefahren werden. Das Experiment hat gezeigt, dass erst durch Aggregation mehrerer Anlagen unterschiedlicher Charakteristik die notwendige Granularität und Dynamik zur Erbringung von Sekundärregelleistung erreicht werden kann.

BFE Forschungsprogramm Netze
Überblicksbericht 2013

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 Energiedebatte in vielen Regionen der Welt in der Folge dominieren sollten. 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 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 Ener-

gieeffizienz, der Ausbau der Wasserkraft sowie neue erneuerbare Energiequellen. Zur Deckung des Restbedarfs können Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlagen oder Gas-Kombikraftwerke 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 Ge-

samtsystems sind entscheidend. Sowohl der 2013 vom Parlament verabschiedete «Aktionsplan koordinierte Energieforschung Schweiz» [2] wie auch das neue «Energieforschungskonzept des Bundes 2013–2016» [3] 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 bei der Identifikation des «Potenzials der Schweizer Infrastrukturanlagen zur Lastverschiebung» [4] oder durch den Einsitz in verschiedenste internationale Gremien zur Forschungskoordination und damit zum optimalen Einsatz der – nach wie vor – verhältnismässig geringen finanziellen Mittel. Nichts desto trotz 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, sog. «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, langfristigen 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 [5], EU [6,7] etc.).

Rückblick und Bewertung 2013

Die Projekte und Aktivitäten im Forschungsprogramm Netze haben auch im Jahr 2013 dazu beigetragen, verschiedenste Aspekte bestehender und künftiger Energiesysteme erforschen und entsprechende Kompetenzen in der Schweiz aufbauen und fördern zu können. Im Bereich der Netzplanung und des -betriebs bestand die Zielsetzung weiterhin darin, verschiedene Konzepte für die erfolgreiche Systemintegration dezentraler Erzeugungsanlagen und Speichertechnologien sowie zu Vorhaltung und Einsatz von Regelreserven zu erarbeiten, zu evaluieren und in der Praxis anzuwenden. Dazu wurden verschiedene Forschungs- und Pilotprojekte gestartet resp. weitergeführt. Im Hinblick auf den notwendigen Ausbau der Übertragungsnetzinfrastruktur konnten ebenfalls wichtige Erkenntnisse zu einem möglichen künftigen gemeinsamen Betrieb von Wechselstrom- und Gleichstromübertragungsnetzen erzielt werden. Aber auch die Erforschung von Möglichkeiten zur besseren Auslastung der bestehenden Übertragungsnetzinfrastruktur wurde fortgesetzt. Im Zusammenhang mit der Integration von Endkunden und deren Partizipation z. B. am Regelenergiemarkt wurden mehrere Projekte zur Potenzialanalyse und -erschliessung von Laststeuerungen in verschiedenen Anwendungsbereichen abgeschlossen oder neu initiiert. Im Technologiebereich standen die Untersuchung der Auswirkungen von Fehlerfällen in Gleichstromübertragungsnetzen auf die relevanten Netzelemente sowie die Erarbeitung der Grundlagen für effiziente Leistungselektronik in Mittelspannungsbatterien im Vordergrund. Diese Schwerpunkte wurden durch internationale Aktivitäten ergänzt und die Koordination der Forschungsaktivitäten dadurch unterstützt. Im Rahmen des «SmartGrids ERA-Net» [7] wurde zur Planung eines nachfolgenden «ERA-NET

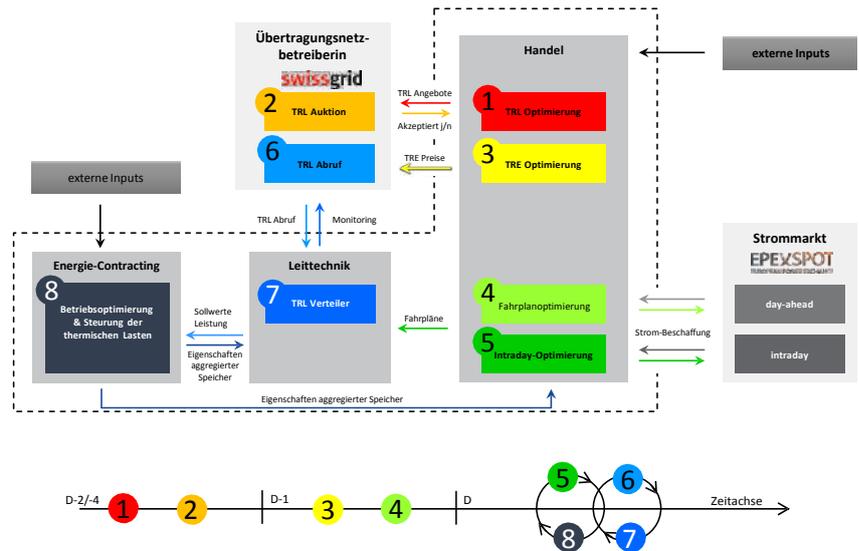
COFUND» eine Serie von Workshops durchgeführt, mit dem Ziel, die Umsetzung des strategischen Energietechnologieplans der EU (SET-Plan) [6] auf nationaler Ebene optimal zu unterstützen.

Ausblick

Aufgrund der nationalen und internationalen Entwicklungen wurde die Schwerpunktsetzung im Detailkonzept 2013–2016 des Forschungsprogramms Netze [8] aktualisiert. Die laufenden Aktivitäten in den verschiedenen technischen Bereichen, sowie in der internationalen Zusammenarbeit werden 2014 fortgesetzt. Insbesondere im Bereich der Mess- und Regeltechnik werden zusätzliche Projekte gestartet, um den Netzzustand in nahezu Echtzeit bestimmen und ggf. geeignete Massnahmen abzuleiten zu können. Dabei wird sowohl der Spezifika der entsprechenden Spannungsebene sowie der Kommunikationsinfrastruktur Rechnung getragen. In Zusammenarbeit mit dem Forschungsprogramm Energie, Wirtschaft, Gesellschaft (EWG) werden Möglichkeiten erörtert, wie und unter welchen Bedingungen der Eigenverbrauch von dezentral erzeugtem Photovoltaikstrom maximiert werden kann. Weitere interdisziplinäre Projekte mit den Forschungsprogrammen Verbrennung (Potenzial biogener Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen im Schweizer Stromnetz), Wasserstoff (Wechselwirkung zwischen den Energieträgern) sowie Kraftwerk 2020 (Beitrag von Gaskraftwerken zur Netzstabilität) werden weitergeführt. Auch in Zukunft besteht Bedarf an Pilot- und Demonstrationsprojekten, in denen verschiedenste Aspekte umfassend untersucht und entsprechende Lösungsansätze demonstriert werden können. Aufgrund der Aufstockung des entsprechenden Budgets 2014 könnte verschiedenen, im Rahmen von Forschungsprojekten entwickelten Ansätzen der Übergang in die nächste Phase ermöglicht werden. Es ist aber auch weiterhin essentiell, die bestehenden internationalen Beziehungen, z. B. zum EU SET-Plan [6] oder innerhalb der Kooperation D-A-CH Smart Grids [9] weiter auszubauen und Synergien zu nutzen.

Highlights aus Forschung und Entwicklung

Durch den massiven Ausbau von fluktuierenden Einspeisungen in Europa, hauptsächlich aus regenerativer Sonnen- und Windenergie, wird das europäische Elektrizitätsnetz künftig zusätzliche Möglichkeiten und Methoden zur Ausbalancierung der Last- und Produktionsschwankungen benötigen. Diese dürfen die lokalen Verteilnetze aber nicht an ihre Betriebsgrenzen bringen, sondern sollten deren sicheren Betrieb sogar noch unterstützen. Neben der Frage, wie gross der Bedarf an derartigen Flexibilitäten in Zukunft sein wird, befassten sich in der Berichtsperiode verschiedene Projekte mit der Identifizierung und Erschliessung des Lastverschiebepotenzials, angefangen bei Wärmeanwendungen in Privathaushalten, über Infrastrukturanlagen bis hin zu industriellen Tieffühlagern.



Figur 1: Das Konzept des WarmUp-Simulators besteht aus einer Kaskade von Optimierungen, die chronologisch nummeriert sind [4].

WARMup – Optimale Verwertung der Flexibilität von thermischen Speichern

Im Rahmen von «WarmUp» [10] wurde die Flexibilität von thermischen Speichern ökonomisch bewertet. Warmwasserspeicher sind bereits heute in einer grossen Anzahl vorhanden und bieten ein interessantes Potenzial zum Lastmanagement. Zudem kann die thermische Trägheit von Gebäuden als Speicher genutzt werden, um das Betriebsregime der Wärmeerzeugung dynamisch anzupassen und damit die Teilnahme an den Energiemärkten (Systemdienstleistungen, EPEX) zu optimieren. Im Projekt wurde die technische Umsetzbarkeit der marktorientierten, dynamischen Wärmeproduktion als gegeben vorausgesetzt und der Fokus auf die Quantifizierung des ökonomischen Wertes dieser Flexibilität gelegt.

Das durch die aktive Bewirtschaftung der thermischen Speicher geschaffene Wertschöpfungspotenzial wird dadurch bestimmt, in dem diese Flexibilität auf den Energiemärkten durch optimale Handelsgeschäfte verwertet wird. Zu diesem Zweck wurde ein Simulator entwickelt, der aus einer Kaskade von Optimierungen besteht, in welcher die optimalen Angebote, das Verhalten des Marktes (Annahme, Ablehnung, Abruf der Angebote), das Kappen der Leistungsspit-

zen (vermeidene Netzkosten), sowie das daraus resultierende Betriebsregime der Wärmeerzeugung numerisch bestimmt werden können (Figur 1).

Gemeinsam mit dem Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (ewz) und EnAlpin wurden anschliessend verschiedene Praxisorientierte Simulationsszenarien definiert. Beispielsweise konnte mit einer optimierten Bewirtschaftung bei einem Mehrfamilienhaus mit 22 Wohneinheiten und modernem Baustandard eine Heizkostenreduktion sowie zusätzliche Erträge von insgesamt 800 Franken gegenüber einer konventionellen Betriebsweise erzielt werden. Ein im Anschluss gestartetes Pilotprojekt unter Beteiligung von ewz wird zeigen, ob die simulierten Erträge am Markt auch tatsächlich erzielt werden können.

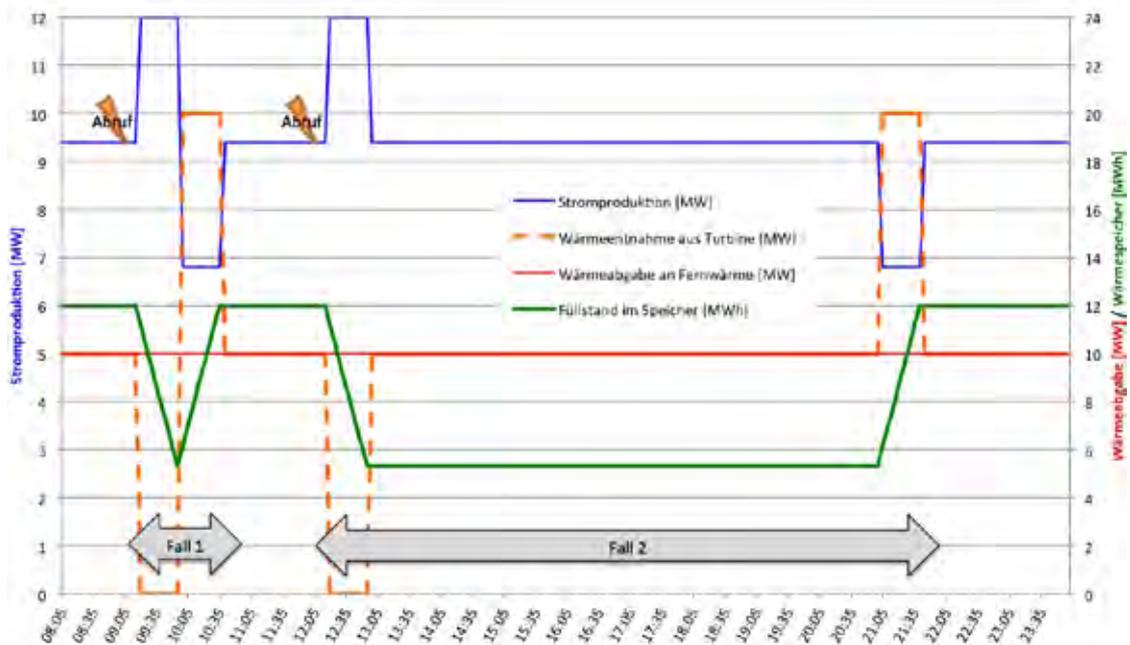
Der entwickelte Simulator soll im nächsten Jahr um Modelle weiterer Konversions- und Speichertechnologien ergänzt werden, um entsprechende Investitions- und Betriebsstrategien ableiten zu können.

Potenzial der Schweizer Infrastrukturanlagen zur Lastverschiebung

Neben den kleineren Wärmeanwendungen im Niederspannungsnetz ber-

gen auch grössere Lasten auf übergeordneten Netzebenen das Potenzial für Lastverschiebungen. Im kommunalen Bereich dürften sich insbesondere Abwasserreinigungsanlagen (ARA), Wasserversorgungen (WV) und Kehrriechverbrennungsanlagen (KVA) dazu anbieten. Deren Potenzial wurde im Rahmen einer Studie [4] an Hand von jeweils zwei bis drei konkreten Fallbeispielen detailliert betrachtet, indem unter anderem auch entsprechende Speichermöglichkeiten einbezogen wurden (Figur 2). Die identifizierten Potenziale zur Lastverschiebung sind in der Tat zwar beträchtlich, aber auch stark begrenzt durch die Tatsache, dass die Anlagen ihrer Hauptaufgabe – der Ver- und Entsorgung von Wasser, Abwasser und Abfall – jederzeit nachkommen müssen.

Eine Hochrechnung ergab für das Jahr 2012 für alle Schweizer Infrastrukturanlagen ein technisches Lastverschiebepotenzial von 140 MW (positiv) resp. 233 MW (negativ) während 1 Stunde. Dieses dürfte bis im Jahre 2050 noch auf 198 bzw. 290 MW ansteigen. Zur positiven Lastverschiebung steuert das Abschalten der jeweiligen Strombezüge etwas mehr als die Hälfte bei, zur Negativen mit rund zwei Dritteln die Stromproduktion. Werden Lastverschiebungen nur über 15 Minuten erbracht, so steigt deren Potenzial noch leicht, sinkt aber beinahe auf die Hälfte bei Zeitdauern



Figur 2: Speicherbewirtschaftung einer Kehrichtverbrennungsanlage bei Abruf von positiver Regelleistung. (Quelle: InfraWatt)



Figur 3: Blick in das Tiefkühlager der Migros in Neuendorf. Die Temperatur in dem vollautomatischen Hochregallager beträgt standardmässig -26,5 °C. (Quelle: Benedikt Vogel)

über 2 Stunden. Vom gesamten Potenzial der rund 3900 Infrastrukturanlagen in der Schweiz könnten alleine die grössten 40 ARA, 30 WV und 30 KVA heute rund 100 MW positive und rund 200 MW negative Lastverschiebungen anbieten.

Zur Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse im Bereich der Wasserversorgungs- und Abwasserreinigungsanlagen

wird 2014 ein entsprechendes Leuchtturmprojekt gestartet.

FlexLast – Erzeugung von Sekundär-Regelleistung durch flexibles Lastmanagement bei Grossverbrauchern

BKW, IBM, Migros und Swissgrid führten während eineinhalb Jahren das gemeinsame Pilotprojekt FlexLast [1] mit dem Ziel durch, die Machbarkeit der Erzeugung sekundärer Regelleistung durch Schaltung industrieller Lasten zu untersuchen. Als Versuchsobjekt dienten dabei die Tiefkühlanlagen des Migros Verteilzentrums in Neuendorf (Figur 3).

Im Rahmen des Projektes wurde insbesondere eine IT-Lösung zur dynamischen Steuerung und Optimierung der Kälteanlagen realisiert, welche sich aktueller Logistikdaten und Wetterprognosen bedient. Ausserdem wurde im Feldversuch das Potenzial und die Grenzen zur Erzeugung von Regelleistung detailliert analysiert. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den Schweizer Energiemarkt wurde in einer begleitenden Studie untersucht.

Es konnte gezeigt werden, dass die Bereitstellung von Regelleistung durch industrielle Lasten grundsätzlich möglich ist, die Einstiegshürden für Sekundärregelung allerdings hoch sind und mit den untersuchten Tiefkühlagern alleine nicht überwunden werden können. Dazu sind ein Pooling von Lasten unterschiedlicher Charakteristika (vgl. WarmUp oder Infrastrukturanlagen) sowie weitere ergänzende Massnahmen notwendig.

Nationale Zusammenarbeit

Das Forschungsprogramm Netze pflegt seit vielen Jahren eine enge Zusammenarbeit und einen regen Austausch mit den für den Themenbereich relevanten Forschungsgruppen an der ETH Zürich (Proff. Andersson, Franck, Biela) und verschiedenen Fachhochschulen (BFH, FHNW, HES-SO, HSLU, SUPSI, ZHAW). Im Jahr 2013 konnte auch der Kontakt zur ETH Lausanne (Prof. Paolone, Dr. Cherkaoui) ausgebaut werden. Die Schaffung neuer Kompetenzzentren im Rahmen des «Aktionsplans koordinierte Energieforschung Schweiz» [2], darunter auch eines im Bereich der Netze und Systeme (SCCER FURIES), dessen Koordination der EPFL obliegt, hat diese Anstrengungen positiv unterstützt. Durch die aktive Zusammenarbeit zwischen der «Schweizerischen Gesellschaft für Netzinfrastrukturforschung» (SGN) und der ETH Zürich hat die Geschäftsstelle der «Forschungsstelle Energienetze» (FEN) [11] mit ihren drei wis-

senschaftlichen Mitarbeitern weitere Forschungsprojekte vorangetrieben, z. B. zur Potenzialabschätzung biogener Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen im Schweizer Stromnetz oder zur Kosten-Nutzen-Analyse von Smart Grids. Die Resultate werden soweit wie möglich auch BFE-intern verbreitet und verwendet, so z. B. bei der Erarbeitung der «Smart Grids Roadmap» als Teil der Energiestrategie 2050. 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) [12] oder des vom BFE und Swisselectric Research unterstützten Projekts «Swiss2 G» [13].

Internationale Zusammenarbeit

Bereits 2010 wurde mit der Bildung des «Implementing Agreement for a co-operative programme on Smart Grids» (ISGAN) [14] im Rahmen des «Clean Energy Ministerial» (CEM) begonnen, wobei auch einzelne Vertreter aus dem vorangehenden Implementing Agreement «Enard» federführend mitgewirkt haben. Bedeutend mehr Staaten als bei Enard haben das Vorhaben unterstützt und gemeinsam zu einem Implementing Agreement im Sinne der IEA weiterentwickelt, das 2011 bewilligt 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 der neuen Energiestrategie 2050 oder der Smart Grids Roadmap. Aus diesem Grund hat die Schweiz ihre Teilnahme an ISGAN erklärt und die entsprechenden Arbeiten zu den Annexes aufgenommen. Die Schweizer Vertretung im Executive Committee von ISGAN wurde der Forschungsstelle Energienetze der ETH [11] übertragen. Die Arbeiten zur Umsetzung des SET-Plans [6] der EU wurden fortgesetzt. Im Bereich der Netze fanden diese vorwiegend innerhalb der «European Electricity Grid Initiative» (EEGI) [15] 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» [7], der «Kooperation D-A-CH Smart Grids» [9], des FP7-Projektes «GRID+» [16] und von ISGAN. Dabei hat sich auch die Schweiz aktiv beteiligt. Aufgrund der positiven Evaluation des «SmartGrids ERA-Net» durch die EU konnte die Laufzeit bis 2014 verlängert werden. Die Arbeiten dienen vor allem der Vorbereitung eines «ERA-NET COFUND», das ab 2014 im Rahmen von Horizon 2020 die Umsetzung des SET-Plans unterstützen soll. Die 2009 geschlossene «Kooperation D-A-CH Smart Grids» [9] wurde weitergepflegt, beispielsweise im Rahmen der «Smart Grids Week 2013 Salzburg» [17] oder der Konferenz «D-A-CH Energieinformatik 2013» [18] in Wien, die auch bei Schweizer Forschenden auf grosses Interesse gestossen ist. Die nächste Konferenz wird turnusgemäss am 13./14. November 2014 an der ETH Zürich stattfinden [19].

Referenzen

- [1] BKW et al.: Flexlast – Erzeugung von Sekundär-Regelleistung durch ein dynamisches Lastmanagement bei Grossverbrauchern, SB (2014)
- [2] SBF: Aktionsplan Koordinierte Energieforschung Schweiz (2012)
- [3] CORE: Konzept der Energieforschung des Bundes 2013–2016 (2012)
- [4] Infracore: Potenzial der Schweizer Infrastrukturanlagen zur Lastverschiebung, SB (2013)
- [5] IEA: www.iea.org
- [6] EU SET-Plan: ec.europa.eu/energy/technology/set_plan
- [7] SmartGrids ERA-Net: www.eranet-smartgrids.eu
- [8] BFE: Forschungskonzept 2013–2016 – Netze (2012)
- [9] Kooperation D-A-CH Smart Grids: www.smartgrids-dach.eu
- [10] Misurio AG: WARMup – Optimale Verwertung der Flexibilität von thermischen Speichern, SB (2013)
- [11] Forschungsstelle Energienetze: www.fen.ethz.ch
- [12] Konsortium VEiN: VEiN – Verteile Einspeisung in Niederspannungsnetze, JB (2013)
- [13] SUPSI, Bacher Energie AG: Swiss2 G, JB (2013)
- [14] IEA ISGAN: www.iea-isgan.org
- [15] EEGI: www.smart-grids.eu/?q=node/170
- [16] EU Forschungsprojekt «GRID+»: www.gridplus.eu
- [17] Smart Grids Week 2013 Salzburg: www.energiesystemederzukunft.at/results.html/id7097
- [18] DACH-Energieinformatik 2013: www.energieinformatik2013.at
- [19] DACH-Energieinformatik 2014: www.energieinformatik2014.ch

Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(* IEA-Klassifikation)

- ANALYSE DES FORSCHUNGSUMFELDS "SMART GRIDS" IN DER SCHWEIZ UND IN EUROPA** R+D, Int 6.2*

Lead:	Bacher Energie AG	Funding:	BFE
Contact:	Rainer Bacher rainer.bacher@bacherenergie.ch	Period:	2009–2014
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.		

- BOOSTERCAP - DYNAMIC EXCITATION MODULE (DEM) TECHNOLOGY** R+D 6.2

Lead:	Alstom Switzerland Ltd.	Funding:	BFE, Privat
Contact:	Stefan Keller stefan.sk.keller@power.alstom.com	Period:	2011–2014
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.		

- BPES - OPTIMAL SIZING AND CONTROL OF BALANCING POWER IN THE FUTURE EUROPEAN POWER SYSTEM INCLUDING TRANSMISSION SYSTEM CONSTRAINTS** R+D, Int 6.2

Lead:	ETH Zürich	Funding:	BFE, Privat
Contact:	Göran Andersson andersson@eeh.ee.ethz.ch	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.		

- DEMAND-RESPONSE.CH** R+D 6.2

Lead:	Hochschule Luzern - Technik und Architektur, iHomeLab	Funding:	BFE, Privat
Contact:	Alexander Klapproth alexander.klapproth@ihomelab.ch	Period:	2013–2015
Abstract:	The project investigates mechanisms how the energy consumption can be influenced in regard to the time of use, the price and the demand between the supplier and the consumer. It will be investigated what kind of incentives can change the consumers behaviour and lead to the goals of the suppliers energy sourcing from sun, wind and hydro-electric power plant. The factors for the consumer's energy costs are as well part of the project.		

- **ESINFOVEIN - EFFIZIENTE STROMNUTZUNG DURCH EXTERNE INFORMATIONEN** R+D 6.2
- Lead: Fachhochschule Nordwestschweiz Funding: BFE, Privat
 Contact: Holger Wache holger.wache@fhnw.ch Period: 2013–2014
 Abstract: Existing approaches for the management of low power grids only consider local measurements. However the management may be suboptimal due to the lack of information like e.g. a precise short-term weather forecast for solar generators. That kind of external information may improve network stability and power consumption significantly. This study investigates how big the potential of (external) information for optimisation of low power grids is.
- **EXCO-VERTRETUNG IM IEA IMPLEMENTING AGREEMENT «ISGAN»** Int 6.2
- Lead: ETH Zürich Funding: BFE
 Contact: Turhan Demiray demirayt@fen.ethz.ch Period: 2012–2016
 Abstract: ISGAN creates a mechanism for multilateral government-to-government collaboration to advance the development and deployment of smarter electric grid technologies, practices, and systems. It aims to improve the understanding of smart grid technologies, practices, and systems and to promote adoption of related enabling government policies. Turhan Demiray represents Switzerland within the executive committee as its alternate delegate.
- **FLEXI : DÉTERMINATION DU POTENTIEL DE FLEXIBILISATION DE LA DEMANDE ÉLECTRIQUE** R+D 6.2
- Lead: Planair SA Funding: BFE
 Contact: Lionel Perret lionel.perret@planair.ch Period: 2013–2014
 Abstract: Le projet vise à répondre à la question du potentiel de flexibilisation de la demande électrique des ménages afin de maximiser la part de consommation locale d'énergie solaire photovoltaïque. Le but est de quantifier de manière précise la couverture de la demande électrique d'un ménage ou d'un ensemble de ménages avec une production solaire locale en fonction de l'utilisation de technologies "smart" de flexibilisation de la demande.
- **FLEXLAST – ERZEUGUNG VON SEKUNDÄR-REGELLEISTUNG DURCH EIN DYNAMISCHES LASTMANAGEMENT BEI GROSSVERBRAUCHERN** P+D 6.2
- Lead: IBM Schweiz AG Funding: BFE, Privat
 Contact: Norbert Ender Norbert.Ender@ch.ibm.com Period: 2012–2013
 Abstract: Mit dem Projekt wollen Migros, BKW, Swissgrid und IBM das Potenzial von Smart Grid Technologien bei Grossverbrauchern adressieren; es soll die Entwicklung eines Smart Grid in der Schweiz unterstützen. Im Pilotprojekt werden die Kühlhäuser des Migros-Verteilbetrieb Neuendorf (MVN) zur Erzeugung von Sekundär-Regelleistung genutzt.
- **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 bondi@alari.ch Period: 2010–2014
 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.
- **GRIDBOX - PILOTNETZ** P+D 6.2
- Lead: Super Computing Systems AG; Bacher Energie AG Funding: BFE, Privat
 Contact: Stephan Moser stephan.moser@scs.ch Period: 2013–2016
 Abstract: GridBox ist ein umfassendes Smart Grid Konzept, basierend auf im Netz verteilten, kommunizierenden Geräten, welche sowohl Netzzustände in Sekundenintervallen und mit synchroner Zeitgenauigkeit erfassen als auch entsprechende Netzstabilisierende Aktionen auslösen können. Das GridBox Pilotnetz ist eine vollständig mit GridBoxen ausgerüstete Verteilnetzregion, in welcher verschiedenste Aspekte eines zukünftigen Stromsystems untersucht werden.
- **HVDC NETWORKS** R+D, Int 6.2
- Lead: ETH Zürich Funding: BFE, Privat
 Contact: Christian Franck cfranck@ethz.ch 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 ISGAN ANNEX 1 – GLOBAL SMART GRID INVENTORY** R+D, Int 6.2

Lead: Bacher Energie AG	Funding: BFE
Contact: Rainer Bacher rainer.bacher@bacherenergie.ch	Period: 2012–2014

Abstract: The ISGAN Annex 1 consists of three tasks. Task 1 entails development and population of a unified ISGAN framework for assessment of national-level motivating drivers and technology priorities for smart grids. Task 2 concerns development of the initial project inventory. Task 3 adds a quantitative layer using key per performance indicators identified by ISGAN Annex 3.

● **IEA ISGAN ANNEX 3 – BENEFIT AND COST ANALYSES AND TOOLKITS** R+D, Int 6.2

Lead: ETH Zürich	Funding: BFE
Contact: Türhan Demiray demirayt@fen.ethz.ch	Period: 2012–2016

Abstract: The objective is to develop a global framework and related analyses that can identify, define, and quantify in a standardized way the benefits that can be realized from the demonstration and deployment of smart grids technologies and related practices in electricity systems. The Annex will leverage existing knowledge and experience gained, e.g., in different participating countries.

● **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 Looock moritz.loock@unisg.ch	Period: 2010–2013

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's impact on established structures will be highlighted.

● **OPTIMIERUNG DES BETRIEBES VON FREILEITUNGEN AUS METEOROLOGISCHER SICHT** R+D 6.2

Lead: Meteodat GmbH	Funding: BFE, Privat
Contact: Urs Steinegger steinegger@meteodat.ch	Period: 2012–2015

Abstract: The project will deliver methods to calculate and predict the change in conductor temperature with changing weather conditions. This will help to improve the use of existing overhead power lines without compromising the safety. Weather-related loads on overhead lines may influence the operation or even damage the infrastructures. A high-resolution weather forecast model will be tested and improved to foresee wet snow and in-cloud icing events.

● **POTENZIAL DER SCHWEIZER INFRASTRUKTURANLAGEN ZUR LASTVERSCHIEBUNG** R+D 6.2

Lead: InfraWatt	Funding: BFE
Contact: Ernst A. Müller mueller@infrawatt.ch	Period: 2011–2013

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.

● **POWER ELECTRONIC CONVERTER SYSTEMS FOR ENERGY STORAGE BASED ON SPLIT BATTERIES** R+D 6.2

Lead: ETH Zürich	Funding: BFE, Privat
Contact: Jürgen Biela jbiela@ethz.ch	Period: 2012–2015

Abstract: In the project, highly efficient and reliable power electronic converter systems for modular energy storage systems applied in medium voltage grids are investigated. The new solutions are comprehensively modelled and optimised for efficiency. For evaluating the performance of the new concepts, these are compared to existing solutions. Based on the optimal solution, a medium voltage prototype is built and control issues are investigated.

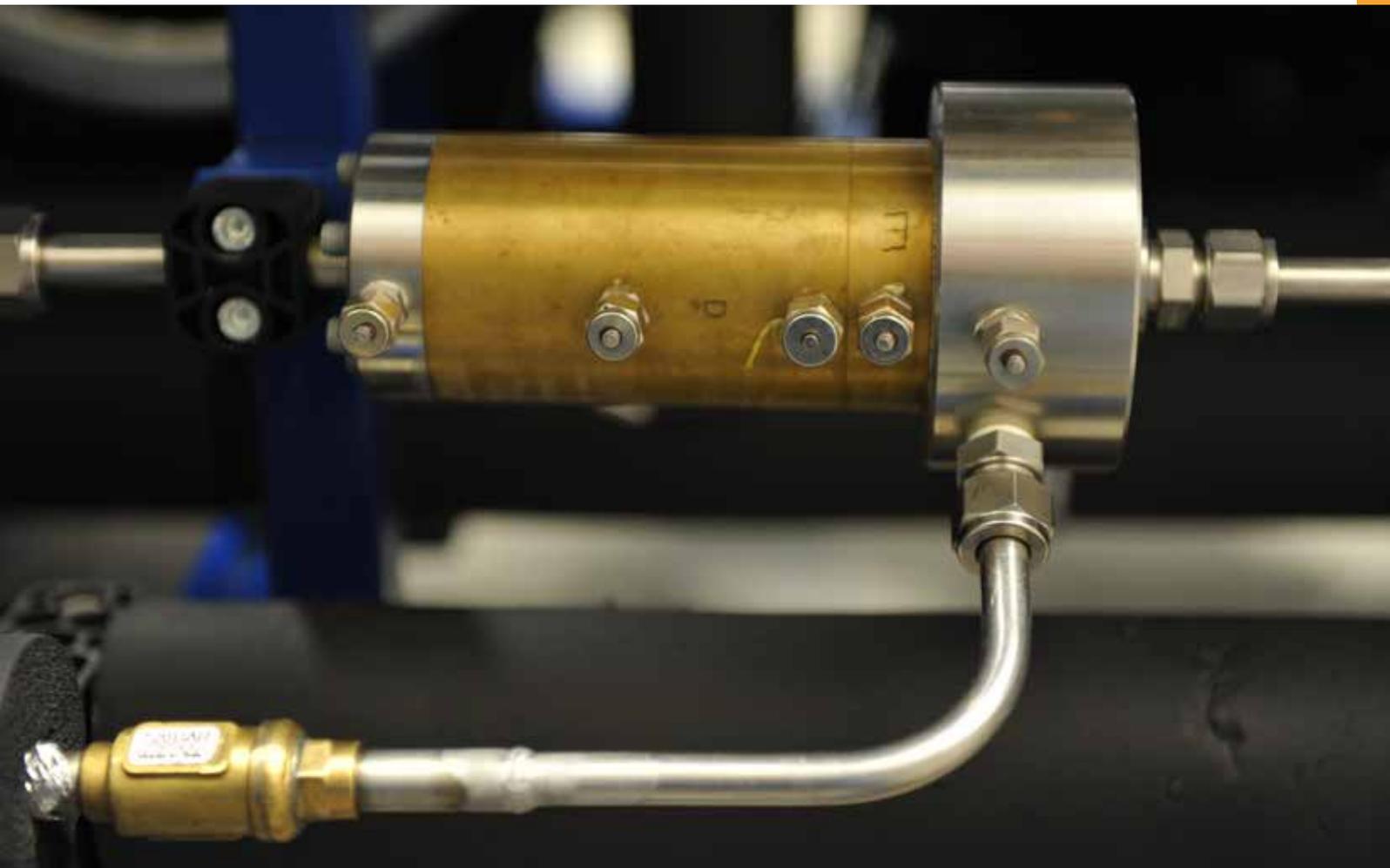
● **RENEWABLE ENERGIES IN FUTURE ENERGY SUPPLY (RENERG2) – WORKPACKAGE 5: MARKET & GRID** R+D 6.2

Lead: Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW)	Funding: BFE, Privat
Contact: Petr Korba petr.korba@zhaw.ch	Period: 2013–2016

Abstract: The project includes research activities in the field of chemical electricity storage, efficient use of stored electricity and the interaction with the electric grid. The target of the project is to demonstrate the efficiency increase and pollutant reduction potentials of the whole chain, from electrolytic hydrogen production and the use in energy converters as well as the capabilities for grid stabilization.

- **SMART GRID-POLYSUN – DESIGNTOOL FÜR LOKALES LASTMANAGEMENT** R+D, Int 6.2
- | | | | |
|----------|---|----------|-------------|
| Lead: | ETH Zürich | Funding: | BFE, Privat |
| Contact: | Göran Andersson
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.
- **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
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 of partners in NO, DK, Latvia and CH.
- **SWISS2G** P+D 6.2
- | | | | |
|----------|-------------------------------------|----------|-------------|
| Lead: | SUPSI; Bacher Energie AG | Funding: | BFE, Privat |
| Contact: | Roman Rudel
roman.rudel@supsi.ch | Period: | 2009–2014 |
- 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 elaborate models to reproduce these measured phenomena.
- **SYSTEM MODELLING FOR ASSESSING THE POTENZIAL OF DECENTRALIZED BIOMASS-CHP PLANTS** R+D 6.2
- | | | | |
|----------|--|----------|-------------|
| Lead: | ETH Zürich | Funding: | BFE, Privat |
| Contact: | Konstantinos Boulouchos
boulouchos@lav.mavt.ethz.ch | Period: | 2012–2015 |
- Abstract: An increasing share of fluctuating renewable electricity production (photovoltaic, wind) asks for grid stabilising measures. Decentralised biogenic combined heat and power (CHP) plants could play a significant role in this context. The development of a CHP swarm model based on geographical distributed information about energy sources and transmission infrastructure allows assessing the potencial of this concept for Swiss regions.
- **VEIN - VERTEILTE EINSPEISUNGEN IN NIEDERSPANNUNGSNETZE** R+D, P+D 6.2
- | | | | |
|----------|--|----------|-------------|
| Lead: | Konsortium VEIN | Funding: | BFE, Privat |
| Contact: | Gilbert Schnyder
gilbert.schnyder@sing.ch | Period: | 2009–2014 |
- 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. The aim is to prepare the accordingly necessary knowledge and to gain experience.
- **WARMUP - OPTIMALE NETZREGELUNG IM WÄRMEPOOL** R+D 6.2
- | | | | |
|----------|---|----------|-------------|
| Lead: | Misurio AG | Funding: | BFE, Privat |
| Contact: | Samuel Pfaffen
samuel.pfaffen@misurio.ch | Period: | 2012–2013 |
- Abstract: The project aims at exploiting the flexibility of a pool of thermal storage devices for balancing the electrical grid. A high level intelligent system aggregates the existing flexibility, generates best bids on behalf of the system operator and system operator and guarantees an optimal overall operation. The project investigates economical, physical and legal requirements which guarantee a sustainable implementation. It is the starting point for a pilot.
- **WARMUP - PHASE 2** R+D 6.2
- | | | | |
|----------|---|----------|-------------|
| Lead: | Misurio AG | Funding: | BFE, Privat |
| Contact: | Samuel Pfaffen
samuel.pfaffen@misurio.ch | Period: | 2013–2015 |
- Abstract: A pool of heat pumps with warm water and building thermal energy storage is optimized against the intraday and tertiary control market. The project will prove the economic value of the flexibility of approx. 10 local energy systems in the field test and should confirm the results of the potencial analysis. It experiences with the bi-directional binding of the plants to a market-focused system and the associated completion of energy business.

Wärmepumpen und Kälte



Titelbild:

Ejektor zur Effizienzsteigerung einer transkritischen CO₂-Kälteanlage in der Migros Bulle (Quelle: Frigo-Consulting AG)

Zur Versorgung der Kühlregale und der Tiefkühlräume mit Kälte werden in Lebensmittelgeschäften oft transkritische CO₂-Kälteanlage eingesetzt, die zwar ein umweltfreundliches Kältemittel verwenden aber mit sehr hohen Drücken arbeiten. Entsprechend gross sind die Energieverluste über das Expansionsventil im Kältemittelkreislauf. Um diese zurück zu gewinnen, werden verschiedene Lösungsmöglichkeiten verfolgt. Ein viel versprechender Ansatz ist der Einbau eines Ejektors. Dies wurde im Rahmen eines Pilotprojekts in der Kälteanlage in der Migros in Bulle durchgeführt. Der Stromverbrauch konnte um 15 % reduziert werden. Ein Ejektor ist ein relativ einfaches Bauteil, das über eine Verengung im Rohrquerschnitt mit anschließender konischer Erweiterung (Venturirohr) einen Unterdruck erzeugt und durch eine Bohrung ein zweites Fluid ansaugen kann. Er wirkt wie eine Pumpe, jedoch ohne bewegliche Teile. (Mehr unter *Pilot- und Demonstrationsprojekte*).

BFE Forschungsprogramm Wärmepumpen und Kälte

Überblicksbericht 2013

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE

CH-3003 Bern

Programmleiter BFE (Autor):

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

Bereichsleiter BFE:

Martin Pulfer (martin.pulfer@bfe.admin.ch)

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

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

Einleitung

Die Energiestrategie 2050 des Bundes [1] fordert eine sparsame und rationelle Energienutzung sowie einen Übergang zu einer stärkeren Nutzung erneuerbarer, insbesondere einheimischer Energien. Dazu gehören auch Umgebungswärme, Wärme von Oberflächengewässern, Erdwärme oder Geothermie. Vereinzelt ist zudem Abwärme aus industriellen Prozessen oder von Kläranlagen vorhanden. Oft muss das Temperaturniveau dieser Wärmequellen jedoch erhöht werden, um deren Energieinhalt für die Wärmeversorgung von Gebäuden nutzbar zu machen. Mit der Zufuhr von Kompressionsarbeit kann dies mittels Wärmepumpen sehr effizient erfüllt werden. Wärmepumpen können einen relevanten Beitrag zur Erfüllung der Ziele der Energiestrategie 2050 leisten. So wurden 2013 insgesamt 19'350 – vor allem kleinere Anlagen mit einer Heizleistung unter 20 kW – installiert [2]. Der Wert liegt im Schnitt der vergangenen 5 Jahre. Insgesamt sind in der Schweiz über 200'000 Wärmepumpen in Betrieb.

Die Anforderungen an die Effizienz und die Flexibilität der Systeme sind gestiegen. Durch das Ziel, den Stromverbrauch weiter zu reduzieren, müssen die Systeme möglichst über das ganze Einsatzprofil eine hohe Leistungsziffer ausweisen. Die Energieversorgung der Gebäude erfolgt vielfach durch mehrere Energiesysteme und es entstehen beispielsweise Kombinationen von Wärmepumpen mit Solarthermie oder mit Photovoltaik. Die Effizienz einer Wärmepumpenan-

lage hängt von den Eigenschaften der Wärmequelle und der Wärmesenke ab. Diese werden durch den Standort des Gebäudes (welche Wärmequelle ist verfügbar) und die Art des Gebäudes (Art der Beheizung, Leistungsbedarf und Temperaturbedarf) bestimmt. Es geht also darum, bestmögliche Anlagentechnologien und -konfigurationen sowie Betriebskonzepte zu finden und diese im Markt zur Anwendung zu bringen.

Wärmepumpen können auch in vielen Industrieanwendungen eingesetzt werden und helfen den Energieverbrauch zu senken. In der Industrie, im Gewerbe und teilweise in Dienstleistungsbetrieben werden zudem Kältemaschinen benötigt. Sie dienen zur Kühlung von Räumen, Medien und Produkten bis zu Temperaturen weit unter dem Gefrierpunkt. Auch hier gelten die gleichen Herausforderungen wie bei Wärmepumpen: hohe Effizienz und optimale Einbindung in die Prozesse.

Ein besonderes Augenmerk gilt den Kältemitteln. Zu beachten sind die Eigenschaften, die für das vorgesehene Einsatzgebiet der Wärmepumpen oder der Kältemaschinen erforderlich sind, sowie das Umweltschädigungs- und Gefahrenpotential der Kältemittel. Eine kritische Grösse ist deren Treibhausgaspotenzial.

Die Schweiz verfügt über zahlreiche Firmen, die Komponenten entwickeln und herstellen oder kleinere Kältemaschinen und Wärmepumpen in Serien fertigen. Hinzu kommen Anlagebauer, die Wär-

mepumpen in allen Grössen bis in den Multi-Megawatt-Bereich planen und realisieren. In Entwicklungsbüros sowie an Forschungsinstituten von Hochschulen sind eine grosse Erfahrung und ein hoher Wissenstand vorhanden. Dies zeigt sich beispielsweise in der Mitarbeit und der Leitung von Forschungsprojekten im Heat Pump Programme (HPP) der Internationalen Energieagentur (IEA) durch Schweizer Forschende.

Das Bundesamt für Energie (BFE) unterstützt zahlreiche Projekte, welche die vorgenannten Herausforderungen angehen. Die Ziele und Schwerpunkte des Forschungsprogramms werden für eine 4-Jahresperiode festgelegt [3] und orientieren sich an den übergeordneten Forschungskonzepten des Bundes [4] und des BFE [5]. Das Forschungsprogramm Wärmepumpe und Kälte trägt zur Zielerfüllung der Forschungsschwerpunkte «Arbeiten und Wohnen der Zukunft» und «Prozesse der Zukunft» bei.

Im vorliegenden Jahresbericht informieren wir über unsere Forschungsziele und Schwerpunkte sowie einige Highlights aus laufenden Forschungsprojekten. Eine Zusammenstellung sämtlicher Forschungsprojekte ist am Schluss aufgelistet und Berichte über die Projekte sind auf der Website des BFE [6] verfügbar.

IEA Klassifikation: 3.7 Other Renewables

Schweizer Klassifikation: 2.3 Umgebungswärme

Programmschwerpunkte

Die Ziele des Forschungsprogramms [3] orientieren sich an den Forschungskonzepten des Bundes [4] und des BFE [5]. Wichtig ist zudem die Koordination mit den anderen Forschungsprogrammen des BFE. Zielsetzung 2013–2016:

Verbesserung der thermodynamischen Kreisprozesse

Die theoretisch möglichen Gütegrade werden erst zu etwa 50 % erreicht. Langfristig anzustreben sind Werte von 65 % bis zu 70 %.

Verbesserung von Komponenten

Die Verluste des Gesamtsystems summieren sich aus der Summe der Verluste der einzelnen Komponenten.

Optimierung der Regelstrategien

Neben der Auslegung des Systems ist eine optimale Regulierung entsprechend den Rahmenbedingungen erforderlich.

Ganzheitliche Systemoptimierung und Berücksichtigung von additiven Energiesystemen

Einbindung von Wärmepumpen in Versorgungssysteme mit Solarwärme, Photovoltaik, Wärmekraftkopplung, verbunden mit neuartigen Speichern.

Hohe Temperaturen mit Wärmepumpen für spezielle Anwendungen

Temperaturen über 80 °C sind notwendig für den Einsatz in zahlreichen indust-

riellen Prozessen.

Umweltfreundliche und thermodynamisch effiziente Arbeitsmedien

Neben klimaschädigenden auch thermodynamische Eigenschaften sowie Aspekte der Sicherheit und der Toxizität berücksichtigen.

Schwerpunkte 2013–2016

1. *Reduktion des Energiebedarfs für die Verdichtung:* Bei gegebenem Temperaturhub soll der Energiebedarf für die Verdichtung gesenkt werden. Dies gilt auch für den Teillastbetrieb.

2. *Rückgewinnung der Expansionsenergie:* Transkritischen Systeme sollen weiter optimiert und die Erfahrungen für andere Kältemittel angewendet werden.

3. *Optimierung der Regelstrategien und Einbezug von neuartigen Speichersystemen:* Leistungsregulierung sowie Betrieb entsprechend Angebot und Nachfrage der Wärmequelle sowie der Wärmesenke. Einbezug des Gebäudes als Energiespeicher.

4. *Untersuchung der Systemintegration von Wärmepumpen in additive, vor- und nachgelagerte Energiesysteme:* Additiv sind Solarwärme, Photovoltaik, Wärmekraftkopplung, (Holz)-Heizkessel. Vor- und nachgelagert sind Strom-, Erdgas- sowie Fernwärmenetze, «Smart Grids».

5. *Optimierung von grossen Wärmepumpen und grossen Kältemaschinen:* Besondere Anforderungen bei Grosswärmepumpen in Kombination mit Fernwärmenetzen und im Industrieinsatz.

6. *Hochtemperaturwärmepumpen für die Industrie:* Verfahrenstechnische Prozesse benötigen Temperaturen zwischen 80 °C bis 180° C. Hochtemperaturwärmepumpen helfen, die Effizienz der Industrie zu verbessern.

7. *Stärkung des Netzwerkes zwischen Hochschul- und Industrieforschung und der internationalen Zusammenarbeit:* Die nationale und internationale Zusammenarbeit in der Forschung ist ein wesentliches Element für den Erfolg.

Rückblick und Bewertung 2013

Das jährliche «Highlight» des Forschungsprogramms ist die *Wärmepumpentagung in Burgdorf*, welche zum 19. Mal stattfand. Präsentiert wurden vom BFE geförderte Projekte, Forschungsarbeiten anderer Gruppen sowie anwendungsorientierte Arbeiten. Neben über 200 Teilnehmenden zeigte auch das Medienecho [7, 8, 9] das grosse Interesse am Anlass. Im Projekt *Sole/Wasser-Wärmepumpen mit Leistungsreglung* konnte der Einfluss des Betriebs einer Wärmepumpe auf die Temperatur der Erdwärmesonde aufgezeigt werden. Durch eine geeignete Regelstrategie kann die Temperaturerholung verbessert werden. Sehr erfolgreich konnte das P&D-Projekt *CO₂-Kältemaschine und Ejektor* realisiert werden. Eine Effizienzverbesserung von 15 % wurde nachgewiesen. Im Projekt *Zweiphasenkompressor* konnte ein weiterer Teil, die Realisierung eines Funktionsmusters, gestartet werden. Das Projekt *Optimale Einheit aus Wärmepumpe und Energiespeicher* beschäftigt sich auch mit der Abstimmung des Betriebs von Wärmepumpen mit den Gegebenheiten des Stromnetzes.

Ausblick

International bedeutend ist die alle 3 Jahre stattfindende, vom Wärmepumpenprogramm HPP der internationalen Energieagentur IEA organisierte Heat



Figur 1: BFE Forschungsprogramme mit Schnittstellen zum Programm Wärmepumpen und Kälte. Orange: Effiziente Energienutzung, grün: erneuerbare Energien, grau: Querschnittsprogramme

Pump Conference, die 2014 in Montreal stattfand. Die Schweiz ist Mitglied des IEA HPP und in der Organisation des Anlasses engagiert. Ein Ziel ist, das neue Projekt *Optimale Einheit aus Wärmepumpe und Energiespeicher* in den

IEA HPP Annex 42 *Heat Pumps in small energy grids* zu integrieren und mit Projekten der Forschungsprogramme Netze sowie Wärmekraftkoppelung zu koordinieren. Abgeschlossen werden die Projekte *EFKOS (Leistungsgeregelte Solel*

Wasser-WP) sowie *Zweiphasenkompressor Funktionsmuster*. Die Erkenntnisse dieser Projekte können in einem nächsten Schritt als P&D-Projekte konkretisiert und damit näher zum Markt geführt werden.

Highlights aus Forschung und Entwicklung

Wärmepumpen und Netto-Nullenergiehäusern?

Durch additive Energiesysteme zur Gewinnung erneuerbarer Energien aus der unmittelbaren Umgebung eines stark wärmegeprägten Gebäudes sinkt dessen Nettoenergiebedarf gegen Null. Verschiedene Beispiele zeigen sogar Objekte, die in der Jahresbilanz einen Energieüberschuss ausweisen können. Dies heisst nun nicht, dass im Gebäude keine Energie mehr verbraucht wird. Es ist der Saldo zwischen dem Bezug von Energie von ausserhalb der Systemgrenzen der Liegenschaft und der Strom- und Wärmeerzeugungen abzüglich des Verbrauchs innerhalb dieser Systemgrenze der Null beträgt oder sogar einen Überschuss ausweist (Plusenergie Gebäude).

Die Frage lautet nun: Besteht für Wärmepumpen in diesen hoch isolierten Gebäuden mit eigener Energiegewinnung noch ein Bedarf? Eine Wärmepumpe wandelt zwar auch einen Teil Umgebungswärme in nutzbare Wärme um, benötigt aber dafür immer auch etwas Strom. Die Antwort lautet Ja, oder vielmehr, Wärmepumpen sind die dominierende Technologie in Netto-Nullenergiehäusern wie dies eine Auswertung von 216 Minergie A-Gebäuden in der Schweiz (Figur 2) zeigt.

Die Anforderung an diesen Einsatzbereich für Wärmepumpen werden im Projekt *Heat pump concepts for Nearly Zero Energy Buildings*, das als Annex 40 im IEA HPP bearbeitet wird, untersucht. Das Projekt wird von der Schweiz geleitet, wofür Prof. C. Wemhöner von der Hochschule für Technik Rapperswil (HSR) als Operating Agent vom BFE beauftragt wurde. Die Arbeiten wurden 2012 gestartet und 2013 waren Forschende aus Japan, Holland, Norwegen, Schweden,

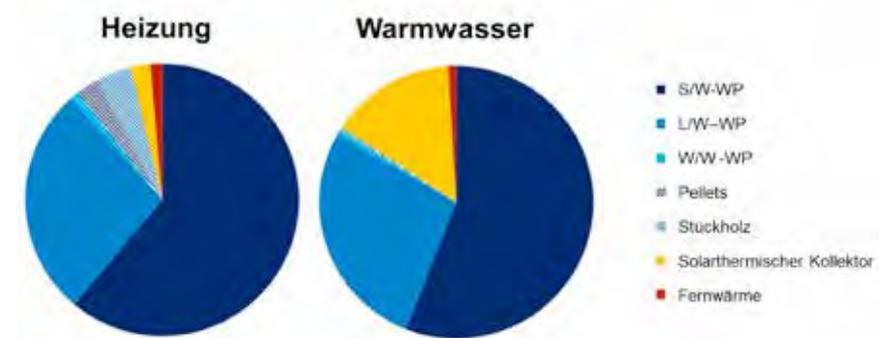
der Schweiz und den USA dem Annex 40 beigetreten. Ein Beitritt von Kanada, Deutschland und Finnland wird Anfang 2014 erwartet. Interessant an dieser breiten Teilnahme ist der vielfältige Input aus verschiedenen Regionen mit unterschiedlichen klimatischen, regulatorischen und auch technischen Voraussetzungen.

Der Annex 40 ist in vier Tasks unterteilt. In Task 1 wird der Stand der Technik in den einzelnen Teilnehmerländern zusammengestellt und eine Definition für Netto-Nullenergiegebäude (Nearly Zero Energy Buildings – nZEB) ausgearbeitet, die im Annex 40 benutzt wird. Task 1 ist 2013 bearbeitet worden, eine Veröffentlichung der Ergebnisse ist für 2014 geplant. Netto-Nullenergiegebäude sind trotz politischer Ziele mit Zeithorizont 2020 zurzeit nicht einheitlich definiert. In der Schweiz hat sich das Minergie A-Label mit rund 250 zertifizierten Gebäuden etabliert. Photovoltaik und Wärmepumpen sind die dominierenden Technologien in bereits realisierten nZEB. Die Konzepte haben allerdings einen Schwerpunkt auf Wohngebäuden, ins-

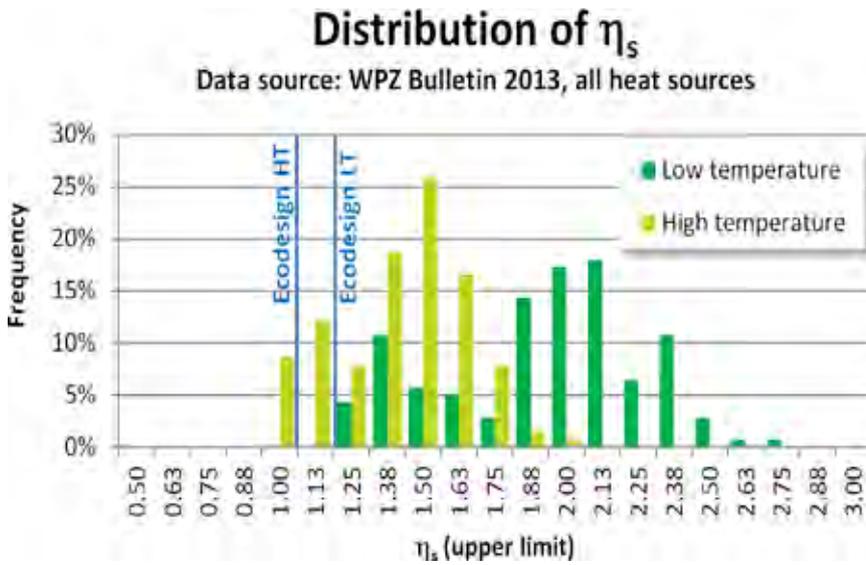
besondere Einfamilienhäusern. In Skandinavien, Nordamerika und Japan sind nZEB eher in der Planung und ersten Pilot-Umsetzungen.

In Task 2 werden vielversprechende Konzepte mit Hilfe von Simulationen hinsichtlich Design, Integrationsmöglichkeiten und Regelung untersucht und weiter entwickelt. Task 3 wird parallel bearbeitet und bezieht sich auf Technologieentwicklung und Feldtests von neuen und marktverfügbaren Systemlösungen. In den Teilnehmerländern werden 2014 verschiedene nZEB in Feldtests betrachtet, um Konzepte und entwickelte Technologien im Feldeinsatz zu untersuchen. Die Ergebnisse gehen auch in die Simulationen in Task 2 ein. Task 4, der im Anschluss durchgeführt wird, werden Fragestellungen betrachtet, die für die breite Integration von nZEB in das Energiesystem relevant sind, beispielsweise Eigenverbrauch, Netzrückwirkungen und lokale Speicherintegration.

Neben der Leitung des Annex wirkt die Schweiz auch in Task 3 mit. Fachleute der HSR, der Fachhochschule Nordwestschweiz und Energie Solaire SA



Figur 2: Auswertung der eingesetzten Technologien zur Wärmeversorgung in 216 Minergie-A-Gebäuden in der Schweiz. (Quelle: HSR)



Figur 3: Verteilung der Raumheizungseffizienz η_s von 139 Wärmepumpenanlagen, die in der Schweiz angeboten werden. Datenbasis vom Wärmepumpentestzentrum (Quelle: FHNW)



Figur 4: Transkritische CO₂-Kälteanlage der Migros Bulli. Die Anlage versorgt mit 6 Verdichtern (-8 °C) die Kühlregale und 4 Verdichtern (-33 °C) die Tiefkühlräume. Die Temperatur für die Kühlregale konnte dank dem Einbau von 3 Ejektoren auf -2 °C angehoben werden.

untersuchen die Integration von Solar-komponenten und Wärmepumpen für Heizung, Warmwasser und Kühlbetrieb für Büro- und Wohngebäude mit Simulationen und Labortests.

Wärmepumpen in der Schweiz erfüllen EU-Effizienz-Kriterien

Die Effizienz von Systemen, die in der Praxis im Einsatz stehen, kann nicht nur auf der Basis der Kennzahlen im

Nennbetriebszustand multipliziert mit der Betriebsdauer berechnet werden. Dafür braucht es weitere Kriterien, die das tatsächliche Einsatzprofil des Produkts möglichst genau berücksichtigen. Bei einer Heizungsanlage sind dies der Heiztemperaturbedarf und der Wärmeleistungsbedarf eines Gebäudes, deren Verläufe über eine Heizsaison erfasst werden müssen. Bei einer Wärmepumpe muss auch der Temperaturverlauf der Wärmequelle – beispielsweise Aussenluft – in ein Berechnungsmodell miteinbezogen werden.

Für konventionelle Wärmepumpen (Vollast, Ein-/Aus-Schaltbetrieb) sind dafür geeignete und international harmonisierte Berechnungswerkzeuge vorhanden, um nachvollziehbar die Jahresarbeitszahl, auch SPF (Seasonal Performance Factor) genannt, zu bestimmen. Für neue Technologien von Wärmepumpen oder bei der Kombination mit additiven Energiesystemen des Gebäudes müssen die Berechnungsmodelle angepasst und erweitert werden. Beispiele sind leistungsregulierte Wärmepumpen, welche die Leistung dem Bedarf der Wärmesenke aber auch den momentanen Eigenschaften der Wärmequelle anpassen können. Obschon eine Wärmepumpe im Teillastbetrieb eine schlechtere Leistungsziffer ausweist als bei Vollastbetrieb und einer Ein/Aus-Schaltung kann sich die Leistungsregulierung lohnen. Wird der Temperaturhub der Wärmepumpe möglichst gut an den effektiven Temperaturbedarf eines Gebäudes angepasst und die Leistung moduliert, wird per saldo eine deutlich bessere Effizienz erreicht. Um dies mit den Berechnungsmodellen abbilden zu können, müssen weitere Faktoren mit einbezogen werden. Dies gilt dann insbesondere auch beim Erlass von Regulativen über die Leistungsziffern von Wärmepumpen.

Im Projekt *Effizienz kombinierter Systeme mit Wärmepumpen* wird dieser Frage nachgegangen und Berechnungsmodelle für leistungsgeregelten Wärmepumpen werden erarbeitet und überprüft. Das Modell soll von den Herstellern akzeptiert werden können und nach Möglichkeit auf bereits vorhandenen Daten gemäss EN 14511 [10] und der 2013 neu erlassenen EN 14825 [11] aufbauen. Zur Überprüfung der Berechnungsmodelle

werden auch Messungen an Anlagen durchgeführt. In den bisherigen Arbeiten wurden zwei Modelle entwickelt, die nun überprüft und verfeinert werden. Ein Vergleich mit den Vorgaben der EN 14825, die insbesondere auch leistungsregulierte Systeme berücksichtigt, zeigt, dass die Daten aus den Berechnungsmodellen sehr gut für die Berechnung des SPF genutzt werden können. Die EU wird 2014 Energielabels für Wärmepum-

pen für Raumheizung, einführen. Dabei werden Minimalwerte für einen Betrieb für Niedertemperatur (Fussbodenheizung 35 °C) und für Hochtemperatur (Radiatorenhheizung 55 °C) differenziert. Als Primärenergieumwandlungsfaktor für die Elektrizität wird 2.5 verwendet. Eine Wärmepumpe mit einem SPF von 2.5 erreicht somit eine Jahresenergieeffizienz für Raumheizung von 100 % (Seasonal space heating energy effici-

ency = η_p). Für 139 in der Schweiz vom Wärmepumpentestzentrum getestete Wärmepumpen wurden die η_p mit den Berechnungsmodellen berechnet und in Figur 3 dargestellt. Der eher tiefe Minimalwert der Ecodesign-Vorgabe Level «A» wurde von gut 90 % der Anlagen erreicht. Für Niedertemperaturanlagen ist dafür eine η_p von mindestens 115 % erforderlich was einem SPF von 2.88 entspricht.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

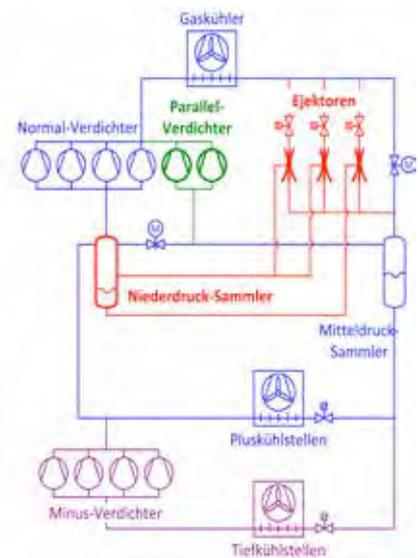
Effizienzsteigerung von CO₂-Kälteanlagen

Seit rund 10 Jahren erlebt CO₂ als natürliches Kältemittel in Kälteanlagen des Gewerbes und der Industrie eine Art Renaissance. Schweizer Supermarkt- und Grosshandelsketten installieren vorwiegend transkritische CO₂-Kälteanlagen. Die Anlagen sind heute robust, erreichen sehr gute Leistungsziffern und haben den Vorteil, dass kein synthetisches Fluor-Kohlen-Wasserstoff-(FKW)-Kältemittel mit einem grossen Treibhausgaspotenzial eingesetzt wird. Die speziellen Eigenschaften der CO₂-Anlagen wie hohe Drücke und hohe Temperaturen erfordern auch besondere Massnahmen, um einen möglichst effizienten Betrieb zu gewährleisten. Im Forschungsprojekt *Effizienzsteigerung von transkritischen CO₂-Kälteanlagen* untersucht Frigo-Consulting AG [12] entsprechende Methoden. Basis bilden drei Feldtestanlagen, in denen eine integrierte Expansionsmaschine, die Kombination aus einer CO₂-Kälteanlage und einer Adsorptionskälteanlage sowie eine CO₂-Kälteanlage mit Parallelkompression eingesetzt und verglichen werden. Zudem werden weitere Methoden zur Effizienzsteigerung theoretisch evaluiert. Aus dem Projekt wird ein systematisches Auswahlverfahren für die Effizienzsteigerung von transkritischen CO₂-Kälteanlagen resultieren sowie von drei bereits realisierten Methoden anhand von Messresultaten das effektive Einsparpotential validiert sein. Der Projektabschluss erfolgt 2014.

Sehr erfolgreich wird ein weiteres System zur Steigerung der Effizienz von transkritischen CO₂-Kälteanlagen im Rahmen eines Pilot- und Demonstrationsprojekts in der Praxis erprobt. Im ebenfalls von Frigo-Consulting AG geplanten Projekt *Effizienzsteigerung einer transkritischen CO₂-Kälteanlage mittels Ejektor* wurden in die neue erstellte Kälteanlage der Migros-Filiale Bulle drei Ejektoren (Figur 4) eingebaut. Interessant an diesem Projekt ist, dass der Effizienzgewinn nicht durch die Rückführung der gewonnenen Expansionsenergie in die Kompressionsphase des Kältemittelkreislaufes erfolgt. Es wird die Temperatur in den Verdampfern angehoben, beispielsweise in den Kühlregalen von -8 °C auf -2 °C. Der geringere Temperaturhub bewirkt direkt eine Einsparung bei der Kompression des Kältemittels und führt damit zu einer Effizienzsteigerung. Der Nachteil dieser Temperaturerhöhung ist, dass die Kältemittel nicht mehr vollständig verdampft und die Gefahr besteht, dass Flüssigkeitropfen in den Kompressor gelangen, was zu erheblichen Schäden führt. Durch den Einsatz eines Ejektors wird dies erfolgreich vermieden. Der flüssige Teil des Kältemittels wird in einem Niederdrucksammler ausgeschieden, vom Ejektor angesaugt und in den Mitteldrucksammler gefördert. Als Antriebsenergie dieser «Pumpe» wird ein Teil des Kältemittelstroms vor dem Expansionsventil verwendet. Der Ejektor ist ein robustes und einfaches zusätzliches Element im Kühlkreislauf, das über keine bewegte Teile verfügt.

Die Berechnungen wurden durch das norwegische Forschungsinstitut SINTEF Energy Research durchgeführt. Der Einbau in die Kälteanlage wurde vom italienischen Hersteller, Enx srl, vorgenommen. Die Installation und die Wartung erfolgt durch Alpig InTec West AG.

Die bisherigen Resultate sind sehr erfolgreich und zeigen eine Verbesserung von 15 %.



Figur 5: Schema des Kältemittelkreislaufs. Nach dem Gaskühler (Kondensator) wird ein Teilstrom des flüssigen Kältemittels abgezweigt und den Ejektoren zugeführt. Diese saugen überschüssige Flüssigkeit aus dem Niederdruck-Sammler an und fördern sie in den Mitteldrucksammler.

Nationale Zusammenarbeit

Die Teams der Schweizer Wärmepumpen- und Kältemaschinen-Forschung sind gut vernetzt und pflegen eine Zusammenarbeit auch zwischen der Hochschul- und der Industrieforschung. Hinzu kommen die Kontakte zu den Umsetzungspartnern wie Architekten und Planern sowie zu den Nutzern. Dies manifestiert sich an der jährlich vom BFE organisierten Wärmepumpentagung, an der sich in Burgdorf jeweils über 200 Personen aus Forschung, Fertigung, Planung, Realisierung und Anwendung treffen. Durch Projektbegleitgruppen mit Industrievertretern erfolgt der notwendige Praxisbezug in von Hochschulen bearbeiteten Projekten. So wird das eher grundlagenorientierte Projekt *Zweiphasenkompressor* der HSR durch Spezialisten der Firmen Burckhardt Compression, Haug Kompressoren, DUAP Einspritzsysteme sowie Hoval Wärmepumpen begleitet [13]. Im Projekt *Effizienzsteigerung von transkritischen CO₂-Kälteanlagen* erfolgt eine Zusammenarbeit mit Prodega Basel und Prodega St. Blaise sowie Migros Ebikon und

Migros Bulle, die als Anwender ihre Kälteanlagen für Feldtests oder Demonstrationsanlagen zur Verfügung stellen. Zahlreiche Fachhochschulen arbeiten im Projekt *SOFOWA (Kombination von Solarthermie, Fotovoltaik und Wärmepumpen)* zusammen. Dazu gehören die Institute IEBAu (FHNW), SPF (HSR), HEFR (Fribourg), LESBAT (HEIG-VD) und FOREL (Universität Genf).

Mit den Branchenverbänden besteht ein Informationsaustausch: Mit dem Fachverband Wärmepumpen Schweiz (FWS), mit dem Schweizer Verein für Kältetechnik (SVK) sowie mit dem Schweizer Verein für Gebäudetechnik-Ingenieure (SWKI). Im Rahmen der BFE-Forschungsprogramme besteht vor allem eine Zusammenarbeit mit den Programmen Solarwärme und Wärmespeicherung, Energie in Gebäuden, Elektrizitätstechnologien und -anwendungen sowie Verfahrenstechnische Prozesse. Gut funktioniert zudem die Koordination der Arbeiten mit EnergieSchweiz.

Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit erfolgt vor allem durch eine aktive Mitarbeit im IEA HPP. Schweizer Forschende arbeiteten 2014 in 4 Projekten (Annexes) des IEA HPP mit. Im Annex 37 *Demonstration of Field Measurements on Heat Pump Systems in Buildings* [14] sind Forschende aus 4 verschiedenen Ländern engagiert, wobei die Schweizer Vertreter ein Teilprojekt (Task) bearbeiten. Eine sehr umfassende internationale Zusammenarbeit findet im Annex 38 *Solar and Heat Pump Systems* [15] statt, der gemeinsam mit dem Annex 44 des IEA Implementing Agreement Solar Heating and Cooling bearbeitet wird. In dieser Kooperation sind 12 verschiedene Länder involviert und sie wird von der Schweizer Vertretung geleitet. Die Schweiz steuert je ein Projekt der FHNW und der FH Fribourg bei. Im Annex 39 *A common method for testing and rating of residential heat pumps and air conditioners annual/ seasonal performance (SPF)* [16], an dem 8 verschiedene Länder beteiligt sind,

bearbeitet die FHNW mit dem Projekt *EFKOS (Effizienz kombinierter Systeme mit Wärmepumpen)* ein Teilprojekt. Hier findet auch eine Zusammenarbeit mit dem deutschen Bundesverband Wärmepumpen (bwp) statt. Im vom IET der HSR geleiteten IEA HPP Annex 40 *Heat Pump Concepts for Nearly Zero Energy Buildings* [17] arbeiten zur Zeit 6 verschiedene Länder zusammen.

Die Berichte aus den IEA HPP Annexes werden jeweils auf der Website des Heat Pump Centre publiziert und sind für die Mitglieder zugänglich. Dadurch wird ein breit abgestütztes Wissen zur Verfügung gestellt. Im Rahmen der Projektarbeit organisiert das IEA HPP zahlreiche Workshops. Alle drei Jahre wird eine internationale Wärmepumpenkonferenz durchgeführt. Die nächste wird 2014 in Montreal stattfinden.

Referenzen

[1] Botschaft zum ersten Massnahmenpaket der Energiestrategie 2050, Bundesrat, 4.9.2013

[2] Wärmepumpenstatistik 2013, Fachverband Wärmepumpen Schweiz (FWS)

[3] Forschungsprogramms Wärmepumpen und Kälte, Konzept 2013 bis 2016, BFE, 2013

[4] Konzept der Energieforschung des Bundes 2013 bis 2016, Eidgenössische Energieforschungskommission CORE, BFE, 2012

[5] Energieforschungskonzept 2013 bis 2016 des BFE, 2012

[6] Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Wärmepumpen und Kälte, <http://www.bfe.admin.ch/forschungwkk>

[7] Bis 2050 Verdopplung der Jahresarbeitszahl, TAG Fachplaner, (Stuttgart) 09.2013

[8] Wärmepumpen mit verbesserter Effizienz, Spektrum Gebäude Technik, 4/2013

[9] Wärmepumpen sind noch nicht am Ziel, hk Gebäudetechnik, 9/2013

[10] EN 14511:2012; Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling, CEN, Brussels, 2012

[11] EN14825:2013; Air conditioners, liquid chilling packages

and heat pumps, with electrically driven compressors, for space heating and cooling - Testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance, CEN, Brussels, September 2013

[12] Ejektor macht Kälteanlage effizienter, B. Vogel, Fachbeitrag, BFE, 01/2014

[13] Zweiphasenkompressor für Wärmepumpen, M. Friedel, Th. Wüst, S. Oricchio, Th. Neuenschwander, BFE-Schlussbericht, 2012

[14] IEA-HPP-Annex 37: Demonstration of Field Measurements on Heat Pump Systems in Buildings, (www.heatpumpcentre.org)

[15] IEA-HPP-Annex 38: Solar and Heat Pump Systems, (www.heatpumpcentre.org and www.iea-shc.org/task44)

[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)

[17] IEA-HPP- Annex 40: Heat Pump Concepts for Nearly Zero Energy Buildings, (www.heatpumpcentre.org)

Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(* IEA-Klassifikation)

● OIL-FREE MONO AND TWO STAGE DOMESTIC ELECTRICAL HEAT PUMP R+D 7.2

Lead: EPFL, Laboratoire d'Énergétique Industrielle (LENI)

Funding: KTI

Contact: Daniel Favrat daniel.favrat@epfl.ch

Period: 2008–2012

Abstract: In collaboration with Fischer Engineering Solutions AG, EPFL has demonstrated the feasibility of a new high-speed direct driven oil-free turbocompressor for refrigerant systems including heat pumps. Oil-free compressor technology is a major technology step towards significant improvements of heat pump efficiency and size.

● IEA-HPP-ANNEX 38: SOLAR AND HEAT PUMP SYSTEMS R+D 7.2

Lead: IEA Heat Pump Programme, Borås, Sweden

Funding: BFE, other

Contact: www.heatpumpcentre.org

Period: 2010–2014

Abstract: Internationales Gemeinschaftsprojekt IEA-HPP Annex 38 mit dem Ziel, die Einsatzmöglichkeiten der Kombination von Wärmepumpen und Solarthermie zu evaluieren und zu optimieren. Existierende Systeme werden bewertet und Testmethoden verglichen. Simulationen von heutigen Systemen und ergänzenden neuen Komponenten sollen das erreichbare Potential aufzeigen. Die Resultate werden den Herstellern offengelegt und Massnahmen zur Umsetzung vorgeschlagen.

● SOFOWA – KOMBINATION VON SOLAROTHERMIE, FOTOVOLTAIK UND WÄRMEPUMPEN R+D 7.2

Lead: Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut am Bau

Funding: BFE

Contact: Ralf Dott, Thomas Afjei thomas.afjei@fhnw.ch

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.

- 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, other
Contact: www.heatpumpcentre.org	Period: 2010–2014

Abstract: Internationales Gemeinschaftsprojekt IEA-HPP Annex 39 mit dem Ziel, eine international anerkannte Methode zur Berechnung des Seasonal Performance Factor (SPF) aus gemessenen Momentanwerten des Coefficient of performance (COP) für verschiedene neuartige Wärmepumpentypen (z.B. frequenzgeregelte Wärmepumpen oder CO₂-Wärmepumpen) zu evaluieren. Zudem werden Testmethoden zur Messung der momentanen COP verglichen.
- EFKOS - EFFIZIENZ KOMBINierter SYSTEME MIT WÄRMEPUMPE**

R+D 7.2

Lead: Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut am Bau	Funding: BFE
Contact: Andreas Genkinger, Thomas Afjei thomas.afjei@fhnw.ch	Period: 2010–2014

Abstract: Kombinierte Wärmepumpen-Systeme (z.B. Multifunktionsgeräte) und neue Technologien (z.B. Leistungsmodulation mit Inverter, neue Kältemittel) können mit den verfügbaren Methoden nicht oder nur unzureichend berechnet werden. Neue Berechnungsmodelle sollen entwickelt und validiert werden. Das Projekt ist ein Beitrag für den IEA Heat Pump Program Annex 39.
- EFFIZIENTE KÄLTEERZEUGUNG VON TRANSKRITISCHEN CO₂-KÄLTEANLAGEN**

R+D 7.2

Lead: Frigo-Consulting AG, Gümliigen	Funding: BFE
Contact: Jonas Schöneberger j.schoenebergerr@frigoconsulting.ch	Period: 2011–2013

Abstract: Das Kältemittel CO₂ kommt in stationären Kälteanlagen vermehrt zum Einsatz. Die relativ schlechte Leistungszahl des Kaldampfprozesses mit CO₂ kann mit einer arbeitsleistenden Entspannung thermodynamisch verbessert werden. Drei verschiedene Varianten (Expansionsmaschine, Adsorptionskälte, Parallelkompression) werden in Feldtests und weitere theoretisch untersucht.
- 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, other
Contact: www.heatpumpcentre.org	Period: 2011–2014

Abstract: Internationales Gemeinschaftsprojekt IEA-HPP Annex 37 mit dem Ziel, das Potential 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.
- WÄRMEPUMPE ZUR NUTZUNG VON ZWEI WÄRMEQUELLEN**

R+D 7.2

Lead: NTB, Interstaatliche Hochschule für Technik	Funding: KTI
Contact: Stefan Bärtsch stefan.baertsch@ntb.ch	Period: 2011–2014

Abstract: In diesem Projekt mit drei Industriepartnern geht es dar- um, eine Wärmepumpe zu bauen, die gleichzeitig sowohl Luft als auch die Abwärme einer Solarthermieanlage als Wärmequelle verwenden kann. Dabei wird eine optimale Effizienz durch die Verwendung der Wärme auf dem jeweiligen Temperaturniveau erreicht.
- SOLE/WASSER-WÄRMEPUMPEN MIT KONTINUIERLICHER LEISTUNGSREGELUNG**

R+D 7.2

Lead: HSL – Technik und Architektur, CC Thermische Energiesysteme und Verfahrenstechnik, Horw	Funding: BFE
Contact: Lukas Gasser, Beat Wellig beat.wellig@hslu.ch	Period: 2012–2014

Abstract: Erfahrung aus der Leistungsregelung von LW-WP sollen auf SW-WP übertragen werden. Bei SW-WP ist die Wärmequellentemperatur zwar eher konstant, Temperatur- und Leistungsbedarf der Abnehmerseite schwankt jedoch identisch. In Vergleich zur Ein/Aus-Schaltung wird eine Verbesserung durch kontinuierliche Leistungsregelung erwartet.
- TURBO-WÄRMEPUMPE FÜR NIEDERHUB-ANWENDUNGEN**

R+D 7.2

Lead: HSL – Technik und Architektur, CC Thermische Energiesysteme und Verfahrenstechnik, Horw	Funding: KTI
Contact: Lukas Gasser, Beat Wellig beat.wellig@hslu.ch	Period: 2012–2014

Abstract: Moderne Raumwärmesystem eine geringe Differenz zwischen Vorlauf- und Raumtemperatur. Durch die Optimierung von Wärmequellen für Wärmepumpen kann der Temperaturhub weiter reduziert werden. Niederhubwärmepumpen stellen andere Anforderung an die Verdichtertechnologie als konventionelle Systeme. Für Anlagen kleiner Leistung sind Radialkompressoren vielversprechend.

- **IEA-HPP-ANNEX 40: HEAT PUMP CONCEPTS FOR NEARLY ZERO ENERGY BUILDINGS (OPERATING AGENT)** R+D 7.2
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | Hochschule für Technik Rapperswil, Institut für Energietechnik | Funding: | BFE |
| Contact: | C. Wemhöner
carsten.wemhoener@hsr.ch | Period: | 2012–2015 |
- Abstract: Der sehr geringe Energiebedarf von neuen Gebäuden stellt auch besondere Herausforderungen an die Wärmepumpen. In einem internationalen Rahmen sollen der Stand der Technik und die Definition von «Nearly Zero Emission Buildings» erfasst werden. Zudem werden vielversprechende Wärmepumpenkonzepte analysiert und Fragen zu Netzurückwirkungen und Speicherintegration untersucht.
- **EFFIZIENZSTEIGERUNG EINER TRANSKRITISCHE CO₂- KÄLTEANLAGE MITTELS EJEKTOR** P+D 7.2
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | Frigo-Consulting AG | Funding: | BFE |
| Contact: | Jonas Schönenberger
j.schoenenberger@frigoconsulting.ch | Period: | 2012–2015 |
- Abstract: In die neue transkritische CO₂-Kälteanlage der Migros in Bulle werden 3 Ejektoren. Damit kann die Verdampferferntemperatur angehoben und der Temperaturhub reduziert werden. Als primäres Fluid des Ejektors wird ein Teilstrom des kondensierten Kältemittels vor dem Drosselventil entnommen. Dieses saugt den flüssigen Teil des aus dem Verdampfer austretendes Kältemittels an und pumpt es auf den Einlassdruck des Kältemittelkreislaufes hoch.
- **NEXT GENERATION OF HEAT PUMPS WORKING WITH NATURAL FLUIDS. (NXTHPG)** R+D 7.2
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | EPFL, Laboratory of Heat and Mass Transfer (LTCM) | Funding: | EU-FP7 |
| Contact: | Thome John Richard
john.thome@epfl.ch | Period: | 2012–2016 |
- Abstract: EU-FP-Project NxtHPG is targeted at producing a definitive step forward to the launch of a high capacity heat pump technology employing natural refrigerants, that can become the future solution for heating and cooling on both new and existing buildings. EPFL is the leader of the heat exchanger team.
- **ENTWICKLUNG EINER OPTIMALEN EINHEIT AUS WÄRMEPUMPE UND THERMISCHEM ENERGIESPEICHER** R+D 7.2
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | HSL – Technik und Architektur, CC Thermische Energiesysteme und Verfahrenstechnik, Horw | Funding: | BFE |
| Contact: | Jörg Worlitschek
joerg.worlitschek@hslu.ch | Period: | 2013–2015 |
- Abstract: Produktion und der Verbrauch von Wärme und Elektrizität sollten verstärkt entkoppelt werden. Ziel dieses Projektes ist, die Kombination von Wärmepumpe und einem innovativen thermischen (technischen) Energiespeicher für Gebäude (für Heizung und Brauchwassererwärmung) zu analysieren, zu modellieren und optimale Auslegungskriterien zu entwickeln. Ein Funktionsmuster dient der experimentellen Verifizierung des Modelles.
- **ZWEIPHASENKOMPRESSOR FÜR WÄRMEPUMPEN – PHASE 2: FUNKTIONSMUSTER** R+D 7.2
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | Hochschule Rapperswil Institut für Energietechnik | Funding: | BFE |
| Contact: | Markus Friedl
markus.friedl@hsr.ch | Period: | 2013–2016 |
- Abstract: Um den Wirkungsgrad von Wärmepumpen zu verbessern, soll das Arbeitsmedium aus dem Zweiphasengebiet auf einen Zustand gesättigten Gases verdichtet werden. Diese neue Idee wurde in der Konzeptphase analysiert mit dem Resultat, dass die Wirkungsgradverbesserung möglich ist, indem am Kompressoreintritt ein feiner Nebel erzeugt wird. In der Phase 2 soll mit einem Funktionsmusters das Konzept experimentell demonstriert werden.
- **IEA-HPP-ANNEX 42: HEAT PUMPS IN SMART GRIDS** R+D 7.2
- | | | | |
|----------|--|----------|------------|
| Lead: | IEA Heat Pump Programme, Harderwijk, Niederlande | Funding: | BFE, other |
| Contact: | Peter Wagener
wagener@bdno.nl | Period: | 2013–2016 |
- Abstract: Internationales Gemeinschaftsprojekt IEA-HPP Annex 42 mit dem Ziel, den Stand der Technik von Wärmepumpe-Technologie in Bezug auf Smart Cities zu analysieren. Daraus kann geschlossen werden, ob Wärmepumpen in Smart Cities helfen können, Schwankungen auf der Produktions- und Nachfrageseite einzupendeln und gleichzeitig dazu beitragen, die CO₂-Emission zu reduzieren.

Verbrennung und Wärme-Kraft-Kopplung



Titelbild:

Phasen Doppler Anemometrie (PDA) Messeinrichtung bei Wärtsilä Schweiz AG (Quelle: Wärtsilä)

Der Aufbau der neuen PDA-Messeinrichtung wurde in Zusammenarbeit mit der ETH Zürich und der Empa Dübendorf konzipiert und realisiert. Sie wird in Zukunft von allen drei Partnern genutzt werden. Die ETHZ setzt sie für Messungen an der schnellen Expansionsmaschine, die Empa für die Untersuchung an einem Einspritzprüfstand und Wärtsilä für Forschungsarbeiten an der neuartigen Einspritz-Verbrennungskammer ein. Im Projekt *Flex Fuel* erforscht Wärtsilä die Auswirkungen unterschiedlicher Brennstoffe auf das Einspritz- und Zündverhalten in grossen Schiffsdieselmotoren. Die PDA-Messung erlaubt nun in der Einspritz-Verbrennungskammer mit hoher Genauigkeit die Grösse und die Geschwindigkeit der Tropfen im Einspritzstrahl zu messen.

BFE Forschungsprogramm Verbrennung und Wärme-Kraft-Kopplung
Überblicksbericht 2013

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern

Programmleiter BFE (Autor):

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

Bereichsleiterin BFE:

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

www.bfe.admin.ch/forschung/verbrennung

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

Einleitung

In den letzten Jahren richteten sich die Anstrengungen der Verbrennungsmotorenindustrie stark auf die Reduktion der Luftschadstoffe wie NO_x und Partikel. Die erforderlichen Massnahmen waren durch den Absenkpfad der Euronorm, welche beispielsweise für schwere Lastwagen 1992 eingeführt wurde und über 6 Stufen schrittweise tiefere Emissionsstandards vorschrieb, vorgegeben. Die letzte Stufe, Euro VI, ist ab 2013/14 gültig und fordert im Vergleich zur ersten Stufe eine Reduktion der NO_x -Emissionen um den Faktor 20 und der Partikelemissionen um den Faktor 36 (für grosse Motoren) [1]. Weil Massnahmen zur Reduktion der NO_x -Emissionen gegenläufig zur Verbesserung des Wirkungsgrads und damit zur Reduktion des Treibstoffverbrauchs wirken, war ein Ziel, den Verbrauch zumindest stabil zu halten.

Nachdem der Absenkpfad für Luftschadstoffe bei Fahrzeugmotoren erfüllt ist, haben nun die Reduktion des Brennstoffverbrauchs und des CO_2 -Ausstosses höchste Priorität. Massnahmen sind die Verbesserung des Wirkungsgrads über alle für den Betrieb relevanten Lastzustände und der Einsatz von erneuerbaren oder CO_2 -armen Brennstoffen und Gemischen davon. Hinzu kommt die Hybridisierung der Antriebe, die neue Anforderungen an den Betrieb der Verbrennungssysteme stellt. Diese Anstrengungen decken sich auch gut mit den Zielen des Bundesrats, die er in der Energiestrategie 2050 [2] formuliert hat: Sparsame und rationelle Energienutzung, stärkere Nutzung erneuerbarer Energien sowie Reduktion der CO_2 -Emissionen.

Bei Verbrennungssystemen, die in Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK) eingesetzt werden, sind die Anforderungen ähnlich: Eine möglichst hohe Stromausbeute bei tiefen Emissionen und geringem CO_2 -Ausstoss. Hinzu kommen Forderungen eines flexiblen Einsatzes in einem vermehrt durch fluktuierende Stromerzeugungsanlagen geprägten Versorgungssystem. Als Brennstoff wird weiterhin vorwiegend Erdgas genutzt. In der Zukunft wird erwartet, dass neben einem zunehmendem Anteil Biogas auch Wasserstoff, produziert aus überschüssigem Strom, in WKK-Anlagen verstromt wird.

In der Seeschifffahrt steht heute die Herausforderung, die Emission zu reduzieren, an oberster Stelle. Die internationalen Organisationen haben nicht nur im küstennahen Bereich sondern auch für die Hochsee Emissionsvorschriften erlassen [3]. Neben dem bei Hochseeschiffen üblichen Schweröl (Marinediesel) werden deshalb alternative Brennstoffe bis hin zu Zweistoff-Konzepten mit dem Einsatz von Diesel- und Gasbrennstoff (Dual Fuel) erforscht.

Erfreulich ist, dass im Forschungsprogramm Verbrennung und WKK des Bundesamts für Energie (BFE) ein Portefeuille von Projekten gefördert werden kann, die auf unterschiedlicher Ebene Antworten auf die vorgenannten Herausforderungen erforschen. Dies ist dank der in der Schweiz international anerkannten Kompetenzen in der Verbrennungsforschung in der Industrie und an Hochschulen möglich. 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 Verbrennungskraftmaschinen bahnbrechende Erfindungen hervorgebracht hat, begründet. Dazu gehört beispielsweise die Fiat Power Train Motorenforschung AG [4] in Arbon (ehemals Saurer), welche mit 32 Prüfständen die gesamte Palette der grösseren Dieselmotoren für den Fiat-Konzern entwickelt. Wärtsilä Schweiz AG [5] in Winterthur (ehemals Sulzer) ist das Entwicklungszentrum für grosse Zweitakt-Schiffsdieselmotoren des gleichnamigen finnischen Motorenherstellers. Hier werden Motoren bis zu einer Leistung von 80'000 kW entwickelt, die weltweit in Hochseeschiffen im Einsatz sind. Die Firma Wenko in Burgdorf [6] stellt Motoren im unteren Leistungsbereich (typisch 10–100 kW) her und entwickelt diese zudem für den US-Konzern Polaris Industries [7]. In Bulle ist die Firma Liebherr Machines SA [8] domiziliert, welche für den Liebherr-Konzern die Verbrennungsmotoren entwickelt und dort jährlich ca. 10'000 Stück herstellt. Auch zahlreiche Entwickler und Hersteller von peripheren Komponenten wie Turboladern, Einspritzsysteme, Katalysatoren, Partikelfiltern, Mess- und Steuersystemen sind in der Schweiz aktiv. Pro Jahr investiert die Schweizer Industrie rund 150 Mio. CHF in die Forschung zur Verbesserung von Verbrennungssystemen.

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 des Programms Verbrennung und WKK [9] richten sich nach den Vorgaben des Konzepts der Energieforschung des Bundes [10].

Erhöhung des exergetischen Wirkungsgrads: Verbrauch Energieresourcen und CO₂-Emissionen reduzieren.;

Reduktion der Schadstoffemissionen: Reduktion von NO_x, Partikel, Metalloxide, Aerosole auch bei variablen Lastzuständen.;

Optimierung der Systeme für die Nutzung gasförmiger Energieträger: Erdgas, Biogas, Wasserstoff und Gemische davon;

Nutzung von erneuerbare Energieträgern und Anforderungen an diese: Auswirkungen der Brennstoffe auf die Verbrennung sowie die Anforderungen der Verbrennung an die Brennstoffe;

Verbesserung von Forschungsmethoden und Instrumenten: Hochkomplexe Vorgänge im Verbrennungsprozess besser verstehen und abbilden;

Optimierung von WKK-Anlagen als Gesamtsystem inkl. Einbindung in die Strom- und Wärmeversorgung: Flexibler Einsatz hocheffizienter WKK-Systeme als

Ausgleich zu Photovoltaik und Wind.

Schwerpunkte 2013–2016 [9]:

- Forschungsmethoden und -instrumente für konventionelle und biogene Energieträger der 2. Generation;
- Variable Brennstoffnutzung und Schadstoffreduktion in grossen Dieselmotoren (Dual Fuel);
- Verbesserung des Wirkungsgrads und Reduktion der Schadstoffe bei der Nutzung von gasförmigen Brennstoffen
- Erweiterte Kenntnisse über massgeschneiderte Brennstoffe für Dieselmotoren
- Optimierung des Gesamtsystems Gemischbildung – Zündung – Verbrennung – Abgasnachbehandlung
- Erhöhung des exergetischen Wirkungsgrads durch Abgasenergienutzung
- Optimierung von WKK-Systemen als Ergänzung zu variablen erneuerbaren Stromerzeugungsanlagen unter Berücksichtigung der Wärmenutzung
- Kommunikation und Vernetzung Akteure in der Schweizer Verbrennungsforschung

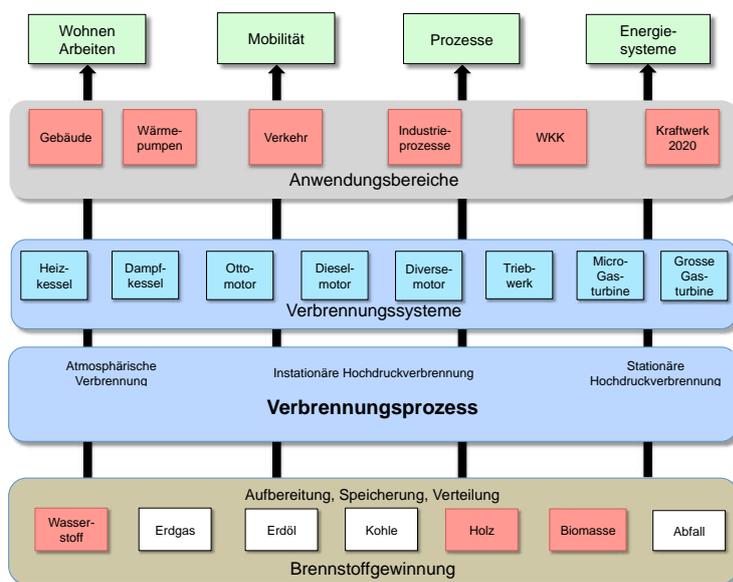
Rückblick und Bewertung 2013

Die Tagung Verbrennungsforschung in der Schweiz brachte über 100 Forschende aus der Industrie und aus Hochschulen zusammen. Sie tauschten sich über aktuelle Projekte sowie über Herausforderungen und Ziele der Industrie aus. Positive Rückmeldungen zeigten, dass die Kontaktpflege im Rahmen eines Schweizer Anlasses sehr erwünscht ist. Nachdem im Vorjahr zahlreiche Projekte abgeschlossen wurden, konnten 8 neue gestartet werden (siehe Seite 11ff), welche verschiedene Schwerpunkte abdecken. Im abgeschlossenen Projekt *Klein-WKK-Anlagen* erzielte ein 7 kW-Motor einen mechanischen Wirkungsgrad von 36 %. Und dies bei NO_x-Emissionen, die um den Faktor 5 unter dem Grenzwert der Stadt Zürich, dem tiefsten in der Schweiz, liegen.

Erfolgreich gestartet wurde der von der Schweiz initiierte und geleitete *Collaborative Task Gas Engines* im Implementing Agreement Combustion der Internationalen Energieagentur (IEA) [11].

Ausblick

Wichtiges Ziel ist das Etablieren einer guten internationalen Zusammenarbeit im neuen IEA Collaborative Task Gas Engines. Das Projekt *Klein-WKK-Anlagen* verfügt über das Potenzial in einem P&D-Projekt weitergeführt zu werden. Anwendungsmöglichkeiten bestehen auch im Kontext zu den Projekten *Biomass-CHP-Plants* sowie *RENERG²*, weshalb in der Forschung die Nutzung biogener oder wasserstoffhaltiger Brennstoffe untersucht werden soll. Resultate werden von den Projekten *Biomass-Micro-GT-CHP*, *ORC-Flügelzellenexpander Gas-motor* und *Xhost Harvester* erwartet, welche innerhalb von P&D-Projekten weitergeführt werden könnten.



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

Highlights aus Forschung und Entwicklung

Mit der Förderung von Projekten durch das BFE können Forschungsaufgaben bearbeitet werden, welche vertieft Aspekte der übergeordneten Zielsetzung untersuchen und deren Erfolg nicht von vornherein gegeben ist. Im Berichtsjahr betrug der Finanzbeitrag des Forschungsprogramms Verbrennung und WKK 23 % der gesamten Projektkosten. Dies zeigt eine sehr grosse Hebelwirkung der BFE-Förderung. Die Unterstützung von Projekten orientiert sich an den Zielsetzungen und Schwerpunkten des Programms für die Periode 2013–2016 [9]. Ein Highlight ist die Allokation von Fördermitteln in 6 komplementären Projekten, welche den Zielen betreffend *Erhöhung des exergetischen Wirkungsgrads von Verbrennungssystemen und Optimierung von WKK-Anlagen als Gesamtsystem* entsprechen und die Schwerpunkte 6 und 7 sehr gut abdecken. Interessant ist hier auch die Zusammenarbeit mit den Forschungsprogrammen Biomasse und Holzenergie, Netze und Wasserstoff. Ein weiterer sich gut ergänzender Projektbereich ergab sich zum Thema Nutzung von alternativen flüssigen und gasförmigen Brennstoffen, der im Folgenden im Highlight *Brennstoffflexibilität* erläutert wird. Erforscht werden die Eigenschaften neuartiger Brennstoffe, die Verbesserung und Anpassung der Simulationsmodelle für die Darstellung der Verbrennung dieser Brennstoffe sowie der Einsatz von unterschiedlichen flüssigen und gasförmigen Brennstoffen und Kombinationen davon.

Sehr erfolgreich konnte zudem die grundlagenorientierten Arbeiten zur Erforschung der *Energiefreigabe der Moleküle im Verbrennungsprozess* fortgesetzt werden.

Hocheffiziente und bedarfsgerechte Stromerzeugung – auch mit Erneuerbaren

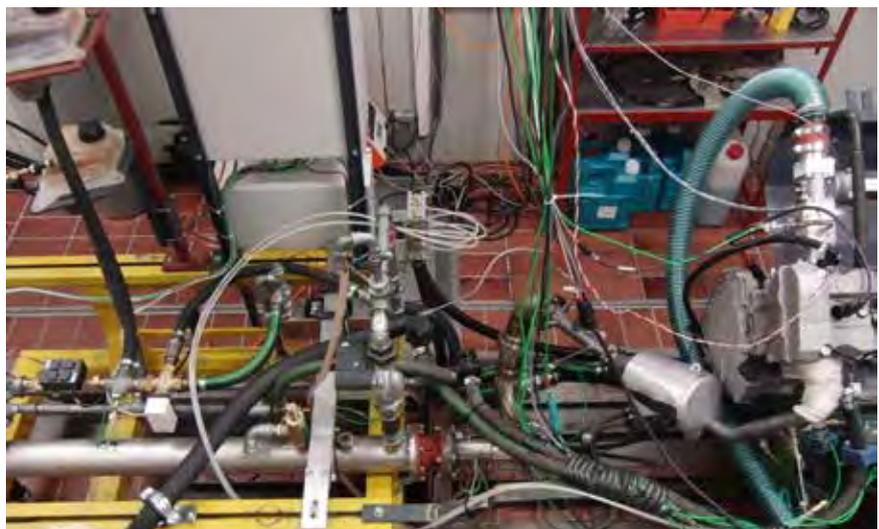
Die Nutzung der Wertigkeit des Energieträgers – z. B. als mechanische Energie eines Verbrennungsmotors – sollte in jedem Fall maximal genutzt werden. Dies gilt vorab für fossile Brennstoffe aber auch für Energieträger aus Biomasse, die auch nur begrenzt verfügbar sind. Verbrennungsmotoren werden nicht nur

für den Antrieb von Fahrzeugen und Maschinen eingesetzt, sondern auch für die Stromerzeugung. Obschon bei der Wärmekraftkopplung (WKK) die nutzbare Wärme einen wichtigen Beitrag an die Wirtschaftlichkeit solcher Anlagen leistet, sollte aus der Sicht der Forschung die technisch hochwertigere Exergie, d. h. der Strom, im Vordergrund stehen. Dies gilt – wie erwähnt – auch bei Energieträgern aus Biomasse und speziell für Holz. Diese werden bisher nur in Grossanlagen im MW-Bereich für die Stromerzeugung eingesetzt. Bei kleineren Anlagen werden erste Demonstrationsprojekte [13] gezeigt. Im Projekt *Biomass-Micro-GT-CHP (Biomasse befeuerte Heissluft-Mikrogasturbine mit WKK)* wird die Kombination Holzheizkessel und Stromerzeugung im kleineren Leistungsbereich (250 kW Feuerungswärmeleistung) entwickelt. Das Ziel ist, einen elektrischen Wirkungsgrad von 24 % zu erreichen. Vergleichbare Anlagen, die heute demonstriert werden, erreichen einen Wert von 12 %. Zusammen mit der Wärmenutzung sollten in jedem Fall mindestens 80 % erreicht werden. Als Gasturbine wird ein Produkt der Firma Capstone mit einer Nennleistung von 65 kW eingesetzt, das in WKK-Anlagen für die Nutzung von Erdgas und Biogas verwendet wird. Dieses verfügt über einen Rekupe­rator, der zu einer besseren Nutzung des

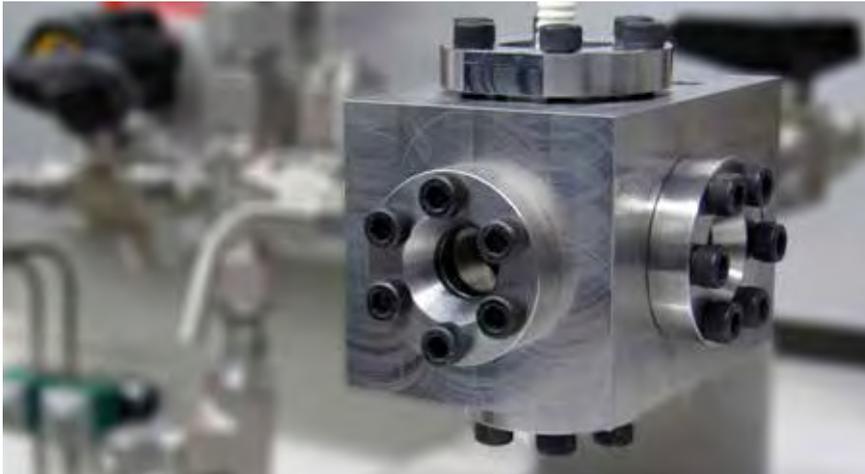
eingesetzten Energieträgers verhilft. Die Herausforderung ist, die Übertragung der Feuerungswärme auf die der Turbine zugeführte Heissluft und das Erreichen einer möglichst hohen Temperatur. Problematisch sind die Dimensionen des dafür notwendigen Wärmetauschers und die Wahl eines hitzebeständigen Materials.

Im erst gestarteten Projekt *μXyloCogen (Micro-turbine à air chaud)* wird die gleiche Aufgabe – Strom- und Wärmeerzeugung aus Holz – mit einem nochmals deutlich kleineren Heizkessel erforscht. An einen 5 kW-Holz­kessel soll ein Mikrogasturbine-Generator-System mit einer elektrischen Leistung von 1 kW angebaut werden. Angestrebt wird ein elektrischer Wirkungsgrad von 15–20 %. In dieser Leistungsklasse wurden bisher Systeme mit Stirling-Motoren erprobt, welche den Schritt zur Marktreife nicht erreicht haben.

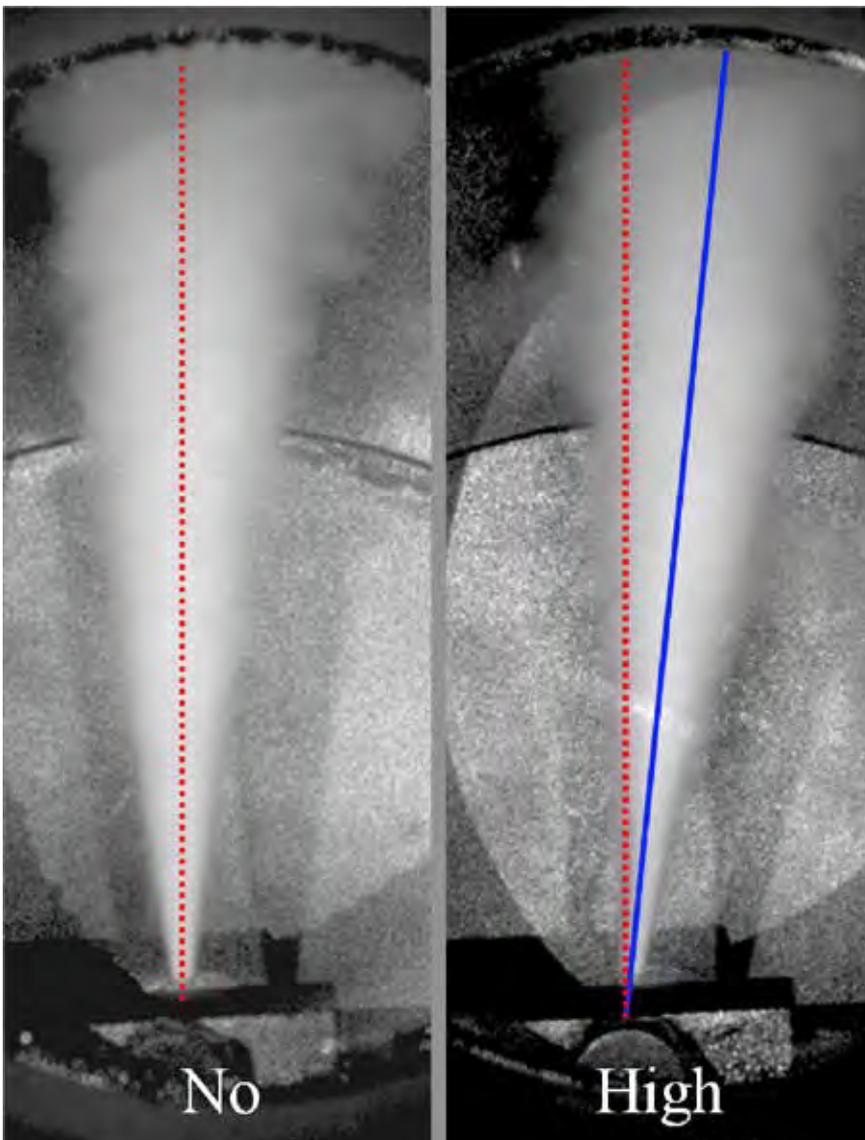
Bei der Nutzung von gasförmigen Brennstoffen wie Erdgas oder Biogas in Verbrennungsmotoren zur Stromerzeugung liegt der elektrische Wirkungsgrad bereits heute deutlich höher. Bei einer Leistung von 500 kW werden 42 % erreicht. In den über 600 °C heissen Abgasen steckt immer noch Exergie, die genutzt werden könnte. Die Herausforderung ist, den Gegendruck zum Motor mög-



Figur 1: Versuchsaufbau und Prüfstand mit dem 1 Zylinder Motor. Dieser wird mit Erdgas betrieben und ist mit einem Katalysator ausgerüstet. Auf dem Bild gut erkennbar (gelber Rahmen) sind die Wärmetauscher für die Gewinnung der diversen Abwärmequellen des Motors. (Quelle: LAV ETHZ)



Figur 2: Heizbare Hochdruckzelle zur spektroskopischen Untersuchung der Zündung von Wasserstoff-Methan-Gemischen. Optischer Zugang via Saphirgläser und Vorrichtung zum Einbau einer Zündkerze. (Quelle: Empa)



Figur 3: Ablenkung des Einspritzstrahls durch Exzentrizität der Düsenstritzlöcher. Die Aufnahme zeigt rot gestrichelt die Achse der zentrischen Einspritzung und blau bei exzentrischer Anordnung der Löcher. (Quelle: Wärtsilä)

lichst nicht zu erhöhen. Dies hätte zur Folge, dass der Wirkungsgrad im Motor sinkt und am Schluss die Verbesserung aufgehoben wird.

Im Projekt *Xhost Harvester* werden kostengünstige Systeme wie eine inverse Gasturbine untersucht. Diese erzeugt am Auslass des Motors einen Unterdruck und verdichtet die Abgase dann wiederum über den Umgebungsdruck, um sie ausstossen zu können. Bei gut abgestimmten, aufgeladenen Gasmotoren liegt die Verbesserung unter 1 %. Bei Saugmotoren ist die Verbesserung besser und wird mit rund 3 % berechnet. In Feldversuchen wurden schon höhere Werte gemessen. Vielversprechend ist dagegen die «Aactor !GT» genannte atmosphärische Abgasturbine, welche einen Teil «Turbo-Compounding» enthält, ohne dabei den Motor mit einem Gegendruck zu beeinflussen. Im Projekt werden rechnerisch weitere Konzepte zur Verstromung der Abgasenergie verglichen und ein weiteres mit einem «Dreitaktmotor» entworfen. Der Abschluss des Projekts erfolgt 2014.

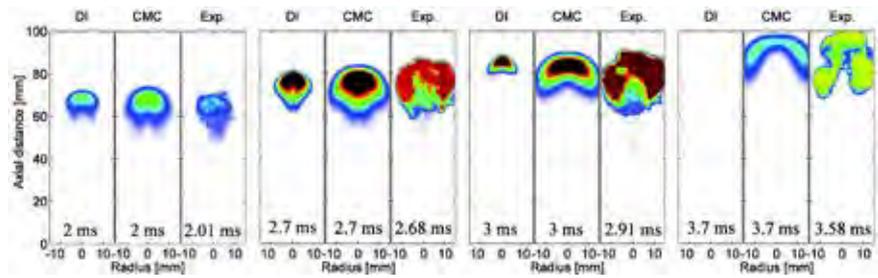
Neu gestartet wurde die Entwicklung und Erprobung eines Flügelzellenexpanders, der mit einem Organic Rankine Cycle die Abgasenergie nutzen wird. Im Gegensatz zu anderen Technologien, welche die kinetische Abgasenergie verwenden, wie beispielsweise der Turbo-Compound, nutzt der ORC lediglich die thermische Abgasenergie. ORC-Systeme können auch andere Abwärmequellen des Motors nutzen und ermöglichen eine maximale Verwertung der Gesamtabwärme zur additiven Stromerzeugung. Im Projekt *ORC Flügelzellenexpander Gasmotor* soll mit einem 500 kW-Motor ein elektrischer Wirkungsgrad von 48 % erreicht werden. Gleichzeitig soll der Gesamtwirkungsgrad als WKK-Anlage erhalten bleiben.

Im Projekt *Klein-WKK-Anlagen* wurde ein 1 Zylindermotor mit 0,325 Litern Hubraum der Firma Wenko aus Burgdorf für den stationären Einsatz und die Nutzung von Erdgas angepasst und optimiert. Das Ziel ist der Einsatz als Kompaktanlage, die beispielsweise in Einfamilienhäusern abgestimmt auf die Nachfrage im Versorgungsnetz Strom erzeugt, die Wärme speichert und für das Brauchwarm-

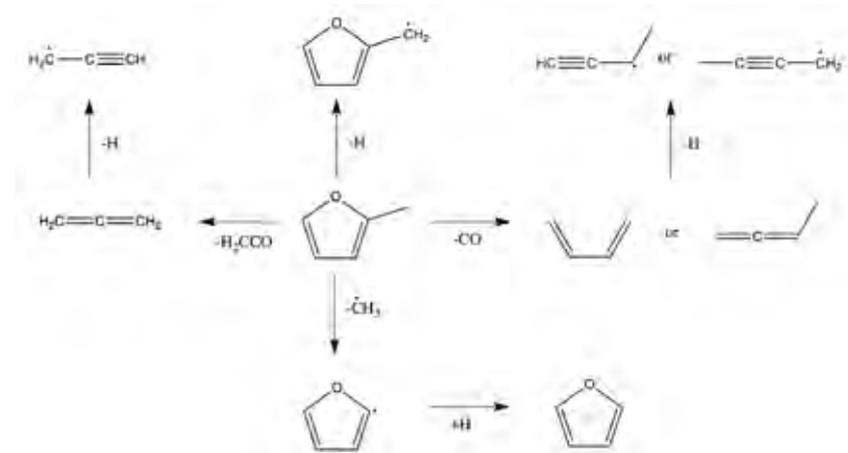
wasser und die Raumwärmeversorgung nutzt. Auf dem Prüfstand wurde ein mechanischer Wirkungsgrad von 36 % und NO_x -Emissionen von 10 mg/Nm^3 (bei 5 % O_2) erreicht. Der strengste Grenzwert in der Schweiz (Zürich) beträgt 50 mg/Nm^3 . Mit einem marktgängigen Generator wird ein elektrischer Wirkungsgrad von 32 % erreicht. Aufgrund der mittels Katalysator erreichten sehr tiefen Emissionen wurde auf eine Abgasrückführung verzichtet (Figur 1). In einem nächsten Schritt wird der Betrieb mit Biogas untersucht. Ein Verbesserungspotential liegt auch beim Generator, der mit einem Wirkungsgrad von 88 % nur einen Teil der mechanischen Energie in Strom umwandelt. In einem separaten Projekt wurde die Realisierung eines Prototyps vorbereitet. Dieser soll dann als Pilotsystem im Feld erprobt werden.

Der Einsatz derartiger hocheffizienter WKK-Systeme in Kombination mit den Anforderungen des Stromnetzes und den Vorkommen und der Verfügbarkeit von Biomasse als Brennstoff wird im Projekt *Biomass-CHP-Plants* untersucht. Der wachsende Anteil fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung (z. B. Photovoltaik, Wind) macht Massnahmen zur Netzstabilisierung nötig. In diesem Zusammenhang können dezentrale biogene WKK eine wichtige Rolle spielen. Die Entwicklung eines WKK-Schwarm-Modells gestützt auf geografische Daten (z. B. zu Energiressourcen und -infrastruktur) soll das Potenzial für ausgewählte Schweizer Regionen zeigen. Zusätzlich können aus Langzeit-Szenarien des gesamten schweizerischen Elektrizitätssystems günstige Randbedingungen für einen WKK-Schwarm abgeleitet werden. Neben dem Projektinhalt ist die Zusammenarbeit von drei ETH-Instituten und dem Paul Scherrer Institut (PSI) interessant: Spezialisten aus den Bereichen Verbrennungsmotoren, Gebäudeenergieversorgung, Geoinformation, Energienetze und Energie-System-Analyse arbeiten zusammen.

Dem gleichen Thema, der fluktuierenden Stromerzeugung und der dabei vor allem im Sommer auftretenden Überschüsse an Strom aus Photovoltaik und Wind, widmet sich das Projekt *RENERG²*. Der überschüssige Strom soll in Wasserstoff umgewandelt und gespeichert



Figur 4: Vergleich des Abbrands und Darstellung des natürlichen Leuchtens (Russbildung) der Flamme. Das CMC-Modell stimmt gut mit dem Experiment überein. Die Direkte Integration (DI) überschätzt die Oxidation und zeigt bereits nach 3ms kein Russleuchten mehr. (Quelle: *Combustion and Flow Solutions*)



Figur 5: Anfängliche Reaktionen von Methylfuran, wie sie in der Flamme zu erwarten sind. Die thermochemischen Daten aller Produkte müssen für eine aussagekräftige Modellierung bestimmt werden. (Quelle: PSI)

werden. Dieser kann dann für mobile Anwendungen genutzt oder mittels Verbrennungsmotoren wiederum in Strom umgewandelt und damit zu einem späteren Zeitpunkt zur Netzstabilisierung eingesetzt werden. Dabei können unterschiedliche Brennstoffpfade wie direkte Nutzung des Wasserstoffs, Methanisierung des Wasserstoffs oder Beimischung in die Erdgasversorgung gewählt werden. Auf die Verbrennung im Motor hat dies einen relevanten Einfluss, weshalb Untersuchungen über das Zündverhalten (Figur 2), den Abbrand und die Klopfesigigkeit durchgeführt werden sollen.

Brennstoffflexibilität

Die Reduktion der CO_2 -Emissionen er-

fordert die Senkung des Verbrauchs an fossilen Energieträgern. Dies kann durch effizientere Verbrennungssysteme oder durch die Substitution mit erneuerbaren bzw. CO_2 -armen Brennstoffen erfolgen. Dazu gehören vorab Biogas aber auch synthetisch hergestellte Dieselmotorenstoffe oder aus überschüssigem Strom erzeugter Wasserstoff. Die Palette der verfügbaren Brennstoffe weitet sich aus, womit die Anforderungen an die Brennstoffflexibilität von Verbrennungsmotoren steigen. Gefordert wird beispielsweise die Nutzung unterschiedlicher Brennstoffqualitäten und -zusammensetzungen und dies variabel in flüssiger oder gasförmiger Form. Im Projekt *Flex Fuel* untersucht Wärtsilä Schweiz AG den Einfluss von verschiedenen Brennstoffen auf den Einspritzstrahl und die Ver-



Figur 6: Aufbau der i^2 PEPICO Apparatur an der für die Verbrennungsforschung eingerichteten Endstation an der SLS/UV Beamline des Paul Scherrer Instituts in Villigen. (Quelle: PSI)

brennung (Figur 3). Sie nutzt dafür eine spezielle Verbrennungskammer, welche den Brennraum eines grossen Dieselmotors mit einem Durchmesser von 500 mm darstellt. Die Verbrennungskammer wurde im Rahmen des EU-Projekts HERCULES [20] realisiert und vom BFE mitfinanziert. Das Projekt HERCULES wird nun schon in seiner dritten Erweiterung bearbeitet. Um Daten aus solchen Experimenten in Rechencodes für die Simulation der Verbrennung nutzen zu können, müssen geeignete Berechnungsmodelle gefunden und diese an die Eigenschaften der Brennstoffe angepasst werden. Das am ETH Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV) mit entwickelte Berechnungsmodell Conditional Moment Closure (CMC) für die Darstellung des Verbrennungsablaufs und der Russbildung in turbulenten reaktiven Strömungen wird im Projekt *3D-CRFD-Modelle* diesbezüglich weiterentwickelt. Der Vergleich mit der direkten Integration zeigte für das CMC-Modell deutlich bessere Resultate. Die Validierung erfolgte zunächst für n-heptane mit Daten der Sandia National Laboratories (US). Anschliessend wurden Daten aus dem Projekt HERCULES, also eines grossen Marinemotors mit entsprechend grossem Bohrungsdurchmesser der Einspritzdüse verwendet und eine gute Übereinstimmung für das CMC-Modell

festgestellt (Figur 4). Eine Herausforderung in diesem laufenden Projekt ist die Verfügbarkeit von verlässlichen chemischen Daten, welche die Brennstoffe genügend genau beschreiben (Anzahl Teilchen und Reaktionen), und den Rechenaufwand in einem auch für die Praxis tragbaren Rahmen zu halten. In der weiteren Projektbearbeitung werden langkettige, paraffinartige Brennstoffe untersucht, welche gut den Eigenschaften von XTL-Brennstoffen (aus diversen Substraten wie Biomasse oder Abfall synthetisch hergestellte flüssige Brennstoffe) entsprechen. Dafür muss auch die Hochdruck-Hochtemperatur-Brennkammer des LAV modifiziert werden.

Der Energiefreigabe der Molekülen in der Verbrennung auf der Spur

Der Verbrennungsprozess ist durch die thermochemische Umwandlung der Moleküle des Brennstoffs in die Endprodukte CO_2 , H_2O , NO_x geprägt. Relevant ist der Zündvorgang, mit dem die Energiefreigabe und die nachfolgenden Reaktionen der Verbrennung über zahlreiche Zwischenprodukte bestimmt werden. Massgebend am Zündverhalten beteiligt sind Peroxy-Radikale. Deren thermochemische Daten sind bisher zu

wenig genau bekannt. Dies schlägt sich in Simulationsmodellen in der Berechnung der Reaktionsgeschwindigkeit nieder, welche um den Faktor 10 variieren kann. Damit ist beispielsweise die Entstehung von Stickoxid kaum verlässlich modellierbar. Zur genauen Bestimmung der energetischen und molekularen Zustände (Spinrotationen) der Radikale und weiterer für die Verbrennung relevanter Moleküle werden im Projekt *Molecular Data of Combustion relevant Radicals* am PSI spektroskopische Methoden eingesetzt. An der SLS/UV Strahllinie [14] wurde im Berichtsjahr die Fragmentierung von Furanen und die Isomer-spezifischen Reaktionen von Xylenen untersucht. Dabei erlaubt der im Vorjahr installierte i^2 PEPICO-Aufbau (double image Photo Electron Photo Ion Coincidence) einzelne Isomere zu bestimmen, selbst wenn deren Ionisationsenergie ähnlich ist und bisher angewandte Verfahren versagen (Figur 5). Mit dem Aufbau, der nicht nur die Elektronen, sondern auch die Ionen abbildet, kann neben der kinetischen Energie der Elektronen auch die der Ionen bestimmt werden. Damit wird es möglich, die während einer Dissoziation freiwerdende Energie zu messen.

An der i^2 PEPICO-Apparatur (Figur 6) wurde eine 1-D Flamme (Flat Flame Burner) installiert, von der Zwischenprodukte extrahiert und einer Messung zugeführt werden können. Einerseits können mit dieser Anordnung direkt Speziesprofile in einer Flamme aufgenommen und mit kinetischen Modellen verglichen werden. Andererseits dient der Brenner auch als Quelle für Radikale, deren Thermochemie intensiv untersucht werden soll. Obschon die Anordnung an sich nicht neu ist, bietet die Kombination der 1-D Flamme mit der an der SLS/UV Strahllinie möglichen Isomer-spezifischen Detektion bisher nicht erreichbare Untersuchungsmöglichkeiten. 2014 sollen damit verschiedene Messkampagnen durchgeführt werden, mit denen verbrennungsrelevante Moleküle vermessen werden. Ein Schwerpunkt wird der Nachweis von ionisierenden Alky-Perox Radikalen sein. Dabei soll insbesondere die Stärke der C-O₂-Bindung dieser wahrscheinlich instabilen Ionen bestimmt werden können.

Nationale Zusammenarbeit

Die Forscherteams der Schweizer Verbrennungsforschung pflegen über zahlreiche gemeinsame Projekte gute Kontakte und dies auch zwischen Hochschulen und Industrie. Zu nennen sind das Projekt *Dual Fuel*, in dem die ETHZ, das PSI sowie die FHNW Partner sind. Das Projekt ist Teil der vom Competence Centre Energy and Mobility (CCEM) [15] unterstützten Projekte *SCHE-Dual* und *Flex-FI-Dual* und enthält ein Arbeitspaket, das im Rahmen eines Projektes der deutschen Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) [16] mit dem IVK der Universität Stuttgart bearbeitet wird. Eine breit abgestützte nationale Zusammenarbeit von Hochschulinstituten erfolgt im Projekt *Biomass-CHP-Plants*. Involviert sind drei Institute der ETHZ (LAV, GIE, FEN) sowie eines des PSI (EEG). Das Projekt wird von Swisselectric Research [17] unterstützt und die BFE-Forschungsprogramme Biomasse und Holzenergie sowie Netze sind ebenfalls beteiligt. Ähnliches gilt für das Projekt *RENERG²*. Es umfasst die Zusammenarbeit von Instituten der EPFL, der ETHZ, der EMPA, dem PSI sowie der ZHAW. Mitfinanziert wird es vom CCEM, von Swisselectric Research sowie vom Verband der Schweizer Gasindustrie (FOGA) [18]. Beteiligt sind auch die BFE-Forschungsprogramme Netze und Wasserstoff. Im Projekt *Gas Pot* erfolgt eine Zusammenarbeit zwischen der EMPA und der Firma MEMS. Das Projekt wird ebenfalls vom FOGA mitfinanziert.

Im Projekt *Xhost Harvester* arbeitet das Oekozentrum Langenbruck mit Liebherr Maschine Bulle SA, Sa-charging Solution AG, Combustion and Flow Solution GmbH und DLM AG zusammen. Auch im Projekt *Biomass-MicroGT-CHP* ist das Oekozentrum engagiert. Unter der Leitung der FHNW ist zudem die Firma Acrona Systems AG involviert. Das Projekt wird auch vom Kanton Aargau gefördert. Im Projekt *Klein-WKK-Anlagen* arbeiten das LAV ETHZ, Wenko AG und Bucher AG Motorex zusammen.

Jährlich wird an der *ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles* [19] die Problematik der durch die Verbrennung erzeugten Partikel interdisziplinär behandelt. Dabei werden Referate über die Partikelentstehung in der Verbrennung, die Abgasnachbehandlung, die Messtechnik, die atmosphärischen Vorgänge wie auch über biologisch-medizinischen Wirkungsaspekte gehalten. An der alle zwei Jahre stattfindenden Tagung Verbrennungsforschung in der Schweiz trafen sich im November 2013 über 100 Forscher und Entwickler aus den Bereichen Hochschulen und Industrie. Der vom BFE mit organisierte Anlass ist eine Plattform zum Informationsaustausch über aktuelle Themen der Verbrennungsforschung in der Schweiz und bietet Kontaktmöglichkeiten 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* [20]: 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 *Experimentelle Untersuchung und Simulation der Entflammung*, das im Auftrag der FVV erfolgt und zusammen mit dem LVK der TU München bearbeitet wird. Auch das Projekt *Kraftstoffkennzahlen II* wird parallel zu Projekten der FVV bearbeitet, mit entsprechender Zusammenarbeit mit anderen Forschungsstellen in Deutschland. Im Projekt *Molecular data of combustion relevant radicals* findet eine Zusammenarbeit mit den Universitäten Würzburg und Duisburg-Essen, dem DLR Stuttgart sowie den Sandia National Laboratories Livermore (US) statt. Das Projekt arbeitet in der COST Action 901 [21] der EU, in der sich Gruppen von mehr als 20 Ländern austauschen, mit. Zudem wurde eine Mitarbeit im 2013 gestarteten Collaborative Task

Combustion Chemistry der IEA Combustion gestartet.

Ein wichtiger Informationsaustausch und die Gelegenheit, die Schwerpunkte der Verbrennungsforschung international mitzugestalten, erfolgt in der Mitarbeit in Arbeitsgruppen der IEA. Für die Verbrennung relevant sind das Implementing Agreement Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion (IEA Combustion) [11], die Working Party on Fossil Fuels (WPF) [22] und das Implementing Agreement Advanced Motor Fuels (AMF) [23] sowie die IEA CHP/DHC Collaborative [12]. Die Schweiz ist in diesen Arbeitsgruppen vertreten.

Grössere Aktivitäten von Schweizer Forschenden erfolgen im IEA Combustion. Dessen Ziel ist, die Entwicklung von Verbrennungstechnologien, die einen verminderten Brennstoffverbrauch und geringere Emissionen aufweisen, voranzutreiben. In Collaborative Tasks werden die Themen Gas Turbines, Sprays in Combustion, Alternative Fuels, Nanoparticle Diagnostics, Homogeneous Charge Compression Ignition, Combustion Chemistry und Gas Engines bearbeitet. Die Mitarbeit der Schweiz sichert eine Vertretung der Interessen im Bereich Verbrennung, eine Mitwirkung bei der Festlegung zukünftiger Schwerpunkte, die Vermitt-

lung Schweizerischer Forschungsergebnisse sowie die Weitergabe der Informationen über internationale Aktivitäten an Interessierte in der Schweiz.

Das von der Schweiz geleitete IEA AMF will die internationale Forschungsnetzwerk bei der Erforschung und Entwicklung, bei der Implementierung und Verbreitung von sauberen, energieeffizienten und nachhaltigen Treibstoffen und den damit zusammenhängenden Fahrzeugtechnologien fördern. Insgesamt gibt es aktuell 12 aktive Annexe, u. a. zu Themen wie «Emission Performance of HD Methane Engines, Alcohol Application in CI engines, Toxicity of

Diesel Exhaust (Schweiz hat hier den Lead), Performance Evaluation of Passenger Car, Fuel, and Powerplant Options etc. Bei den zur WPFF gehörenden Implementing Agreements Greenhouse Gas R&D Programme, Enhanced Oil Recovery und IEA Clean Coal Centre sind die Verbesserung des Wirkungsgrads von grossen mit fossilen Brennstoffen befeuerten Kraftwerken und in diesem Kontext Verfahren zur Elimination des CO₂ wichtige Themen. In aktuelle Überlegungen fliessen auch Aspekte der Nutzung von CO₂ mit ein. Die Schweiz hat 2013 intensiv an der Lancierung des neuen Implementing Agreement Gas and Oil Technologies (GOT IEA) mitgewirkt.

Referenzen

- [1] EU Emission Standards for HD Diesel Engines: VERORDNUNG (EG) Nr. 595/2009
- [2] Botschaft zum ersten Massnahmenpaket der Energiestrategie 2050, Bundesrat, 4.9.2013
- [3] Marine Environment Protection Committee, International Maritime Organization (IMO) 65th Session, May 2013
- [4] FPT Motorenforschung AG, Arbon (www.fpt-motorenforschung.ch)
- [5] Wärsilä (Schweiz) AG, Winterthur (www.wartsila.com/en_CH/Home)
- [6] Wenko AG Swissauto, Burgdorf (www.swissauto.com/)
- [7] Polaris Industries Inc., Medina, USA (www.polaris.com)
- [8] Lieberherr Machines Bulles SA (www.liebherr.com)
- [9] Forschungsprogramm Verbrennung und WKK, Konzept 2013–2016, BFE, 2013
- [10] Eidgenössische Energieforschungskommission CORE, Konzept der Energieforschung des Bundes 2013 bis 2016, BFE, 2012
- [11] International Energy Agency Implementing Agreement on Combustion (www.ieacombustion.net)
- [12] IEA CHP/DHC Collaborative (www.iea.org/chp)
- [13] Holzbefeuertes Blockheizkraftwerk mit Heissluftturbine im kleineren Leistungsbereich 80 – 100 kWel, Schmid AG, BFE, Juni 2012
- [14] SLSI VUV Beamline Swiss-Light-Source beamline for Vacuum Ultraviolet Radiation, PSI
- [15] Competence Centre Energy and Mobility CCEM, (www.ccem.ch)
- [16] Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (www.fvv-net.eu/)
- [17] SwisselectricResearch (<http://www.swisselectric-research.ch/de/>)
- [18] Forschungsfond der Gasindustrie, FOGA (www.erdgas.ch)
- [19] ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles, 2013 (www.nanoparticles.ethz.ch)
- [20] High-efficiency Engine R&D on Combustion with Ultra-low Emissions for Ships (HERCULES), EU-FP7
- [21] COST European Cooperation in Science and Technology Action CM 901 Detailed Chemical Kinetic Models for Cleaner Combustion (www.ensic.inpl-nancy.fr/cost/)
- [22] IEA Working Party on Fossil Fuels (IEA-WPFF) (www.iea.org)
- [23] IEA Implementing Agreement Advanced Motor Fuels (www.iea-amf.org)

Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(* IEA-Klassifikation)

- «KLEIN WKK-ANLAGEN» 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:	Konstantinos Boulouchos boulouchos@lav.mavt.ethz.ch	Period:	2011–2014

Abstract: Klein-WKK-Anlage (≤ 10 kWel.) 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	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 - μ s-Bereich genauer als bisher bestimmt werden. Problematisch ist die Erzeugung der Radikale. Zusammenarbeit mit EU-COST-Action 901 und NCCR-MUST.
- «GASPOT» POTENZIALE VON BRENNVERFAHREN IN GASMOTOREN FÜR UNTERSCHIEDLICHE GASQUALITÄTEN, DETEKTION VON GASPARAMETERN MITTELS NEUARTIGER SENSORIK**

R+D 2.1.4

Lead:	Empa	Funding:	BFE
Contact:	Patric Soltic patrik.soltic@empa.ch	Period:	2012–2014

Abstract: Erd- und Biogas kann örtlich und zeitlich grosse Schwankungen in der chemischen Zusammensetzung aufweisen. Dies führt zu Problemen bzw. zu ungenutzten Potenzialen in der verbrennungsmotorischen Nutzung in WKK Anlagen, Nutzfahrzeug-, PW- und Schiffsantrieben. Es soll erforscht werden, wie die dem Motor zugeführte Gasqualität mittels eines Sensors quantifiziert und damit das Brennverfahren adaptiert bzw. weiterentwickelt werden kann.
- «XHOST HARVESTER» - EINFACHE UND WIRKUNGSVOLLE EFFIZIENZSTEIGERUNG FÜR STATIONÄRE ANTRIEBE**

R+D 2.1.4

Lead:	Oekozentrum	Funding:	BFE
Contact:	Martin Schmid martin.schmid@oekozentrum.ch	Period:	2012–2014

Abstract: Xhost Harvester erzeugt aus der Auspuffabhitze eines Antriebes einen Unterdruck, der via Turbolader die Leistung und die Effizienz des Antriebes steigern kann. Feldversuche zeigten bei bis zu 11% Mehrleistung eine Senkung des spez. Verbrauches von 1.3% bis 7%. Simulationen und Prüfstandsversuche sollen belastbare Aussagen und Zahlen, sowie wissenschaftliche Erklärungen für diese Effizienzsteigerungsmaßnahme liefern.
- «BIOMASS-CHP-PLANTS» SYSTEMMODELLIERUNG FÜR DIE BEWERTUNG DES POTENTIALS VON DEZENTRALEN BIOGENEN WKK-ANLAGEN ZUR STABILISIERUNG DES ELEKTRISCHEN NETZES**

R+D 3.4.3

Lead:	ETHZ-LAV	Funding:	BFE
Contact:	Konstantinos Boulouchos boulouchos@lav.mavt.ethz.ch	Period:	2012–2015

Abstract: Der wachsende Anteil von fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung (Photovoltaik, Wind) macht Massnahmen zur Netzstabilisierung nötig. In diesem Zusammenhang können dezentrale biogene Wärmekraftkoppelungsanlagen (WKK) eine wichtige Rolle spielen. Die Entwicklung eines WKK-Schwarm-Modells gestützt auf geographische Daten zu Energiequellen und -verteilung soll das Potential für Schweizer Regionen zeigen.
- «KRAFTSTOFFKENNZAHLEN II» CHARAKTERISIERUNG VON HOCHSIEDENDEN/TEILSYNTHETISCHEN KRAFTSTOFFEN**

R+D 2.1.4

Lead:	ETHZ-LAV	Funding:	BFE
Contact:	Konstantinos Boulouchos boulouchos@lav.mavt.ethz.ch	Period:	2012–2016

Abstract: Experimentelle Charakterisierung teilsynthetischer hochsiedender Kraftstoffe und Entwicklung korrespondierender Reaktionsmodelle für die vollständig homogene selbstzündende Verbrennung (HCCI). Untersuchung der Übertragbarkeit für teilhomogene Verfahren. Erarbeitung einer Kennzahl, welche die Zündwilligkeit der untersuchten Kraftstoffe zuverlässig charakterisiert und die motorische Brennverfahrensentwicklung massgeblich unterstützt.
- «3D-CRCD MODELLE» FÜR CO2- UND EMISSIONSARME MOTORISCHE BRENNVERFAHREN BEI DER DIFFUSIONSGESTEUERTEN VERBRENNUNG BIOGENER/SYNTHETISCHER KRAFTSTOFFE**

R+D 2.1.4

Lead:	combustion and flow solutions GmbH	Funding:	BFE
Contact:	Christian Lämmle laemml@combustion.flow-solutions.com	Period:	2012–2016

Abstract: Weiterentwicklung eines 3D-CRFD-Modells hinsichtlich Auslegung von CO₂- und emissionsarmen motorischen Brennverfahren bei der diffusionsgesteuerten Verbrennung. Fokus der Erweiterungen sind Dieselsurrogate und biogene sowie synthetische Kraftstoffe unter Verwendung detaillierter Reaktionskinetiken, um quantitative Vorhersagen von motorisch relevanten Parametern zu ermöglichen

- «BIOMASS-MICRO-GT-CHP» BIOMASSE BEFEUERTE, HEISSLUFT-MIKROGASTURBINE MIT WÄRME-KRAFTKOPPLUNG**

R+D 3.4.3

Lead:	FHNW	Funding:	BFE
Contact:	Timothy Griffin timothy.griffin@fhnw.ch	Period:	2013–2014

Abstract: Das Projekt beinhaltet eine Holz-befeuerte Heissluftturbine mit Hochtemperaturwärme-tauscher. Ein integrierter Rekuperator ergibt einen hohen Prozesswirkungsgrad. Eine Prozessanalyse des Systems wird durchgeführt, um die relevanten Parameter zu bestimmen. Weiter soll das Verbrennungssystem untersucht werden und die Hauptrisiken bestimmt werden. Abschliessend wird eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt.
- «FLEX FUEL» UNTERSUCHUNGEN ZUR BRENNSTOFFFLEXIBILITÄT BEI TYPISCHEN BEDINGUNGEN FÜR KÜNFTIGE GROSSDIESEL- UND MEHRSTOFF-MOTOREN**

R+D 2.1.4

Lead:	Wärtsilä Schweiz AG	Funding:	BFE
Contact:	Kai Herrmann kai.herrmann@wartsila.com	Period:	2013–2015

Abstract: Ziel des Projektes ist die Klärung des Einflusses nicht-konventioneller Brennstoffe sowie nicht optimaler Brennstoffeigenschaften auf Strahlausbreitung und Verbrennung, unter Bedingungen wie sie für grosse Diesel- und Mehrstoffmotoren künftig zu erwarten sind. Der etablierte, einzigartige Versuchsträger bietet dabei die ideale Basis für derartige Untersuchungen, welche Aktivitäten innerhalb des EU FP7-Projekts HERCULES-C ergänzen.
- ORC FLÜGELZELLEXPANDER GASMOTOR**

R+D 2.1.4

Lead:	Liebherr Machines Bulle AG	Funding:	BFE
Contact:	Marcus Quasthoff marcus.quasthoff@liebherr.com	Period:	2013–2015

Abstract: Ein Gasmotor-basiertes BHKW (Blockheizkraftwerk) soll mit einem ORC (Organic-Rankine-Cycle) unter der Zielsetzung einer deutlichen Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades ergänzt werden. Als Expansionsmaschine des in diesem Vorhaben zu entwickelnden ORC's soll eine Weiterentwicklung des von den Antragstellern neu entwickelten Flügelzellenexpanders Verwendung finden.
- «DUAL FUEL» ENTWICKLUNG FORTGESCHRITTENER CFD-MODELLE UND GEEIGNETER EXPERIMENTELLER VERSUCHSTRÄGER**

R+D 2.1.4

Lead:	ETHZ-LAV	Funding:	BFE
Contact:	Yuri M. Wright wright@lav.mavt.ethz.ch	Period:	2013–2016

Abstract: Entwicklung von 3D-CRFD Modellen für die Verbrennung von homogenen CH₄-Grundladungen gezündet mit variabel eingespritzten Mengen von Dieselmotorkraftstoff. Validierung mit experimentellen Daten aus dem Einhubtriebwerk, der Hoch-Temperatur und -Druck Zelle sowie einer neu zu entwickelnden Flexible Rapid Compression Machine. Letztere ist geeignet für Untersuchungen von Diesel-, vorgemischten- und insbesondere Dual Fuel Verbrennungstypen.
- «RENERG2» INTEGRATION ERNEUERBARER ENERGIE IN DAS KÜNFTIGE ENERGIESYSTEM**

R+D 2.1.4

Lead:	PSI	Funding:	BFE
Contact:	Thomas J. Schmidt thomasjustus.schmidt@psi.ch	Period:	2013–2016

Abstract: Das Projekt beinhaltet Forschungsarbeiten im Bereich der chemischen Stromspeicherung, der effizienten Nutzung des gespeicherten Stroms und der Interaktion mit dem Stromnetz. Das Ziel ist, Effizienzsteigerungs- und Emissionssenkungspotentiale der gesamten Kette, angefangen bei der Wasserstoffproduktion über die Nutzung in Energiewandlern bis hin zu Möglichkeiten zur Netzstabilisierung gegenüber heutigen Technologien aufzuzeigen.
- «GASOMEP» METAL – NANOPARTIKEL UND ANDERE NICHTLIMITIERTE EMISSIONEN VON PERSONENWAGEN MIT BENZIN- UND ALKOHOL- MISCHBETRIEB**

R+D 2.1.4

Lead:	AFHB Abgasprüfstelle FH Biel	Funding:	BFE
Contact:	Jan Czerwinski jan.czerwinski@bfh.ch	Period:	2013–2016

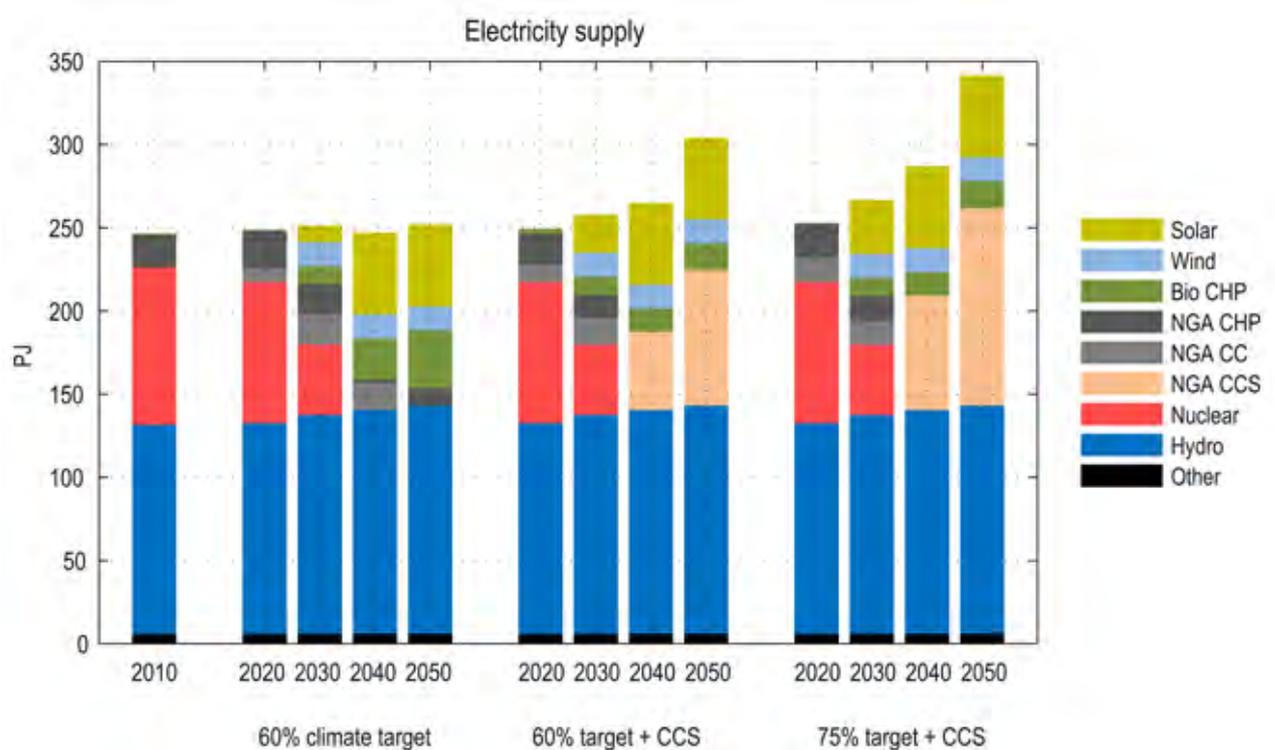
Abstract: Metall-Nanopartikel (einschliesslich < 20nm) aus Benzin-Personenwagen (12 Fahrzeuge) werden untersucht. Diese Untersuchungen betreffen: Zusammensetzung (EMPA) und Potentiale der Sekundäraerosole (SOA-PSI). Zusätzliche Forschung wird von AFHB durchgeführt an: Nanopartikel beim Kaltstart, flüchtige, nichtlimitierte Komponenten (speziell NO₂, NH₃ & Aldehyde) und Betrieb mit Alkoholen.
- «XYLOCOGEN» DEZENTRALISIERTE STROM- UND WÄRMEERZEUGUNG MIT SEHR KLEINER LEISTUNG (1KWE) BASIEREND AUF DER HOLZVERBRENNUNG IM WOHNBEREICH**

R+D 3.4.3

Lead:	HEIG-VD	Funding:	BFE
Contact:	Roger Röthlisberger roger.roethlisberger@heig-vd.ch	Period:	2013–2017

Abstract: Das Projekt umfasst die Entwicklung einer Mikro-Gas-Turbine mit externer Verbrennung, welche die Luft als Arbeitsmedium nutzt (Heissluftturbine). Als Brennstoff dient Holz, das in einem kleinen Heizkessel (5 kWth) verbrannt wird und die heisse Luft erzeugt. Das Ziel ist ein erstes komplettes System herzustellen, das an einen handelsüblichen Holzpellet-Ofen angeschlossen werden kann und 1 kWe und 4 kWth erzeugt.

Kraftwerk 2020 und Carbon Capture & Storage (CCS)



Titelbild:

Gaskraftwerke (mit/ohne CO₂-Abscheidung) als potenzieller Bestandteil eines zukünftigen Kraftwerksparks in der Schweiz

In einer kostenoptimierten Analyse zukünftiger Energieszenarien für die Schweiz spielen Gaskraftwerke (sowohl ohne (NGA CC), als auch mit CO₂-Abscheidung (NGA CCS)) eine nicht unbedeutende Rolle. Insbesondere wenn CO₂-Abscheidetechniken (Carbon Capture and Storage, CCS) spätestens ab 2030 verfügbar sind, können Gaskraftwerke mit CCS einen Beitrag für die Stromerzeugung in der Schweiz leisten, und so zum Erreichen ambitionierter Klimaziele (60 % bzw. 75 %-Reduktion der CO₂-Emissionen) beitragen ohne dass für die Schweizer Gesellschaft absolut untragbare Zusatzkosten auflaufen (weniger als 2 % bzw. 5 % des BIP).

BFE Forschungsprogramm Kraftwerk 2020 und Carbon Capture & Storage (CCS)
Überblicksbericht 2012

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

Mit der im Jahr 2012 angekündigten Energiestrategie der Schweiz für den Zeitraum bis zum Jahr 2050 sind bisher entworfene Energie-Szenarien, die keine Weiterführung der Nutzung der Atomenergie für die Stromerzeugung enthalten haben, sehr viel wahrscheinlicher geworden, und damit auch die Bedeutung potentieller Ersatztechnologien deutlich gewachsen.

Durch den steigenden Strombedarf, das Auslaufen von Stromimportverträgen und die sukzessive Abschaltung der bestehenden nuklearen Kraftwerksanlagen zeichnet sich für den Zeitraum um das Jahr 2020 ein Engpass in der Stromversorgung der Schweiz ab (und dies trotz eines prognostizierten, massiven Zubaus erneuerbarer Stromerzeugungs-Kapazitäten). Um diese vorhersehbare Versorgungslücke zu schliessen, sind deshalb darüber hinaus weitere Anstrengungen auf unterschiedlichen Ebenen zu leisten (rationelle Stromverwendung, dezentrale Kraft-/Wärme-Kopplung, Ersatz von Stromerzeugungskapazitäten usw.). Eine Option für die Elektrizitätserzeugung in der Schweiz (insbesondere in der Funktion als «Brückentechnologie» für die Jahrzehnte 2020–2050) stellen Kombi-Kraftwerke auf Erdgas-Basis dar, die aufgrund ihrer für thermische Kraftwerke hohen Effizienz, ihres niedrigen Schadstoffausstosses und ihrer hohen betrieblichen Flexibilität kurz-/mittelfristig in der Stromerzeugung und der Stabilisierung der Stromversorgungsnetzwerke von grosser Bedeutung sind.

Diese Kraftwerkstechnik ist auch deshalb für die Schweiz von besonderem Interesse, weil Schweizer Industriefirmen und Forschungsorganisationen in der Weiterentwicklung dieser Technologie führend 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 CO₂-Emissionen aus dem gesamten schweizerischen Energiesystem wie beabsichtigt drastisch gesenkt werden können. Die Prozessführung des Kraftwerks ist so zu gestalten, dass alternative (kohlenstoffarme) Brennstoffe eingesetzt werden können und CO₂ 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.

Das Programm «Gas- und Dampf-Kraftwerke mit CO₂-Abscheidung (Kraftwerk 2020)» umfasst deshalb all diese Themenbereiche (Effizienz in der Stromerzeugung, CO₂-Minderung, flexible/abrufbare Betriebsweisen) wobei Prozesse ausserhalb des eigentlichen Kraftwerks, wie z. B. die externe Brennstoffaufbereitung zur CO₂-Abtrennung und die CO₂-Lagerung und (wo möglich) CO₂-

Wiederverwendung (zusammengefasst unter dem Begriff «Carbon Capture, Use and Storage» CCUS) integraler Bestandteil des Programms sind.

Aufgrund des begrenzten finanziellen Rahmens kann das Programm aber nur einen signifikanten Beitrag leisten, indem eine starke Fokussierung auf einzelne Schlüsselkomponenten (wie z. B. Kompressoren, Turbinen, Generatoren) und Schlüsseltechnologien (Turbomaschinen-Aerodynamik, Hochdruck-Verbrennung, Wärmeübertragung/Kühlung) 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 2015 verfügbar sein. Deshalb ist das Programm vorerst auf einen Zeitraum von ca. 10 Jahren (d. h. bis Ende 2015) ausgerichtet. Dieser Programmperiode können sich geeignete Fortsetzungsphasen mit erweiterten, angepassten Zielsetzungen anschliessen. Die Konzentration der Programm-Aktivitäten auf Schlüsselgebiete der Dampf- und Gasturbinentechnik inkl. Generatoren ist auch aus diesen zeitlichen Aspekten heraus erforderlich.

IEA Klassifikation: 1.1 Industry

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 mit reduziertem CO₂-Ausstoss zu gelangen. Dadurch soll sichergestellt werden, dass die bestgeeigneten Technologien bzw. Systeme für die Stromerzeugung in der Schweiz zum Einsatz kommen können. Die schweizerische Kraftwerksindustrie inklusive der Zulieferfirmen und dem unterstützenden, akademischen Umfeld ist im internationalen Vergleich sehr gut aufgestellt, hat eine starke Marktstellung und ein grosses Umsetzungspotential.

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. Mit einem hohen elektrischen Wirkungsgrad (bzw. einem hohen Gesamt-Wirkungsgrad bei gleichzeitiger Wärmeauskopplung) lassen sich bereits signifikante Einsparungen der CO₂-Emissionen pro erzeugter kWh erreichen.

Ein weiteres Ziel ist die Steigerung des Einsatzes von erneuerbaren, CO₂-neutralen Brennstoffen (insbesondere Biomasse-basierenden Vergasungsprodukten) auf ca. 15 % des gesamten Energieeinsatzes im produktiven Betrieb. Ferner sollen mit dem Einbezug von prozesstechnischen Varianten für die erleichterte Abscheidung und Rückhaltung von Kohlendioxid (CO₂) darüber hinausgehende CO₂-Emissionsminderungs-Potenziale (Reduktion der CO₂-Freisetzung um 80 %) ausgenützt werden.

Durch den zukünftig verstärkten Einsatz fluktuierender, erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien wie Wind und Photovoltaik werden Stromversorgungsnetzwerke stärkeren, kurzfristigeren Produktionsschwankungen unterworfen sein, die durch andere Stromerzeuger kompensiert oder in geeigneter Weise zwischengespeichert werden müssen. Ein weiteres Ziel des Programms ist es deshalb, Gasturbinen-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. grossskalige Strom- bzw. Energiespeicher-Technologien (über 1 MWh) im direkten Kraftwerksumfeld sollen deshalb neu ebenfalls im Programm mit enthalten sein.

Die Umsetzung dieser Schwerpunkte soll zukünftig mit einem etwa gleichgewichtigen Einsatz der Programmmittel einhergehen (Wirkungsgradsteigerung: 30 %; CO₂-Minderung: 35 %; Netzzun-terstützung: 35 %).

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 (Swisslectric Research) und der Europäischen Gemeinschaft im Zusammenhang mit dem 7. Forschungsrahmenprogramm (FP7) unterstützt.

Rückblick und Bewertung 2012

Nach dem Übergangsjahr 2009, in dem fast alle Projekte der Programm-Anfangsphase abgeschlossen wurden, haben sich im Jahr 2012 die thematisch ähnlichen Folgeprojekte bereits wieder in einem weit fortgeschrittenen Projektstadium befunden und stehen grossteils bereits wieder vor dem Abschluss. Zudem konnten wieder thematisch neuorientierte Projekte gestartet werden, die bisher vorhandene Lücken im Projekt-Spektrum weiter schliessen. Das Programm befindet sich nun in einer Phase der kontinuierlichen Erneuerung des Projektportfolios, welches die modifizierte Ausrichtung (stärkere Betonung von CCS-Themen) deutlich widerspiegelt. Mit neu lancierten Projekten wurde der thematisch schwächer besetzte Bereich («dynamische Netzstabilisierung»; «flexible Betriebsweisen») weiter gestärkt und die Bearbeitung der Schwerpunkt-Themenfelder abgerundet. Der zur Verfügung gestellte Finanzrahmen aus BFE-Mitteln war durch laufende Projek-

te bereits weitgehend ausgeschöpft und liess dementsprechend auch in 2012 nur wenig Spielraum für eine Erweiterung des Projekt-Portfolios. Unsicherheiten in der Budgetzuweisung führten dazu, dass in 2012 nur sehr vorsichtig neue Projekt-Vorschläge verfolgt wurden und potentielle Projektnehmer teilweise auf spätere Finanzierungszeiträume (2013 ff.) vertröstet werden mussten.

Durch die in Aussicht gestellte Aufstockung von Fördermitteln von P&D-Projekten wurde vor allem in diesem Bereich in 2012 (vorbereitende) Projekt-Aquisition betrieben. Da bei der umsetzungsnahen (Weiter-)Entwicklung von Kraftwerkskomponenten i.d.R. mit hohen Kostensummen gerechnet werden muss, sind mit der verstärkten P&D-Förderung die Erwartungen verbunden, dass nun auch Projekte im Themenbereich des Programms «Kraftwerk 2020» unterstützt werden können.

Ausblick

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. Die neue Energiepolitik (und Energiestrategie), die nach den Ereignissen im Kernkraftwerk in Fukushima initiiert wurde, hat aber noch keine (deutliche) Änderung der Finanzierungssituation der BFE-Forschungsprogramme bewirkt. Eine wesentliche Aufstockung von Finanzierungsmitteln ist allerdings für P&D-Projekte vorgesehen. Im Bereich P&D des Programms «Kraftwerk 2020» sind deshalb mehrere Projektideen in der Diskussion, die sich um diese Mittel bewerben möchten. Am weitesten gediehen sind die Vorarbeiten für ein P&D-Projekt im Themenbereich «CCS – Carbon Capture and Storage». Zusammen mit einer P&D-Anlage, die erstmalig in Europa eine industrielle Gasturbine mit Abgas-Rezirkulation betreiben soll, ist ein CO₂-Speichertest vorgesehen, der die Tauglichkeit des Untergrunds im Schweizer Mittelland als CO₂-Speichermedium unter Beweis stellen soll.

Highlights aus Forschung und Entwicklung

Das Verbund-Projekt «CARMA – carbon management in power generation», an welchem sich verschiedene Institutionen des ETH-Bereichs (ETHZ, EPFL, PSI), die Uni Bern und die Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) beteiligt haben, ist im Dezember 2012 abgeschlossen worden. Neben dem BFE haben zur Finanzierung insbesondere die Kompetenzzentren des ETH-Bereichs (CCEM - Competence Center Energy & Mobility, CCES – Competence Center Environment & Sustainability), sowie SwissElectric Research und Alstom beigetragen.

Ziel des CARMA-Projektes war es, insbesondere unter Berücksichtigung der speziellen Schweizer Verhältnisse, Grundlagen zu erarbeiten, mit welchen Techniken die Stromerzeugung (mit Einbezug auch fossiler Brennstoffe) möglichst CO₂-neutral ausgeführt werden kann.

Gasturbinen-Kraftwerksprozesse mit CO₂-Abscheidung

Im Projekt «CARMA» wurden verschiedene technische Optionen von Gasturbinen-Kraftwerksprozesse mit CO₂-Abscheidung auf Basis thermodynamischer Modellansätze untersucht und optimiert, und deren ökonomische und umweltrelevante Auswirkungen (Life Cycle Assessment LCA) bewertet. Bezüglich des technischen (Optimierungs-)Potentials wurden schwerpunktmässig Verfahrensvarianten betrachtet, die eine Brennstoffaufbereitung und Kohlenstoff-Abscheidung vor dem Verbrennungsprozess vorsehen. Diese Prozessvarianten versprechen höhere elektrische Wirkungsgrade (als Verfahrensvarianten, die mit hohem Energieaufwand das stark verdünnte Kohlendioxid (CO₂) aus den Abgasen abtrennen), sind aber nur für Neuanlagen geeignet (keine Retrofit-Lösung für bestehende Anlagen) und führen dazu, dass im eigentlichen Kraftwerksprozess wasserstoffreiche Brenngase beherrscht werden müssen (s. unten).

Mit Hilfe einer neu entwickelten, variablen sog. Superstruktur (Fig. 1) konnten verschiedene Verfahrensvarianten mit unterschiedlichen Teilprozessschritten

modelliert und quantitativ miteinander verglichen werden (hinsichtlich technischer Parameter wie z. B. dem elektrischen Wirkungsgrad, aber auch in Bezug auf ökonomische Kenngrössen wie z. B. den Stromgestehungskosten oder den spezifischen CO₂-Abscheidungskosten). Durch die Einbindung dieser thermo-ökonomischen Modellrechnungen in einen Optimierungsalgorithmus konnten sog. Pareto-Kurven ermittelt werden, die eine Übersicht vermitteln welche Verfahrensvarianten jeweils optimale Ergebnisse ergeben (Fig. 2), je nachdem welche - sich teilweise entgegenstehende - Erfolgsparameter definiert werden (z. B. minimale Stromkosten, minimale CO₂-Abscheidungskosten, maximaler elektrischer Wirkungsgrad, maximaler CO₂-Abscheidungsgrad).

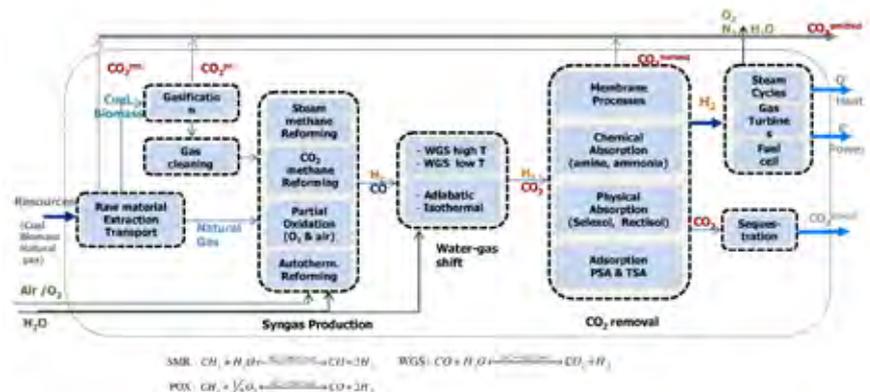
Zusammenfassend ergaben sich folgende Erkenntnisse aus den Modellrechnungen: Je nach gewähltem Erfolgsparameter, welchem höchste Bedeutung zugemessen wird, stellen unterschiedliche Verfahrenskonzepte die «optimale» Prozessvariante dar. Jeweils verglichen mit einem konventionellen Gas- und Dampf-Kraftwerk als Referenzgrösse, ergeben sich die geringsten Wirkungsgradverluste (ca. 6 %-Punkte) für die Stromerzeugung bei einer Kraftwerksvariante mit CO₂-Abscheidung vor der Verbrennung; dagegen sind die zusätzlichen Stromgestehungskosten (ca. 25 %) am geringsten bei einer Kraftwerksvariante mit CO₂-Abscheidung nach der Verbrennung (CO₂-Wäsche aus dem Abgasstrom). Mit (CO₂-neutraler) Biomasse als Brennstoff können verständlicherweise

die besten (negative) CO₂-Bilanzen erzielt werden (der Atmosphäre wird effektiv CO₂ entzogen).

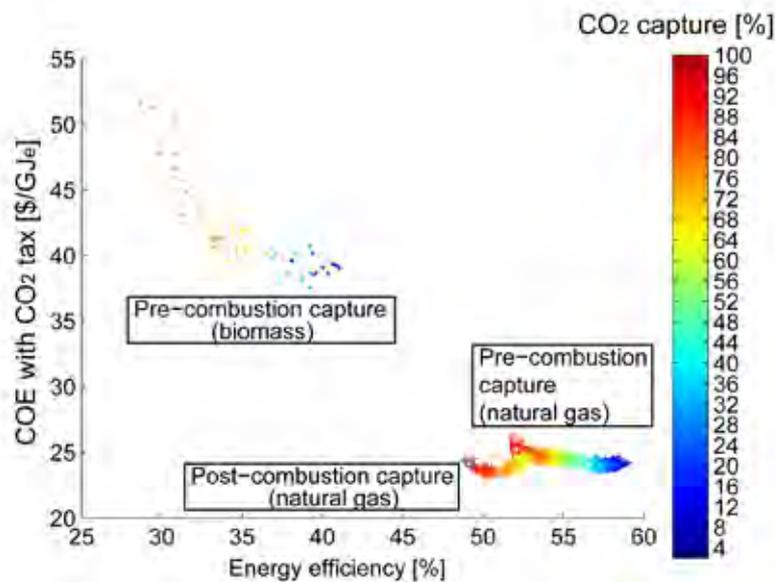
Sichere und emissionsarme Verbrennung von H₂-reichen Brenngasen

Da bei den Verfahrensvarianten, die eine Brennstoffaufbereitung und Kohlenstoff-Abscheidung vor dem Verbrennungsprozess vorsehen, im eigentlichen Kraftwerksprozess wasserstoffreiche Brenngase beherrscht werden müssen, ergeben sich bei diesen Prozessvarianten zusätzliche verbrennungstechnische Herausforderungen. Insbesondere die hohe Reaktionsfreudigkeit H₂-reicher Brenngase (hohe Brenngeschwindigkeit, leichte Entzündbarkeit) stellt konventionelle, emissionsarme Brennertechnologien (bei denen vorgemischte Brenngas/Luft-Gemische verwendet werden) vor nahezu unüberwindbare Probleme. Eine Stabilisierung der H₂-Flamme im bzw. nahe des Brenners (als Flammenrückschlag bezeichnet) führt häufig zu einer Zerstörung von Brennerbauteilen durch Überhitzung. Darüber hinaus kann mit H₂-reichem Brenngas in vielen Fällen auch keine ausreichend gute Vormischqualität mit der Verbrennungsluft erzielt werden, sodass die Bildung von unerwünschten Stickstoffoxiden (NO_x) nicht effektiv unterdrückt werden kann.

Ebenfalls im Projekt «CARMA» wurde deshalb ein alternatives Verbrennungskonzept im Labormassstab experimentell untersucht (Fig. 3), welches sowohl die



Figur 1: Super-Struktur der untersuchten Verfahrensketten und Prozessschritte



Figur 2: Stromgestehungskosten und elektrische Wirkungsgrade für ausgewählte, optimale Verfahrenskombinationen (Farbskala: CO₂-Abscheidegrad; Kostenbasis: 9.7\$/GJ (Brennstoffkosten), 35\$/tCO₂ (CO₂-Steuer), 7500 h/y (Betriebsstunden), 25 y (Abschreibungsdauer), 6 % (Zinssatz))

Reaktionsschritt, in dem das H₂-reiche Brenngas unter Luftmangel zuerst nur teilweise umgesetzt wird (vorzugsweise ohne eine sichtbare Flammenzone) und erst in einer zweiten Verbrennungstufe nach zusätzlicher Luftermischung vollständig abreagiert. Durch die erste, durch den Luftmangel nur teilweise möglichen Freisetzung der im Brenngas enthaltenen Energie können sowohl Überhitzungseffekte umgangen werden, als auch die extrem hohe Reaktionsgeschwindigkeit der H₂-Umsetzung abgemildert werden. In der zweiten Reaktionsstufe muss damit ein «nur» noch mässig reaktives Brenngas/Luft-Gemisch beherrscht werden, welches auch nicht mehr zu exzessiver NO_x-Bildung neigt (Fig. 4). Die NO_x-Emissionen aus der ersten Reaktionsstufe sind zudem nahezu NO_x-frei, da die Brenngas-Umsetzung an den katalytisch aktiven Oberflächen dieser Stufe keine NO_x-Bildung mit sich bringt.

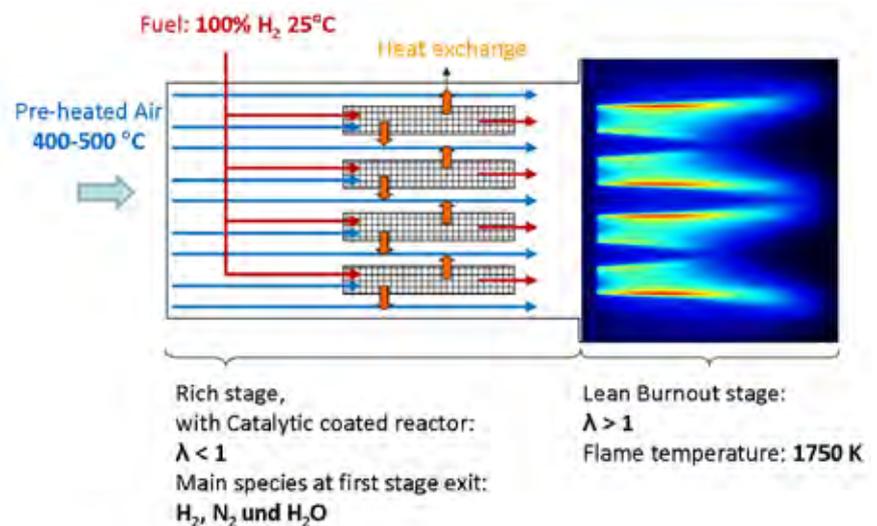
Überhitzung von Brennerkomponenten durch Flammenrückschlag ausschliesst, als auch unerwünscht hohe NO_x-Emissionen

vermeidet. Das verwendete gestufte Verbrennungskonzept beruht auf einem katalytisch unterstützten ersten

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Abscheidung und Lagerung von CO₂ durch CO₂-Mineralisierung

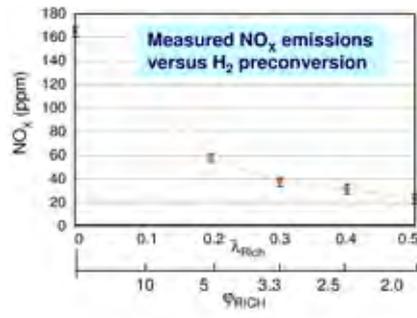
Die bekannten Verfahren zur CO₂-Abscheidung aus Kraftwerksprozessen beruhen in der Regel auf flüssigen Waschmitteln, die mit dem CO₂ aus der Gasphase (z. B. CO₂-haltiges Abgas) reagieren und es in die Flüssigphase einbinden. Das damit verbrauchte Waschmittel muss anschliessend mit viel Energieaufwand (Aufheizen mit Hilfe von Dampf) wieder regeneriert werden, um es wieder im CO₂-Abscheideprozess einsetzen zu können. Bevor das bei der Waschmittel-Regeneration wieder freigesetzte CO₂-Gas im Untergrund versorgt werden kann, muss es .i.d.R. noch konditioniert (getrocknet) und auf einen hohen Druck (> 80 bar) gebracht werden. Um all diese aufwendigen, energie-



Figur 3: Gestuftes Verbrennungskonzept für H₂-reiche Brenngase (1. Stufe: Luftmangel-Bedingungen, katalytisch unterstützt; 2. Stufe: Luftüberschuss für vollständigen Ausbrand)

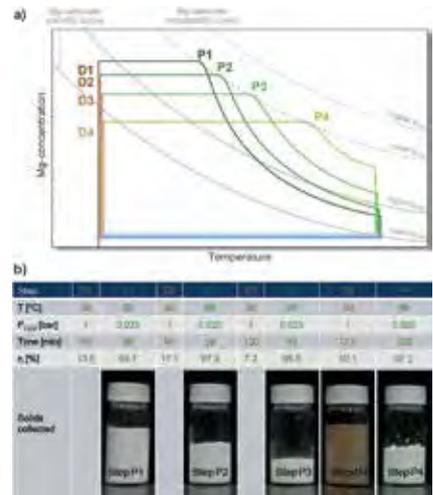
intensiven Prozessschritte umgehen zu können, wird intensiv nach alternativen CO₂-Abscheidungsverfahren geforscht. Eine dieser Alternativen wurde auch im Projekt «CARMA» verfolgt - die direkte Überführung des CO₂ im Kraftwerksabgas in eine mineralische Karbonat-Verbindung (Feststoff). Mineralische Karbonate (vorwiegend Verbindungen auf Basis von Magnesium (Mg) und Kalzium (Ca) sind natürlich vorkommende Gesteinsformen (in Kombination mit Silikaten), die chemisch sehr stabil sind und dementsprechend gebundenes CO₂ sehr zuverlässig über lange Zeiträume aus der Atmosphäre entfernt halten.

Ziel der Untersuchungen im Projekt «CARMA» war es die CO₂-Mineralisierung unter den für Kraftwerksprozesse technisch relevanten Bedingungen in Laborversuchen nachzubilden und Optimierungspotential aufzuzeigen. Die bisher erzielten Ergebnisse zeigten, dass bei einer 1-stufigen Verfahrensführung das eingesetzte Material (z. B. Serpentine, Mg-Fe-Si-O-H-Verbindung) nur unzureichend ausgenutzt wird (max. bis zu



Figur 4: NO_x-Emissionen in Abhängigkeit des Brenngas-Umsatzes in der (1.) katalytisch unterstützten Reaktionsstufe

20 %), selbst bei zusätzlichem mechanischem Aufschluss, pH- und Temperatur-Variation. Ein vielversprechender Ansatz scheint dagegen ein mehrstufiges Verfahrenskonzept zu sein (Fig. 5), welches auf einem zyklischen Druck- und Temperaturverlauf beruht und sequentiell die beiden massgeblichen Reaktionsschritte (Lösung der aktiven Mineralbestandteile aus dem Ursprungsgestein, Bildung und Ausfällung von Karbonaten, Fig. 6) steuert.



Figur 5: mehrstufiges Verfahrenskonzept zur CO₂-Mineralisierung

a) Temperatur- und CO₂-Partialdruck-Verlauf in den -4- Verfahrenszyklen

b) Umsatzgrade, Produktmengen und -Beschaffenheit

Nationale Zusammenarbeit

Die Programmziele sind anwendungs- und umsetzungsorientiert ausgerichtet [1,2], 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 unterhalten. Im Themenbereich Elektrizität im CCEM-CH besteht eine weitgehende Übereinstimmung der Zielsetzungen mit der Ausrichtung des Programms Kraftwerk 2020. Besonders hervorzuheben ist hier wiederum das Verbund-Projekt Carbon dioxide management in Swiss power generation (CARMA), welches im CCEM-CH eingebunden ist und eine signifikante finanzielle Förderung aus ETH-Bereichsmitteln erhält. Das Projekt CARMA, welches einen breiten Bereich von Fragestellungen im Bereich der CO₂-Problematik abdeckt (Gesamtsystemanalysen, Pre-Combustion Decarbonization, CO₂-Abscheidungstechniken, CO₂-Sequestrierung, sozio-ökonomische Fragen/gesellschaftliche Akzeptanz), und Antworten und Lösungen für die Schweiz sucht, aber auch Resultate von internationaler Bedeutung bereitstellt, ist mit finanziellen Mitteln aus der Forschungsförderungs-

organisation 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: Juli 2013), bei der ein Überblick über den Stand der Programmaktivitäten geboten wird und die Gele-

genheit besteht, sich über die Zielsetzungen und Rahmenbedingungen des Programms im Detail zu informieren und mit potenziellen Projektpartnern in Kontakt zu kommen. Bei der Veranstaltung in 2012 stand der Themenbereich «hoher elektrischer Wirkungsgrad (>60%)» im Vordergrund; im Jahr 2013 sollen für das Thema «Netzunterstützung/flexible Betriebsweise», der Entwicklungsstand der massgeblichen Technologien und ihre zukünftigen Perspektiven und Potentiale aufgezeigt werden.

Internationale Zusammenarbeit

Weltweit werden weiterhin grosse Anstrengungen unternommen, um den Wirkungsgrad von gasbefeuerten Kombi-Kraftwerken zu verbessern und um auf Systemebene die CO₂-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. Gemeinsame Projekte sind aufgrund nationaler Finanzierungsregeln und komplizierter Konstellationen bezüglich Eigentumsrechten an Projektergebnissen bisher jedoch nicht konkret in Betracht gezogen worden.

Die europäische Integration wird durch die Einbettung von Projekten aus dem Forschungsprogramm Kraftwerk 2020 im derzeit noch 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 mitbezogen 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 CO₂-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 Aktivitäten 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).

In einer weiteren europäischen Initiative (ECCSEL: European Carbon Dioxide Capture and Storage Laboratory Infrastructure), die sich speziell auf die Entwicklung und gemeinsame Nutzung von Forschungs-Infrastruktur für CO₂-arme Kraftwerks- und Industrieprozesse konzentriert, sind akademische Partner des Programms Kraftwerk 2020 ebenfalls aktiv.

Über Kontakte zu themenrelevanten Initiativen der Internationalen Energie Agentur (IEA) [7] wie der Working Party for Fossil Fuels (WPF), 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/

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

[7] Internationalen Energie Agentur (IEA), 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.				
● EXPERTEN FÜR FACHBEREICH KW2020 / CCS (BEGLEITGRUPPEN UND FORSCHUNGSEXPERTEN)			0	2.3	
Lead:	Häring Geo Project	Funding:	BFE		
Contact:	Häring Markus haring@geo-ex.ch	Period:	2009–2011		
Abstract:	Das Projekt umfasst die Einzel-Forschungsaufträge an Mitglieder von Begleitgruppen, an Experten für Forschungsworkshops und an Experten für die Begleitung von spezifischen Forschungs- und P&D Projekten.				
● CARMA - CARBON DIOXIDE MANAGEMENT IN POWER GENERATION			R+D	2.3	
Lead:	ETH Zürich	Funding:	BFE		
Contact:	Mazzotti Marco marco.mazzotti@ipe.mavt.ethz.ch	Period:	2009–2012		
Abstract:	Das CARMA-Projekt befasst sich mit der Abscheidung und Einlagerung von Kohlendioxid (Carbon Capture and Storage). Neben Gesamt-Systemanalysen und techno-ökonomischen Bewertungen unter länderspezifischen Bedingungen sowie Akzeptanzstudien zur Einführung von CCS, werden auch eine Vielzahl von technisch-wissenschaftliche Fragestellungen bearbeitet (Abscheidung von CO ₂ in Kraftwerksprozessen, Einbindung von CO ₂ in geologischen Formationen, Ausweisung und Betrieb von CO ₂ -Lagerstätten, etc.).				

● **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 H2 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 Vergleichmässigung der lokalen Kühlwirkung "hot spots" vermieden werden.

● **ENTWICKLUNG VON INTEGRIERTEN MOTORVERDICHTERN FÜR DIE ERZEUGUNG VON BRENNGAS AUS BIOMASSE, TEIL 2** R+D 2.3

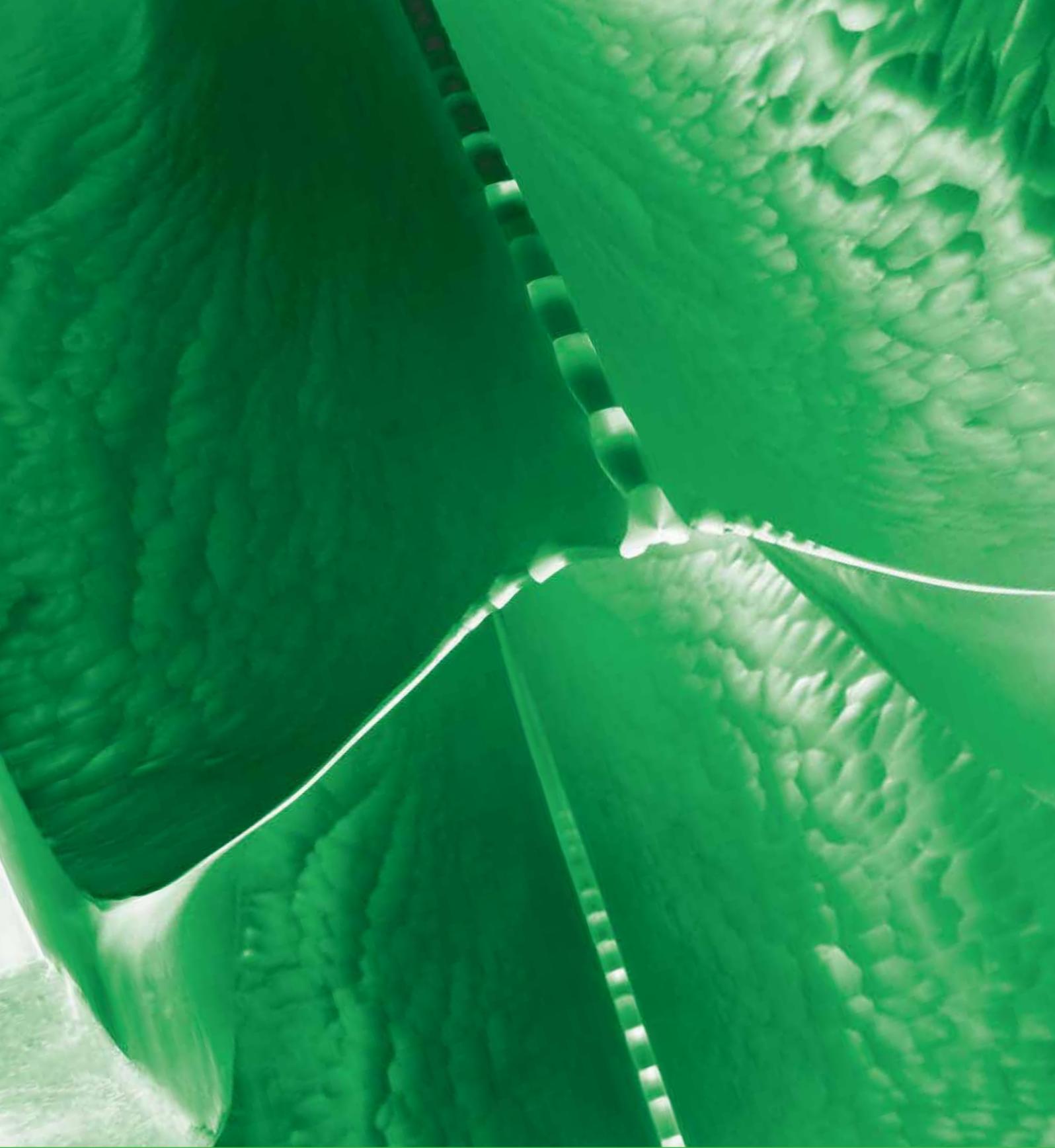
Lead:	MAN Turbo AG	Funding:	BFE
Contact:	Lauber Uwe uwe.lauber@man.eu	Period:	2009–2013

Abstract: Integrierte Motor-Verdichter sind direkt mechanisch gekoppelt und hermetisch dicht, weswegen sie besonders vorteilhaft bei gesundheits-gefährlichen Gasen zum Einsatz kommen. Die integrale Bauweise erfordert allerdings ölfreie (Magnet-)Lager und eine auf Prozessgas abgestimmte Motorkühlung. Beide Aspekte werden in diesem Projekt für die Anwendung auf Produktgas aus (Biomasse-) Vergasungsprozessen untersucht.

● **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: Generatoren mit konventioneller Technik müssen bisher bei Spannungsschwankungen (bzw. Frequenzschwankungen) vom Netz getrennt werden, und verschärfen damit die Problematik. Durch die im Projekt untersuchte Einbindung von Kurzzeitspeichertechnologien (Hochleistungskondensatoren) und Leistungshalbleiter-Schaltelementen sollen längere bzw. tiefere Spannungs-/Frequenz-Einbrüche ohne Trennung vom Netz möglich werden und damit zur Stabilisierung der Situation beitragen.

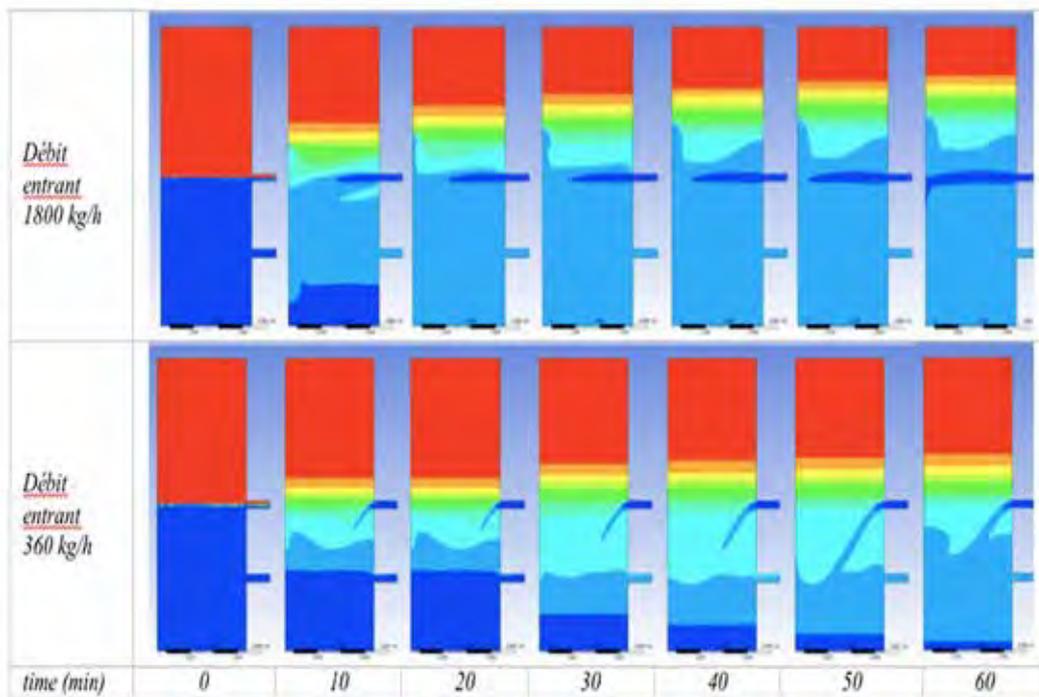


***Erneuerbare Energien
Sources d'Énergie Renouvelables***

Bild vorherige Seite:

Peltonturbinen werden bei Wasserkraftwerken mit grossen Fallhöhen bei vergleichsweise geringen Wassermengen eingesetzt, dies insbesondere in Pump-Speicherkraftwerken. Problematisch ist der Verschleiss durch Wasser mit einem hohen Anteil an Schwemmpartikeln (Sand), was zu starker Abrasion führt. Dadurch entstehen Kosten und der Betrieb ist während der Arbeiten eingeschränkt. Der Rückgang alpiner Gletscher und die Verlandung der Speicherseen führen tendenziell zu einem Anstieg der Schwebstoffkonzentration im Triebwasser und damit zur Zunahme solcher Schäden. Das Bild zeigt Abrasionserscheinungen eines Peltonlaufrades am Kamm zwischen den beiden Becherhälften sowie in den Bechern selbst. (Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie VAW, 2010).

Chaleur solaire et Stockage de chaleur



Page de couverture :

Effet du débit de charge sur la stratification d'une cuve solaire

La stratification dans une cuve de stockage solaire avec une eau à 50 °C en haut et 30 °C en bas peut être perturbée fortement par un débit d'eau entrant à 30 °C trop important. La simulation numérique permet de mieux concevoir les organes d'injection et de soutirage dans la cuve pour conserver la stratification et donc une exergie optimale dans un stockage solaire [Source: SPF].

Programme de recherche OFEN Chaleur solaire et Stockage de chaleur

Rapport de synthèse 2013

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)

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 a encore régressé en 2012 à un niveau de 154'711 m² de capteurs vendus par an. C'est un léger tassement. Les ventes de capteurs sous vide ont nettement progressé à 17'287 m² par an. Les capteurs plans vitrés ont maintenu leurs niveaux (81.5 %), des capteurs non vitrés pour piscine (5 %), des absorbeurs sélectifs (2.5 %) et des capteurs sous vide (11 %) [5].

La Suisse a exporté moins de capteurs que en 2011 soit 47'732 m² de capteurs (82 % de capteurs plans, 11 % de capteurs sous vide) et en a importé 57'982 m² dont plus de 85 % de capteurs plans. Il y a eu 13'919 installations solaires en suisse en 2012 comparé à 15'884 réalisées en 2011.

Ce sont toujours principalement des installations d'eau chaude sanitaire pour la villa (44 % part en augmentation), des

systèmes combinés pour la villa (24 % part en régression) et d'eau chaude sanitaire pour les immeubles (19 % part en régression), et des systèmes combinés pour les locatifs (8 % stable).

Plus de 10'000 installations comprennent moins de 10 m² de capteurs, plus de 2'300 ont entre 11 et 20 m² et le reste, soit environ 7 % (en régression) dépasse 21 m². Il y a eu en 2012 42 (contre 58 en 2011) installations de plus de 100 m². La Suisse est un pays de petites installations surtout pour l'eau chaude et le chauffage de villas.

Sur le marché du chauffage en Suisse, c'est la pompe à chaleur en version air/eau, soit en monovalent soit en combinaison avec du solaire pour l'eau chaude sanitaire qui domine dans le neuf. C'est le sujet de la Tâche 44 du programme Solar Heating and Cooling de l'IEA que nous avons terminé en 2013.

La recherche internationale en énergie solaire thermique étudie les capteurs hybrides (solaire photovoltaïque et thermique), les combinaisons solaire et pompe à chaleur en série ou parallèle, la réfrigération solaire thermique et désormais photovoltaïque, le stockage de chaleur dans le sous-sol à grande échelle, le stockage chimique dense et les matériaux thermochimiques, les réseaux de chaleur de quartier avec injection de solaire, soit en décentralisé soit en centralisé, les matériaux polymères pour le solaire, la prévision du rayonnement solaire sur toute la planète à partir des données de satellites, le solaire sur les bâtiments historiques. La recherche suisse participe aux thèmes importants pour notre marché notamment via les projets de l'Agence Internationale de l'Energie.

Classification de l'AIE : 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 thèmes principaux en sont: l'amélioration des performances des éléments de la boucle solaire et notamment la recherche de la durabilité des capteurs solaires, la limitation des effets de la stagnation ou la réduction de son occurrence, le développement de couches à propriétés thermiques ou optiques pour les capteurs, une meilleure intégration des capteurs dans les bâtiments et les villes, une optimisation des combinaisons solaire et pompe à chaleur, le stockage dense de chaleur et si possible saisonnier, l'amélioration de l'efficacité du stockage en cuve à eau, l'introduction du solaire thermique dans les réseaux de chaleur, et la progression des outils de simulation de systèmes.

Revue et évaluation 2013

Les buts suivants ont été atteints en 2013: - les premiers tests de cuve de stockage en glace à l'Institut für Solar-technik (SPF) de Rapperswil; - les travaux de recherche appliquée du SPF en soutien de l'industrie solaire suisse; - la poursuite des améliorations de la première nanocouche mondiale thermochromique sur support métallique à l'EPFL; - les tests d'un nouveau type de capteur solaire totalement transparent au SPF; - les tests au banc d'essai de combinaison solaire et pompe à chaleur pour le compte de fabricants au SPF; - les rapports techniques et les résultats finaux de la Tâche 44 "Solar and heat pump systems" qui

s'est déroulée de 2010 à 2013 dans le programme "Solar Heating and Cooling" de l'AIE et dans le programme "Heat pump programme", avec notamment les résultats de mesures in situ de plus de 25 installations et les résultats de simulation; - les conclusions du projet Aquapacsol du LESBAT à la HEIG-VD à Yverdon; - le lancement de la nouvelle Tâche 51 "Solar energy and urban planning" de l'AIE; - la définition de la Tâche 52 "Solar heat and energy economics" et de la Tâche 53 "New generation Solar cooling"; - la soutenance de la thèse de M. Eismann sur la compréhension de la stagnation dans les circuits solaires à l'ETHZ; - le lancement du projet Storex sur la maximisation de l'exergie dans les cuves à eau au SPF; - les mesures sur un projet P+D avec une combinaison absorbeurs solaires et pompe à chaleur sur une cuve de glace; - les mesures sur un projet avec capteur hybride PVT; - le démarrage d'un projet de stockage de chaleur dans du béton à l'EMPA.

Perspectives

En 2014, le livre de la Tâche 44 "Solar and heat pump systems" sera disponible et rassemblera tous les résultats de la Tâche durant 2010 à 2013, avec les performances (SPF Seasonal Performance Factor) de systèmes mesurés et les résultats comparés des différentes solutions par simulation. Les combinaisons solaire et pompe à chaleur auront enfin un ouvrage de référence quant à leurs performances réelles et possibles,

des méthodes de mesures au banc d'essai y sont recommandées, les valeurs qu'il faut mesurer et les performances qu'il faut calculer pour une comparaison entre systèmes y sont définies. La possibilité de réaliser un capteur transparent à fluide thermochromique sera connue. La nouvelle Tâche AIE SHC 52 sur le solaire dans les réseaux urbains aura posé les problématiques du solaire dans les quartiers de ville ancienne. Plusieurs projets de stockage d'énergie sous forme de glace pourront indiquer le futur de cette technique de stockage. Les travaux sur les couches thermochromiques auront abouti à une solution à température dépassant 90 °C. Un projet P+D de stock de glace de plusieurs m³ aura donné des résultats et un capteur hybride PVT aura été mesuré dans une installation d'ampleur. Le programme travaille sur tous les aspects du domaine du solaire thermique basse température, du composant au système : le gisement solaire dans une tâche (46) AIE et sa prévision par satellite, des matériaux nouveaux en captage et stockage comme le béton amélioré, la compréhension thermohydraulique de la boucle solaire en conditions réelles, les échangeurs dans les cuves de glace, le stockage, les systèmes solaires en combinaison avec les pompes à chaleur, les outils de simulation des systèmes. Le travail se fait principalement dans deux centres suisses de compétences et en collaboration internationale au sein de l'AIE et dans des projets européens.

Highlights Recherche et Développement

En 2013, des projets importants se sont terminés. La Tâche 44 de l'AIE "Solar and heat pump systems" s'est achevée après 4 ans de travaux et 8 meetings internationaux. Les résultats commencent à apparaître sur le site internet du programme Solar Heating and Cooling. Ils montrent la complexité des combinaisons de système hybride tant au point de vue de la mise en service que du réglage. Il était attendu que les combinaisons solaire et pompe à chaleur en parallèle qui sont les plus simples à mettre en oeuvre soient les plus performantes. Les mesures in situ sur plus de 25 installations ont montré que toute combinaison (parallèle, série, régénération, complexe selon les 4 catégories faites dans la Tâche 44) peuvent conduire à de bonnes performances en terme de coefficient annuel de performance ou de taux d'énergie renouvelable utilisée, pour autant que l'intégration soit réfléchie et bien réalisée. Des modèles de simulation ont été développés et ils permettent désormais des optimisations.

Le projet Aquapacsol a fait partie des installations suivies et simulées durant la Tâche 44 et est présenté ci-après. De même le projet SOLHEAP du SPF a apporté des informations précieuses en testant au banc d'essai plusieurs combinaisons solaire et pompe à chaleur du marché suisse. Le projet High Ice du SPF tente de développer un échangeur eau - glace qui serait flexible pour pouvoir évacuer rapidement la glace qui se

forme tout autour.

Au SPF des projets sur les matériaux sont en cours: la mesure de la capacité calorifique des fluides antigel est un projet important pour le dimensionnement correct de la boucle solaire et paradoxalement ces données manquent. La corrosion de l'aluminium, de plus en plus utilisé dans les capteurs solaires, soumis à des mélanges glycolés est aussi un sujet en cours d'étude.

Au Leso une thèse sur la thermochromie a été tenue avec succès par le Dr Paone [10]. Le principe fonctionne mais il faut encore atteindre le bon niveau de températures en dépassant les 68 °C actuellement atteints pour que l'application pour les capteurs solaires soit la plus efficace.

Le projet d'étude d'une fenêtre solaire intégrée en façade a été achevé et un pilote devrait être construit.

Une pompe à chaleur sur capteurs solaires pour l'eau chaude sanitaire

Le projet Aquapacsol de la HEIG-VD à Yverdon avait pour objectif d'analyser les performances obtenues en couplant des capteurs solaires thermiques à une pompe à chaleur pour la production d'eau chaude sanitaire. Ce couplage utilise l'énergie solaire au niveau de l'évaporateur (circuit primaire) de la pompe à

chaleur (PAC), ceci dans le but de maximiser la part d'énergie solaire utilisée sur l'année et par conséquent le coefficient de performance annuelle de la pompe à chaleur. Un banc de mesures pour la caractérisation du fonctionnement de capteurs solaires dans des conditions particulières comme, entre autres, des températures de fonctionnement inférieures à la température extérieure donc avec des effets de condensation sur le capteur, a été réalisé. De même le chauffe-eau utilisant une PAC et des capteurs solaires avec possibilité de faire varier les paramètres influant sur le fonctionnement et les performances de l'installation (capteurs solaires, soutirages d'eau chaude sanitaire (ECS), conditions météorologiques, bâtiment) a été mis en test. La solution de couplage testée et analysée dans ce projet permet d'offrir une alternative aux solutions de production d'ECS traditionnelles. Une analyse détaillée du comportement des capteurs solaires sous des conditions de fonctionnement non usuelles a permis de mettre au point un modèle mathématique capable d'évaluer la part des différents flux d'énergie fournis ou perdus par n'importe quel type de capteurs solaires thermiques, vitrés ou non vitrés qui seraient couplés à la pompe à chaleur.

Les simulations annuelles ont montré que le système chauffe-eau/PAC testé dans ce projet est une solution pouvant être énergétiquement concurrentielle sur le marché de la production d'ECS moyen-

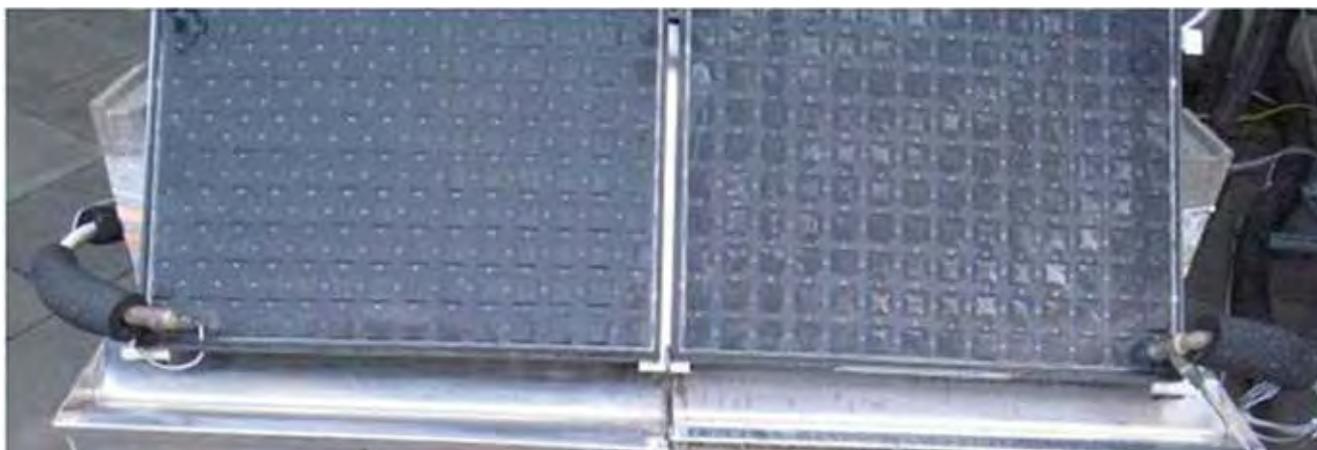


Figure 1 : Mesure de la quantité d'eau condensée sur un absorbeur solaire utilisé comme source pour une pompe à chaleur pour déterminer l'énergie de condensation récupérée [Source: Lesbat]

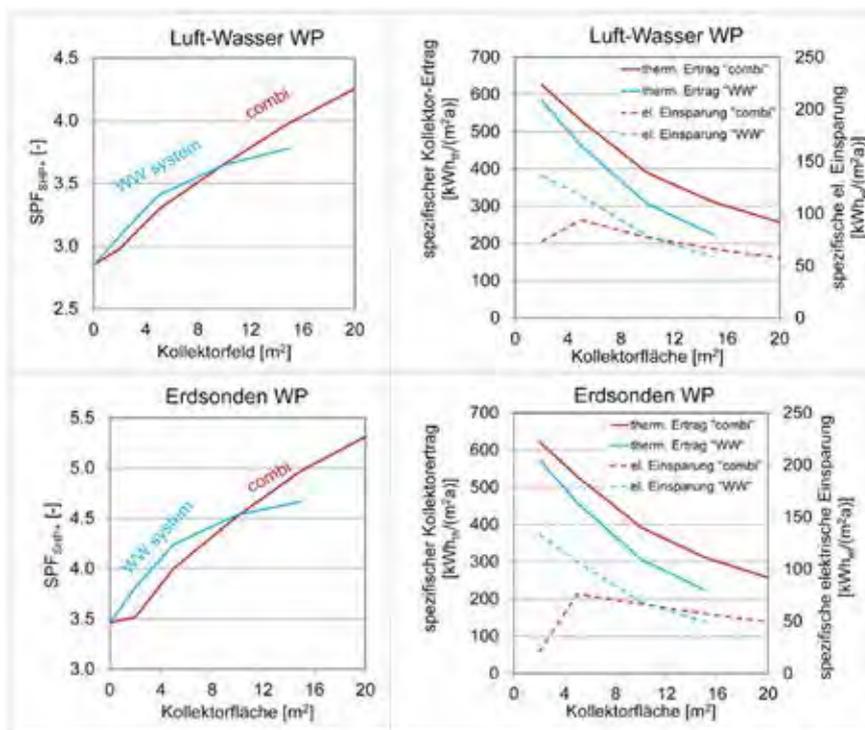


Figure 2 : Résultats de la Tâche 44: ce qu'apportent les capteurs solaires dans un système hybride solaire + pompe à chaleur [Source: SPF].

nant quelques adaptations constructives. Il a été montré que l'utilisation d'un seul capteur solaire non-vitré permet d'atteindre des coefficients de performance similaires à ceux obtenus avec un capteur

à tubes sous-vide, tout en supprimant les problèmes de surchauffe dans le circuit solaire. De plus, un gain en performance non-négligeable sur la production d'ECS du système est réalisable en laissant la

possibilité au capteur solaire de charger directement la cuve d'ECS et de faire l'appoint nécessaire par le chauffe-eau/PAC. Dans ce cas, l'utilisation d'un capteur solaire plus performant (vitré ou à tubes) améliore encore les performances (de 28 % à 76 % selon l'utilisation respective de un ou deux capteurs).

Une analyse de cycle de vie a montré que le couplage d'un chauffe-eau/PAC avec une installation solaire est moins favorable qu'un système solaire combiné présentant une plus grande surface de capteurs solaires, ceci pour les indicateurs dits "NRE" (énergie non renouvelable) et "GWP" (potentiel de réchauffement climatique). Par contre, ce système est meilleur qu'un système de production d'eau chaude sanitaire en électrique direct. Il ressort également de cette étude que la part de matériaux dans les installations par rapport à celle due à la consommation d'énergie, sur une durée de vie de 20 ans, n'est pas négligeable selon le type d'installation considérée.

Le stockage solaire en glace

Depuis quelques années, les stocks de glace arrivent sur le marché solaire. Nous avons présenté un projet dans le rapport 2012. Le projet High-Ice du SPF cherche à comprendre les mécanismes de formation de la glace sur les échangeurs immergés dans des cuves de stockage solaire qui sont utilisables en hiver par une pompe à chaleur. Dans ce projet, une cuve prototype a été équipée de différents types d'échangeurs soit en inox à plaque soit en tubes en plastique. Les modèles sont validés sur les mesures.

Des simulations sur ordinateur et des mesures sont menées pour analyser de quelle manière un stock de glace peut être intégré dans un système de chauffage tout en minimisant la demande d'énergie primaire et l'impact environnemental de l'ensemble du système.

Le système solaire / pompe à chaleur a été modélisé par le SPF dans un environnement TRNSYS. Les conditions de référence sont celles définies dans notre projet international SHC Task 44. Les bâtiments simulés sont les maisons unifamiliales: il s'agit d'un bâtiment à basse

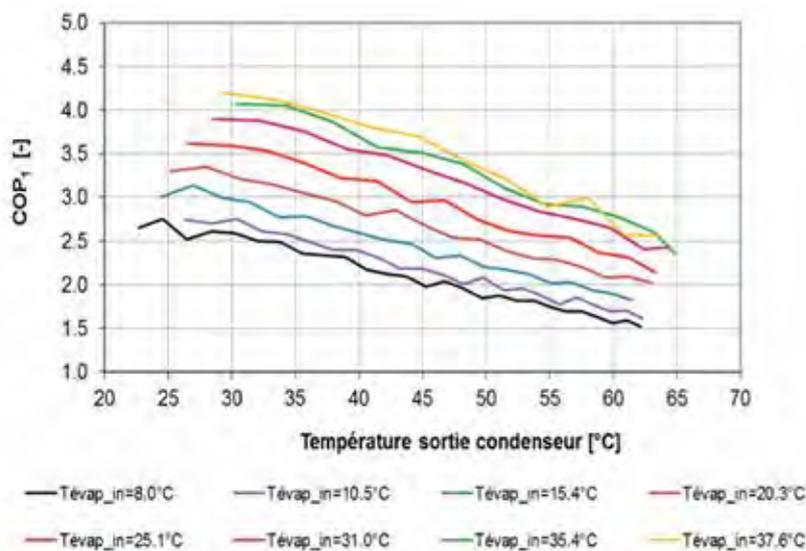


Figure 3 : Effet de la température sur la performance de la pompe à chaleur du projet Aquapscol [Source: Lesbat].

température de distribution de la chaleur et une demande de chauffage annuelle de 45 kWh/m² an et d'un bâtiment plus usuel du parc existant avec une distribution de chaleur à plus haute température et une demande de chauffage de 100 kWh/m² an. Le climat de référence des simulations est celui de Strasbourg.

Le modèle mathématique d'un stockage de glace avec des échangeurs de chaleur qui peuvent être dégivrés a été validé avec les données de mesure sur la cuve prototype du SPF de 1 m³. Le modèle est ensuite utilisé pour optimiser une installation grandeur réelle où le stock de glace atteint 75 m³.

Le stockage de glace peut être considéré comme une alternative aux forages en tant que source de chaleur, et donc une installation avec forage est utilisée comme référence pour les comparaisons. Le but est d'obtenir un rendement plus élevé que le système sur sonde avec moins de consommation d'énergie primaire sur la durée de vie. Dans cette comparaison, les coûts doivent être pris en compte. Les premiers résultats ont montré que le système sur stock de glace peut sous certaines conditions conduire à des performances plus élevées. Mais un système optimisé sur sonde peut atteindre un coefficient annuel de 5,8, difficile à battre, dans le cas de la maison à basse consommation. Avec 5 m² de capteurs non vitrés, pour la recharge du stock et un stock de glace de 25 m³, une performance de 5,01 est obtenu. Si l'on augmente la surface de capteurs de 15 à 30 m², les performances du système solaire-glace-PAC augmente à 5,9 et le volume de stockage peut être réduit à 20 m³ sans jamais avoir recours à plus de 70 % de la capacité de la glace. Avec 20 m³ de volume de stockage de glace, la surface de capteurs peut être réduite jusqu'à 20 m² tout en gardant une performance annuelle (il s'agit du coefficient dit SPFSHP+ selon la définition établie par la Tâche 44) de 5,53.

La récupération de chaleur sur les eaux usées est aussi une possibilité que le SPF va analyser par simulation. La température des eaux usées permettrait en effet de régénérer aussi le stock de glace.

Un autre aspect du projet est de trouver un dispositif qui permet de décoller

Anlagen-Nr	Aperturfäche	Kollektortyp	Solarregler	Speichervolumen	Inbetriebnahme der Anlage
1	23.3 m ²	Viessmann 200-f Typ SV2/8H2	Steca TR0503TTR	800 + 500 L	2011
2	36.8 m ²	Viessmann 200 F SV2A	Resol DeltaSol M	2 x 1'000 L	2012
3	7.84 m ²	Consolar Tubo 12 Ci (Röhrenkollektor)	Steca TR0503TTR	2 x 850 L	2012
4	32.5 m ²	Soltop Cobra Evo 2.8H	Soltop SR4	2 x 1'500 L	2013
5	12.0 m ²	Elco Solatron A2.3	Steca TR0603mc	2 x 1'000 L	2007
6	18.3 m ²	Ernst Schweizer AG FK-H4	Steca TR0503TTR	1'280 L	2004
7	12.5 m ²	Viessmann Vitosol 200F SH2A	Steca TR0503TTR	2 x 800 L	2012
8	19.6 m ²	Consolar Tubo 12 Ci (Röhrenkollektor)	Steca TR0503TTR	1'150 L	2012
9	7.1 m ²	Soltop Cobra SA2H	Steca TR0603mc	2 x 850 L	2004
10	3.9 m ²	Soltop Cobra Evo 2.3V	Soltop SR4	500 L	2013

Figure 4 : Les installations solaires suivies à distance dans le projet P+D "Funktioncheck" [Source: Egon AG]

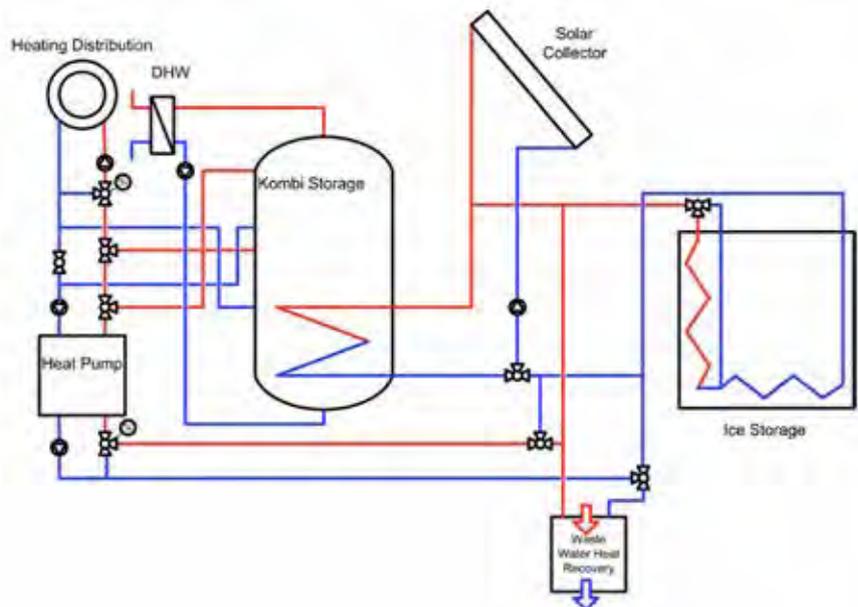


Figure 5 : Schéma d'une installation solaire + pompe à chaleur avec stock de glace et récupération sur les eaux usées [Source: SPF]

rapidement la glace qui se forme sur l'échangeur. Plusieurs solutions ont été testées au SPF. L'idée principale consiste à trouver des échangeurs de chaleur qui peuvent être dégivrés mécaniquement en modifiant leur forme. Pour changer la forme, deux solutions ont été analysés: (1) le gonflage de tubes flexibles (2) le pliage à plat des échangeurs de chaleur à plaques.

Le banc d'essai avec le stockage de glace

au SPF était alors à reconstruire pour permettre des mesures automatisées de changement de la pression du système. Les performances des différents échangeurs de chaleur en ce qui concerne l'élasticité de leur matériau de paroi ont pu être analysés. Après de nombreux cycles de gonflage-dégonflage, la durabilité des matériaux a pu être évaluée.

Différents matériaux comme le silicone et latex ont été examinés en terme de

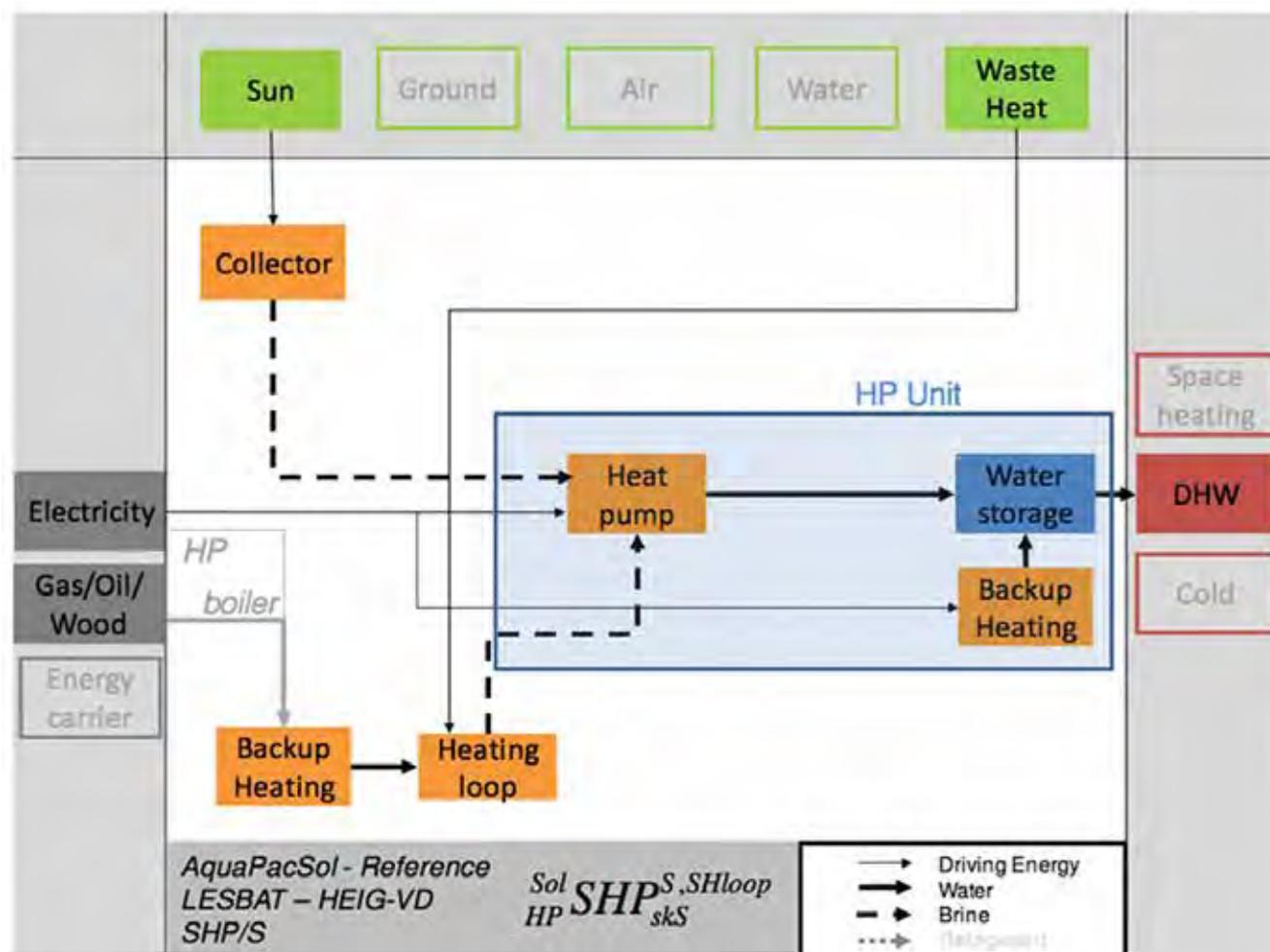


Figure 6 : Schéma bloc des flux d'énergie selon la méthode de la Tâche 44 pour le système Aquapacsol [Source: Lesbat]

flexibilité à des températures inférieures à 0 °C , pour tester la résistance à la pression ou l'adhérence de la glace. Dégivrer les tubes en augmentant leur diamètre par gonflage a été possible dans la plupart des cas. Toutefois un problème principal de cette stratégie de dégivrage,

semble bien être que les tubes doivent être gonflés à un degré tel, que des inhomogénéités dans la paroi conduisent à une expansion inégale et à une fragilisation locale du matériau de la paroi. En outre, certains tuyaux ne récupèrent pas leur forme originale ou éclatent, ce

qui rendrait le système non fiable. Au vu des difficultés, un échangeur de chaleur à plaques plat mais flexible en silicone a été imaginé. Les travaux doivent se poursuivre pour trouver la solution la plus fiable.

Projets Pilotes et de Démonstration

En 2013, plusieurs projets P+D avec des innovations en matière d'énergie solaire thermique sont en cours. Deux installations de pompe à chaleur avec capteurs hybrides PVT sont en cours de mesures sur 2 maisons. Un projet de stockage en béton amélioré a été débuté à l'EMPA. Une installation avec pompe à chaleur

couplée sur un chauffage à distance et avec des capteurs solaires en local est mesurée, et on étudie la cohérence du fonctionnement de la combinaison. Un projet de combinaison PAC et solaire a dû être arrêté après un an de mesures décevantes faute de support de la maison qui a livré la PAC et dont la régulation

ne fonctionnait pas. Un bâtiment de bureaux à Uznach a été équipé avec deux citernes en béton et des échangeurs en plastique en serpentins. L'eau des citernes peut geler pour permettre en hiver une source d'énergie à température stable pour les pompes à chaleur, source qui est le stock de glace. Ce pro-

jet est un test pilote à cette échelle de taille.

Un projet P+D regroupant des industriels du solaire et visant à augmenter la fiabilité des installations solaires pour les clients est le projet "FunktionenCheck Sonnenkollektoranlagen" que nous allons détailler.

Le suivi d'installations solaires thermiques en temps réel

Ce projet P+D dit "Funktionencheck" rassemble, à l'initiative de la société Egon AG, des professionnels du solaire qui ont compris que le suivi des installations solaires thermiques pouvait être nettement amélioré pour la détection de pannes notamment. Le suivi d'installations a été implémenté sur un "portail web". Les mesures physiques sur une installation doivent permettre d'analyser toutes les fonctions importantes. C'est l'accès au régulateur de l'installation solaire qui permet de fournir les données de mesure, et l'interfaçage avec tout type

de régulateur solaire est, de ce fait, un point potentiellement limitant du déploiement du concept. Les mesures sont régulièrement téléchargées sur le portail web de contrôle de fonctionnement. Un algorithme effectue alors une analyse de plausibilité du fonctionnement observé du circuit solaire, de la température de stockage, des conditions de stagnation, et de l'énergie solaire produite. En utilisant les données de rayonnement solaire et de température extérieure de stations météorologiques de proximité, le logiciel calcule également un "rendement de référence". Le rendement mesuré est comparé à cette référence pour détecter un écart anormalement élevé. Les résultats peuvent être consultés par le propriétaire ou le personnel de service, et fournissent des informations précieuses pour l'optimisation et le dépannage des équipements à distance.

Dix installations solaires de préparation d'eau chaude sanitaire existantes du portefeuille de "Industrielle Werke Basel" IWB ont été équipées de régulateurs solaires appropriés, d'une mesure de débit et d'une mesure de la température

aller et retour. Neuf installations sont situées sur des logements multifamiliaux et une sur une maison familiale.

Equiper les installations a toutefois pris beaucoup plus de temps que prévu, les interventions sur les installations étant repoussées souvent par les installateurs eux-mêmes.

Les premières analyses ont montré que les données récoltées étaient insuffisantes pour décrire correctement le fonctionnement du système. Par exemple, la circulation dans les installations collectives est un paramètre qu'il faut mesurer d'une manière directe ou indirecte.

Le portail web est accessible en ligne et permet de voir les périodes où une installation a été en panne ou en défaut. Il est pour le moment à accès restreint.

Moyennant un interfaçage avec le régulateur, toute installation solaire thermique pourra être visualisée sur le site du portail web "Vérification du fonctionnement des installations solaires" dont le futur est en discussion.

Collaboration Nationale

Les tests de capteurs au SPF sont l'occasion d'échange avec toute l'industrie solaire suisse et internationale. Le SPF a organisé à Rapperswil en 2013 un "jour de l'industrie", durant lequel ont été exposés tous les projets en cours devant l'industrie solaire suisse. Les thèmes abordés sont ceux de notre programme de recherche, et les résultats sont explicités par les chercheurs en charge. Le rapprochement avec les industriels du solaire est nécessaire lors de cette journée qui est très appréciée de son public. Les présentations sont disponibles sur le site du SPF (www.solarenergy.ch). La journée sur la chaleur solaire en Suisse organisée par Swissolar à Lucerne en 2013 a reçu le soutien financier de l'Office Fédéral de l'Énergie et le chef de notre domaine de recherche Andreas Eckmanns a fait une présentation devant l'industrie solaire suisse des thèmes de recherche

que nous poursuivons.

La société Meteotest collabore avec l'Université de Genève en matière de prévision de rayonnement solaire. Les résultats sont intégrés dès que possible dans le logiciel Meteonorm. Dans le cadre de la Tâche 44, les groupes suisses ont coordonné leurs travaux régulièrement, ce sont : le SPF, le LESBAT, l'Université de Genève, l'Université de Fribourg, la Fachhochschule Nordwestschweiz, les sociétés 3S (Meyer Burger) et Energie Solaire SA. Le SPF a suivi les travaux de thèse du Dr Eismann à l'ETHZ sur la stagnation. Six fabricants de cuves solaires participent au projet de recherche sur l'amélioration de l'exergie dans les cuves de stockage qui se tient sur un banc d'essai au SPF.

Collaboration Internationale

Le SPF participe aux travaux de normalisation européenne et est agréé auprès de l'association "Solar Keymark" dont le label correspond à une réelle demande du marché international et qui est aussi reconnu en Suisse pour l'attribution de subventions. La plupart des projets de notre programme participe à des tâches de l'Agence Internationale de l'Energie dans le programme "Solar Heating and Cooling", les Tâches 39, 41, 42, 44, 46, 51, 52, 53 (voir sous www.iea-shc.org). Le SPF coopère avec de nombreux instituts solaires (Institut technique de la chaleur de Graz en Autriche, Institut de thermodynamique de Stuttgart en Allemagne, Centre de recherches solaires de Borlange en Suède, Institut des Energies Renouvelables AEE Intec en Autriche, ISFH en Allemagne, EURAC en Italie) . Meteotest et l'Université de Genève sont nos représentants dans la

Tâche AIE SHC 46 sur la prévision du rayonnement solaire par satellite. Energie Solaire SA a réalisé un projet P+D avec l'entreprise qui développe la gamme "Kioto clean energy" mais avec un succès très limité, ce qui a permis de développer un nouveau produit par la société suisse. Nous avons 4 laboratoires suisses et 2 sociétés qui ont participé à la Tâche 44 "Solar and heat pump systems" que nous avons menée à bien depuis 2010 et qui a réuni plus de 50 experts de 11 pays différents sur le sujet du solaire couplé avec une pompe à chaleur. En matière de stockage, sur des fonds nationaux et européens, l'EMPA fait partie de la Tâche AIE SHC 42, et participe au projet européen COMTES.

Nos équipes et centres de compétences sont bien intégrés dans la recherche européenne.

References

[1] Carbonell, D. et al, 2013. Simulations of Combined Solar Thermal and Heat Pump Systems for Domestic Hot Water and Space Heating. In: Energy Procedia, Elsevier, Freiburg, Germany

[2] R. Eismann, Thermohydraulik von Solaranlagen, Schlussbericht , 28 April 2013, Projekt SI/500489

[3] Carbonell, D. et al, 2013. Development and validation of a mathematical model for ice storages with heat exchangers that can be de-iced, in: Proceedings of ISES Solar World Congress, Cancun, Mexico

[4] Stettler et al, Web-based functionality check for solar heating systems, SHC 2013, September 23-25, 2013, Freiburg, Germany

[5] Swissolar, Le recensement du marché de l'énergie solaire en 2011, juin 2012

[6] Haller, M.Y., Haberl, R., Persson, T., Bales, C., Kovacs, P., Chèze, D. & Papillon, P., 2013, Dynamic whole system testing of combined renewable heating systems – The current state of the art. Energy and Buildings, 66, p.667-677

[7] Haberl, R., Haller, M.Y., Reber, A. & Frank, E., 2013. Solare

Kombispeicher mit Wärmepumpen: Labormessungen der Jahresleistung zeigen Optimierungspotential. In: 23. Symposium Thermische Solarenergie, 24.-26. April 2013, OTTI, Germany

[8] Haberl, R., Haller, M.Y., Reber, A. & Frank, E., 2013. Solare Kombispeicher mit Wärmepumpen: Labormessungen der Jahresleistung zeigen Optimierungspotential. In: 23. Symposium Thermische Solarenergie, 24.-26. April 2013, OTTI e. V., Regensburg, Kloster Banz, Bad Staffelstein, Germany

[9] Ineichen P. (2013) Long term satellite global, beam and diffuse irradiance validation. SHC2013, September 23-25, Freiburg, Germany

[10] A. Paone, public thesis defense, Switchable selective absorber coatings for overheating protection of solar thermal collectors, December 6th, 2013, EPFL, Lausanne, Switzerland.

Projets en cours et terminés dans l'année de référence

(* Classification de l'AIE)

- SOLAR RESOURCE ASSESSMENT AND FORECASTING IEA SHC 46**

Lead: **Meteotest**

Contact: **Jan Remund** jan.remund@meteotest.ch

Abstract: Le programme AIE « Solar heating and cooling » a lancé la Tâche 46 « Solar Resource Assessment and Forecasting" à la suite de la Tâche 36. Il s'agit d'explorer la qualité de la prévision du rayonnement solaire, de développer des procédures normalisables pour traiter les données et la prévision du rayonnement à court terme. Le groupe fait appel aux données satellitaires. Les résultats sont intégrés dès que disponible dans le logiciel suisse Meteonorm.

R+D 3.1.1*

Funding:	BFE
Period:	2011–2015
- SOLAR RESOURCE ASSESSMENT AND FORECASTING IEA SHC 46**

Lead: **Université de Genève**

Contact: **Pierre Ineichen** Pierre.Ineichen@unige.ch

Abstract: Le programme AIE « Solar heating and cooling » a lancé la Tâche 46 « Solar Resource Assessment and Forecasting" à la suite de la Tâche 36. Il s'agit d'explorer la qualité de la prévision du rayonnement solaire, de développer des procédures normalisables pour traiter les données et la prévision du rayonnement à court terme. Le groupe fait appel aux données satellitaires. Les résultats sont intégrés dès que disponible dans le logiciel suisse Meteonorm.

R+D 3.1.1

Funding:	BFE
Period:	2011–2015
- THERMOCHROMIE: ADVANCED SWITCHABLE SELECTIVE ABSORBER COATINGS FOR OVERHEATING PROTECTION OF OLAR THERMAL COLLECTORS**

Lead: **EPFL/ENAC/LESO-PB**

Contact: **Andreas Schüeller** andreas.schueler@epfl.ch

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 testing the durability of such new coatings for thermochromic solar collectors.

R+D 3.1.1

Funding:	BFE
Period:	2012–2014
- SPF GLASOLO**

Lead: **Institut für Solartechnik, SPF**

Contact: **Elimar Frank** Elimar.Frank@solarenergy.ch

Abstract: Le projet vise à développer un nouveau type de capteur solaire thermique, permettant l'usage de fluide sélectif.

R+D 3.1.1

Funding:	BFE
Period:	2013–2014
- SPF HIGH ICE**

Lead: **Institut für Solartechnik, SPF**

Contact: **Elimar Frank** Elimar.Frank@solarenergy.ch

Abstract: Le test de différentes combinaisons d'échangeurs pour les stocks de glace est essentiel pour augmenter l'efficacité de tels stocks couplés à des pompes à chaleur et rechargés par l'énergie solaire en hiver même dans des conditions d'ensoleillement médiocre.

R+D 3.1.1

Funding:	BFE
Period:	2013–2014
- SPF STOREX**

Lead: **Institut für Solartechnik, SPF**

Contact: **Michel Haller** Michel.Haller@solarenergy.ch

Abstract: Le projet a pour but d'améliorer l'exergie des stocks de chaleur solaire en cuve à eau, avec la participation d'industriels du solaire qui acceptent de soumettre leurs concepts de stocks à des tests poussés pour les améliorer en performance exergetique.

R+D 3.1.1

Funding:	BFE
Period:	2013–2014
- SPF APPLIED RESEARCH**

Lead: **Institut für Solartechnik, SPF**

Contact: **Elimar Frank** Elimar.Frank@solarenergy.ch

Abstract: Mit diesem Projekt soll die Bearbeitung praktischer Forschungsfragen 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

Funding:	BFE
Period:	2013–2014

● **IEA SHC TASK 51 "SOLAR ENERGY IN URBAN PLANNING "** R+D 3.1.1

Lead:	EPFL/ENAC/LESO-PB	Funding:	BFE
Contact:	Cristina Munari-Probst mariacristina.munariprobst@epfl.ch	Period:	2013–2017

Abstract: Il s'agit d'assurer une participation active à la Tâche 51 de l'AIE « Solar Energy in Urban Planning » avec direction d'un groupe de travail sur l'acceptabilité du solaire actif dans l'environnement urbain. Ceci en internationalisant la méthode du LESO pour juger de la qualité d'un projet solaire en environnement construit selon une méthode dite «Acceptabilité urbaine des systèmes solaires actifs, approche LESO-QSV»

● **IEA SHC TASK 52 « SOLAR HEAT AND ENERGY ECONOMICS»
PARTICIPATION ET DIRECTION SOUS-TÂCHE B** R+D 3.1.1

Lead:	Sorane SA	Funding:	0
Contact:	Paul Bourdoukan paul.bourdoukan@sorane.ch	Period:	2013–2017

Abstract: This Task proposal focuses on the analysis of the future role of solar thermal in energy supply systems in urban environments. Based on an energy economic analysis - reflecting future changes in the whole energy system - strategies and technical solutions as well as associated tools will be developed. Good examples of integration of solar thermal systems in urban energy systems will be developed and documented.

● **AQUAPACSOL** R+D 3.1.1

Lead:	HEIG-VD / LESBAT	Funding:	BFE
Contact:	Stéphane Citherlet 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.

● **THERMOHYDRAULIK VON SOLARANLAGEN** R+D 3.1.1

Lead:	Eismann Ing.	Funding:	BFE
Contact:	Ralph Eismann eismann@lke.mavt.ethz.ch	Period:	2010–2013

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.

● **THERMOHYDRAULIK VON SOLARANLAGEN: HANDBUCH** R+D 3.1.1

Lead:	Eismann Ing.	Funding:	BFE
Contact:	Ralph Eismann eismann@lke.mavt.ethz.ch	Period:	2013–2014

Abstract: Ein praxisorientiertes Handbuch zur Thermohydraulik von Solaranlagen wird erarbeitet, welches die Gebiete Rohrnetzrechnung, Druckhaltung, Stagnation sowie Entlüftung und Entgasung behandelt. Die zur Entlüftung erforderliche Fließgeschwindigkeit des Wärmeträgers wird experimentell bestimmt. Das Handbuch ermöglicht die kostenoptimale Planung von Solaranlagen sowie die Vermeidung von kostspieligen Schadenfällen durch Fehlplanung.

● **SPF SOL HEAP AND IEA SHC 44 SUBTASK C LEADERSHIP** R+D 3.1.1

Lead:	Institut für Solartechnik, SPF	Funding:	BFE
Contact:	Michel Haller Michel.Haller@solarenergy.ch	Period:	2010–2013

Abstract: In der IEA-SHC Task 44 „Solar and Heat Pump Systems“, ist das SPF über das Projekt „SOL-HEAP“ eingebunden. 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:	Jean-Christophe Hadorn 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.

● **EMPA PILOTPROJEKT ETTRINGITBASIERTER WÄRMESPEICHER**

P+D 3.1.1

Lead:	EMPA	Funding:	BFE
Contact:	Josef Kaufmann Josef.Kaufmann@empa.ch	Period:	2013–2015
Abstract:	Dieses Demonstratorprojekt wurde mit dem Ziel der praxisnahen Erprobung eines neuartigen latenten Wärmespeichermaterials, basierend auf Calciumsulfoaluminat (CSA)-Beton mit sehr hohem Ettringit-tanteil, initiiert. Es wird ein Ettringitbeton-basierter saisonaler Wärmespeicher im realistischen Massstab (mehrere m3 Speichergrosse) gebaut.		

● **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 m2 de absorbeurs nonn vitrés sélectifs est testé sur une villa de 230 m2 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?		

● **NIEDERTEMPERATUR- PV/T-KOLLEKTOREN MIT EINBINDUNG IN DIE GEBÄUDETECHNIK MIT WÄRMEPUMPE UND ERDSONDE: HAUS HALTER UND HAUS SCHAUB**

P+D 3.1.1

Lead:	3S Swiss Solar Systems AG	Funding:	BFE
Contact:	Marc Bächtli Marc.baetschmann@3s-pv.ch	Period:	2012–2015
Abstract:	Mit den zwei Pilotanlagen soll gezeigt werden, dass sich die Hybridisierung der Photovoltaik lohnt, insb. dass Energieeinsparung und photovoltaischer Mehrertrag den finanziellen und energetischen Zusatzaufwand (graue Energie) rechtfertigen. Die JAZ des Gesamtsystems wird anhand von Anlagen im Betrieb ermittelt oder mit Hilfe von Simulationen berechnet		

● **FUNKTIONS-CHECK SONNENKOLLEKTORANLAGEN**

P+D 3.1.1

Lead:	Egon AG	Funding:	BFE
Contact:	Sandra Stettler Sandra.stettler@egonline.ch	Period:	2012–2014
Abstract:	In diesem P+D Projekt wird anhand von 10 bestehenden Sonnenkollektoranlagen die Eignung und Zweckmässigkeit eines Webbasiereten Funktions-Checks überprüft.		

● **BOOSTER SOLAIRE ET ABSORBEURS NON VITRÉS ESSA**

P+D 3.1.1

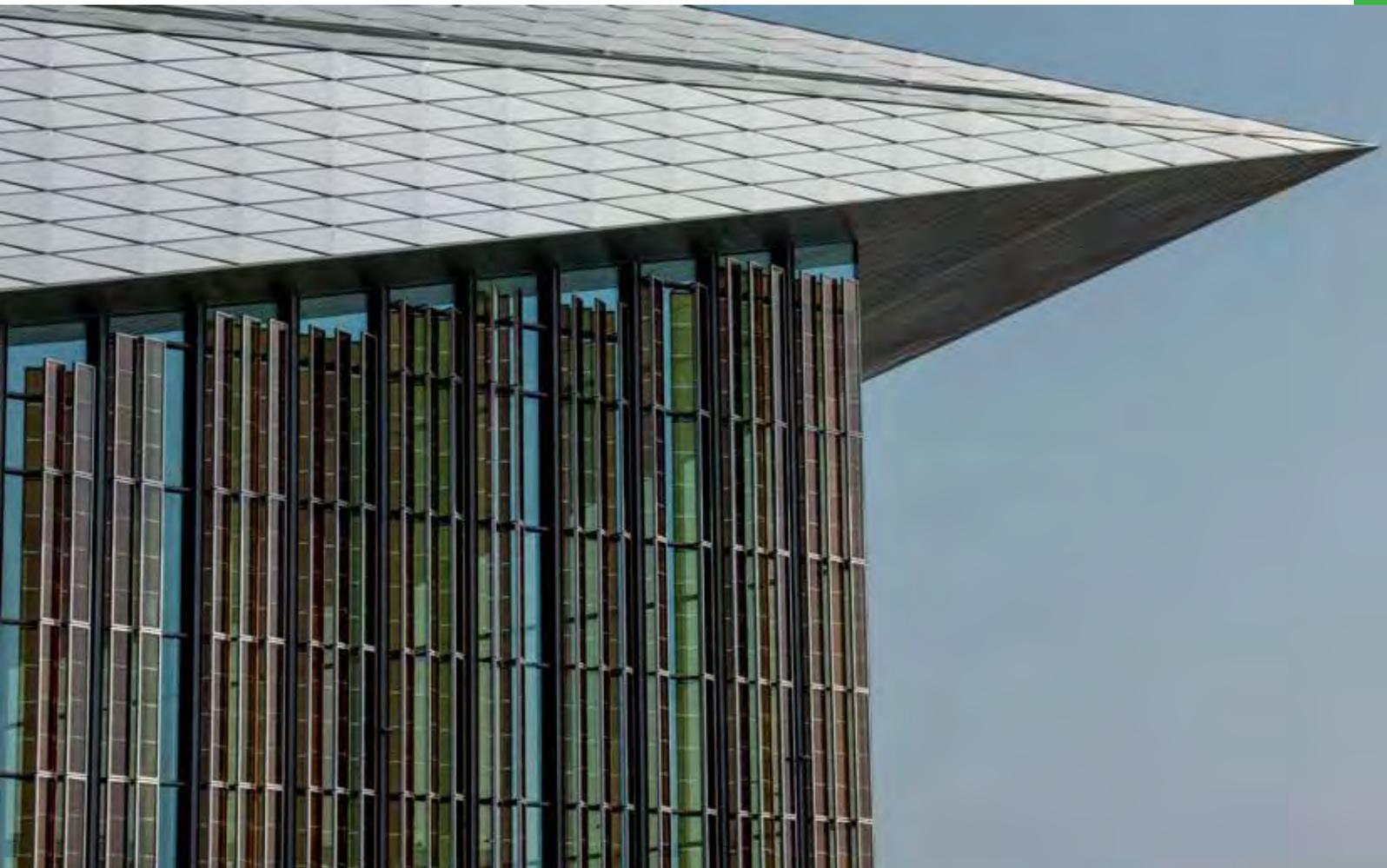
Lead:	Energie Solaire SA	Funding:	BFE
Contact:	Bernard Thissen bernard@energie-solaire.com	Period:	2012–2014
Abstract:	Ce projet P+D est un test de terrain d'un système de production de chaleur compact et innovant, composé d'une pompe à chaleur utilisant des absorbeurs sélectifs non vitrés comme source de chaleur directe et indirecte et un stock de glace.		

● **UZNACH SOLAR EISSPEICHER HEIZUNG**

P+D 3.1.1

Lead:	Planungszentrum Lini AG	Funding:	BFE
Contact:	Andrea Pozzi andrea.pozzi@nippo.ch	Period:	2013–2015
Abstract:	In Uznach wird ein Bürogebäude in einem Gmndwassergebiet erstellt. Sowohl Erdsonden wie auch eine Grundwasseremutzung sind an diesem Standort nicht zugelassen. Um Gebäude trotzdem über Wärmepumpen mit Wännen zu versorgen werden als Wärmequelle die Sonnen- und Umgebungswärme sowie die Abwärme Kühlung über Eisspeicher genutzt.		

Photovoltaik



Titelbild:

Neuartige farbige Photovoltaik Fassade

Am neuen SwissTech Convention Center an der EPFL in Lausanne wurde zum ersten Mal eine 300 m² grosse Fassade mit mehrfarbigen, transluziden Solarmodulen auf der Grundlage der farbstoffsensibilisierten «Graetzel»-Solarzellen realisiert. Die an der Westseite des Konferenzentrums angebrachten, vorgehängten Fassadenelemente sind bis zu 36 m hoch und bilden einen Sonnenschutz für den lichtdurchfluteten Vorraum des Gebäudes (Solaranlage – Planung und Bau: Solaronix SA; Architekt: Richter - Dahl Rocha & Associés, Bildquelle: © IEA PVPS / Daniel Forster)

BFE Forschungsprogramm Photovoltaik

Überblicksbericht 2013

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

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

Einleitung

In den letzten Jahren haben sich Technologie und Industrie der Photovoltaik, ihre Wettbewerbsfähigkeit, die politischen Rahmenbedingungen und die Bedeutung der Photovoltaik für den Elektrizitätsmarkt deutlich verändert. Zum einen fand eine beispiellose Preisreduktion insbesondere der Photovoltaik-Module statt, welche die Wettbewerbsfähigkeit der Photovoltaik in wenigen Jahren in vielen Märkten und Anwendungen massiv verbessert hat. Ausschlaggebend dafür ist die rasch wachsende Industrie mit entsprechenden Skaleneffekten, aber auch eine erhebliche globale Überproduktion. Damit einhergehend erfolgt weltweit ein rasches Marktwachstum, welches weiter anhalten dürfte. Gleichzeitig ist aufgrund des steigenden Wettbewerbsdrucks eine ausgeprägte Konsolidierungsphase in der Photovoltaikindustrie eingetreten. Nationale wie internationale Energiedebatten befassen sich immer intensiver mit der Photovoltaik, sowohl mit der Frage was ihr künftiger Beitrag im Energiemix sein wird als auch mit den marktbezogenen Rahmenbedingungen, welche zunehmend den Elektrizitätsmarkt als Ganzes erfassen.

Vor diesem Hintergrund findet weiterhin eine intensive Forschung statt, welche sich die anhaltende Kostenreduktion des ganzen Photovoltaiksystems, die rasche Industrialisierung neuer Prozesse, Produkte und Anwendungen wie die Integration in das Energiesystem als Ganzes zum Ziel setzt. Beispiele von wichtigen Photovoltaik Forschungsinitiativen sind die «Innovationsallianz Photovoltaik» in Deutschland, die «Sunshot Initiative» in den USA, das neue «AIST Fukushima

Renewable Energy Institute» in Japan oder der «PV Implementation Plan 2013 – 2015» der Solar Europe Industry Initiative [1-4].

In der Forschung geht es um die anhaltende Weiterentwicklung der bestehenden Photovoltaiktechnologien sowie die Entwicklung neuer Materialoptionen und Konzepte. Nebst dem Kerngebiet der verschiedenen Solarzellen- und Modulttechnologien beinhaltet die Photovoltaikforschung auch technologiespezifische Themen auf der Systemebene, z. B. der Gebäudeintegration, der elektrischen Systemtechnik oder der Umweltindikatoren 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 wesentlicher Pfeiler einer nachhaltigen Stromversorgung hat in relevanten Szenarien inzwischen ihren festen Platz: Die im Jahr 2010 publizierte Photovoltaik-Roadmap der Internationalen Energie Agentur IEA [5] spricht bis 2050 von einem möglichen Beitrag von mehr als 10 % zur weltweiten Stromversorgung. Die kurzfristigen Marktprognosen der IEA zeigen ein noch dynamischeres Bild [6]. In aktuellen Schweizer Energieszenarien wird von der Photovoltaik bis 2050 ein Beitrag von mindestens 10 TWh Elektrizität als erwartet [7].

In den letzten bald 30 Jahren hat sich eine starke Schweizer Position in verschiede-

nen Gebieten der Photovoltaikforschung herausgebildet: Im Vordergrund stehen die Entwicklungen von verschiedenen Dünnschicht-Technologien, welche schon immer den Schwerpunkt der Schweizer Photovoltaikforschung bildeten. Im Jahr 2013 erfolgte dazu eine deutliche Steigerung der Aktivitäten, eine Stärkung der Forschungsinfrastruktur und Erfolge in verschiedenen Forschungsgebieten. Ausgehend von Arbeiten an neuen Solarzellen-Konzepten, z. B. auf dem Gebiet der CIGS-Technologie, werden 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 Wertschöpfungskette der Photovoltaik bedeutenden Schweizer Industrie geführt hat. Laufende Aktivitäten in Forschung und Entwicklung sowie Projekte im Bereich von Pilot- und Demonstrationsanlagen umfassen im Berichtsjahr 2013 rund 75 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 Projekte mit Unterstützung der Kommission für Technologie und Innovation (KTI) sowie zahlreiche EU-Projekte im Forschungsprogramm Photovoltaik eine tragende Rolle.

IEA Klassifikation: 3.1.2 Photovoltaics

Schweizer Klassifikation: 2.1.2 Photovoltaik

Programmschwerpunkte

Das Forschungsprogramm Photovoltaik des BFE verfolgt in der Periode 2013–2016 die folgenden Ziele [8]:

- Effizienzsteigerungen und Kostenreduktion von Dünnschicht-Solarzellen;
- Entwicklung von Hocheffizienzzellen (HIT-Zellen, Photonenmanagement);
- Materialoptionen für neue Solarzellenkonzepte (organische Solarzellen);
- Industrielle Fertigungsprozesse für verschiedene Dünnschicht-Solarzellen (Silizium, CIGS);
- Neue multifunktionale Produkte für die Gebäudeintegration;
- Optimierung der Einbindung von Solardächern und -fassaden in die Gebäudetechnik;
- Netzintegration von hohen Anteilen von Photovoltaikstrom;
- Übergreifende Zusammenarbeit zur Optimierung der Energieerzeugung in Kombination mit andern Erneuerbaren, insbesondere bezüglich Speicheroptionen und Verbrauchssteuerung.

Das Programm ist dazu in folgende fünf

Bereiche aufgeteilt (die angegebene Klassifizierung bezieht sich auf die Liste der Projekte, Seite 11 ff.):

Solarzellen (1a-e)

Verschiedene materialspezifische Ansätze zu Dünnschicht-Solarzellen stellen hier den wichtigsten Schwerpunkt dar (Silizium, Verbindungshalbleiter, organische Materialien). Verstärkt werden Hocheffizienz-Zellen mit Heteroübergängen zwischen Dünnschicht- und kristallinem Silizium vorangetrieben. Organische und Polymersolarzellen, neuerdings verstärkt durch Forschung an Perowskitstrukturen, gewinnen als mögliche langfristige Technologieoptionen an Bedeutung. Ausserdem werden in der Grundlagenforschung fortgeschrittene Konzepte mit Photonen-Management erforscht, z. B. für Lumineszenz-Konzentratoren.

Module und Gebäudeintegration (2a-e)

Diese Gebiet ist eng mit der Anwendung der Gebäudeintegration verbunden. Im Vordergrund stehen zum Einen Modultechnologien, welche mit den in der Schweiz entwickelten Solarzellen einhergehen. Zum Anderen wird die Integration in funktionale Gebäudeelemente

(z. B. Isolation, Wasserdichtigkeit) verstärkt verfolgt.

Elektrische Systemtechnik (3)

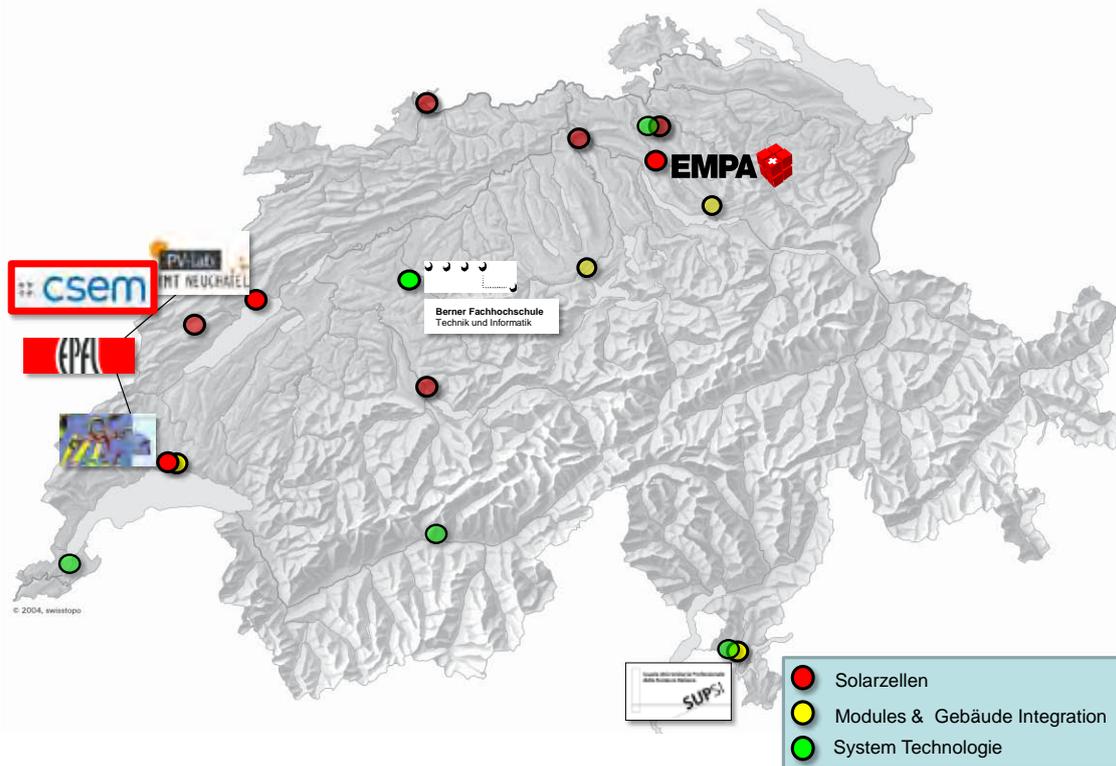
Im Vordergrund steht die Qualitätssicherung von Modulen und Wechselrichtern, einschliesslich entsprechender Normen. Ein in Zukunft wichtiger werdendes Thema ist die Wechselwirkung mit dem elektrischen Netz und die Integration der Photovoltaik ins Netz.

Begleitende Themen (4)

Zum einen geht es um relevante technische und nicht technische Themen zur Marktentwicklung (z. B. Hilfsinstrumente, Monitoring, Umweltaspekte). Andererseits sind hier auch auf andere Energiethemen übergreifende Projekte (z. B. Gebäude, Mobilität, Speicherung) angesiedelt.

Internationale Zusammenarbeit (5)

Diese erfolgt projektbezogen auf allen Gebieten und im Rahmen des Implementing Agreements Photovoltaic Power System Programme (PVPS) der Internationalen Energieagentur (IEA), der europäischen SOLAR-ERA.NET-Kooperation (ERA: European Research Area),



Die Schweizer Photovoltaik Forschungslandschaft

der Europäischen Photovoltaik-Technologieplattform, der Solar Europe Industry Initiative (SEII) im Rahmen des SET-Plans und der Normen festlegenden Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC).

Rückblick und Bewertung 2013

Gemessen an der Anzahl laufender Projekte mit öffentlicher Finanzierung und der gesamthaft gemeldeten Forschungsprojekte [9] kann eine anhaltende Verstärkung der Forschungsaktivitäten beobachtet werden. Diese Erhöhung ist in erster Linie auf eine Zunahme von KTI- und EU-Projekten zurückzuführen. Die zur spezifischen Förderung der Photovoltaik verfügbaren Forschungsmittel des BFE sind im Jahr 2013 beschränkt aber konstant geblieben. Die Mittel für Pilot- und Demonstrationsprojekte konnten hingegen deutlich erhöht werden, wobei hier keine für die Photovoltaik spezifischen Mittel reserviert sind. Neu ist 2013 mit Unterstützung des Staatssekretariats für Bildung, Forschung und Innovation (SBF) das Photovoltaik-Kompetenzzentrum am Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique (CSEM) operativ geworden. Damit soll die industriennahe Forschung in Hinblick auf die Umsetzung deutlich gestärkt werden.

Inhaltlich sind programmübergreifend drei wesentliche Trends zu erkennen: i) die verstärkte Fokussierung auf kurz- und mittelfristig relevante Fragestellungen der Industrie (anhaltende Kostensenkung und Effizienzsteigerung), ii) die wachsende Bedeutung von systemrelevanten Aspekten (z. B. Gebäude- und Netzintegration) sowie iii) langfristige Optionen in der Grundlagenforschung. Für die Photovoltaikindustrie hielt der ausgeprägte Wettbewerb und Kostendruck weiter an, aber es zeichnet sich gleichzeitig eine verstärkte Innovations-tätigkeit in Hinblick auf neue Prozesse und Produkte ab.

Ein nicht unwesentliches Element auf der nationalen Ebene ist der inzwischen auf mindestens 300 MW Jahreskapazität geschätzte Markt (total installierte Leistung Ende 2013 rund 740 MW), welcher seitens der Marktakteure zu vermehrten Kooperationen mit Forschungsinstituten und Innovationen führt. Insgesamt ist damit trotz Konsolidierung in der Industrie eine wachsende Industrietätigkeit zu verzeichnen.

Ausblick

Die Schweizer Photovoltaik Forschungslandkarte (siehe Bild links) ist stark diversifiziert und gut verteilt. Für das Bestehen

im internationalen Wettbewerb wichtig, dass die einzelnen Forschungsaktivitäten eine genügend grosse kritische Masse aufweisen und halten können.

Die Herausforderung der Schweizer Photovoltaikforschung und -industrie für die kommenden Jahre liegt deshalb darin, international, sowohl technologisch wie marktbezogen, mithalten zu können. Die Ausgangslage dazu ist grundsätzlich sehr gut: Die Schweiz hat in verschiedenen Forschungsgebieten weltweit weiterhin führende Forschungsaktivitäten und konnte diese in den letzten Jahren deutlich verstärken. Die Industrie ist trotz den derzeit schwierigen Zeiten in Bezug auf die Innovationstätigkeit weiterhin stark präsent und thematisch breit aufgestellt. Mit den verschiedenen Massnahmen zur Stärkung von Forschung und Umsetzung sollte sich auch die Forschungsinfrastruktur weiter entwickeln können. Zusammen mit dem kontinuierlich wachsenden Markt und der zunehmenden Wettbewerbsfähigkeit sind damit die Voraussetzungen für die weitere Entwicklung sowohl wissenschaftlich und technologisch wie industriell und marktbezogen anspruchsvoll aber aussichtsreich.

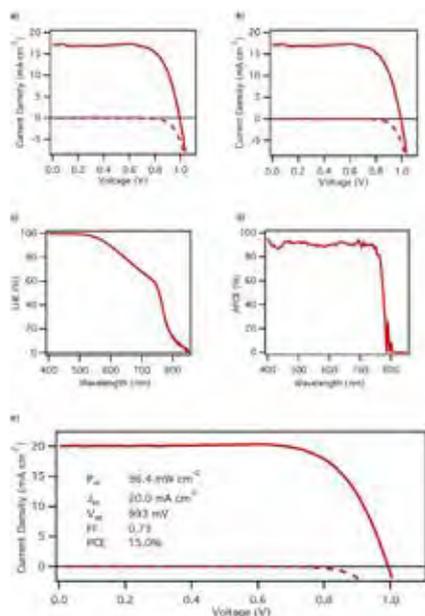
Highlights aus Forschung und Entwicklung

Die Schweizer Photovoltaik Kompetenzzentren zu einzelnen Schwerpunktthemen konnten in den letzten Jahren ihre Forschungsaktivitäten vertiefen, neue Themen aufgreifen, die Industriekooperationen stärken und allgemein die Forschungsinfrastruktur ausbauen. Im Jahr 2013 sind dies insbesondere das Photovoltaik-Labor (PV-Lab) an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne (EPFL) in Neuchâtel zusammen mit dem CSEM PV Center (Silizium-Dünnschicht-Solarzellen), das Institute of chemical sciences and engineering (ISIC) an der EPFL in Lausanne (Farbstoff-Solarzellen), die Empa in Dübendorf (Verbindungshalbleiter-

und organische Solarzellen), die Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana (SUPSI) in Lugano (Solarmodule und Gebäudeintegration) und die Berner Fachhochschule Technik und Informatik (BFH TI) in Burgdorf (elektrische Systemtechnik). Daneben sind auch verstärkte Forschungsaktivitäten an weiteren Hochschulen, z. B. an den Universitäten Bern, Basel und Fribourg sowie an der Empa in Thun (Grundlagenforschung), den Fachhochschulen ZHAW in Winterthur und Wädenswil und der heig-vd in Yverdon (Systemtechnik, Simulation), dem Laboratoire d'énergie solaire (LESO) an der EPFL und der Hochschule HSLU in Luzern (Gebäudeintegration) oder der HSR in

Rapperswil (insbesondere PVT-Hybridkollektoren) und dem NTB in Buchs (Kleinanwendungen) zu verzeichnen.

Forschung und Entwicklung auf kristallinen Solarzellen ist in der Schweiz weitgehend 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



Figur 1: Charakterisierung von Perovskit-Solarzellen: a) I-V Kurven unter AM 1.5 G Spektrum (fest) bzw. im Dunkeln (gestrichen), b) IPCE (incident photon-to-current conversion efficiency) bzw. integrierter Photonenstrom, c) LHE (light harvesting efficiency), d) APCE (absorbed photon-to-current conversion efficiency), e) I-V Kurve der besten Zelle (Bildquelle EPFL [10], Copyright: Nature Publishing Group 2013).

effizienzmässig noch schneller weiter zu entwickeln. Dabei gewinnt auch das Konzept der hocheffizienten Solarzellen mit Heteroübergängen zwischen amorphen und kristallinen Zellen industriell rasch an Bedeutung. Fortgeschrittene Solarzellenforschung bedeutet aber immer mehr auch Materialforschung mit neusten Ansätzen, neuen Materialkombinationen und neuen Prozessen. Dabei spielen feinste Schichten und Strukturen im Nanometerbereich eine zunehmende Rolle. Im Jahr 2013 standen diesbezüglich vor allem die Forschungsarbeiten an Perovskit-Strukturen, namentlich am ISIC an der EPFL, im Rampenlicht.

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 Berner Fachhochschule HTI in Burgdorf das Verhalten von Wechselrichtern und Systemen untersucht. Beide Institute betreiben Prüflabors, in welchen Solarmodule oder Wechselrichter gemäss gängigen Normen geprüft werden können.

Dünnschichtsolarellen – mit neuen Konzepten zu höchsten Wirkungsgraden

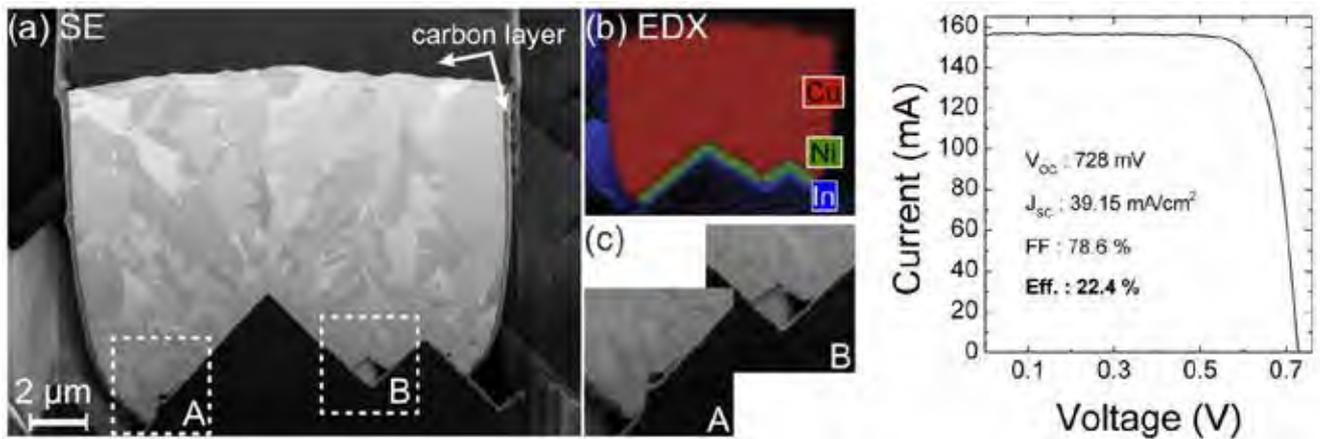
Besondere Beachtung fanden im Berichtsjahr die neusten Forschungsarbeiten des Teams um Prof. Michael Graetzel am ISIC an der EPFL in Lausanne, welcher seit vielen Jahren im Rahmen von nationalen und internationalen Projekten an vorderster Front an farbstoffsensibilisierten Dünnschichtsolarellen (sogenannten «Graetzel-Zellen») forscht. Das neue «heisse» Thema sind lösungsmittelbasierte, metallorganische Perowskite (bleihaltige Perovskit-Kristalle), welche 2009 an der Universität Tokyo zum ersten Mal zur Sensibilisierung der Farbstoffsolarellen eingesetzt wurden und damit in der internationalen Forschungsgemeinschaft grosses Interesse ausgelöst haben. In nur wenigen Jahren hat sich seither der Wirkungsgrad solcher Solarzellen von nur drei auf jetzt über 16 Prozent gesteigert, viel schneller als bei allen anderen Solarzellen-Technologien. Die Forschungsgruppe an der EPFL konnte zeigen, dass das Leistungsvermögen der Perovskit-Solarellen von der Regelmässigkeit der Perovskit-Kristalle abhängt. Die Forscher schlugen dazu einen sequentiellen Herstellungsprozess der Perovskit-Kristalle vor. In einem ersten Schritt wird die anorganische Bleiverbindung aus einer Lösung auf die nanoporöse Titandioxid-Schicht aufgebracht. Anschliessend wird der Film einer organischen Lösung ausgesetzt, welche zur Bildung der Perovskit-Kristalle führt. Die Umwandlung zur Perovskitstruktur erfolgt beim Kontakt der zwei Komponenten in den Poren der Titandioxid-Schicht und führt dabei zu einer viel besseren Morphologie der Perovskit-Kristalle. Auf diese Weise konnten die Forscher an der EPFL den Wirkungsgrad im Jahr 2013 auf bis zu 15 Prozent steigern (Fig.1) [10]. Prof. M. Graetzel wurde 2013 auch mit dem

bedeutenden Marcel Benoist Preis 2013 ausgezeichnet [11].

Die rasante Entwicklung des Wirkungsgrads dieses neuen Materials hat weltweit fiebrige Forschungsarbeiten ausgelöst – treibende Kraft dafür ist die Hoffnung, hohe Wirkungsgrade mit günstigen Kosten zu verbinden, dem schlussendlichen Ziel jeder Solarzellenforschung. Ob und wann das vielversprechende Konzept diese Erwartungen in der Praxis erfüllen kann, welche Fragen sich dabei ergeben und welche Aufgaben gelöst werden müssen, bleibt weiter zu verfolgen. Dennoch zeigt dieses Beispiel eindrücklich, wie wichtig die anhaltende Forschung an neuen Konzepten ist und welches Potential in neuen Materialien und Prozessen immer noch steckt.

Das PV-Lab an der EPFL in Neuchâtel bearbeitet in einer Anzahl von eng verwandten Projekten aktuelle Fragestellungen zur weiteren Entwicklung von Silizium-Dünnschichtsolarellen auf verschiedenen Substraten. Das aktuelle vom BFE unterstützte Projekt am PV-Lab ist in sechs komplementäre Aufgabenbereiche strukturiert: Einfluss der Plasmaeigenschaften auf die Siliziumschichten, neue Materialien und Schichten, Lichteinfang, Mehrfachübergänge, Zuverlässigkeit und Charakterisierung sowie allgemeine Infrastruktur. Im zweiten Projektjahr wurde das Verständnis der Materialeigenschaften von amorphem und mikrokristallinem Silizium mit verschiedenen Zwischenschichten vertieft. Auf der Zellebene konnten wesentliche Fortschritte erzielt werden, namentlich ein Weltrekord für den Wirkungsgrad von mikrokristallinen Siliziumsolarellen von 10,7 % sowie die sehr guten Werte von mikromorphen Siliziumsolarellen von 12,3 % für Tandemzellen bzw. 13,0 % für Tripelzellen (Fig. 2).

Das Konzept von Hocheffizienz-Solarellen mit einem Heteroübergang (*heterojunction technology HJT*) zwischen verschiedenen Schichten aus kristallinem und amorphem bzw. mikrokristallinem Silizium gewinnt unter dem aktuellen Kostendruck durch die marktübliche kristalline Technologie weiter an Bedeutung. Das PV-Lab erreichte hierzu bisher einen maximalen Wirkungsgrad 22,1 %. Wesentliche Industriekooperationen des



Figur 2: Als neue Kontaktelektroden von Silizium Heterjunction Solarzellen werden Ni/Cu Finger untersucht. Linker Bildteil: a) Sekundärelektronen SEM Bild eines Ni/Cu Fingers. b) EDX mapping von Kupfer, Nickel und Indium. c) Vergrößerte Sicht von zwei Defekten an der ITO/Ni Grenzschicht; rechter Bildteil: Strom-Spannungscharakteristik und Wirkungsgrad einer Silizium Heterjunction Solarzelle mit Kupfergitter, einem IO:HIITO Front TCO Stack und einer MgF_2 Antireflexschicht. (Bildquelle EPFL [12], Copyright: IEEE).

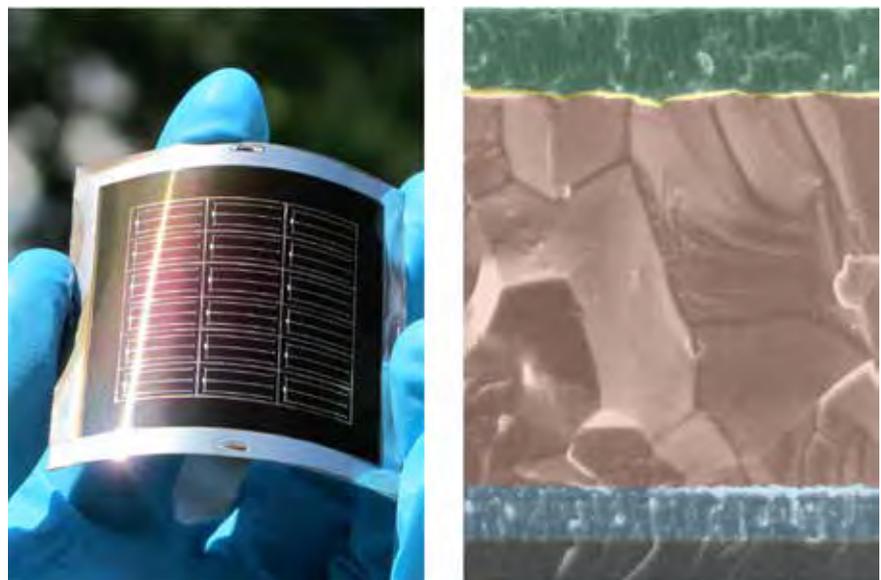
PV-Lab erfolgen hierzu mit Meyer Burger und Roth & Rau in der Schweiz sowie mit verschiedenen weiteren in- und ausländischen Unternehmen.

Die derzeit wichtigsten Vertreter der Verbindungshalbleiter-Solarzellen sind CIGS und CdTe. Nachdem sich CdTe Solarzellen im Markt etabliert haben gewinnt auch die CIGS Technologie zunehmende Bedeutung. Nebst diesen Hauptvertretern der Verbindungshalbleiter-Solarzellen werden weltweit neue Materialvarianten erforscht, insbesondere in der Materialklasse der Kesteriten. Das Labor für Dünne Schichten und Photovoltaik an der Empa arbeitet dazu an unterschiedlichen Fragestellungen zu CIGS- und CdTe Solarzellen sowie Kesteriten ($Cu_2ZnSn(S, Se)_4$). Dabei interessieren auch bei diesen Technologien 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.

Das Team an der Empa liegt mit seinen Resultaten weltweit weiterhin an der Spitze: Der Rekord-Wirkungsgrad einer CIGS Solarzelle auf Kunststoff von 20,4 % wurde vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Frei-

burg (Deutschland) verifiziert. Ein vom BFE unterstütztes Projekt an der Empa in Zusammenarbeit mit FLISOM befasst sich mit dem Aufbau einer pilotmässigen Anlage zur mehrstufigen Abscheidung von CIGS Solarzellen auf Kunststofffolien in einem roll-to-roll Prozess. Damit soll die Übertragung der erzielten Forschungsergebnisse auf industriennahe Verhältnisse erreicht werden. Die Anlage konnte im

Labor weitgehend aufgebaut werden. Im Berichtsjahr konnte auch für CdTe Solarzellen auf flexiblen Substraten wichtige Fortschritte erarbeitet werden. Der dabei erreichte Wirkungsgrad beträgt 13,8 % in Superstrat-Konfiguration auf Polyimid und 11,5 % in Substrat-Konfiguration auf Metallfolien, in beiden Fällen ein neuer Weltrekord (Fig.3).



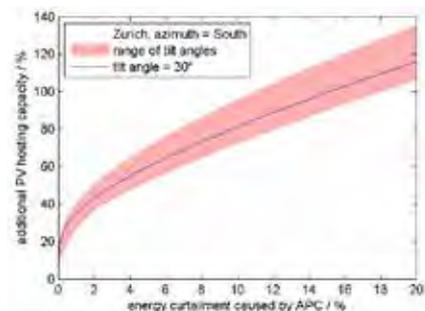
Figur 3: CdTe-Solarzellen auf einer flexiblen Metallfolie (links) und Elektronenmikroskop-Aufnahme (EM) des Zellaufbaus in der Substrat-Konfiguration (rechts) mit dem elektrischen Frontkontakt (oberste Schicht), der zentralen CdTe-Schicht und dem rückseitigen Kontakt aus Metall (unterste Schicht), deponiert auf einem Glasträger (Bildquelle Empa).

Integration von hohen Photovoltaik Anteilen im elektrischen Netz

Im Zusammenhang mit dem teils massiven Ausbau der installierten Photovoltaik Kapazität in verschiedenen Ländern ist die Frage nach der Integration dieser Anlagen im elektrischen Netz von einer konzeptionellen und theoretischen Frage rasch zu einer praxisrelevanten Problematik geworden. Das seit 2010 im Rahmen der PV-ERA.NET Kooperation laufende BFE-Projekt *Distribution Grid Analysis and Simulation with Photovoltaics* (DIGASP) wurde im Berichtsjahr durch Basler & Hofmann erfolgreich abgeschlossen [13]. Das Projekt untersucht die Frage, wie viel Photovoltaik ein Verteilnetz erträgt, und legt damit den Fokus auf Niederspannungs-Verteilnetze (Netzebene 6 und 7) in sowohl städtischen wie auch ländlichen Wohngebieten der Schweiz.

Dazu wurde ein spezifisches Simulationsmodell zur Lastflussanalyse erstellt und für unterschiedliche Annahmen ausge-

wertet. So konnte beispielsweise gezeigt werden, dass unter Berücksichtigung der Gleichzeitigkeit von Lasten und PV-Einspeisung fast 50 % mehr Solarstrom ans Netz abgegeben werden kann als ohne diese. Je mehr Standorte (Haushalte) einbezogen werden, desto höher wird die Aufnahmekapazität des Solarstroms. Ein anderes wichtiges Resultat betrifft die Abregelung von Leistungsspitzen der PV-Anlage. Der Verzicht von 2 % der Energie ermöglicht im untersuchten Beispiel eine zusätzliche PV-Aufnahmekapazität von rund 40 % (Fig. 4). Weitere Resultate betreffen die Auswirkung der Ausrichtung der PV-Module mit vermehrter Orientierung nach Osten und Westen auf die Leistung und den Energieertrag. Es zeigt sich, dass diese viel diskutierte Massnahme die momentan abgegebene Leistung im Netz zwar reduziert, ebenso aber den Energieertrag, ausser bei sehr steilen Anstellwinkeln der PV-Module. Im Weiteren wurde der Einfluss von dezentralen Speichereinheiten untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass durch einen Speicher, welcher vier Stun-



Figur 4: Einfluss der Wirkleistungsbegrenzung auf die bei der Netzeinspeisung von Photovoltaik-Anlagen mögliche Aufnahmekapazität, das Band gibt die Abhängigkeit vom Anstellwinkel der PV-Module wieder (Bildquelle Basler&Hofmann).

den mal der nominalen Anlagenleistung entspricht, die Aufnahmekapazität des Verteilnetzes für PV-Anlagen um 200 % erhöht werden kann. Die Forschungsergebnisse fliessen auch in die Arbeiten des IEA PVPS Task 14 *High Penetration of PV Systems in Electricity Grids* ein.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Photovoltaik Gebäudeintegration in vielen Farben

Das P+D-Projekt Archinsolar, welches verschiedene Partner und Förderorganisationen (BFE, swisselectric research, SIG, CCEM) vereint, wurde im Berichtsjahr durch das PV-Lab abgeschlossen. Es ging bei diesem Vorhaben in erster Linie darum, amorphe und mikromorphe Silizium-Dünnschichtsolarmodule mittels

eines am LESO der EPFL in Lausanne entwickelten Interferenz-Verfahrens so zu gestalten, dass unterschiedliche Farben möglich werden. Damit soll eine neue und energetisch effizientere Art der Farbgebung (weniger Verluste) von Solarmodulen erzielt werden. Es wurden seit 2010 eine grössere Anzahl von verschiedenen farbigen und grossflächigen Demonstrationsmodulen sowie Dachziegel hergestellt (Fig.5). Dabei wurde der

Verbundaufbau variiert und in Bezug auf Wirkungsgrad, Materialien, Funktionalität, Haftung, Dichtheit, Kosten sowie Umweltaspekte analysiert. Es zeigte sich anfänglich bei den Testmodulen, dass je nach Zusammensetzung der Farbfilter bei mikromorphen Solarmodulen eine bis zu rund doppelt so grosse Wirkungsgradreduktion beobachtet wird wie bei den amorphen Modulen. Durch geeignete Wahl der Interferenzstruktur konnte die-



ser Effekt weitgehend behoben werden. Nebst den eigentlichen Demonstrationsmodulen in unterschiedlichen Farben wurden Konzepte für farbige Solarziegel mit Komposit-Strukturen entwickelt und getestet.

Figur 5: Erste Prototypen von farbigen Dünnschicht PV-Modulen aus dem Projekt Archinsolar (Bildquelle PV-Lab, EPFL).



Figur 6: Grosse, leistungsfähige Photovoltaikanlagen, z. B. auf Gebäuden, entsprechen dem aktuellen Stand der Technik und sind immer häufiger anzutreffen. Neue Photovoltaiktechnologien müssen sich an diesen erprobten Konzepten messen können, in Bezug auf Wirkungsgrade, Kosten, Langlebigkeit wie auch die Ästhetik (Aufdachanlage mit Asbestsanierung, 1.928 MWp, Breitenbach (SO), Planung und Realisierung sowie Bildquelle: SOLVATEC AG).

Nationale Zusammenarbeit

Im Berichtsjahr wurde die vielfältige nationale Zusammenarbeit in verschiedenen Projekten weiter intensiviert. Die Schweizer Photovoltaik Kompetenzzentren arbeiten immer häufiger in gemeinsamen, häufig themenübergreifenden Projekten zusammen, z. B. in Projekten des CCEM. Damit hat sich der Austausch innerhalb der Schweizer Photovoltaik Forschungsgemeinschaft deutlich verstärkt. Die Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen konnte ebenfalls ausgebaut werden, sowohl in neuen Projekten mit Unterstützung der KTI, als auch in der Form von direkten Mandaten der Industrie an ausgewählte Forschungsinstitute. Als wichtigstes neues Element ist das CSEM Photovoltaik Technologiezentrum zu erwähnen, welches anfangs 2013

seinen Betrieb aufgenommen hat. Es soll die industriennahe Forschung mit allen wichtigen Schweizer Photovoltaik Kompetenzzentren nachhaltig stärken. Auf Programmebene wurde die Zusammenarbeit mit vielen Stellen des Bundes, der Kantone und der Elektrizitätswirtschaft weiter gepflegt. Mit dem Aktionsplan Koordinierte Energieforschung, der Nano-Tera Initiative und den neuen Schwerpunktprogrammen NFP 70 und 71 des Schweizerischen Nationalfonds, dem erwähnten CSEM Photovoltaik Technologiezentrum mit Unterstützung des SBFI und der Erhöhung der BFE-Mittel für P+D Projekte haben sich wesentliche Randbedingungen für die beschleunigte Entwicklung und Umsetzung der Forschung positiv entwickelt.

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 erfolgreich fortgesetzt werden. Im Jahr 2013 waren es 18 Projekte im 7. Rahmenforschungsprogramm der EU bzw. 4 Grundlagen-Projekte mit Unterstützung des European Research Council. Die Beteiligung am Photovoltaikprogramm der IEA (IA PVPS) wurde im Berichtsjahr fortgesetzt, sowohl auf der Projektebene als auch im Executive Committee (ExCo) [14]. Im Berichtsjahr begann die 5. Phase dieses Programms mit einer neu definierten Strategie. 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 2012 [15] ausgearbeitet. Auf dieser Grundlage wurde die 18. Ausgabe des jährlichen internationalen Berichtes (Trends Report) über die Marktentwicklung der Photovoltaik in den IEA-Ländern erstellt [16]. Im Rahmen der interdepartementalen (SECO, DEZA, BAFU, BFE) REPIC Plattform zur Förderung der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz in der internationalen Zusammenarbeit [17] 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. Treeze 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 aufgearbeitet und publiziert

werden. TNC vertritt die Schweiz im IA PVPS Task 13 zu Performance und Zuverlässigkeit von Photovoltaikanlagen, welcher in der Schweiz durch den IEA PVPS Pool (aktuell getragen von ewz., Gesellschaft Mont Soleil und Swissolar) gefördert wird. Im Berichtsjahr hat TNC eine internationale Datenbank für Photovoltaik fertiggestellt [18], mit welcher weltweit Erfahrungen und Resultate aus vermessenen Photovoltaik Anlagen gesammelt und analysiert werden können. Im Projekt werden zudem Methoden zur Charakterisierung und normierten Messung von Photovoltaikmodulen entwickelt sowie entsprechende Erfahrungen, z. B. zu Fehlverhalten von Modulen, ausgetauscht. In diese Aktivität ist auch das ISAAC SUPSI mit seinen relevanten Aktivitäten eingebunden. Eine Arbeitsgruppe unter Leitung von Planair vertritt die Schweiz im IA PVPS Task 14 zur hohen Penetration von PV-Anlagen in elektrischen Netzen. Auch dieser Schweizer Beitrag wird durch den IEA PVPS Pool unterstützt. Das Projekt gewinnt aufgrund des starken Wachstums der Photovoltaik in einzelnen Ländern bzw. Regionen rasch an Bedeutung und stösst damit auf grosses internationales Interesse. Erste Projektergebnisse betreffen hier Vorhersagemodelle und Fallstudien zu hoher Photovoltaik Netzpenetration [19]. Das Unternehmen Meteotest und die Groupe Energie an der Universität Genf erbringen zusammen den Schweizer Beitrag zum Task 46 Solar resource assessment and forecasting. Task 46 ist Bestandteil des IA Solare Wärme und Kälte (SHC) der IEA [20], 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 werden die Auswirkungen von Strahlungsänderungen und Vorhersagen auf die solare Energieproduktion bei hoher Dichte von Solaranlagen sowie die Verfügbarmachung der entsprechenden Daten bearbeitet.

Basler & Hofmann vertritt die Schweiz im Auftrag von Swis-solar im TC 82 der IEC zu Photovoltaik-Normen [21]. Das neue EU-Projekt SOLAR-ERA.NET [22] nahm im Berichtsjahr seine Aktivitäten voll auf. Es umfasst nebst der Photovoltaik auch die konzentrierende solarthermische Energie und soll die Umsetzung der Solar Europe Industry Initiative unterstützen. Das Projekt führt rund 20 nationale und regionale Forschungs- und Innovationsprogramme zusammen und

wird durch die Schweiz (Programmleitung Photovoltaik) koordiniert. Im Berichtsjahr wurde eine erste gemeinsame Ausschreibung durchgeführt, welche auf grosses Interesse stiess. Die entsprechenden Projekte sollen im Verlauf von 2014 konkret beginnen. Die Schweiz ist zudem in der Europäischen Photovoltaik-Technologie-Plattform sowohl im Steuerungsausschuss, als auch in der Mirror Group vertreten [23].

Referenzen

- [1] Innovationsallianz Photovoltaik (www.innovationsallianz-photovoltaik.de).
- [2] SunShot Vision Study, US DOE (2012).
- [3] Fukushima Renewable Energy Institute, AIST (<http://www.fukushima.aist.go.jp/en/>).
- [4] PV Implementation Plan 2013 – 2015, Solar Europe Industry Initiative SEII/EPIA(2013).
- [5] IEA Technology Roadmap Solar photovoltaic energy, OECD/IEA (2010).
- [6] IEA Medium-Term Renewable Energy Market Report, OECD/IEA (2013).
- [7] Grundlagen für die Energiestrategie des Bundesrates, BFE (2011).
- [8] Konzept der Energieforschung des Bundes 2013 bis 2016, CORE/BFE (2012).
- [9] Energieforschungsstatistik 2010–2011, BFE (2013).
- [10] J. Burschka et al., Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells, *Nature*, Vol. 499, 316 (2013).
- [11] <https://www.news.admin.ch/message/index.html?lang=de&msg-id=50064>. (besucht am 26.02.2014)
- [12] J. Geissbühler et al., Silicon heterojunction solar cells with copperplated grid electrodes: Status and comparison with silver thick-film techniques, *IEEE Journal of Photovoltaics*, in press
- [13] Ch. Bucher, Wie viel Solarstrom verträgt das Niederspannungsnetz? Resultate aus hochauflösenden Lastflusssimulationen, *VSE-Bulletin* 3, 37 (2014)
- [14] IEA Implementing Agreement for a co-operative programme on photovoltaic power systems, IEA PVPS (www.iea-pvps.org).
- [15] National Survey Report of PV Power Applications in Switzerland 2012, BFE (2013).
- [16] Trends in Photovoltaic Applications, Survey Report of selected IEA countries between 1992 and 2012, IEA-PVPS T1-23 (2013).
- [17] Interdepartementale Plattform zur Förderung der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz in der internationalen Zusammenarbeit, REPIC (www.repic.ch).
- [18] IEA PVPS Task 13 IEA PVPS Task 13 Performance Database (www.iea-pvps.org).
- [19] Photovoltaic and Solar Forecasting: State of the Art, IEA PVPS T14‐01 (2013).
- [20] IEA SHC Task 46 Solar Resource Assessment and Forecasting (<http://task46.iea-shc.org/>).
- [21] IEC TC 82 Solar photovoltaic energy systems (www.iec.ch).
- [22] ERA-NET on Solar Electricity for the Implementation of the Solar Europe Industry Initiative (www.solar-era.net).
- [23] European Photovoltaic Technology Platform (www.eupvplatform.org).

Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(* IEA-Klassifikation)

- THIN LAYERS FOR HIGH-EFFICIENCY SILICON SOLAR CELLS THROUGH IDEAL COUPLING OF INDIVIDUAL COMPONENTS**

Lead: EPFL STI IMT-NE PV-LAB

Contact: Ballif Christophe christophe.ballif@epfl.ch

Abstract: The project focuses on the increase in efficiency of thin film silicon devices, and also contributes to developments that can be implemented for high efficiency crystalline heterojunction solar cells. The final objective is to bring new findings to the research field that provides new routes for increased module efficiencies for similar costs, without impacting the reliability.

R+D (1a) 3.1.2*

Funding: BFE

Period: 2012–2014
- DEMONSTRATION OF HIGH PERFORMANCE PROCESSES AND EQUIPMENTS FOR THIN FILM SILICON PHOTOVOLTAIC MODULES PRODUCED WITH LOWER ENVIRONMENTAL IMPACT (PEPPER)**

Lead: EPFL STI IMT-NE PV-LAB

Contact: Ballif Christophe christophe.ballif@epfl.ch

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.

R+D (1a) 3.1.2

Funding: EU

Period: 2010–2013
- ACCELERATED DEVELOPMENT AND PROTOTYPING OF NANO-TECHNOLOGY-BASED HIGH-EFFICIENCY THIN-FILM SILICON SOLAR MODULES (FAST TRACK)**

Lead: EPFL STI IMT-NE PV-LAB

Contact: Ballif Christophe christophe.ballif@epfl.ch

Abstract: The main project goals are the development of innovative photovoltaic cell processes and their up-scaling to the level of pilot lines. These goals should be reached in terms of stable device efficiency higher than 14% and a prototype module with stable efficiency higher than 12%.

R+D (1a) 3.1.2

Funding: EU

Period: 2012–2015
- INTERFACE TEXTURING FOR LIGHT TRAPPING IN SOLAR CELLS**

Lead: EPFL STI IMT-NE PV-LAB

Contact: Ballif Christophe christophe.ballif@epfl.ch

Abstract: The project is devoted to a fundamental understanding of the light trapping process in solar cells.

R+D (1a) 3.1.2

Funding: SNF

Period: 2009–2013
- HIGH RATE DEPOSITION OF MICROCRYSTALLINE SILICON FOR SOLAR CELL APPLICATIONS BY MEANS OF A RESONANT NETWORK RF ANTENNA**

Lead: EPFL - CRPP

Contact: Tran Minh Quang minhquang.tran@epfl.ch

Abstract: To change from the traditional capacitively coupled plasma reactor to inductively coupled devices might reduce the cost and increase the efficiency of thin film solar cells. In the present project a plasma box reactor equipped with a resonant network RF antenna will be constructed and, as main topic, PV related material will be aimed for under these conditions. The project will lead to a concept and design of a novel PECVD production reactor.

R+D (1a) 3.1.2

Funding: KTI

Period: 2013–2015
- HIGH EFFICIENCY TRIPLE JUNCTION THIN FILM SILICON SOLAR CELLS IMPLEMENTING AMORPHOUS SILICON GERMANIUM ALLOY (TRIGGER)**

Lead: EPFL STI IMT-NE PV-LAB

Contact: Ballif Christophe christophe.ballif@epfl.ch

Abstract: Advanced triple junction solar cell will be developed to further enhance the conversion efficiency of thin film silicon solar cells. High quality silicon germanium alloys will be synthesized on textured substrates, and implemented in the triple junction solar cells. Record devices will be developed on state-of-the-art substrates as well as on advanced electrodes.

R+D (1a) 3.1.2

Funding: KTI

Period: 2012–2015
- NOVEL REFLECTIVE LAYER ALLOWING A CONTROL OF THE QUALITY OF THE MICROCRYSTALLINE SOLAR CELL IN THIN FILM MICROMORPH DEVICES**

Lead: HE-ARC

Contact: Keppner Herbert herbert.keppner@he-arc.ch

Abstract: The project aims to create an innovative smoothening reflective layer SRL that will be inserted between the top and bottom cell of a Micromorph tandem device deposited on as-grown thick highly textured LPCVD ZnO layer.

R+D (1a) 3.1.2

Funding: KTI

Period: 2011–2013

- **HISOCEL: IMPROVEMENT OF FRONT CONTACTS MORPHOLOGY FOR ENHANCEMENT OF EFFICIENCY IN THIN FILM SILICON SOLAR CELLS** R+D (1a) 3.1.2
- Lead: CSEM Funding: KTI
- Contact: Dadras Massoud massoud.dadras@csem.ch Period: 2012–2013
- Abstract: The aim of this project is to improve the front contacts of tandem microcrystalline & amorphous silicon solar cells to reach an efficiency of 13% by producing denser and nearly defect free silicon layers.
- **CONTROL OF TRAVELING EM WAVES IN LARGE AREA (VHF) PECVD REACTORS FOR THE PRODUCTION OF COMPETITIVE SOLAR PANELS** R+D (1a) 3.1.2
- Lead: NTB Fachhochschule Buchs Funding: KTI
- Contact: Würsch Christoph christoph.wuersch@ntb.ch Period: 2013–2014
- Abstract: In order to increase market share and the economic viability of silicon thin film photovoltaic electricity, the production costs must be reduced and module efficiency improved. This project evaluates alternative concepts for the Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition of silicon films deposited over large areas substrates (>1.4 m²) and sustained at very high frequencies (40–200 MHz).
- **FEASIBILITY STUDY FOR THE ATMOSPHERIC PLASMA JET DEPOSITION OF TRANSPARENT CONDUCTIVE OXIDE FOR THIN-FILM SOLAR CELL APPLICATIONS (JETCO)** R+D (1a) 3.1.2
- Lead: EPFL STI IMT-NE PV-LAB Funding: KTI
- Contact: Wyrsch Nicolas nicolas.wyrsch@unine.ch Period: 2012–2014
- Abstract: This project will investigate the possibility to use the atmospheric arc plasma jet technology developed by Swissnanocoat in order to deposit transparent conductive oxide films to be used as thin film silicon solar cells front electrodes. These films should be characterized by high transmission (above 85%), low resistivity (below 10-3 Ohm cm) and offer the possibility to achieve surface texturation for light scattering in the solar devices.
- **ZWEIDIMENSIONALE NANOSTRUKTUREN FÜR SILIZIUM-SOLARZELLEN** R+D (1a) 3.1.2
- Lead: PSI Paul Scherrer Institut Funding: BFE
- Contact: Gobrecht Jens jens.gobrecht@psi.ch Period: 2008–2012
- Abstract: Optical gratings can be used to increase the light absorption in thin film solar cells. The main goal of the project is the development of efficient numerical methods to solve the Maxwell equations in order to calculate the optical properties of crossed gratings rigorously.
- **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: EU
- Contact: Ballif Christophe christophe.ballif@epfl.ch 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.
- **DEVELOPMENT OF THIN HIGH-EFFICIENCY LARGE-AREA INTERDIGITATED BACK CONTACT SILICON HETEROJUNCTION SOLAR CELLS FOR MASS PRODUCTION (HET-IBC)** R+D (1b) 3.1.2
- Lead: EPFL STI IMT-NE PV-LAB Funding: KTI
- Contact: Ballif Christophe christophe.ballif@epfl.ch Period: 2012–2014
- Abstract: The HET-IBC project aims at the development of an industrial process for the manufacture of high efficiency large-area interdigitated back contact silicon heterojunction solar cells on thin Si wafers. This type of device is amongst the most promising ones for ultra-high conversion efficiencies, low production costs and easier assembly into solar modules.
- **ENTWICKLUNG VON KRISTALLINEN SILIZIUM-SOLARZELLEN UND -MODULEN MIT HÖHEREM WIRKUNGSGRAD UND BESSERER ENERGIEAUSBEUTE (NODHID)** R+D (1b) 3.1.2
- Lead: EPFL STI IMT-NE PV-LAB Funding: Axpo Naturstrom
- Contact: Ballif Christophe christophe.ballif@epfl.ch Period: 2011–2013
- Abstract: Entwicklung von kristallinen Silizium-Solarzellen und -modulen mit höherem Wirkungsgrad und besserer Energieausbeute

- **CIGS MULTI-STAGE INLINE DEMONSTRATION** P+D (1c) 3.1.2
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | EMPA Dübendorf | Funding: | BE |
| Contact: | Tiwari Ayodhya N. ayodhya.tiwari@empa.ch | Period: | 2011–2013 |
- Abstract: The goal of the project is to develop and demonstrate a CIGS deposition system where the innovative multi-stage co-evaporation process developed in the lab for small area substrates in static positions can be scaled up for coating on in-line moving large area substrates.
- **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: | 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.
- **ROLL-TO-ROLL MANUFACTURING OF HIGH EFFICIENCY AND LOW COST FLEXIBLE CIGS SOLAR MODULES (R2R-CIGS)** R+D (1c) 3.1.2
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | EMPA Dübendorf | Funding: | EU |
| Contact: | Tiwari Ayodhya N. ayodhya.tiwari@empa.ch | Period: | 2012–2015 |
- Abstract: The aim of R2R-CIGS is to develop efficient flexible solar modules by implementing innovative cost-effective processes such that production costs below 0.5€/Wp can be achieved in large volume factories with annual capacity of 500MWp in future.
- **FLEXIBLE PHOTOVOLTAIC CELLS OPTIMIZED FOR HIGH CONVERSION EFFICIENCY FROM INDOOR TO OUTDOOR ILLUMINATION CONDITIONS, USED IN NEW WRISTWATCH PRODUCTS** R+D (1c) 3.1.2
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | EMPA Dübendorf | Funding: | KTI |
| Contact: | Tiwari Ayodhya N. ayodhya.tiwari@empa.ch | Period: | 2013–2015 |
- Abstract: This project aims at developing flexible CIGS photovoltaic (PV) cells optimized for high conversion efficiency from low (indoor) to high (outdoor) illumination intensity. The project includes the development of CIGS PV dials for classic wristwatches, as well as a second generation for solar wristwatches integrating highly flexible CIGS PV cells in the bracelet with conversion efficiencies above 8 % under low illumination intensity.
- **PERFORMANCE STABILITY OF FLEXIBLE CIGS SOLAR MODULES** R+D (1c) 3.1.2
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | EMPA Dübendorf | Funding: | KTI |
| Contact: | Tiwari Ayodhya N. ayodhya.tiwari@empa.ch | Period: | 2013–2015 |
- Abstract: Development of flexible CIGS solar modules for high performance and low cost are essential for diverse applications. Long term performance evaluation of encapsulated solar modules through accelerated tests and analyses of degradation and failure mechanisms on microscopic and macroscopic levels are necessary for proving improved long term performance stability and enabling market entry readiness.
- **ALL LASER SCRIBING OF CIGS PHOTOVOLTAIC PANELS ON RIGID SUBSTRATES** R+D (1c) 3.1.2
- | | | | |
|----------|--------------------------------------|----------|-----------|
| Lead: | Berner Fachhochschule HTI | Funding: | KTI |
| Contact: | Romano Valerio valerio.romano@bfh.ch | Period: | 2012–2013 |
- Abstract: In the whole manufacturing process the laser scribing step is one of the key processes to produce high efficient solar modules. With narrow scribing line widths and high precision processing tools the non effective zone on solar panels (dead zone) can be reduced to a minimum. Within this project an industrial scribing machine will be developed for an all laser scribing process for CIGS.
- **TRAINING FOR SUSTAINABLE LOW COST PV TECHNOLOGIES: DEVELOPMENT OF KESTERITE BASED EFFICIENT SOLAR CELLS** R+D (1c) 3.1.2
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | EMPA | Funding: | EU |
| Contact: | Romanyuk Yaroslav Yaroslav.Romanyuk@empa.ch | Period: | 2012–2016 |
- Abstract: The project proposes the development of new technologies compatible with the cost, efficiency, sustainability and mass production requirements that are needed to become a reliable and future alternative to conventional non renewable energy sources. With this objective in mind, the project will focus on the development of kesterite based solar cells.

- **DEVELOPMENT AND SCALE-UP OF NANOSTRUCTURED BASED MATERIALS AND PROCESSES FOR LOW COST HIGH EFFICIENCY CHALCOGENIDE BASED PHOTOVOLTAICS (SCALENANO)** R+D (1c) 3.1.2
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | SUPSI ISAAC | Funding: | EU |
| Contact: | Virtuani Alessandro
alessandro.virtuani@supsi.ch | Period: | 2012–2015 |
- Abstract: This project will exploit the potential of chalcogenide based thin film photovoltaic technologies for the development and scale-up of new processes based on nano-structured materials for the production of high efficiency and low cost photovoltaic devices and modules compatible with mass production requirements.
- **DURSOL - EXPLORING AND IMPROVING DURABILITY OF THIN FILM SOLAR CELLS** R+D (1d) 3.1.2
- | | | | |
|----------|--------------------------------------|----------|-----------|
| Lead: | EMPA | Funding: | diverse |
| Contact: | Nüesch Frank
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.
- **DYE SENSITISED NANOCRYSTALLINE SOLAR CELLS** R+D (1d) 3.1.2
- | | | | |
|----------|--|----------|---------|
| Lead: | EPFL ISIC-LPI | Funding: | diverse |
| Contact: | Graetzel Michael
michael.graetzel@epfl.ch | Period: | 2000- |
- Abstract: Key activities concerning dye sensitised nanocrystalline solar cells at EPFL.
- **ESCORT - EFFICIENT SOLAR CELLS BASED ON ORGANIC AND HYBRID TECHNOLOGY** R+D (1d) 3.1.2
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | EPFL ISIC-LPI | Funding: | EU |
| Contact: | Graetzel Michael
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: | EU |
| Contact: | Graetzel Michael
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.
- **SANS - SENSITIZER ACTIVATED NANOSTRUCTURED SOLAR CELLS** R+D (1d) 3.1.2
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | EPFL ISIC-LPI | Funding: | EU |
| Contact: | Graetzel Michael
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.
- **FARBSTOFF-SOLARZELLEN AUF SEFAR PRÄZISIONSGEWEBEN** R+D (1d) 3.1.2
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | EPFL ISIC-LPI | Funding: | KTI |
| Contact: | Graetzel Michael
michael.graetzel@epfl.ch | Period: | 2012–2014 |
- Abstract: The project aims to enhance market readiness of dye sensitized solar cells (DSC) by developing electrodes based on transparent and conductive precision fabrics.

- **NOVEL ENVIRONMENTALLY FRIENDLY SOLUTION PROCESSES NANOMATERIALS FOR PANCHROMATIC SOLAR CELLS** R+D (1d) 3.1.2
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | EPFL ISIC-LPI | Funding: | EU |
| Contact: | Graetzel Michael michael.graetzel@epfl.ch | Period: | 2013–2015 |
- Abstract: In this project a disruptive approach is proposed for dye-sensitized solar cells (DSSC); to replace titania with a novel electron accepting nanoporous semiconductor with a bandgap suitable for optimized solar harnessing and a very high absorption coefficient to allow total light absorption within 2 μm across its absorption spectrum.
- **ORDERED INORGANIC-ORGANIC HYBRIDS USING IONIC LIQUIDS FOR EMERGING APPLICATIONS (ORION)** R+D (1d) 3.1.2
- | | | | |
|----------|-------------------------------------|----------|-----------|
| Lead: | Solaronix SA | Funding: | EU |
| Contact: | Meyer Toby 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.
- **FIRST PRINCIPLES SIMULATIONS OF THE ELECTRON DYNAMICS IN DYE SENSITIZED SOLAR CELLS** R+D (1d) 3.1.2
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | ETH Zürich | Funding: | SNF |
| Contact: | VandeVondele Joost joost.vandevondele@mat.ethz.ch | Period: | 2011–2016 |
- Abstract: The research focus is on the development of new methods to enable ab initio molecular dynamics simulations of complex systems with modern density functional theory. New methods, implemented for massively parallel computers, are applied to a wide range of systems such as radicals in clusters and the condensed phase, surface physics, and interfacial systems such as dye sensitized solar cells.
- **MESOLIGHT - MESOSCOPIC JUNCTIONS FOR LIGHT ENERGY HARVESTING AND CONVERSION** R+D (1d) 3.1.2
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | EPFL | Funding: | ERC |
| Contact: | Graetzel Michael michael.graetzel@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.
- **UPCON - ULTRA-PURE NANOWIRE HETEROSTRUCTURES AND ENERGY CONVERSION** R+D (1d) 3.1.2
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | EPFL | Funding: | ERC |
| Contact: | Anna Foncuberta i Morral anna.foncuberta-morral@epfl.ch | Period: | 2010–2014 |
- Abstract: This project is devoted to the synthesis of ultra pure semiconductor nanowire heterostructures for energy conversion applications in the photovoltaic domain.
- **TRANSPARENT ELECTRODES FOR LARGE AREA, LARGE SCALE PRODUCTION OF ORGANIC OPTOELECTRONIC DEVICES** R+D (1d) 3.1.2
- | | | | |
|----------|-----------------------------------|----------|-----------|
| Lead: | EMPA Dübendorf | Funding: | EU |
| Contact: | Nüesch Frank frank.nuesch@empa.ch | Period: | 2011–2015 |
- Abstract: TREASURES will demonstrate the production of large area organic electronics using high throughput manufacturing technologies based on roll-to-roll (R2R) wet deposition processes.
- **SUSTAINABLE NOVEL FLEXIBLE ORGANIC WATTS EFFICIENTLY RELIABLE** R+D (1d) 3.1.2
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | CSEM Muttenz | Funding: | EU |
| Contact: | Nisato Giovanni giovanni.nisato@csem.ch | Period: | 2011–2015 |
- Abstract: The project addresses the current challenges of organic photovoltaics (OPV) which reside in the combination to increase efficiencies to 8-10% (module level), increase expected lifetime up to 20 years and decrease production costs to 0.7 Eur/Wp, while taking into account the environmental impact and footprint.

- **DEVELOPMENT OF LUMINESCENT SOLAR CONCENTRATORS** R+D (1e) 3.1.2
- Lead: ZHAW IEFE Funding: diverse
- Contact: Brühwiler Dominik dominik.bruehwiler@zhaw.ch Period: 2011–2015
- Abstract: Das hier untersuchte Konzept von Lumineszenzkonzentratoren baut auf der Grundlage der Förster Resonance Energy Transfer (FRET) Frequenzverschiebung auf. Hierzu werden geeignete Materialien mit den gewünschten Eigenschaften entwickelt.
- **LUMINESCENT SOLAR CONCENTRATORS - GEWINNUNG ELEKTRISCHER ENERGIE AUS TÖNUNGEN FÜR FENSTERSCHEIBEN UND FASSADENELEMENTE** R+D (1e) 3.1.2
- Lead: Optical Additives GmbH Funding: BFE
- Contact: Andreas Kunzmann andreas.kunzmann@optical-additives.com Period: 2013–2015
- Abstract: Mit dem Projekt soll das Konzept des Lumineszenzkonzentrators für die Bedingungen in Aussenanwendungen, insbesondere in Fenstern und Fassaden, weiter entwickelt werden. Dabei stehen lichtstabile Farbstoff-Zeolithen im Vordergrund, welche eine angemessene Langzeitstabilität erreichen.
- **OPTIMIZED METHODS FOR INCREASED PERFORMANCE PHOTOVOLTAIC CELLS BY NANOPARTICLES INTEGRATION (OPTINOGEN)** R+D (1e) 3.1.2
- Lead: EIA-FR Funding: Sciex
- Contact: Niederhaeuser Elena Lavinia Elena-Lavinia.Niederhaeuser@hefr.ch Period: 2011–2013
- Abstract: The project targets the optimization and the development of new improved methods for enhancing of the overall performance and stability of nanocomposite solar cells (NSC) by introducing new physical principles.
- **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: 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.
- **DIAMOND: DISCOVERY AND INSIGHT WITH ADVANCED MODELS OF NANOSCALE DIMENSIONS** R+D (1e) 3.1.2
- Lead: ETH Zürich Funding: ERC
- Contact: VandeVondele Joost joost.vandevondele@mat.ethz.ch Period: 2011–2016
- Abstract: In this project, it is proposed to advance the current state of the art in atomistic modeling of complex systems. The goals are providing and establishing new tools that will allow for the description of large multi-component/multi-phase systems at experimental temperature and pressure with predictive power and controlled error.
- **LIGHT-IN, LIGHT-OUT: CHEMISTRY FOR SUSTAINABLE ENERGY TECHNOLOGIES (LILO)** R+D (1e) 3.1.2
- Lead: Uni Basel, Institut für Anorganische Chemie Funding: ERC
- Contact: Constable Edwin Charles Edwin.Constable@unibas.ch Period: 2011–2016
- Abstract: The project is concerned with a coordinated approach to the development of novel chemical strategies for light harvesting by photovoltaic cells and light generation using light emitting electrochemical cells.
- **NOVEL PRODUCTION EQUIPMENT FOR NOVEL PHOTOVOLTAIC MODULE DESIGNS USING NEW ENCAPSULANTS** R+D (2a) 3.1.2
- Lead: EPFL STI IMT-NE PV-LAB Funding: KTI
- Contact: Ballif Christophe christophe.ballif@epfl.ch Period: 2012–2014
- Abstract: The main target of this project is the development and the market launch of novel laminating lines optimized for the production of PV modules based on novel module designs using new encapsulants.

- SMARTWIRE - DEVELOPMENT OF MULTI-WIRE MODULE DESIGN TECHNOLOGY AND PRODUCTION EQUIPMENT**

Lead: CSEM

Contact: Despeisse Matthieu matthieu.despeisse@csem.ch

Abstract: The SmartWire project goals are the development of a new generation of crystalline silicon (c-Si) solar cells interconnection technology, the design of an associated module technology and the prototyping of dedicated high-end production equipment, which can allow for modules with increased efficiency (> 5 % relative gain) and reduced manufacturing cost (> 10 % relative reduction) for high efficiency c-Si cell technologies.

R+D (2a) 3.1.2

Funding: KTI

Period: 2013–2015
- UNIQUE AND INNOVATIVE SOLUTION OF THIN SILICON FILMS MODULES BUILDING INTEGRATION (ARCHINSOLAR)**

Lead: CSEM

Contact: Perret-Aebi Laure-Emmanuelle laure-emmanuelle.perret@csem.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
- CONSTRUCT PV - CONSTRUCTING BUILDINGS WITH CUSTOMIZABLE SIZE PV MODULES INTEGRATED IN THE OPAQUE PART OF THE BUILDING SKIN**

Lead: SUPSI ISAAC

Contact: Frontini Francesco francesco.frontini@supsi.ch

Abstract: Construct-PV will develop and demonstrate customizable, efficient, and low cost BIPV for opaque surfaces of buildings. Opaque surfaces are selected because they represent massive wide-area spaces of untapped harvesting potential across Europe. To develop highly efficient systems, most promising PV technologies have been selected, i.e. back contact cells fabricated with MWT technology.

R+D (2a) 3.1.2

Funding: EU

Period: 2013–2017
- LOW-COST PV BITUMINOUS-MODIFIED ROOFING MEMBRANE WITH FULL INTEGRATION OF HIGH EFFICIENCY FLEXIBLE THIN-FILM SILICON PV MODULES (PV-GUM)**

Lead: nolax AG

Contact: David Koch david.koch@nolax.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: EU

Period: 2010–2013
- PRODUKTENTWICKLUNG SOLAR DEVICE**

Lead: NTB

Contact: Gutsche Martin martin.gutsche@ntb.ch

Abstract: In diesem Projekt wird die Technologie der hocheffizienten textilen Photovoltaik bis zur Produktionsreife weiterentwickelt. Diese Produktentwicklung wird die Markteinführung von textiler Photovoltaik beschleunigen.

R+D (2a) 3.1.2

Funding: KTI

Period: 2010–2012
- OPTIMIZATION OF THIN FILM MODULE TESTING AND PV MODULE ENERGY RATING AT SUPSI**

Lead: SUPSI ISAAC

Contact: Friesen Gabi gabi.friesen@supsi.ch

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.

R+D (2c) 3.1.2

Funding: BFE

Period: 2011–2014
- TOOLS FOR ENHANCED PHOTOVOLTAIC SYSTEM PERFORMANCE**

Lead: SUPSI ISAAC

Contact: Chianese Domenico domenico.chianese@supsi.ch

Abstract: For a continued decrease of levelised costs of energy from photovoltaics (PV), the prices of PV system components have to be further decreased while performance, functionality, reliability and lifetime on the component and system level need to be increased. The Performance Plus project focuses on the PV system rather than on the component level. The main idea of the project is to optimise the system as a whole rather than the separate components.

R+D (2c) 3.1.2

Funding: EU

Period: 2012–2015

- **ENTWICKLUNG EINES TESTPRÜFSTANDES ZUR ÜBERPRÜFUNG DES EINFLUSSES VON WIND- UND SCHNEELASTEN AUF SOLAR THERMISCHE ODER PHOTOVOLTAISCHE ANLAGENSYSTEME** R+D (2c) 3.1.2
- Lead: HSR Funding: KTI
- Contact: Bohren Andreas andreas.bohren@solarenergy.ch Period: 2012–2013
- Abstract: Die in den letzten Jahren gemachten Erfahrungen mit Sonnenenergiesystemen auf Schrägdächern haben gezeigt, dass die in den Normen beschriebenen Wind- und Schneelasten nur bedingt auf solche Anlagen anwendbar sind. Um die Widerstandsfähigkeit solcher Anlagen beurteilen zu können, ist ein Teststand zur unabhängigen Aufbringung von Flächenlasten und Parallellasten (Hangantrieb von Schneelasten) nötig.
- **CARACTÉRISATION DES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES À COLORANT DE L'ENTREPRISE G2E** P+D (2d) 3.1.2
- Lead: HEIG-VD Funding: BFE
- Contact: Affolter Jean-François jean-francois.affolter@heig-vd.ch Period: 2012–2014
- Abstract: A solar simulator for measuring the performance of solar panels based on dye sensitised solar cells is going to be realized. The panels will be installed in real conditions and monitored over a complete year, in order to characterize and have the necessary perspective on this new technology and product.
- **PHOTOVOLTAÏK IM VERBUND MIT DÄMMSTOFF FOAMGLAS** P+D (2d) 3.1.2
- Lead: Basler & Hofmann AG Funding: BFE
- Contact: Eric Langenskiöld eric.langenskiold@baslerhofmann.ch Period: 2010–2013
- Abstract: The scope of this project is the development and realisation of building integrated photovoltaic (BIPV) including the feature of thermal insulation. A pilot plant with modules combined of photovoltaic modules and Foamglas insulation shall be build.
- **SOLAR BRICK: INNOVATIVE PHOTOVOLTAIC AND THERMAL INSULATING BUILDING MATERIALS** R+D (2d) 3.1.2
- Lead: SUPSI ISAAC Funding: KTI
- Contact: Rudel Roman roman.rudel@supsi.ch Period: 2011–2013
- Abstract: The goal of this project is to develop a photovoltaic and thermal insulating building material and in parallel to plan and construct a prototype installation including said material.
- **NEUARTIGES LEICHTBAU PHOTOVOLTAÏK SYSTEM, DAS DIE DOPPELNUTZUNG VON FLÄCHEN IM URBANEN BEREICH FÜR DIE ERZEUGUNG VON ERNEUERBARER ENERGIE ERMÖGLICHT** R+D (2d) 3.1.2
- Lead: ZHAW IEFÉ Funding: KTI
- Contact: Baumgartner Franz franz.baumgartner@zhaw.ch Period: 2013–2014
- Abstract: Entwicklung eines Leichtbau-Solkraftwerks mit einerseits neuartigen Meteo Algorithmen zur Sicherstellung der Robustheit und Minimierung der Ertragsverluste und andererseits Machbarkeitsabklärungen (einschliesslich Konzeptstudie) für ein Leichtbau-Tragwerk unter Verwendung von Faserverbundkunststoff Hybrid-Bauelementen.
- **PRODUKTENTWICKLUNG PV/T SOLARKOLLEKTOR MIT INSTALLATIONSSYSTEM** R+D (2d) 3.1.2
- Lead: Hochschule für Technik Rapperswil HSR Funding: KTI
- Contact: Rommel Matthias matthias.rommel@solarenergy.ch Period: 2011–2014
- Abstract: Das Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines ungedeckten Niedertemperatur PV/T-Kollektors und eines dazu optimierten Installationssystems. Ausgangspunkt für die Entwicklung sind Standard PV-Module on 3S für den Kollektor sowie auf dem Markt erhältliche Komponenten für das Installationssystem.
- **PV FASSADEN - ENTWICKLUNG UND PRÜFUNG VON VORGEHÄNGTEN HINTERLÜFTETEN FASSADEN AUS PV MODULEN UND PERFORIERTEM METALL** R+D (2d) 3.1.2
- Lead: HTA Luzern Funding: KTI
- Contact: Wittkopf Stephen stephen.wittkopf@hslu.ch Period: 2013–2015
- Abstract: Im Rahmen dieses Projekts werden neuartige hinterlüftete Photovoltaik Fassaden Module (PV-FM) entworfen, hergestellt und getestet. Sie bestehen aus einer Kombination von PV-Modulen und Lochblechen zur Verwendung in Fassaden und Steildächern. Dabei werden architektonische, energetische und konstruktive Aspekte berücksichtigt, die einzeln und im Zusammenspiel untereinander optimiert werden.

- LANGZEIT-MESSUNG VON PV-ANLAGEN**

Lead:	BFH Burgdorf	Funding:	Diverse
Contact:	Muntwyler Urs urs.muntwyler@bfh.ch	Period:	2012–2016

Abstract: Das PV Labor führt Langzeit-Messungen an unterschiedlichen PV-Anlagen durch und dokumentiert damit das längerfristige Verhalten dieser Anlagen.

R+D (3) 3.1.2
- PRÜFSTAND FÜR MULTISTRING SOLARWECHSELRICHTER**

Lead:	BFH Burgdorf	Funding:	BFE
Contact:	Muntwyler Urs urs.muntwyler@bfh.ch	Period:	2013–2015

Abstract: The goal of this project is the development and the construction of a low EMI test bench for research and testing of multistring PV inverters. The test bench shall be able to simulate three independent sub arrays with open circuit voltage of up to 1'000V and maximum power of 11.52kW each. The thermal stability of the generated IV characteristics shall be sufficiently high to allow measurements of the inverter's MPP tracking accuracy.

R+D (3) 3.1.2
- PHOTOVOLTAÏQUE ET NEIGE: HORIZON DES SOLUTIONS POUR L'INSTALLATION SUR LES TOITS DANS LES RÉGIONS ENNEIGÉES**

Lead:	Planair SA	Funding:	BFE
Contact:	Perret Lionel lionel.perret@planair.ch	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.

P+D (3) 3.1.2
- DISTRIBUTION GRID ANALYSIS AND SIMULATION WITH PHOTOVOLTAICS (DIGASP)**

Lead:	Basler & Hofmann AG	Funding:	BFE
Contact:	Bucher Christof christof.bucher@baslerhofmann.ch	Period:	2010–2013

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.

R+D (3) 3.1.2
- DIGITALER LICHTBOGENDETEKTOR FÜR PV-WECHSELRICHTER**

Lead:	BFH Burgdorf	Funding:	KTI
Contact:	Muntwyler Urs urs.muntwyler@bfh.ch	Period:	2012

Abstract: In diesem Projekt besteht die Innovation in der Entwicklung eines digitalen Lichtbogen-Detektionsalgorithmus und der Industrialisierung eines Lichtbogendetektors für dessen Integration in einen Wechselrichter.

R+D (3) 3.1.2
- HIGH CONCENTRATION PHOTOVOLTAIC THERMAL SYSTEM USING LOW-COST INNOVATIVE MATERIALS**

Lead:	NTB Fachhochschule Buchs	Funding:	KTI
Contact:	André Bernard andre.bernard@ntb.ch	Period:	2013–2016

Abstract: The present project aims at the development of a high efficiency cost-competitive High Concentration PhotoVoltaic Thermal (HCPVT) system able to convert 80% of the collected solar energy in useful electrical and thermal energy at a Levelized Cost of Energy (LCOE) between 0.07 and 0.1 \$/KWh when industrialised.

R+D (3) 3.1.2
- DEICING VON PHOTOVOLTAIKANLAGEN**

Lead:	NTB Fachhochschule Buchs	Funding:	KTI
Contact:	Egli Roland roland.egli@ntb.ch	Period:	2013–2014

Abstract: Die Firma Hassler ist Spezialist für Solarenergie im alpinen Raum. Wegen der erhöhten Strahlungsintensität ist Photovoltaik in den Alpen sehr attraktiv. Durch das Einschneien der Anlagen kann jedoch nicht das gesamte Potential ausgeschöpft werden. Mit der Entwicklung einer Lösung zur Schneentfernung von Photovoltaikanlagen kann der Jahresertrag wesentlich erhöht werden.

R+D (3) 3.1.2

- **MOBILES PV MESSSYSTEM** P+D (3) 3.1.2
- | | | | |
|----------|--|----------|---------|
| Lead: | ZHAW IEFE | Funding: | diverse |
| Contact: | Baumgartner Franz franz.baumgartner@zhaw.ch | 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.
- **PV TESTANLAGE DIETIKON** P+D (3) 3.1.2
- | | | | |
|----------|--|----------|---------|
| Lead: | ZHAW IEFE | Funding: | diverse |
| Contact: | Baumgartner Franz franz.baumgartner@zhaw.ch | Period: | 0 |
- Abstract: Die Arbeiten an der PV Testanlage EKZ Dietikon wurden weitergeführt. Dabei wurde in diesem Jahr der Fokus auf die DC und AC Performance der Inverter, die Gewichtungsfaktoren des Euro-Wirkungsgrades, aber auch den Wirkungsgradverlaufes an klaren und bewölkten Tagen für die fünf unterschiedlichen PV Modultechnologien gelegt.
- **PV-CARPORTS PUBLIKUMSWIRKSAME PHOTOVOLTAIKANLAGE** P+D (3) 3.1.2
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | ZHAW IEFE | Funding: | diverse |
| Contact: | Baumgartner Franz franz.baumgartner@zhaw.ch | Period: | 2011–2012 |
- Abstract: Es wird die Nutzung von mit Photovoltaik überdachten Parkplätzen im Zusammenhang mit der Elektromobilität untersucht. Anhand von konkreten Fallstudien wird das Potenzial dieser Anwendung abgeschätzt.
- **POTENTIAL VON PHOTOVOLTAIK AN SCHALLSCHUTZWÄNDEN ENTLANG DER NATIONALSTRASSEN (ASTRA)** R+D (4) 3.1.2
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | TNC Consulting AG | Funding: | ASTRA |
| Contact: | Nordmann Thomas nordmann@tnc.ch | Period: | 2010–2013 |
- Abstract: Das Projekt prüft das Anwendungspotential der Kombination von Photovoltaik und Schallschutz ausgehend vom kurz- und mittelfristigen Realisierungsumfang bestehender und neuer Schallschutzvorhaben in der Schweiz entlang von Nationalstrassen.
- **MACHBARKEITSTUDIE: MODULARES SOLARINSELKONZEPT „MONTAVENT LOTUS“ ZUR ERZEUGUNG VON SOLARSTROM BEI HÖHERER SPEZIFISCHER ENERGIEAUSBEUTE** R+D (4) 3.1.2
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | NTB Fachhochschule Buchs | Funding: | KTI |
| Contact: | Stöck Max stoeck@ntb.ch | Period: | 2012–2013 |
- Abstract: Unter Einbezug von Standard PV-Systemkomponenten werden auf geeigneten Gewässern mit montavent LOTUS weltweit erste Solarinseln als grosse Solarkraftwerke realisiert. Die Solarinseln können dem Sonnenstand einfach nachgeführt werden. Die Anforderungen des Umwelt- und Landschaftsschutzes und des Wasserbaus werden geklärt und die technische Machbarkeit untersucht.
- **LITERATURRECHERCHE ZU DEN EMISSIONEN VON NICHTIONISIERENDER STRAHLUNG VON PHOTOVOLTAIKANLAGEN** R+D (4) 3.1.2
- | | | | |
|----------|--------------------------------------|----------|------|
| Lead: | maxwave AG | Funding: | BAFU |
| Contact: | Georg Klaus 0 | Period: | 2013 |
- Abstract: Im Zusammenhang mit Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) wird vermehrt die Frage aufgeworfen, inwiefern PV-Anlagen eine Quelle von nichtionisierender Strahlung (NIS) darstellen und wie stark diese nichtionisierende Strahlung in Räume einwirkt, in denen sich Menschen längere Zeit aufhalten können.
- **SCHWEIZER BEITRAG IEA PVPS TASK 1** R+D (5) 3.1.2
- | | | | |
|----------|--|----------|------|
| Lead: | Nova Energie GmbH | Funding: | BFE |
| Contact: | Hüsser Pius pius.huesser@novaenergie.ch | Period: | 2013 |
- 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 IEA PVPS TASK 12 - 2013 ÖKOBILANZEN VON SOLARSTROM**

R+D (5) 3.1.2

Lead: Treeze GmbH

Funding: BFE

Contact: Frischknecht Rolf

frischknecht@treeze.ch

Period: 2013

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**

R+D (5) 3.1.2

Lead: TNC Consulting AG

Funding: IEA PVPS Pool

Contact: Nordmann Thomas

nordmann@tnc.ch

Period: 2011–2013

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: Renaud Pierre

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.

● **SOLAR RESOURCE ASSESSMENT AND FORECASTING, IEA SOLAR HEATING & COOLING PROGRAMME, TASK 46**

R+D (5) 3.1.2

Lead: Meteotest

Funding: BFE

Contact: Kunz Stefan

stefan.kunz@meteotest.ch

Period: 2011–2016

Abstract: In the framework of IEA Solar Heating and Cooling (SHC) Task 46, Meteotest investigates the possibilities and quality of global radiation forecast, the trend of recent global radiation data and distribution of atmospheric aerosols.

● **NORMENARBEIT FÜR PV SYSTEME**

WTT (5) 3.1.2

Lead: Basler & Hofmann AG

Funding: BFE

Contact: Toggweiler Peter

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.

Solaire industriel à haute température



Page de couverture :

Capteurs SRB Energy C2, installation de Colas SA à Yverdon-les-Bains

Suite à un premier projet réalisé à Genève, Colas SA a souhaité réaliser une seconde installation sur son site d'Yverdon-les-Bains (centre de travaux) pour le maintien en chauffe des cuves de bitume, mais également pour les besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire des locaux. L'installation (champ solaire de 173 m², composée de 35 collecteurs SRB Energy de type C2) a été inaugurée en juillet 2013 et fait l'objet d'une campagne de mesures dans le cadre du programme de recherche Solaire industriel à haute température (source : Colas SA)

Programme de recherche OFEN Solaire industriel à haute température

Rapport de synthèse 2013

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

Afin de garantir la sécurité de l'approvisionnement énergétique, le Conseil fédéral a mis en place la stratégie énergétique 2050. Dans ce cadre, il est nécessaire de développer les énergies renouvelables, tout en trouvant des solutions adaptées pour assurer une production continue, de jour comme de nuit et répondre aux pics de consommation. En effet, les sources d'énergies renouvelables étant très souvent par nature intermittentes, il est important de les valoriser par la maîtrise du stockage et du transport. Ce sont les avantages majeurs qu'offrent les technologies du solaire à haute température, par la production de carburants solaires, ou « solar fuels », (thermochimie solaire), d'énergie thermique (solaire thermique dans les processus industriels) ou d'électricité (centrales solaires thermiques pour la production d'électricité, concentrating solar power (CSP)).

Malgré cela des progrès restent à faire, tant sur le plan scientifique, technique, que sur le plan économique. Les coûts doivent diminuer et la rentabilité est à améliorer. Il est indispensable que les nouvelles énergies renouvelables se développent et coexistent sans concurrence excessive. Chaque technologie a sa raison d'être, en fonction des conditions cadres et des besoins.

Ainsi, même si le développement du CSP ne suit pas la courbe du photovoltaïque (PV), l'intérêt des industriels pour cette technologie subsiste, son évolution demeure intéressante et de

nombreux projets sont actuellement en phase de planification ou de construction. La valeur de l'électricité produite par les CSP est actuellement plus axée sur la qualité de l'énergie produite que sur une volonté absolue de produire de l'électricité à des prix inférieurs au photovoltaïque. En effet, le CSP offre un atout majeur: il permet de fournir de l'électricité en tout temps, grâce au stockage de chaleur (p.ex. par des sels fondus), sans être soumis à la contrainte de la présence constante du soleil. Il se profile donc par la stabilité de l'électricité produite. En règle générale, les centrales solaires thermiques se dotent de systèmes de stockage leur permettant de fonctionner 6 à 8 heures sans soleil. Cas particulier: la tour solaire à héliostats développée par Torresol Energy en Espagne (19,9 MW), qui permet de produire de l'électricité 24h/24, 365 jours par an [1].

Toutefois, quelques sociétés ont rencontré certains problèmes. C'est par exemple le cas du constructeur israélien de centrales CSP Solel Solar: après avoir été rachetée en 2009 par Siemens, cette société est actuellement en phase de fermeture, n'ayant pu réaliser toutes les installations prévues [2]. En effet, bien que le CSP présente de nombreux avantages, la complexité des installations, la durée nécessaire à la construction et les coûts actuellement légèrement supérieurs à d'autres moyens de production d'énergie font que cette technologie se développe plus lentement que prévu. Cepen-

dant, de récentes études montrent que les coûts peuvent se réduire drastiquement dans un avenir proche. En effet, le programme « SunShot » aux Etats-Unis a déjà permis de faire chuter les prix de 0,21 dollar/kWh à 0,13 dollar/kWh entre 2010 et 2013, alors que les objectifs pour 2020 sont fixés à 0,06 dollar/kWh [3].

L'énergie solaire thermique à haute température est un domaine porteur et durable qui nécessite un savoir-faire important. L'implication des universités, écoles polytechniques et écoles d'ingénieurs est fondamentale pour mener à bien les projets de ce programme et pour converger vers un développement important de cette technologie. De plus, ces projets sont une chance unique pour motiver de jeunes ingénieurs et parfaire leur formation dans plusieurs disciplines différentes.

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 de recherche Solaire industriel à haute température est structuré selon trois axes: la thermochimie solaire, le solaire thermique dans les processus industriels et les centrales solaires thermiques pour la production d'électricité (CSP). Ces applications permettent d'atteindre des températures comprises entre 100°C pour certains processus industriels et 2'000°C pour la thermochimie solaire.

En Suisse, la recherche dans la thermochimie solaire s'oriente vers la réaction d'oxydoréduction et le couple ZnO/Zn, recherche menée par le Paul Scherrer Institut (PSI) à Villigen.

Dans la production de chaleur solaire pour les processus industriels, les points clés de la recherche sont l'engineering et l'implémentation, au travers des différents projets pilotes, appuyés par le centre de compétence CST (Concentrating Solar Thermal Energy) du SPF à la HES de Rapperswil pour la mise en valeur et la diffusion des compétences. La HEIG-VD à Yverdon est également impliquée dans l'un des sept projets suisses liés aux processus industriels.

Pour les CSP, la recherche est en grande partie axée sur la modélisation, la simulation, les mesures et l'analyse de différents prototypes, avec pour objectif l'optimisation des systèmes. Les projets en cours visent également le développement de systèmes de stockage de l'énergie thermique.

Dans ces domaines, la frontière entre recherche & développement (R+D) et pilote & démonstration (P+D) étant très ténue, il est important de considérer les différents projets dans leur globalité.

Revue et évaluation 2013

Le domaine de la thermochimie solaire est toujours couvert par les recherches du PSI (production de zinc et d'hydrogène) et de l'EPF Zürich (carburants solaires). De plus, SolarPACES (Solar Power and Chemical Energy Systems), réseau international d'experts pour le développement de systèmes solaires thermiques (Implementing Agreements de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE)), traite de cette thématique au travers de la Task II «Solar Chemistry Research» [4].

Pour la chaleur solaire dans les processus industriels, plusieurs installations P+D ont été mises en services et donnent des résultats satisfaisants et prometteurs. Même si des adaptations et optimisations restent nécessaires, ces projets constituent une référence pour d'autres projets et de nouvelles opportunités. Deux projets ont démarré dans la partie R+D (cf. Highlights R+D): programme de calcul «GainBuddy» au SPF et campagne de mesures sur l'installation de Colas SA à Yverdon-les-Bains à la Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD). Au niveau international, les principales activités sont menées dans le cadre du programme Solar Heating and Cooling (SHC) de l'AIE, plus particulièrement au niveau de la Task 49 «Solar Heat in Industrial Processes» (SHIP) [5].

Dans le domaine CSP, les activités d'Air-light se sont poursuivies, dirigées maintenant par le partenariat SUPSI (Université professionnelle de la Suisse italienne, Lugano) et l'EPFZ. De manière générale, un travail de fond est effectué pour réduire les coûts et rendre cette technologie compétitive, que ce soit pour les rendements globaux ou pour les composants. En juin, un Workshop «Highly Porous Ceramics for CSP Applications» a été organisé par le SUPSI, DLR (D) et Yeungnam University (RK) à Lugano, avec la participation de l'EPFZ [6]. Le but de cet événement était de mettre en valeur les céramiques poreuses en tant que matériaux privilégiés pour les récepteurs et les échangeurs de chaleur.

Perspectives

Les activités en cours dans le cadre du programme vont se poursuivre, tant au niveau de la recherche que pour les mesures et analyses des installations pilotes.

Au-delà du programme de recherche de l'OFEN, d'autres programmes internationaux soutiennent des projets de recherche. C'est par exemple le cas d'ERANET (UE), visant le développement et le renforcement de la coordination dans la recherche nationale et régionale, ou de SFERA (Solar Facilities for the European Research Area), financé par l'UE, qui vise à renforcer la collaboration scientifique

entre les principales institutions européennes de recherche dans les systèmes solaires à concentration: contribution à des projets prometteurs, accès à des installations/infrastructures uniques en Europe et dans le monde, amélioration de la qualité et du service des infrastructures existantes, organisation de cours/formations, renforcement de la communication et de la collaboration. Trois projets suisses ont pu bénéficier d'une contribution au travers de ce programme (PSI, EPFZ, EPFL) [7].

Les difficultés soulevées par les technologies solaires représentent également des opportunités. Un des défis est par exemple le nettoyage des surfaces PV/CSP, pouvant améliorer l'efficacité énergétique jusqu'à 40 % dans les régions aux climats difficiles. La société suisse CleanFIZZ (Genève) a ainsi mis en place un système appliquant des vagues électrostatiques sur les surfaces pour repousser le sable et la poussière. Il produit également de la chaleur pour faire fondre la neige et dégivrer la surface des panneaux dans les régions froides [8].

Des contacts étroits ont été noués avec différentes hautes écoles, universités et écoles polytechniques (entre autres: SPF, PSI, EPFZ et SUPSI). Chacune a proposé une stratégie à moyen terme pour le financement de projets en cohérence avec les objectifs du programme de recherche Solaire industriel à haute température. Globalement, les perspectives et objectifs prioritaires pour les années futures se focalisent sur les éléments suivants:

- mise en valeur des installations P+D pour le développement du potentiel solaire dans les processus thermiques industriels;
- amélioration des rendements pour la thermochimie solaire;
- développement d'un centre de compétence pour la technologie solaire entre 120 et 250 °C;
- optimisation de la technologie développée par le partenariat SUPSI/EPFZ.

Highlights Recherche et Développement

Suite à un premier projet réalisé à Genève, Colas SA a souhaité réaliser une seconde installation sur son centre de travaux à Yverdon-les-Bains (VD), pour le maintien en chauffe des cuves de bitume, mais également pour les besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire (ECS) des locaux. L'installation a été inaugurée en juillet 2013 et fait l'objet d'une campagne de mesures dans le cadre du programme de recherche Solaire industriel à haute température, par la HEIG-VD, avec le soutien du SPF (HES de Rapperswil) [9].

Le SPF a également démarré un nouveau projet pour le développement d'un algorithme de calcul (GainBuddy), permettant d'améliorer et de compléter l'Info-CD du SPF pour le calcul du rendement thermique brut de collecteurs ou champs de collecteurs solaires thermiques mobiles à concentration. Le logiciel permettra le calcul rapide de la faisabilité et de la rentabilité d'une installation solaire haute température dans les processus industriels. Il facilitera ainsi l'identification du potentiel solaire dans ce domaine. Il débouchera sur une extension de l'Info-CD au solaire à concentration (capteurs paraboliques et fresnel) et permettra de profiler le SPF comme véritable leader et centre de compétences

pour les processus industriels à haute température [10].

Centrales solaires thermiques pour la production d'électricité (concentrating solar power, CSP)

Le CSP est une source d'énergie renouvelable très prometteuse. L'application la plus connue est la production d'électricité par cycles thermodynamiques, mais d'autres applications ont également fait leurs preuves, comme la production d'hydrogène et de carburants solaires (solar fuels), le traitement de l'eau et la recherche sur les matériaux.

Dans ce domaine, l'OFEN cofinance le projet SolAir, mené initialement par Airlight Energy et repris par le partenariat EPFZ/SUPSI depuis mi-2013. Ce projet porte sur le développement d'un collecteur solaire thermique parabolique linéaire novateur pour la production d'électricité (CSP), ainsi que d'un système de stockage de chaleur. Les recherches se poursuivent dans le cadre de ce nouveau partenariat pour l'amélioration et l'optimisation du système (augmentation de la performance globale, de la robustesse

et de la fiabilité). Les nouvelles activités ont démarré en septembre 2013, l'EPFZ travaillant plus particulièrement sur les performances optiques, le SUPSI se focalisant plus sur le concept du collecteur «isobarique». Des simulations et des mesures seront faites sur des récepteurs formés de tuyaux hélicoïdaux. Les objectifs initiaux sont poursuivis et ciblent de nouveaux concepts, tant au niveau du récepteur, qu'au niveau des fluides caloporteurs, de l'isolation thermique et du système de stockage de la chaleur.

Bien que non financé par le programme, un projet suisse intéressant alliant énergies photovoltaïque et thermique: le projet HCPVT (High Concentration Photovoltaic Thermal) de l'EPFZ en partenariat avec IBM, Airlight Energy et l'Université des sciences appliquées de Buchs (SG). L'installation se compose d'une parabole géante, composée elle-même de 36 paraboles et d'un tapis de cellules photovoltaïques permettant de collecter 80 % du rayonnement solaire pour le convertir en électricité, mais également en chaleur. En effet, pour évacuer la chaleur excédentaire est utilisé le micro-cooling, soit l'utilisation d'un fluide de refroidissement permettant ensuite de récupérer 50 % de la chaleur [11].

Au niveau international, il est intéressé-



Figure 1 : Installation de Colas SA à Yverdon-les-Bains dans le canton de Vaud (Source : Colas SA)



Figure 2 : Installation de Zehnder à Gränichen dans le canton d'Argovie (Source : Zehnder Group Produktion Gränichen AG)

sant de relever la finalisation de plusieurs grands projets dans ce domaine, entre autres les projets ci-dessous.

Après trois ans de construction, la mise en service de Shams 1, la plus grande centrale solaire à concentration au monde utilisant la technologie cylindro-parabolique. Située dans l'Ouest des Emirats Arabes Unis EAU (Emirat d'Abou Dhabi), elle occupe une superficie de 2,5 km², pour une capacité de 100 MW, et peut alimenter en électricité l'équivalent de 20'000 foyers des EAU. A terme, la capacité maximale de la centrale devrait atteindre 2'000 MW [12].

Le projet «Crescent Dunes Solar Energy Project» dans le Nevada aux USA (Tonopah) est une installation de 110 MW avec récepteur central (tour et héliostats) et système de stockage de chaleur par cristaux de sels fondus pour un fonctionnement jour et nuit. Elle doit se terminer en 2014, occupera une superficie de 6,5 km²

et permettra d'alimenter l'équivalent de 75'000 foyers (500 GWh/an) [13].

Le projet «Ivanpah» en Californie aux USA (Ivanpah) est une installation avec récepteur central, composée de trois unités pour un total de 377 MW et une superficie de 14,2 Km². La première unité a été raccordée pour les premiers tests à fin 2013. A terme, l'installation devrait alimenter l'équivalent de 140'000 foyers [14].

Thermochimie solaire

L'engouement pour la thermochimie est important et les perspectives prometteuses pour la fourniture de services énergétiques propres, efficaces et durables. Elle est l'un des processus thermochimiques les plus prometteurs pour le stockage de l'énergie solaire et offre de nouvelles solutions au problème de

dépendance aux combustibles fossiles.

Au niveau international, la recherche actuelle mise donc en priorité sur la production de vecteurs énergétiques chimiques (p.ex. de l'hydrogène en transitant par le couple Redox ZnO, ou des carburants tels que l'hydrogène ou le gaz de synthèse), sur la décarbonisation thermique des combustibles fossiles (p.ex. craquage, reformage, gazéification) ou sur le traitement thermique et le recyclage de matériaux à forte intensité énergétique.

Dans le cadre de ce programme, l'OFEN cofinance les projets du laboratoire de technologie solaire du PSI pour la production de zinc à l'aide d'énergie thermique solaire à haute température (env. 2000 °C, cycle ZnO/Zn) pour produire ensuite de l'hydrogène H₂. Elle cofinance également des travaux de l'EPFZ pour la production de carburants liquides solaires (solar fuels) à partir d'eau et de CO₂.

Les activités du PSI vont se poursuivre jusqu'en 2015. En 2013, suite à la seconde campagne de mesures, le réacteur de 100 kW a été rénové, modifié et optimisé. Des tests vont tout d'abord être effectués sur le simulateur solaire haut-flux (HFSS) du PSI. A la suite de ces tests pourra démarrer la troisième campagne de mesures au Four Solaire de 1 MW (MWSF) de PROMES-CNRS à Odeillo en France pour la production de zinc et d'hydrogène. Le but principal est d'assurer la fiabilité du fonctionnement du réacteur, d'optimiser les performances et d'augmenter le rendement de conversion de l'énergie solaire en produit chimique [15].

Dans le cadre de la Task II «Solar Chemistry Research» de SolarPACES, l'une des activités spécifiques est la mise en œuvre de la feuille de route vers les carburants solaires (Roadmap to Solar Fuels). Elle décrit la stratégie pour stimuler l'implication de l'industrie dans la production de carburants solaires et promouvoir la pénétration du marché de cette technologie. Dans le cadre de l'Ex-Co Meeting de SolarPACES à Las Vegas (USA) en septembre 2013, un premier rapport a été présenté à ce sujet (initiation du projet et préparation du concept). Deux Workshops ont été organisés par

l'Afrique du Sud et par l'Australie, afin de présenter aux industries locales et aux gouvernements l'état de l'art et le potentiel du marché des technologies les plus avancées dans la production de carburants solaires. Bien que ces premières investigations (workshops) se soient conclues de manière positive, d'autres rencontres et discussions seront encore nécessaires avec les organismes locaux intéressés pour le développement d'une roadmap complète et spécifique à différents pays [16].



Figure 3 : Installation de la Fromagerie de Saignelégier "Tête de Moins à l'appui solaire" dans le canton du Jura (Source : <http://www.solaragentur.ch>)

Projets Pilotes et de Démonstration

Actuellement, les projets P+D soutenus dans le cadre du programme concernent majoritairement le domaine de la chaleur solaire pour les processus industriels. Contrairement au solaire thermique pour le chauffage des bâtiments et de l'eau chaude sanitaire (ECS), celui-ci n'a pas encore atteint sa complète maturité. Le potentiel de développement est cependant très important, puisqu'une grande partie de la demande d'énergie thermique provenant du secteur industriel se situe à des températures souvent inférieures à 250 °C (28 % dans l'UE27). Actuellement, 120 installations en exploitation ont été recensées dans le monde, pour une capacité de 88 MW_{th}. En Suisse, sept installations sont en exploitation. Alors que les premières applications étaient de nature expérimentale et de relativement petite taille, on remarque une nette augmentation de la taille des projets en cours [5].

Production de chaleur solaire pour les processus industriels

Les projets cofinancés par l'OFEN dans ce domaine permettent d'obtenir un large retour d'expérience pour des installations de tailles, de niveaux de températures, de régions climatiques et de processus



Figure 4 : Installation de Cremo SA à Villars-sur-Glâne dans le canton de Fribourg (Source : Cremo SA)

industriels variés et ceci pour plusieurs types de collecteurs (capteurs plat sous vide, capteurs tubes sous vide, capteurs sous vide avec semi-concentrateurs et concentrateurs paraboliques linéaires). De plus, Le Centre de compétence CST mis en place par SPF, a pour objectif de suivre ces installations. Les données sont ainsi collectées, analysées et mises en valeur de façon systématique.

L'installation réalisée par ewz sur la Lattaria Engiadinaisa SA (LESA) à Bever (Grisons) a permis d'atteindre les résultats escomptés à partir de juillet 2013, après correction et optimisation du processus. Sur la première année de mesures, les 115 m² de concentrateurs paraboliques linéaires (NEP Solar Poly Trough 1200) n'ont pas encore atteint la totalité de la production simulée (40'000 kWh/an au lieu des 60'000 kWh/an). Toutefois, après

correction des maladies de jeunesse, l'installation semble répondre totalement aux attentes. La laiterie se situant à plus de 1700 mètres d'altitude, les résultats sont élevés, très prometteurs et encourageant pour la mise en œuvre d'installations solaires thermiques haute température dans des régions alpines soumises à de basses températures, à un rayonnement direct élevé et à une quantité non négligeable de neige (albedo élevé) [17 et 18].

La société Zehnder à Gränichen (AG) a mis en service en juillet 2012 une installation de 360 m² de collecteurs à tubes sous vide (Ritter) sur le toit de la halle de production et logistique. Après une année de mesures, les résultats sont prometteurs puisque la production de chaleur atteint les valeurs simulées, soit 160'000 kWh/an, et permet de diminuer la consommation de gaz de pétrole liquéfié (GLP) utilisé dans les processus industriels de laquage [19].

Mise en service en octobre 2012, l'installation de la Fromagerie de Saignelégier (Jura) est en exploitation depuis maintenant plus d'une année. Les 630 m² de concentrateurs paraboliques linéaires (NEP Solar Poly Trough 1800) ont permis de produire près de 150'000 kWh de chaleur entre janvier et août. Entre janvier et mai, la production était en dessous des attentes principalement en

raison d'un manque d'ensoleillement par rapport à la moyenne. Les trois mois suivants, les valeurs simulées ont été atteintes, voire dépassées. Les valeurs pour la fin de l'année sont encore attendues. L'installation a remporté le Prix Solaire Suisse 2013 dans la catégorie « Installations d'énergie renouvelable ».

L'installation de la société Cremo SA a été mise en service à mi-juillet 2013. Ce sont 581 m² de concentrateurs paraboliques linéaires (NEP Solar Poly Trough 1800) qui ont été installés sur le toit de l'usine à Villars-sur-Glâne (Fribourg) et qui fournissent de la chaleur au processus de stérilisation de la crème à café. Les mesures sont en cours et les résultats seront connus d'ici la fin de l'année.

En dehors de ces projets soutenus par le programme de recherche, des technologies se développent dans le domaine du solaire thermique pour les processus industriels et peuvent offrir de nouvelles opportunités.

Courant 2013, la société suisse TVP Solar SA a obtenu un nouveau financement de CHF 6 millions pour le développement de ses produits. Cette société conçoit, développe, produit et commercialise des capteurs solaires thermiques à vide poussé innovants, basés sur une technologie brevetée pour des applications de chauffage (chaleur dans les processus

industriels et énergie thermique dans le résidentiel), mais également de climatisation. Ces capteurs sont similaires aux capteurs SRB, mais sont toutefois dépourvus de concentrateurs. L'origine est la même (CERN). L'objectif de TVP Solar SA est de faire de cette technologie une référence et de la rendre compétitive face aux combustibles fossiles [20].

La société Enefttech a développé la technologie Cleantech ENEFCOGEN, système de micro-cogénération utilisant des turbines volumétriques à spirales (Turbine Scroll) au sein d'un mini système ORC (Organic Rankine Cycle) et fonctionnant à partir de sources thermiques à des températures situées entre 120 et 200 °C. Utilisés en turbines, ces compresseurs scrolls peuvent produire de l'électricité, permettant ainsi de combiner production d'électricité et de chaleur par valorisation des énergies renouvelables, notamment d'énergie solaire thermique. C'est le cas d'un projet mené en Turquie à Istanbul : production d'électricité à partir d'une installation solaire thermique, grâce à une unité Enefcogen GREEN 30 kW_{el} avec source de chaleur issue d'huile thermique chauffée par l'énergie solaire [21].

Collaboration Nationale

Dans le domaine de la thermochimie solaire, le Laboratoire de technologie solaire du PSI travaille conjointement avec le Département pour les énergies renouvelables de l'EPF Zürich. Dans le cadre de plusieurs projets, le PSI collabore également avec les sociétés suivantes: ALE Airlight Energy SA (Biasca), Alstom Power Service (Baden-Dättwil), Alstom Power Systems (Birr), Bühler AG (Uzwil) et Holcim (Holderbank). Des collaborations et synergies sont aussi en place avec les laboratoires de recherche suisses suivants: EMPA Dübendorf – Laboratory for Solid State Chemistry and Catalysis, EPF Lausanne - Industrial Energy System Laboratory et EPF Zürich – Particle Technology Laboratory.

Dans le domaine de la chaleur solaire pour les processus industriels, le SPF collabore avec Energie Solaire SA (Sierre) pour la partie « composants », avec NEP Solar AG (Zürich)

pour la partie « collecteurs », ainsi qu'avec les industries porteuses des projets P+D pour la partie « systèmes ». Il collabore également avec la HEIG-VD pour des mesures. Dans le cadre des projets P+D, des collaborations avec les sociétés suivantes ont été mises en place: BE Netz (Lucerne), SRB Energy (CERN Genève) et NEP Solar AG (Zürich).

Dans le domaine des CSP, une collaboration active et efficace a été mise en place dans le cadre du projet SoIAir entre l'Institut des technologies énergétiques de l'EPF Zürich, l'Université professionnelle de la Suisse italienne (SUPSI-DTI-ICIMSI) et Airlight Energy Manufacturing SA.

Des contacts étroits ont été noués avec Swissolar face au Masterplan « Masterplan 2035 - Chaleur solaire en Suisse » que ces derniers ont développé [22].

Collaboration Internationale

Dans le domaine de la thermochimie solaire, une coopération internationale du PSI est en cours dans le cadre de :

- EERA – European Energy Research Alliance (Joint Program on Concentrated Solar Power (CSP));
- IEA's SolarPACES Implementing Agreement (Task II – Solar Chemistry Research; Operating Agent: Dr. A. Meier);
- IPHE – International Partnership for the Hydrogen Economy (Projet: Solar driven high temperature thermochemical production of hydrogen);
- SFERA II – Solar Facilities for the European Research Area (Projet UE);
- SOLLAB – Alliance of European Laboratories on solar thermal concentrating systems;

- STAGE-STE – Scientific and Technological Alliance for Guaranteeing the European Excellence in Concentrating Solar Thermal Energy (projet UE);
- Strategic Alliance between PSI and CIEMAT (Spain) – Roadmap to Solar Hydrogen Production;
- TCSPower – Thermo-chemical energy storage for concentrated solar power plants (Projet UE).

Dans le domaine des CSP, un accord pour la construction en 2012–2013 d'une première installation industrielle pilote à Ait Baha (Maroc) a été signé en septembre 2011 entre Air-light Energy et le producteur de ciment Italgem (Italcementi Group). La mise en service de l'installation est prévue pour le 2^e trimestre 2014.

Références

[1] <http://www.renewableenergyworld.com>

[2] *Forbes: The Big Solar Sell-Off: Siemens Puts Solel On The Block (22-10-2013)* et *Le Temps: Siemens se retire de l'énergie solaire (18-06-2013)*

[3] U.S. Department of Energy Office (DEO) of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE): *The falling cost of concentrating solar power, SunShot Concentrating Solar Power Newsletter (février 2014)*

[4] <http://www.solarpaces.org>

[5] <http://task49.iea-shc.org>

[6] <http://www.supsi.ch/dti/venti-comunicazioni/eventi/2013-2013-03-18.html>

[7] <http://sfera.sollab.eu>

[8] <http://www.cleanfizz.com>

[9] M. Bunea et al.: *Campagne de mesures: Installation solaire thermique à haute température de COLAS SA (Yverdon-les-Bains), Rapport annuel OFEN (2013)*

[10] H. Marty et E. Frank: *Entwicklung eines Fast Feasibility Tools für solare Prozesswärmeanlagen (GainBuddy), BFE Jahresbericht (2013)*

[11] *L'Express-L'Impartial: Dompter la puissance du soleil (07-05-2013)*

[12] <http://www.enerzine.com>: *La plus grande centrale solaire à concentration au monde a démarré (21-03-2013)*

[13] <http://www.solarreserve.com>

[14] <http://ivanpahsolar.com>

[15] A. Meier: *Solar Production of Zinc and Hydrogen – 100 kW Solar Pilot Reactor for ZnO Dissociation, BFE Jahresbericht (2013)*

[16] A. Meier: *Roadmap to Solar Fuels – Strategy for Industry Involvement and Market Penetration, Status Report Phase 1 (10-09-2013)*

[17] M. Feuerstein: *V0538 Bever, Lesa / Solare Prozesswärmeerzeugung - ewz Pilotanlage, BFE Schlussbericht (2013)*

[18] E. Frank et al.: *Etablierung eines CST Kompetenzzentrums am SPF, BFE Jahresbericht (2013)*

[19] H. Schürch et J. Lee: *Integration solarer Prozesswärme in eine Lackieranlage, BFE Schlussbericht (2013)*

[20] <http://www.tvpsolar.com> et *Le Temps: Le genevois TVP Solar lève plus de 6 millions (06-08-2013)*

[21] <http://www.eneftech.com>

[22] <http://www.swissolar.ch>

Projets en cours et terminés dans l'année de référence

(* Classification de l'AIE)

- **IEA-SOLARPACES-PROGRAMM** R+D 3.1.3*
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | DLR | Funding: | BFE |
| Contact: | Christophe Richter
exsec@solarpaces.org | Period: | 1989–2016 |
- 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.
- **AIRLIGHT – HIGH-TEMPERATURE THERMAL STORAGE SYSTEM FOR CONCENTRATING SOLAR POWER** R+D 3.1.3
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | ETHZ | Funding: | BFE |
| Contact: | Aldo Steinfeld
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.
- **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 to produce syngas from H₂O and CO₂ via Zn/ZnO redox reactions is considered. The exothermic step (non-solar) 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 aims at optimizing and scaling-up the chemical reactor technology.
- **SOLAIRE - INNOVATIVE SOLAR COLLECTORS FOR EFFICIENT AND COST-EFFECTIVE SOLAR THERMAL POWER GENERATION** R+D 3.1.3
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | ETHZ/SUPSI | Funding: | BFE |
| Contact: | Aldo Steinfeld / Maurizio Barbato
aldo.steinfeld@ethz.ch | Period: | 2013–2016 |
- Abstract: The 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. Reducing drastically the investment costs of the collector field, the solar thermal plant promises to be highly economic competitive.
- **CAMPAGNE DE MESURES : INSTALLATION SOLAIRE THERMIQUE À HAUTE TEMPÉRATURE DE COLAS SA (YVERDON)** R+D 3.1.3
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | HEIG-VD | Funding: | BFE |
| Contact: | Alexis Duret
alexis.duret@heig-vd.ch | Period: | 2013–2015 |
- Abstract: Ce projet a pour but principal d'analyser les performances d'une installation solaire à haute température intégrée sur le site industriel de COLAS à Yverdon-les-Bains. Cette installation permet d'assurer les besoins énergétiques en chauffage et eau chaude sanitaire d'un bâtiment et de maintenir deux cuves de stockage de bitume au-dessus de sa température de fusion.
- **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 solar-thermischen 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,Analyse.

- **GAINBUDDY: ERARBEITUNG EINES RECHENALGORITHMUS ZUR ERWEITERUNG DER SPF INFO-CD FÜR BRUTTOWÄRMERERTRAGSRECHNUNG** R+D 3.1.3
- Lead: Institut für Solartechnik SPF Funding: BFE
- Contact: Elimar Frank elimar.frank@solarenergy.ch Period: 2013–2015
- Abstract: Im Projekt wird ein Fast Feasibility Tool für solare Prozesswärmanlagen entwickelt. Die Kernaufgabe des Ertragsrechners ist das Berechnen von Bruttowärmeerträgen von Kollektorfeldern. Der Ertragsrechner GainBuddy verwendet dazu u.a. Algorithmen, die bereits in der Bruttowärmeertragsberechnung auf der SPF Info-CD implementiert wurden und dort allerdings nur mit Einschränkungen verwendet werden können.
- **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.
- **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: 2011–2014
- 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 à démontrer que, même dans une région relativement peu ensoleillée, le retour sur l'investissement est raisonnable compte tenu notamment des économies de gaz obtenues d'env.175'000 kWh/an.
- **BEVER, LESA / SOLARE PROZESSWÄRMERZEUGUNG** P+D 3.1.3
- Lead: EWZ Funding: BFE
- Contact: Mevina Feuerstein mevina.feuerstein@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 FROMAGERIE DE SAINGELÉGIER SA: TÊTE DE MOÏNES À L'APPUI SOLAIRE** P+D 3.1.3
- Lead: Fromagerie de Saingelégier 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.
- **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 anton.meier@psi.ch Period: 2010–2015
- 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.
- **INTEGRATION SOLARER PROZESSWÄRME IN EINE LACKIERANLAGE** P+D 3.1.3
- Lead: Zehnder Group Produktion Gränichen AG Funding: BFE
- Contact: Schürch Heiner schuerchconsult@bluewin.ch Period: 2012–2013
- Abstract: Ziel ist, den Prozesswärmebedarf in Lackieranlagen zu einem Anteil aus einer solar thermischen Anlage zu decken. Die Anlage weist eine direkte Integration von Hochleistungs-Vakuumröhren Kollektoren (Kollektorfläche ca. 400 m2) in das Prozesswärmenetz und wird in der Lage sein, die Tauschbäder einer Vorbehandlung über den Tagesverlauf konstant mit der benötigten Prozesswärme zu versorgen (Temp. 90-110°C, Produktion von 200 MWh/a).

- **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: This project aims to increase the operating temperature of the heat transfer fluid to 600°C and thereby raise the thermal efficiency of the power cycle driven from it. The current state-of-the-art designs are limited to 400°C and experience a dramatic efficiency drop at higher temperature. Increasing the efficiency of CSP plants this will contribute to reduce the produced electricity cost and to accelerate the implementation of this technology.
- **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 aldo.steinfeld@ethz.ch	Period:	2011–2014

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.
- **SCOOP - SOLAR COLLECTORS MADE OF POLYMERS** R+D 3.1.3

Lead:	Institut für Solartechnik SPF	Funding:	EU FP7
Contact:	Stefan Brunold stefan.brunold@solarenergy.ch	Period:	2011–2015

Abstract: R&D work to select and develop suitable polymer grades and collector designs to enter international solar thermal with cost efficient and durable solutions to increase the share of renewable energies for domestic hot water and heating applications significantly on a world-wide scale. durability, performance and potential for building integration.
- **ERA-NET ON SOLAR ELECTRICITY FOR THE IMPLEMENTATION OF THE SOLAR EUROPE INDUSTRY INITIATIVE** R+D 3.1.3

Lead:	NET NOWAK ENERGIE & TECHNOLOGIE AG	Funding:	EU FP7
Contact:	Stefan Nowak stefan.nowak@netenergy.ch	Period:	2012–2016

Abstract: The goal of SOLAR-ERA.NET is to undertake joint strategic planning, programming and activities for RTD and innovation in the area of solar electricity generation, i.e. photovoltaics (PV) and concentrating solar power (CSP).
- **TCSPOWER – THERMO-CHEMICAL ENERGY STORAGE FOR CONCENTRATED SOLAR POWER PLANTS** R+D 3.1.3

Lead:	PSI	Funding:	EU FP7
Contact:	Christian Wieckert christian.wieckert@psi.ch	Period:	2011–2015

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.
- **SFERA – SOLAR FACILITIES FOR THE EUROPEAN RESEARCH AREA** R+D 3.1.3

Lead:	PSI	Funding:	EU FP7
Contact:	Aldo Steinfeld aldo.steinfeld@ethz.ch	Period:	2009–2017

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.
- **CSP2 – CONCENTRATED SOLAR POWER IN PARTICLES** R+D 3.1.3

Lead:	PSI	Funding:	EU FP7
Contact:	Aldo Steinfeld aldo.steinfeld@ethz.ch	Period:	2011–2015

Abstract: The aim of the CSP2 Project is to use a dense gas-particle suspension as an alternative heat transfer fluid (HTF) that allows working temperatures higher than 550°C. The solid phase consists of any particulate mineral, like quartz sand, that withstands high temperatures. The solid particles can also be used as a thermal energy storage medium due to their high heat capacity.

● **SOLUGAS - SOLAR UP-SCALE GAS TURBINE SYSTEM**

R+D 3.1.3

Lead: Turbomach

Funding: EU FP7

Contact: Marco Van Schaik marco_vanschaik@turbomach.com

Period: 2008–2013

Abstract: The SOLUGAS project consists in the demonstration of a solar-hybrid power system with direct solar heating of a gas turbine's pressurized air. In combination with highly efficient combined cycle systems.

● **HCPVT - SOLAR CONCENTRATING PHOTOVOLTAIC SYSTEM**

R+D 3.1.3

Lead: ETHZ

Funding: KTI

Contact: Aldo Steinfeld aldo.steinfeld@ethz.ch

Period: 2010–2013

Abstract: The objectives of the project are to design, optimize, construct and test the High Concentration PhotoVoltaic Thermal (HCPVT) system. Solar radiation is concentrated 2000 times onto a microchannel-cooled receiver holding a dense array of ~40% efficient triple junction PV chips able to extract 50% of the incoming energy as heat while maintaining the solar cells at safe temperatures.

● **ENTWICKLUNG EINES TESTPRÜFSTANDES ZUR ÜBERPRÜFUNG DES EINFLUSSES VON WIND- UND SCHNEELASTEN AUF SOLAROTHERMISCHE ODER PHOTOVOLTAISCHE ANLAGENSYSTEME.**

R+D 3.1.3

Lead: Institut für Solartechnik SPF

Funding: KTI

Contact: Andreas Bohren 0

Period: 2012–2013

Abstract: Die in den letzten Jahren gemachten Erfahrungen mit Sonnenenergiesystemen auf Schrägdächern haben gezeigt, dass die in den Normen beschriebenen Wind- und Schneelasten nur bedingt auf solche Anlagen anwendbar sind. Um die Widerstandsfähigkeit solcher Anlagen beurteilen zu können, ist ein Teststand zur unabhängigen Aufbringung von Flächenlasten und Parallellasten (Hangantrieb von Schneelasten) nötig.

● **ENTWICKLUNG EINER ENERGIEEFFIZIENTEN SPEICHERLADESTATION FÜR DEN EINSATZ IN GROSS-SOLAROTHERMIEANLAGEN**

R+D 3.1.3

Lead: Institut für Solartechnik SPF

Funding: KTI

Contact: Matthias Rommel matthias.rommel@solarenergy.ch

Period: 2012–2013

Abstract: Entwicklung einer Lösung zur effizienten Solarthermie-Nutzung in Grossanlagen mit Kollektorflächen von bis zu 400m² und für die Aufbereitung von Warmwasser von bis zu 200 L/Min. Dafür werden eine Speicherladestation zur Beladung und eine Frischwasserstation zur Entladung von Energiespeichern entwickelt. Ziel ist es, durch Standardisierung eine hohe Funktionsicherheit sowie einen erheblichen Preisvorteil gegenüber den marktüblichen zu erreichen.

● **WEITERENTWICKLUNG, OPTIMIERUNG UND CHARAKTERISIERUNG DER NEP SOLAR PARABOLRINNENKOLLEKTOREN FÜR INDUSTRIELLE PROZESSWÄRME**

R+D 3.1.3

Lead: Institut für Solartechnik SPF

Funding: KTI

Contact: Matthias Rommel matthias.rommel@solarenergy.ch

Period: 2012–2013

Abstract: NEP Solar AG hat einen Parabolrinnenkollektor zur solaren Erzeugung von industrieller Prozesswärme entwickelt. Für den Marktdurchbruch muss der Kollektor kostenoptimiert und industrialisiert werden. Hierzu wird die SPF Kompetenz für Modellierung und Komponentencharakterisierung genutzt. Am SPF wird ein neuer Hochtemperatur-Teststand aufgebaut. Dieser erlaubt präzise Wirkungsgradmessungen am Kollektor.

● **ALSTOM – SOLAR-DRIVEN GAS TURBINES**

R+D 3.1.3

Lead: PSI

Funding: KTI

Contact: Aldo Steinfeld aldo.steinfeld@ethz.ch

Period: 2012–2015

Abstract: Scale-up demonstration of solar pressurized air-receiver in a solar tower. 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.

● **BIOMASS (ALGAE) GASIFICATION USING CONCENTRATED SOLAR ENERGY**

R+D 3.1.3

Lead: ETHZ

Funding: others

Contact: Aldo Steinfeld aldo.steinfeld@ethz.ch

Period: 2010–2013

Abstract: The goal of this project is to transform microalgae into clean, CO₂-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 + H₂). 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 aldo.steinfeld@ethz.ch	Period:	2010–2013

Abstract: The goal of this project is to transform microalgae into clean, CO₂-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 + H₂). Syngas can be further processed to liquid fuels for the power and transportation sector.

● **SYNPET - SOLAR THERMOCHEMICAL APPLICATION FOR PRODUCTION OF SYNGAS FROM HEAVY CRUDE OIL** R+D 3.1.3

Lead:	PSI	Funding:	others
Contact:	Aldo Steinfeld aldo.steinfeld@ethz.ch	Period:	2003–2013

Abstract: The solar steam-gasification of petroleum coke (petcoke) is a hybrid thermochemical process that converts intermittent solar energy into a storable and transportable chemical fuel. At the same time, petcoke is solar-upgraded to a cleaner fluid fuel for electricity generation in highly efficient combined cycles or fuel cells.

● **SOLAR ZN-CYCLE - REACTOR TECHNOLOGY FOR ZN+H₂O+CO₂ TO PRODUCE SYNGAS** R+D 3.1.3

Lead:	PSI	Funding:	others
Contact:	Aldo Steinfeld aldo.steinfeld@ethz.ch	Period:	2012–2015

Abstract: Solar production of syngas from H₂O and CO₂ is examined via two-step thermochemical cycles based on redox reactions such as Zn/ZnO and FeO/Fe₃O₄: Endothermic step (thermal dissociation of the metal oxide using concentrated solar radiation) and exothermic step (reaction of the metal or reduced metal oxide with a mixture of H₂O and CO₂ yielding syngas, together with the initial form of the metal oxide that is recycled to the first step)

● **SOLAR CERIA-BASED REDOX CYCLE FOR SPLITTING H₂O AND CO₂** R+D 3.1.3

Lead:	PSI	Funding:	others
Contact:	Aldo Steinfeld aldo.steinfeld@ethz.ch	Period:	2012–2015

Abstract: Solar syngas production from H₂O and CO₂ is experimentally investigated using a two-step thermochemical cycle based on cerium oxide redox reactions. A solar cavity-receiver containing porous ceria felt is directly exposed to concentrated thermal radiation at a mean solar concentration ratio of 2865 suns.

● **SOLARHTG – HYDROTHERMAL GASIFICATION COMBINED WITH SOLAR AIR-RECEIVER AND THERMAL STORAGE** R+D 3.1.3

Lead:	PSI	Funding:	others
Contact:	Aldo Steinfeld aldo.steinfeld@ethz.ch	Period:	2012–2015

Abstract: Hydrothermal gasification, a relatively new technology, is able to convert wet biomass or wastewater in supercritical water into gas, clean water and salts. HTG requires relatively large amount of heat at temperature above 500°C. This project proposes to study the coupling of a solar thermal plant with a HTG plant in order to increase the HTG conversion efficiency and store the solar energy in the fuel produced.

● **ISJRP - INDIAN SWISS JOIN RESEARCH PROJECT** R+D 3.1.3

Lead:	PSI	Funding:	others
Contact:	Aldo Steinfeld aldo.steinfeld@ethz.ch	Period:	2012–2015

Abstract: Development of novel, catalytically active, doped ceria, optimized for solar thermochemical cycles that convert water and carbon dioxide directly into syngas, hydrocarbons, methanol or other oxygenated liquid fuels by concentrated solar radiation.

● **HYTECH – SUSTAINABLE HYDROGEN UTILIZATION** R+D 3.1.3

Lead:	PSI	Funding:	others
Contact:	Aldo Steinfeld aldo.steinfeld@ethz.ch	Period:	2012–2015

Abstract: The HyTech project is focused on the realization of breakthroughs and advancing innovative technologies in the field of sustainable hydrogen utilization. Both the disciplines of solar hydrogen production and hydrogen storage will be engaged by employing the top experts in each field from Switzerland, and by pursuing pioneering approaches.

- **INPHOCUS – INFLATED PHOTOVOLTAIC ULTRA-LIGHT MIRROR CONCENTRATORS** R+D 3.1.3
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | ETHZ | Funding: | KTI |
| Contact: | Aldo Steinfeld
aldo.steinfeld@ethz.ch | Period: | 2010–2013 |
- Abstract: The goal of the InPhoCUS project is to realize a commercial, cost-competitive, innovative concentrating photovoltaic (CPV) system. The project will cover the design, construction and performance testing of the innovative system. The concentrator will be equipped with unconventional pneumatic multilayer Mylar mirrors; it will have an innovative fiber-reinforced concrete structure and an original tilting mechanism to track the sun.
- **PRODUKTENTWICKLUNG PV/T SOLARKOLLEKTOR MIT INSTALLATIONSSYSTEM** R+D 3.1.3
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | Institut für Solartechnik SPF | Funding: | KTI |
| Contact: | Matthias Rommel
matthias.rommel@solarenergy.ch | Period: | 2011–2014 |
- Abstract: Das Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines unbedeckten Niedertemperatur PV/T-Kollektors und eines dazu optimierten Installationssystems. Ausgangspunkt für die Entwicklung sind Standard PV-Module on 3S für den Kollektor sowie auf dem Markt erhältliche Komponenten für das Installationssystem. Das Produkt soll optimiert werden für den Einsatz in einer Niedertemperatur Gebäudetechnologie.
- **CO2 CAPTURE FROM ATMOSPHERIC AIR BY TEMPERATURE-VACUUM SWING ADSORPTION** R+D 3.1.3
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | ETHZ | Funding: | others |
| Contact: | Aldo Steinfeld
aldo.steinfeld@ethz.ch | Period: | 2011–2013 |
- Abstract: The CO2 capture technology is based on a cyclic adsorption-desorption process that occurs on a novel filter material ("sorbent"). During adsorption, atmospheric CO2 is chemically bound to the sorbent surface. Once the sorbent is saturated with CO2, the CO2 is driven off the sorbent through heating the sorbent to around 60-100°C, thereby delivering high-purity gaseous CO2. The CO2-free sorbent can be re-used for many adsorption-desorption cycles.
- **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: The main goal of this project is to provide primary aluminium industry with "green" innovative technological and economical solutions, focusing on the significant improvement of energy and exergy efficiencies of the production process, the substantial reduction of GHG emissions and the complete elimination of the solid wastes.

Biomasse und Holzenergie



Titelbild:

Biogasanlage von agrino in Busslingen (Quelle: S. Imboden)

Biogasanlage mit Co-Vergärung in Busslingen mit einer Leistung von 150 kW_{el} und 116 kW_{th}. Die Biogasanlage wurde 2005 erbaut mit Erweiterung des Nachgärers im Jahr 2011 und dem Ersatz des Blockheizkraftwerks (BHKW) im Jahr 2013. Jährlich werden 4000t Hofdünger und 1000t Co-Substraten vergärt.

BFE Forschungsprogramm Biomasse und Holzenergie

Überblicksbericht 2013

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE

CH-3003 Bern

Programmleiterin BFE (Autorin):

Dr. Sandra Hermle, Bundesamt für Energie (sandra.hermle@bfe.admin.ch)

Bereichsleiterin BFE:

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

www.bfe.admin.ch/forschung/biomasse

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

Einleitung

Bioenergie leistet bereits einen wesentlichen Beitrag zur Versorgung der weltweiten Energienachfrage [1]. Schätzungen zufolge könnte Bioenergie nachhaltig zwischen 25 % und 33 % zur künftigen globalen Primärenergieversorgung (bis 250 EJ) im Jahr 2050 [2] beitragen. Jedoch birgt der zunehmende Einsatz von Bioenergie auch einige Herausforderungen. Ein möglicher Wettbewerb um Landflächen und Ausgangsmaterialien bezüglich anderer Biomassenutzungsformen muss bedacht werden. Bioenergie konkurriert mit anderen Energiequellen. Logistik- und Infrastrukturfragen müssen angegangen werden, und es gibt die Notwendigkeit für weitere technologische Innovationen, die zu einer effizienteren und saubereren Umwandlung von einer vielfältigeren Palette an Rohstoffen führen.

Für die Schweiz standen die drei Konversionstechnologien Verbrennung, Vergasung und anaerobe Vergärung im Berichtsjahr national wie auch international im Fokus.

Im Bereich der *Verbrennungstechnologie* ist festzustellen, dass die Anzahl relevanter Publikationen mit Neuigkeiten zu technischen Verfahren gering und im Vergleich zu den Vorjahren sinkend ist. Dennoch wurden an internationalen Tagungen neue Verbrennungskonzepte, wie z. B. 2-stufige Holzöfen vorgestellt, welche eine lange Abbranddauer aufweisen und somit zum Betreiberkomfort beitragen. Die Anwendung von Phase Change Material (PCM) wurde ebenfalls international thematisiert, wodurch die Wärmeabgabe gleichmässiger erfolgen soll. Das Thema Klein-Elektroabscheider hat im letzten Jahr an Bedeutung verloren. Weiter aktuell sind jedoch Unter-

suchungen zum Thema Feinstaub. Hier geht es unter anderem auf europäischer Ebene um die Standardisierung der Partikelmesstechnik und um die gesundheitsschädigende Wirkung von Feinstaub. Ein weiteres wichtiges Thema, welches ebenfalls für die Schweiz von Interesse ist, sind Optimierungen des Praxisbetriebs von Holzfeuerungen.

In der *Holzvergasung* haben sich die Forschungsschwerpunkte national wie international kaum verändert. In erster Linie geht es um die Hochskalierung erfolgsversprechender Vergasungskonzepte was auch im europäischen Raum durch die ERANET-Plus Calls BESTF und BESTF 2 [3] an Bedeutung gewann. Weitere internationale Themen sind die Optimierung von Anlagenkonzepten für die Produktionskette WKK, SNG, gemischte Alkohole sowie von diversen BTL (biomass-to-liquid)-Linien. Des Weiteren standen Komponententoptimierungen (Vergaser, Gasreinigung, Filteranlagen, Synthetisierung) im Fokus. Generell ist eine breite Konsolidierung und Aufarbeitung des in den letzten Jahren (Jahrzehnten) geschaffenen Wissens festzustellen und eine breite Diskussion über die Realisierung von Grossprojekten wird im ganzen europäischen Raum geführt. Oftmals werden die Forschungsergebnisse und Realisierungsansätze sehr optimistisch präsentiert, wobei in der Umsetzungsphase die Tatsachen dann etwas ernüchternder sind, was die Finanzierung von solchen Anlagen nicht unbedingt erleichtert. Dies nicht zuletzt auch durch fehlende langfristige Rechtssicherheit von Zuschüssen, Einspeisetarifen, Steuervergünstigungen und Rahmenbedingungen für zu realisierende Anlagen.

Im Bereich der *anaeroben Vergärung* ist

festzustellen, dass der Biogassektor in der Schweiz weiterhin stetig wächst. Im Jahr 2012 betrug die Biogasproduktion in Landwirtschaft, Gewerbe und Industrie 501 GWh/a, dies entspricht einem Wachstum von 25 % gegenüber dem Vorjahr. Ca. 463 Biogasanlagen in Abwasserreinigungsanlagen produzieren weitere 523 GWh/a. Der grösste Teil des Biogases wird dabei in BHKW umgesetzt. 2012 wurden insgesamt 258 GWh Strom produziert. Bei den neu gebauten landwirtschaftlichen Anlagen setzt sich der Trend zu BHKWs deutlich fort. Grund dafür sind die hohen Investitionskosten für kleine Aufbereitungsanlagen, jedoch auch das Fehlen eines Einspeisetarifs für Biomethan. Dennoch nimmt auch die Biomethanproduktion weiter zu. 2012 wurden rund 90 GWh Biomethan produziert, knapp 10 % mehr als im Vorjahr.

Wichtige internationale Themen sind die Biogasaufbereitung zu Biomethan und dessen Verwendung als Treibstoff. Damit Biomethan eine wichtige Rolle in der europäischen Klimapolitik spielen kann, ist es wichtig, dass ein grenzüberschreitender Handel möglich wird. Akteure aus sechs Ländern, darunter auch die Schweizerische Gasindustrie (vertreten durch VSG), haben sich zusammengeschlossen um dieses Thema voranzutreiben. Im europäischen Umfeld machen die steigenden Preise für nachwachsende Rohstoffe den Biogasanlagenbetreibern weiterhin zu schaffen.

IEA Klassifikation: 3.4 Bio-Energy

Schweizer Klassifikation: 2.4 Biomasse und Holz

Programmschwerpunkte

Die Biomasse ist die zweitwichtigste einheimische, erneuerbare Energiequelle mit einem heutigen Anteil am gesamten Energieverbrauch von knapp 5 %. Inwieweit das noch verfügbare Potenzial tatsächlich genutzt wird, hängt insbesondere von der Entwicklung von Technologie- und Energieeffizienz, von den Rohstoffkosten und Bioenergiepreisen auf den heimischen und internationalen Märkten, von den politischen Förderbedingungen und nicht zuletzt auch von der sozialen Akzeptanz ab. In diesem Zusammenhang leistet das Forschungsprogramm einen wichtigen Beitrag zur effizienten Nutzung der nationalen Biomasse zur Energieproduktion. Bezüglich der fokussierten Technologien (Verbrennung, Vergasung, anaerobe Vergärung) sind die spezifischen Forschungsziele auf folgende Bereiche ausgerichtet: (1) Entwicklung neuer Verfahren und Technologien, (2) Hochskalierung oder Downsizing von marktnahen Verfahren, (3) Systemoptimierung, -integration und -erweiterung und (4) Qualitätssicherung.

Im Fokus der Verbrennung steht das Thema der Optimierung von Holzfeuerungen, Holzheizkesseln und Holzöfen bezüglich Emissionen und Benutzereinfluss. Bei der Vergasungstechnologie geht es primär um Weiterentwicklungen in der Gasaufbereitung und Diagnostik, aber auch um die Wirkungsgradsteigerung und Aufskalierung von erfolgsversprechenden Konzepten. Die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Anlagen und die Steigerung der Anlageneffizienz, sowie die Entwicklung innovativer Konzepte sind wichtige Themen bei der anaeroben Vergärung.

Rückblick und Bewertung 2013

Im Frühjahr 2013 wurde ein Meeting im Rahmen des Implementing Agreements «Bioenergy» der Internationalen Energieagentur IEA laufenden Task 37 von der Schweiz als Gastgeber durchgeführt. Neben dem Arbeitsmeeting fand ein Workshop zum Thema «Biogas Process Optimisation» mit zahlreichen nationalen und internationalen Referenten statt. Ebenfalls innerhalb Task 37 wird unter der Federführung der Schweiz ein technischer Bericht zum Thema anaerobe Vergärung von Klärschlamm ausgearbeitet werden, wobei der Fokus auf der effizienten Energieproduktion und -nutzung gelegt ist.

Im Rahmen des Task 32 (IEA Bioenergy) wurde unter der Leitung der Schweiz das Projekt «Evaluation of optimal design of biomass fired district heating networks» gestartet. Ziel des Projekts ist die Evaluation typischer Fernwärmenetze. Basierend auf einer Systemanalyse sollen der Einfluss der wichtigsten Betriebsgrößen in Bezug auf die Energieeffizienz und die Energiekosten ermittelt werden, um daraus Empfehlungen für die Planung neuer Fernwärmenetze bzw. für die Verbesserung existierender abzuleiten.

Auch in Task 33 (IEA Bioenergy) wurden durch die Initiative der Schweiz neue Aktivitäten gestartet, u. a. konnten erste Factsheets erarbeitet werden, welche die Vergasertechnologie mit Beispielen und Daten verständlich darstellen.

Neben den Aktivitäten in internationalen Gremien wurden auch neue Projekte zu folgenden Themen initiiert: Energetische und ökonomische Optimierung eines Membranbioreaktors, Leistungssteigerung bei der Monovergärung von tierischen Nebenprodukten, Optimierung eines Pellet-Holzgasbrenners in Bezug auf Emissionen und Einsatz als Retrofit-Brenner, Machbarkeitsstudie zur Holzvergasung und Methanisierung in der Schweiz.

Ausblick

In Zukunft wird die Förderung von Pilot- und Demonstrationsanlagen eine wichtige Rolle spielen was sich auch in den vom Bund zur Verfügung gestellten steigenden Mitteln für P&D und Leuchtturmprojekte (2014: 25 Mio.CHF) zeigt. Auch im europäischen Kontext sind P&D-Anlagen im Rahmen des SET-Plans (Strategic Energy Technology) im Fokus der öffentlichen Förderung. Im Bioenergiebereich wurden bereits zwei ERANET-Plus Calls initiiert. Momentan läuft für den zweiten Call (BESTF 2), die Evaluation der eingegangenen P&D-Projekte. Die Schweiz ist an beiden Calls beteiligt und hofft auf gute Industrieprojekt.

Die laufenden schweizerischen IEA-Aktivitäten werden im Jahr 2014 weitergeführt bzw. durch Publikationen abgeschlossen.

Durch die Ausschreibung von Kompetenzzentren durch die KTI (Kommission für Technologie und Innovation) in verschiedenen Bereichen werden auch neue Aktivitäten im Biomassebereich lanciert werden. Das neugeschaffene Biomassekompetenzzentrum wird verschiedene innovative Ideen im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsprojekten untersuchen. Des weiteren werden Projekte, welche für das Nationale Forschungsprogramm 70 «Energiewende» des Schweizerischen Nationalfonds eingegeben wurden, evaluiert und voraussichtlich im Herbst 2014 gestartet werden. Auch unter dem NFP 70 werden höchstwahrscheinlich Biomasseprojekte durchgeführt werden.

Highlights aus Forschung und Entwicklung

Nachbereitung von Gärgut

Mit Aufbereitungstechnik lassen sich Vergärungsprodukte auftrennen in ein festes Gärgut und ein flüssiges Nährstoffkonzentrat. Dies reduziert das Volumen der düngerwirksamen flüssigen Phase, was zu Einsparungen von Energie und Umweltbelastung beim Transport zum Ausbringort führt. Diesen Einsparungen stehen Aufwendungen gegenüber, die mit der Herstellung des Konzentrats und dessen Anwendung verbunden sind. Ziel des Projekts ist zu untersuchen, ob die Gärgutaufbereitung energetisch, ökologisch und ökonomisch Sinn macht. Dazu wurden am Beispiel einer grossen Biogasanlage die Stoffflüsse bei der Aufbereitung von flüssigem Gärgut untersucht (Figur 1). Es wird das direkte Ausbringen von Gärgut hinsichtlich Energiebilanz und Umweltbelastung verglichen mit einer dreistufigen Nährstoffaufbereitung (Grobseparierung, Ultrafiltration, Umkehrosmose).

Aus rund 42'500 t flüssigem Gärgut entstehen jährlich bei der Aufbereitung gut 10'000 t Nährstoffkonzentrat mit rund 7 kg NH₄+ und 4 kg K₂O pro Tonne sowie rund 5'000 t zusätzliches festes Gärgut. Bezüglich der Stoffflüsse können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden. Im Konzentrat finden sich 35–40 % des im flüssigen Gärgut zugeführten totalen Stickstoffs in der Form von Ammonium, bzw. rund 55–60 % des im Input (Gärgut) vorhandenen Ammonium-Stickstoffs. Jedoch finden sich im Konzentrat weniger als 2 % des zugeführten Phosphors in gelöster Form wieder. Phosphor ist sehr ausgeprägt an die Fraktionen mit Feststoffteilen gebunden. Im flüssigen Gärgut liegen die Schwermetallwerte deutlich unter den gesetzlichen Grenzwerten. Im Konzentrat liegen einige Werte unter der Nachweisgrenze. Die Resultate sprechen dafür, dass alle Schwermetalle vorwiegend in der festen Fraktion verbleiben, insbesondere Cu, Zn, Ni, Pb.

Betrachtet man die energetischen Aspekte der Nährstoffaufbereitung, so zeigt sich, dass durchschnittlich rund 22,5 kWh Endenergie pro Tonne zugeführtes flüssiges Gärgut in Form von Elektrizität notwendig sind plus 2,3 kWh/t für die Herstellung der Hilfs-

mittel, was etwas mehr als 20 % der aus dem Biogas erzeugbaren Elektrizität entspricht, wobei die Ultrafiltration rund 70 % beansprucht. Wenn man Aufbereitung und Transport addiert, wird bei der Aufbereitung bis zum Ausbringort der Produkte über doppelt so viel Endenergie benötigt als bei direktem Ausbringen; das Material müsste mindestens rund 200 km weit transportiert werden, bis aus Sicht der Endenergie sich die Aufbereitung zu lohnen beginnt. Auf Ebene der Primärenergie ist das Resultat noch ausgeprägter, und zwar wird für die Aufbereitung (je nach Strommix) zwischen 4,6 und 4,9 Mal mehr Energie benötigt, als für das direkte Ausbringen.

Beim energetischen Aufwand zum Ausbringen auf dem Feld konnte kein klarer Unterschied zwischen flüssigem Gärgut und Nährstoffkonzentrat ausgemacht werden, da je nach Unternehmer sehr grosse Unterschiede beim Ausbringen desselben Produkts bestehen (Figur 2).

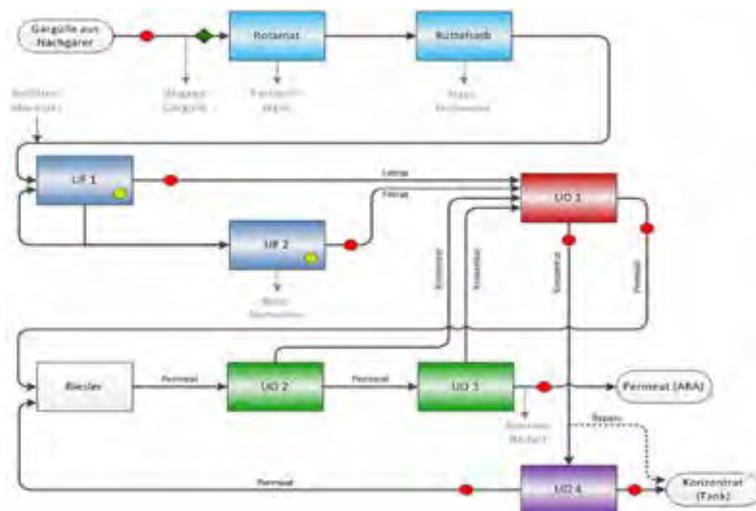
In Bezug zu Umweltbelastungen bei der Nährstoffaufbereitung zeigte sich, dass die untersuchte Anlage im Vergleich zu konventionellen Anlagen spürbar weniger Schadstoffe emittiert. Der grosse Energieaufwand beim Aufbereiten wirkt sich hingegen negativ auf die Umwelt

aus: Zwar können durch den reduzierten Transportaufwand jährlich rund 120 t CO₂-eq. Treibhausgase eingespart werden. Beim Strom für die Aufbereitung werden jedoch Emissionen frei: Bei der Aufbereitung ist daher der totale Treibhausgasausstoss 1,4-mal (CH-Strommix), bzw. 3,8-mal (EU-Strommix) grösser als bei direktem Transport und Ausbringen des unbehandelten flüssigen Gärguts.

Bezüglich der Ammoniakemissionen beim und nach dem Ausbringen deutet ein erster Versuch auf mögliche Vorteile des Ausbringens von Konzentrat hin. Wie gross Einsparungen von Energie und Reduktion von Umweltbelastungen bei der möglichen Substitution von Mineraldüngern sein können, konnte im Rahmen dieses Projekts nicht abgeklärt werden.

Bei den hygienischen Aspekten der Nährstoffaufbereitung konnte gezeigt werden, dass keine pathogene Keime (E. coli, Enterokokken, Campylobacter etc.) bis ins Konzentrat vordringen.

Aus Sicht der Ökonomie scheint die Situation vorteilhafter für die Aufbereitung. Wenn man bei der Aufbereitung mit Transportkosten zum Ausbringort von CHF 20/t rechnet, so kann gegen-



Figur 1: Verfahrensschritte der in diesem Projekt untersuchten Nachbereitung von Gärgut. Dargestellt sind die wichtigsten Stoffströme und die Messgruppen: Durchflussmessungen (rote Punkte), Druckmessung (gelbe Punkte). Die grüne Raute vor dem Rotamat stellt die Durchflussmenge dar, die für die Berechnung des spezifischen Energiebedarfs verwendet wird. Nicht dargestellt: zugeführte Hilfsmittel wie Schwefelsäure und wässrige Lösungen von Reinigungsmitteln, Flockungsmitteln und Antiscalant. (Quelle: engeli engineering et al.).



Figur 2: Beispiele von Ausbringfahrzeugen für Konzentrat. Der Tank ist direkt auf dem Fahrzeug, so dass das Pumpen ab Feldrand entfällt. (Quelle: engeli engineering et al.).

über dem direkten Ausbringen 10–15 % eingespart werden. Bei einem Preis von CHF 15/t wären die beiden Varianten ökonomisch gleichauf. In der EU, wo die Strompreise z. T. über 20 €cts/kWh liegen und gleichzeitig die Löhne und damit die Transportkosten wahrscheinlich tiefer sind als in der Schweiz, dürfte es daher schwierig sein, eine Aufbereitungsanlage gewinnbringend zu betreiben.

Die Resultate dieses Projekts führen – unter den hier gewählten Systemgrenzen – zum Schluss, dass die Nährstoffaufbe-



Figur 3: Salmonellen auf BPLS-Agar (Brillantgrün-Phenolrot-Lactose-Saccharose-Agar). (Quelle: W. Philipp et al.).

ereitung zwar (zumindest in der Schweiz) ökonomisch interessant sein kann, aus ganzheitlicher energetischer und ökologischer Sicht hingegen nicht sinnvoll ist. Allerdings besteht auch hier die Möglichkeit, dass die Systemgrenzen in dieser Studie immer noch zu eng gefasst wurden. Sofern mit dem Konzentrat tatsächlich die Herstellung von Mineraldünger eingespart werden könnte, müssen auch der Energieaufwand und die Umweltbelastung bei der energieintensiven und umweltbelastenden Herstellung von Ammoniak und von Kalidünger in die Rechnung mit einfließen.

Hygienisches Risiko von flüssigem Gärgut

Ziel dieses Projektes war es, eine Charakterisierung des seuchenhygienischen Zustandes von flüssigem Gärgut als Produkt von Schweizer Vergärungsanlagen in Relation zu den Ausgangsmaterialien und zu den angewandten Techniken der Vorbehandlung, der anaeroben Vergärung und der Nachbehandlung durchzuführen.

Es wurden drei Probenahmekampagnen durchgeführt, wobei insgesamt 19 repräsentative Vergärungsanlagen detailliert untersucht wurden.

Jede Anlage wurde gemäss ihren Eigenschaften beprobt, so dass alle relevanten Ausgangsmaterialien und Prozessstufen erfasst wurden. Dabei wurden die Proben auf folgende Keime untersucht: Salmonellen, coliforme Keime, Escherichia coli (E. coli), Enterokokken und Campylobacter (Figur 3).

Bezüglich der Organismen in den Ausgangsmaterialien kann festgestellt werden, dass die Mehrheit der Ausgangsmaterialienproben frei von Salmonellen war oder nur sehr wenige enthielt. Festes Grüngut mit Speiseresten aus ländlichem Ursprung sowie festes Grüngut ohne Speisereste, Schweinegülle, Fettschlämme, Gülle in Güllegruben und Material im Mischer enthielten am häufigsten Salmonellen, jedoch nur in relativ kleiner Anzahl.

E. coli war in mehr als der Hälfte aller Proben zu finden, wobei relativ grosse

Variationen zwischen den Proben einzelner Ausgangsmaterialien zu beobachten waren. Wegen der grossen Streuungen innerhalb der verschiedenen Ausgangsmaterialien wurden jedoch kaum signifikante Unterschiede zwischen den Eingangsmaterialien festgestellt, lediglich, dass das ländliche Grüngutmaterial am meisten mit E. coli durchsetzt war.

Coliforme Keime und Enterokokken waren allgemein in relativ hoher Anzahl in fast allen Proben zu finden. Bei den coliformen Keimen waren die Variationen innerhalb eines Ausgangsmaterials wie bei E. coli sehr gross, wobei am meisten Keime im Grüngut, im Panseninhalt und in Fischabfällen vorkamen. Bei den Enterokokken war die Streuung der Daten geringer, jedoch fanden sich ebenfalls im Grüngut und im Panseninhalt die meisten Keime.

Neben der Beprobung der Ausgangsmaterialien wurden auch die verschiedenen Prozessstufen der thermophilen und mesophilen Vergärung untersucht (Figur 4).

Nach der thermophilen Fermentation wurden Salmonellen nur noch in sehr geringer Konzentration gefunden. Gleichzeitig findet durch die thermophile Fermentation eine sehr starke Reduktion von E. coli statt, hingegen werden die Populationen an coliformen Keimen durch den thermophilen Prozess nur leicht reduziert. Vor allem im festen Gärgut (nach der Trennung) wurden weiterhin hohe Populationen dieser Keime gefunden. Enterokokken wurden durch den thermophilen Prozess deutlich dezimiert, jedoch im Gegensatz zu Salmonellen und E. coli nicht vollständig reduziert.

Allgemein war die Keimreduktion in den mesophilen Anlagen nur sehr gering. Dennoch konnte für Salmonellen und E. coli eine leichte Abreicherung nachgewiesen werden, jedoch waren bei 40 % der mesophilen Anlagen Salmonellen nach dem Fermenter zu finden. Bei den coliformen Keimen und Enterokokken konnte keine Abnahme der Keimzahl nach dem Fermenter nachgewiesen werden.

Ein weiterer interessanter Aspekt des Projekts ist das Reinfektionspotenzial von Gärgut bei der nachgeschalteten

	1. Kampagne				2. Kampagne				3. Kampagne				Gesamt			
	% der Proben mit Keimen		% der Anlagen mit Keimen		% der Proben mit Keimen		% der Anlagen mit Keimen		% der Proben mit Keimen		% der Anlagen mit Keimen		% der Proben mit Keimen		% der Anlagen mit Keimen	
	thermo.	meso.	thermo.	meso.												
Anzahl Proben/Anlagen	9.0	26.0	5.0	12.0	12.0	21.0	6.0	12.0	10.0	22.0	6.0	12.0	31.0	69.0	17.0	36.0
Salmonellen	11.1	42.3	20.0	41.7	0.0	19.0	0.0	25.0	0.0	15.5	0.0	50.0	3.2	36.2	5.8	39.3
E. coli	33.3	60.0	20.0	75.0	16.7	20.0	16.7	25.0	0.0	63.6	0.0	58.3	16.1	49.0	12.3	54.5
Coliforme Keime	100.0	100.0	100.0	100.0	83.3	95.0	83.3	100.0	40.0	77.3	60.0	75.0	74.2	91.2	80.6	92.0
Enterokokken	100.0	100.0	100.0	100.0	83.3	100.0	83.3	100.0	80.0	100.0	60.0	100.0	87.1	100.0	80.6	100.0

Figur 4: Einfluss der Prozesstemperatur über die Anzahl Proben und Anlagen, bei welcher pathogene Keime isoliert werden konnten. Anzahl der Proben nach dem Fermenter mit Keimen in % der gesamten Anzahl untersuchter Proben bzw. Anzahl der Anlagen mit Keimen in Proben nach dem Fermenter in % der gesamten Anzahl der untersuchten Anlagen.

thermo. = thermophile Anlage, meso. = mesophile Anlage (Quelle: J. Fuchs et al.).

Lagerung. Für keinen der analysieren Keime kann eine Reinfektion von Gärgut bzw. eine Wiederverkeimung und eine Anreicherung während der Lagerung nachgewiesen werden. In sämtlichen flüssigen und festen Gärgutfraktionen sowohl nach der mesophilen als auch nach der thermophilen Vergärung liegen die Populationsdichten der analysieren Hygieneleitkeime tiefer (Salmonellen, E. coli) oder auf gleichem Niveau (coliforme Keime, Enterokokken) wie in den Mischungen der Inputmaterialien.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die *Inputmaterialien* mit dem grössten Erregerbesatz Grüngut und Panseninhalt darstellen. Salmonellen können in den Inputmaterialien nur sehr vereinzelt und in geringen Konzentrationen nachgewiesen werden. Da sowohl coliforme Keime, E. coli, als auch Enterokokken in den meisten Inputmaterialien in mittleren Konzentrationen nachgewiesen werden, eignen sich diese Leitkeime nur sehr begrenzt zur Beurteilung des seuchenhygienischen Risikos eines Materials. *Campylobacter* spp. kann in keinem der Inputmaterialien nachgewiesen werden und ist damit ebenfalls nicht zur Beurteilung des seuchenhygienischen Risikos eines Materials geeignet.

Bezüglich der *Behandlungsverfahren* kann gesagt werden, dass Salmonellen und E. coli in thermophilen Anlagen effizient und auf nicht mehr nachweisbare Niveaus eliminiert werden können, sofern die Temperatur und die Verweilzeit den Vorgaben entspricht und auch keine Kurzschlussströme vorhanden sind. En-

terokokken und coliforme Keime werden in der thermophilen Vergärung nicht vollständig eliminiert. Die mesophilen Anlagen haben nur einen geringfügigen Einfluss auf die Mengen der untersuchten Keime, da z. T. zwar die Quantität einzelner Keime wie z. B. E. coli reduziert wird, aber die Keime immer noch in bedeutenden Mengen in den Endprodukten zu finden sind.

Bei der Beprobung und Bestimmung der Konzentrationen an Hygieneleitkeimen konnten teilweise deutliche Unterschiede zwischen ähnlichen Inputmaterialien und Endproduktion von Anlage zu Anlage beobachtet werden. Ein wichtiger Faktor ist hierbei die Prozessführung und die einzelnen Arbeitsabläufe im Betrieb selbst. Ein weiterer Faktor, welcher nicht untersucht wurde, sind die kurzfristigen saisonalen und temperaturabhängigen Fluktuationen der Organismenkonzentration.

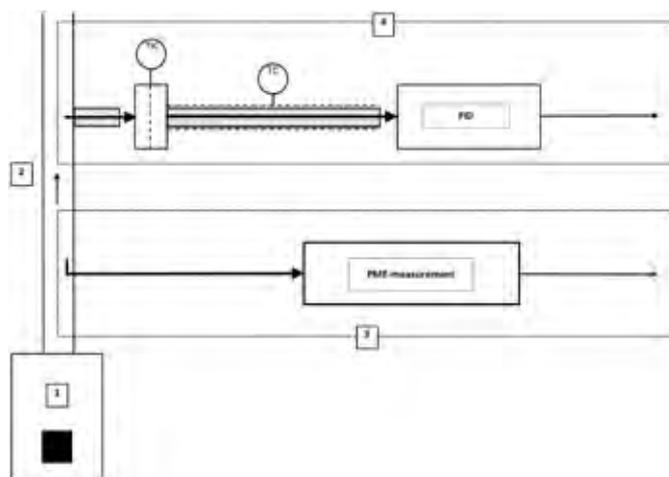
Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass Vorsicht geboten ist bei der direkten Anwendung von Gärgut aus mesophilen Anlagen für Kulturen, welche un- bearbeitet verzehrt werden.

Typenprüfung von Festbrennstofffeuerungen – Bestimmung der Partikelemissionen

Ziel des Projektes ist die Entwicklung und Validierung eines neuen Messverfahrens für Partikelemissionen (PME, particle matter emissions) in den Abga-

sen von Feuerstätten und Kesseln für feste Brennstoffe. Das Verfahren soll als einheitliches Messprozedere in die europäische Norm einfließen, um in den Typenprüfungen angewendet werden zu können. Im Laufe des Projekts soll sowohl an einer Kurzfrist-, als auch an einer Langfristmethode eines einheitlichen europäischen Messverfahrens gearbeitet werden.

Das europäische Projektkonsortium legte anfangs 2013 das kurzfristig umzusetzende PME-Messverfahren fest. Es umfasst eine Simultanmessung mit gravimetrischem Filter zur Ermittlung der PME-Masse und ein FID-Messgerät (flame ionization detector) zur Messung der gasförmigen Kohlenwasserstoffverbindungen (organic gaseous carbon, OGC) (Figur 5). Die gravimetrische Staubmessung als Teil der vorgeschlagenen PME-Messmethode basiert auf der europäischen Norm EN-13284-1. Ein Abgasteilstrom wird in der Abgasmessstrecke als Probegas für die Staubmessung entnommen. Die Orientierung der Entnahmesonde ist gleichlaufend mit der Abgasflussrichtung. Messungen des Schweizer Projektkonsortiums an bestehenden, im Handel erhältlichen Staubmessgeräten haben deutlich aufgezeigt, dass die Vorgaben selbst von bestehenden Normen mit diesen Geräten nicht eingehalten werden. Die grössten Probleme betrafen das Einhalten der vorgeschriebenen Temperatur des Probegases am Ort der gravimetrischen Staubmessung (Filter). Während die Staubfilter in der Regel auf der korrekten Temperatur gehalten werden können, war die Kon-



Figur 5: Kurzfrismethode zur PME-Messung (particle matter emissions) mit der parallelen Anordnung der gravimetrischen Staubmessung und der OGC-Messung (organic gaseous carbon) (FID-Messgerät) 1: Prüfling; 2: Abgasmessstrecke, 3: gravimetrische Staubmessung, 4: OGC-Messung (Quelle: Ökozentrum Langenbruck, Fachhochschule Nordwestschweiz).

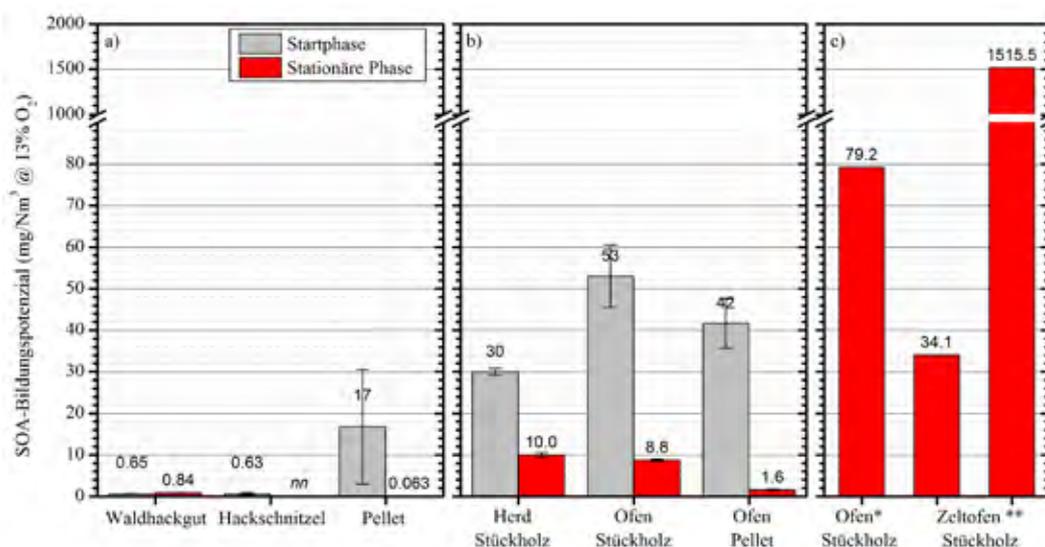
ditionierung des Probegases auf die vorgeschriebene Temperatur (z. B. 160°C) in der Probeleitung nicht gewährleistet. Dies führte dazu, dass das Probegas mit zu hoher oder zu tiefer Temperatur auf den Filter auftraf und so das Messergebnis durch Verdampfung bzw. Kondensation von Kohlenwasserstoffen auf dem Filter verfälschte. Vorgabe für die neu zu entwickelnde Staubmesssonde war die

zentrale Anforderung, dass das Probegas auf die vorgegebene Probegastemperatur von 180 °C (+/- 10 °C) konditioniert werden kann. Nach Berechnungen und Versuchsreihen hat sich gezeigt, dass für den vorgegebenen Abgastemperaturbereich bis 400 °C ein 2 m langes Probenahmerohr mit elektrischer Direktbeheizung geeignet ist. Um das Abkühlen des Probegases an der Wand des Rohrs

mit entsprechender Kondensation von Substanzen auszuschließen, wird es auf der ganzen Länge auf 180 °C beheizt. Tests bestätigten die einwandfreie Funktion des Messprinzips. Es wurde auch das Abscheideverhalten von Zyklonen in der PME-Probenahmestrecke getestet. Es zeigt sich, dass der Einsatz von Zyklon und Impaktor zu vermeiden ist, da Druckverluste auftreten, die ein Einsatz eines Planfilters für die gravimetrische Staubmessung erschweren.

Ebenfalls beschäftigten sich die Schweizer Partner mit längerfristig umsetzbaren PME-Messverfahren, insbesondere der Mikro Smogkammer (micro smogchamber, MSC) zur Erfassung von organischen Sekundäraerosolen (SOA) (Figur 6). MSC-Simultanmessungen mit der Smogkammer des PSI zeigten, dass die MSC SOA-Bildungspotenzial detektiert, die einem 400-stündigen Alterungsprozess in der Atmosphäre für organische Substanzen entsprechen. Dies bezieht sich auf Versuche mit einer stark verdünnten Vorläufersubstanz. Die entsprechende atmosphärische Alterungszeit bei den hohen SOA-Konzentrationen in den Holzfeuerungsabgasen wird deutlich kürzer sein.

Das europäische Konsortium steht mitten in den Vorbereitungen einer Mess-



Figur 6: Mittleres SOA-Bildungspotenzial (secondary organic aerosols) von a) 3 automatischen Kesseln der Messkampagne "QS-Support Holzfeuerungen", von b) 3 im Prüflabor gemessenen, modernen Wohnraumfeuerungen und c) das SOA-Bildungspotenzial von 3 Stückholzöfen, die den LRV-Anforderungen nicht genügen. Die SOA-Werte von a) und b) wurden mit der Mikro-Smogkammer gemessen, während c) Werte aus der Literatur von herkömmlichen Smogkammer-Messungen sind (Heringa et al., 2011, and Grieshop et al., 2009); nn= nicht nachweisbar. (Quelle: Ökozentrum Langenbruck, Fachhochschule Nordwestschweiz).

kampagne mit dem PME/OGC-Verfahren. Messgruppen der verschiedenen Projektpartner werden in simultanen laufenden Messungen an einer identischen Schadstoffquelle (Kesselabgase)

im Institut national de l'environnement industriel et des risques (Frankreich) die Leistungsfähigkeit des PME/OGC-Messverfahrens eruiert und die erzielten Messresultate verglichen.

Nationale Zusammenarbeit

Das Forschungsprogramm Biomasse und Holzenergie pflegt eine intensive Zusammenarbeit mit Hochschulen, Universitäten, privaten Forschungsstellen und Kompetenzzentren. Auch im Jahr 2012 wurde BFE-intern eng mit dem Marktbereich zusammengearbeitet, um innovative Projekte einzuordnen und marktrelevante Bedürfnisse im Forschungsprogramm aufzunehmen. Im vergangenen Jahr wurde die Begleitgruppe des Forschungsprogramms aufgelöst, da diese thematisch zu breit angelegt war. Gleichzeitig wurde eine Austauschplattform zwischen IEA-Mandatsträgern und BFE geschaffen, wobei aktuelle Themen diskutiert werden, aber auch Quervergleiche zwischen den einzelnen Tasks des Implementing Agreements IEA Bioenergy gezogen werden.

Des Weiteren erfolgt ein Austausch mit anderen Forschungsprogrammen des BFE, welche thematisch eng mit dem Forschungsprogramm Biomasse und Holzenergie ver-

knüpft sind (z. B. Wärme-Kraft-Kopplung).

Alle zwei Jahre findet die vom BFE initiierte Tagung «Biomasseforschung in der Schweiz» statt. Im Jahr 2012 wurde die Tagung im Rahmen des Task 37 «Energy from Biogas» Meetings des Implementing Agreements IEA Bioenergy abgehalten. Es wurde ein halbtägiger Workshop zum Thema «Biogas process optimisation» mit nationalen und internationalen Referenten organisiert, welcher mit über 50 Teilnehmer ein voller Erfolg war

Auch die ämterübergreifende Zusammenarbeit spielt innerhalb des Forschungsprogramms eine wichtige Rolle.

Neben der vom BFE initiierten AG Biomasse mit Einsitz von ARE, BAFU, BLW, BVet, EAZ, EZV und Seco spielt der ämterübergreifende Austausch auch bei der vom BAFU initiierten Koordinationsgruppe Ökobilanzen (Einsitz von BAFU, BBL, BFE, SECO) eine wichtige Rolle.

Internationale Zusammenarbeit

International Energy Agency (IEA): Das BFE ist Mitglied beim Implementing Agreement Bioenergy der IEA [4], welches aus 10 Tasks besteht. Die Schweiz arbeitet in drei 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 Schweizer Erfahrungen einzubringen.

Task 32: Biomass Combustion and Co-Firing: Ziel des IEA Bioenergy Task 32 ist die Förderung des vermehrten Einsatzes von Biomasse in Verbrennungsanlagen zur Energieerzeugung und Substitution von fossilen Energien [5]. 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 Biomassennutzung unterstützt werden. Die IEA sichert dazu einen Erfahrungsaustausch über Methoden und Verfahren zur Verbesserung der Effizienz und Umweltverträglichkeit von Anlagen für die Biomasseverbrennung. Im laufenden Triennium sind folgende 12 Länder vertreten: Niederlande (Leitung), Belgien, Dänemark, Deutschland, Grossbritannien, Irland, Japan, Norwegen, Österreich, Schweden, Schweiz,

Südafrika. Im Berichtsjahr wurde der im Vorjahr vereinbarte Dreijahresplan bestätigt und als Arbeitsschwerpunkte folgende Themen gesetzt: Small-scale combustion, Aerosols, Torrefaction, Co-firing, Combined heat and power, pellets, ash utilization, CFD modeling, health and safety. Bezüglich des Arbeitsplans wurden aus der Schweiz vier Projekte vorgeschlagen: die Analyse von Fernwärmenetzen und eine Stellungnahme zu Aerosolen. Schwerpunkte im Berichtsjahr waren der IEA-Workshop über CFD-Simulation von Verbrennungsprozessen und die EU Biomass Conference in Kopenhagen. Daneben wurde aus der Schweiz die Bearbeitung des Projekts über Fernwärme gestartet und die bisher in der Schweiz durchgeführten Arbeiten der IEA vorgestellt.

Task 33: Thermal gasification of biomass: Dieser Task [6] 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) Komponenteoptimierung: Gasreinigung, Filterkonzepte, Optimierung der Synthetisierung; und (4) Verbesserung des gesamten Anlagen-Wirkungsgrades auf den verschiedenen Verfahren. Im vergangenen Jahr führte der Task im Rahmen seines Herbstmeetings einen Workshop zum Thema «System and integration aspects of biomass-based gasification» zusammen mit dem IA IETS (Industrial Energy-Related Technologies and Systems) durch. Ebenfalls am Herbstmeeting wurden neu erarbeitete Factsheets vorgestellt, welche die Vergasertechnologie mit Beispielen und Daten verständlich darstellt.

Task 37: Energy from Biogas and Landfill Gas: Die übergeordnete Aufgabe des Tasks [7] ist der Informationsaustausch über die Technik der anaeroben Vergärung. Dazu gehören die Gärtechnik, Beurteilung von Substraten, Nutzung von produziertem Biogas sowie der Einsatz des Gärguts als organischer Dünger. Mit dem Jahr 2013 hat ein neues Triennium begonnen und damit wurden zahlreiche neue Arbeitsthemen in Angriff genommen. Diese drehen sich um die Schwerpunkte (1) Substrate und Vergärungsprozess, (2) Verwendung der Produkte aus dem Vergärungsprozess, und (3) Nachhaltigkeit. Im Themenkomplex Substrate und Vergärungsprozess hat die Schweiz den Lead beim Erstellen der Broschüre zum Thema Vergärung von Klärschlamm. Im Frühjahr 2013 wurde das Tasktreffen in der Schweiz abgehalten zusammen mit einem vom BFE, Energie Conseil Bachmann und Biomasse Schweiz organisierten Workshop zum Thema «Biogas process optimisation», welcher national wie international grossen Anklang fand. Am Herbstmeeting in Korea fand ein Workshop zum Thema «Renewable energy biogas technologies» statt. Des Weiteren wurden im Berichtsjahr zahlreiche Erfolgsgeschichten veröffentlicht.

Das BFE ist ebenfalls Mitglied im Implementing Agreement Advanced Motor Fuels (AMF) der IEA [8], in dem seit 2013 die Schweiz den Vorsitz durch die Programmleiterin des Forschungsprogramms Biomasse, Sandra Hermle (BFE), inne hat.

Die Aktivitäten innerhalb IEA AMF beziehen sich auf F&E, Bereitstellung und Verbreitung moderner Treibstoffe. Insgesamt gibt es 12 aktive Annexe u. a. zu Themen wie Emission performance of HD Methane engines, Applications, Toxicity of diesel exhaust (Schweiz hat hier den Lead), Performance evaluation of Passenger car, Fuel, and Powerplant options etc. Im Berichtsjahr wurde eine neue Studie zum Thema «Value Proposition Study on Natural Gas Pathways for Road Vehicles» gestartet, welche in Zusammenarbeit mit IEA Bioenergy erfolgen soll. Ziel dieser Studie ist aufzuzeigen wie Erdgas in Strassenfahrzeugen genutzt wird, um die Vor- und Nachteile verschiedener Optionen zu erörtern. Wichtige Aspekte bei dieser Studie umfassen Kosten, Lebenszyklusemissionen, Energieverbrauch und gesellschaftlicher Nutzen. Mittels der Ergebnisse soll ein Weg aufgezeichnet werden, wie sich Erdgas im Transportbereich etablieren kann, anstatt ein Nischendasein zu fristen.

Die alljährlich stattfindende Nanoparticles Conference (auch unterstützt vom BFE) [9] griff 2013 das Thema "How to regulate solid nanoparticles in ambient air" auf. Nationale und internationale Experten diskutierten zum Thema Nanopartikel und deren Inhaltstoffe, Epidemiologische Studien, Auswirkungen von Luftverschmutzung auf Neugeborene, Echtzeiterfassung der Luftqualität in Städten etc. Mit mehr als 400 Teilnehmern war die Veranstaltung ein voller Erfolg.

Referenzen

[1] IEA, 2013: *Key World Energy Statistics 2013*, International Energy Agency

[2] IEA Bioenergy, 2009: *Bioenergy - a sustainable and reliable energy source. A review of status and prospects*, IEA Bioenergy: ExCo: 2009:06

[3] *Bioenergy Sustaining the Future 2 (BESTF 2)*: <http://eranet-bestf.net/two/>

[4] International Energy Agency (IEA) *Implementing Agreement Bioenergy* (<http://www.ieabioenergy.com>)

[5] *Implementing Agreement Bioenergy Task 32* (<http://www.ieabcc.nl>)

[6] *Implementing Agreement Bioenergy Task 33* (<http://www.ieatask33.org>)

[7] *Implementing Agreement Bioenergy Task 37* (<http://www.iea-biogas.net>)

[8] *Implementing Agreement Advanced Motor Fuels* (<http://www.iea-amf.org/>)

[9] BFE, ETHZ, PSI (2013): *17th ETH-Conference on Combustion Generated Nanoparticles* (http://www.lav.ethz.ch/nanoparticle_conf/Former/)

Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(* IEA-Klassifikation)

- NÄHRSTOFFABSCHIEDUNG BEI DER HYDROTHERMALEN METHANIERUNG VON BIOMASSE IM PILOTMASSSTAB** P+D 3.4*

Lead:	PSI Paul Scherrer Institut	Funding:	BFE
Contact:	frederic.vogel@psi.ch	Period:	2012–2014

Abstract: Die hydrothermalen Vergasung ermöglicht die Umsetzung von nasser Biomasse zu synthetischem Erdgas ohne vorhergehende Trocknung. Um die Vergasung nasser Biomasse in einem kontinuierlichen Prozess durchzuführen, ist es notwendig anorganische Salze auszuschleusen und die Koksbildung zu unterdrücken. Im Projekt wird ein Prototyp des Salzabscheiders gebaut, welcher später in einer Demoanlage (1t Biomasse pro Stunde) eingesetzt werden soll.
- EUROPÄISCHES PRÜFVERFAHREN FÜR DIE BESTIMMUNG DER PARTIKELEMISSIONEN VON FESTBRENNSTOFFFEUERUNGEN** R+D 3.4

Lead:	Ökozentrum Langenbruck	Funding:	BFE, BAFU
Contact:	christian.gaegauf@oekozentrum.ch	Period:	2012–2014

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.
- GERUCHSQUELLEN BEI BIOGASANLAGEN** R+D 3.4

Lead:	Forschungsanstalt Agroscope ART	Funding:	BFE
Contact:	matthias.schick@art.admin.ch	Period:	2009–2013

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 Geruchsclagen 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:	Erdgas Zürich u.a.
Contact:	rainer.zah@empa.ch	Period:	2009–2013

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:	thomas.nussbaumer@verenum.ch	Period:	2012–2013

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:	eteca@gmx.ch	Period:	2012–2013

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:	Energie Conseil Bachmann	Funding:	BFE
Contact:	enbachmann@gmail.com	Period:	2012–2013

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 UND ÜBERWACHUNG VON AUTOMATISCHEN HOLZFEUERUNGEN MIT ELEKTROABSCHIEDER - TEIL 1** R+D 3.4

Lead:	Ing. Büro Verenum, Zurich	Funding:	BFE
Contact:	thomas.nussbaumer@verenum.ch	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.
- MESSUNG VON GERUCHSEMISSIONEN UND ENTWICKLUNG EINES GERUCHSEMISSIONSMODELLS FÜR BIOGASANLAGEN** R+D 3.4

Lead:	Ernst Basler + Partner AG	Funding:	BFE, BAFU, div. Kt.
Contact:	holger.frantz@ebp.ch	Period:	2009–2013

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:	matthias.schick@art.admin.ch	Period:	2009–2013

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.
- LEISTUNGSSTEIGERUNG MONOVERGÄRUNG** R+D 3.4

Lead:	Biorender AG	Funding:	BFE
Contact:	juszko@biorender.ch	Period:	2013–2014

Abstract: Das Projekt beantwortet folgende Fragen für die Monovergärung von tierischen Nebenprodukten: (1) Einfluss von Polyacrylamiden auf die Abbauleistung und auf die Bildung von im Betrieb störenden Feinstoffen im Schlamm, (2) Welche Prozesse verursachen störende Inhaltsstoffe im Rohbiogas (z.B. Dimethylsulfid)? (3) Grenzbelastungen bezüglich Ammoniumgehalt, pH-Wert, Temperatur, Schlammalter, CSB-Raumbelastung für den Fermenterbetrieb.
- DÉTERMINATION DE LA PRODUCTION DE MÉTHANE D'INSTALLATIONS DE DIGESTION EN VRAIE GRANDEUR À PARTIR DE TESTS BMP EN LABORATOIRE** R+D 3.4

Lead:	EPFL	Funding:	BFE, ARA Bern, SATOM
Contact:	christof.holliger@epfl.ch	Period:	2012–2014

Abstract: Ce projet propose d'établir les facteurs d'extrapolation permettant d'utiliser directement les résultats des tests BMP (biomethane potential) en laboratoire standardisés pour la détermination de la production énergétique d'une installation à échelle réelle.
- OPTIMIERUNG DES MEMBRAN-BIOREAKTOR-SYSTEMS (MBRPLUS)** R+D 3.4

Lead:	ARGE MBR II c/o Ingenieurbüro	Funding:	BFE, Xpo Naturstrom
Contact:	postmaster@agrenum.ch	Period:	2013–2014

Abstract: Mit dem Einsatz des neuen SSDF-Membransystems im MBRplus sind gegenüber konventionellen Biogasanlagen oder dem mit Rohrmodulen ausgestatteten MBR ökonomische und energetische Vorteile zu erwarten. Es ist von einem schätzungsweise gegen 50% geringeren Strombedarf im Vergleich zum konventionellen MBR auszugehen.
- TORPLANT - PHASE 1** R+D 3.4

Lead:	HEIG-VD	Funding:	BFE
Contact:	jean-bernard.michel@heig-vd.ch	Period:	2011–2013

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 avec production combinée d'énergie mécanique et étude de la valorisation des gaz de torréfaction. Les objectifs sont: la torréfaction de divers sources de biomasse, la production de pellets à partir de la biomasse torréfiée et 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 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.
- **NACHBEREITUNG VON GÄRGUT** R+D 3.4
- Lead: Engeli engineering Funding: BFE, BAFU
 Contact: Engeli Hans engeli@compuserve.com 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.
- **KOMBINIERTER ABGASKONDENSATION/ABGASREINIGUNG FÜR HOLZHEIZANLAGEN** P+D 3.4
- Lead: GUNEP Funding: BFE
 Contact: Koller Eugen e.koller@gunep.ch Period: 2011–2013
 Abstract: Ziel des Projektes ist die Abgaskondensation zur Marktreife zu entwickeln, welche die Emissionswerte von 20mg/Nm³ bzw. 50mg/Nm³ 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.
- **WEITERENTWICKLUNG UND OPTIMIERUNG EINER HEISSLUFTTURBINE IM KLEINEREN LEISTUNGSBEREICH (80-95KWEL)** P+D 3.4
- Lead: Schmid AG Funding: BFE, Groupe E, ...
 Contact: Lüscher Philipp philipp.luescher@schmid-energy.ch Period: 2013–2016
 Abstract: Ziele des Projektes sind das Erzeugen von elektrischer Energie mittels CO₂-neutralen Waldhackschnitzeln im Leistungsbereich von 90 kW elektrisch und 380 kW thermisch, die Steigerung des elektrischen, des thermischen und des Gesamtwirkungsgrades der Anlage und die Erstellung einer optimierten Demonstrationsanlage inkl. Umsetzung der erlangten Erkenntnisse, um die Marktfähigkeit zu erreichen.
- **MINI-BIOGAS** R+D 3.4
- Lead: EREP SA Funding: BFE, Biomasse Schweiz
 Contact: Membrez Yves yves.membrez@erep.ch Period: 2012–2013
 Abstract: Les buts du projet sont de définir le marché pour de petites installations de biogaz en Suisse, d'identifier l'offre actuelle des constructeurs européens pour de telles unités, d'analyser l'adéquation de ces systèmes au marché helvétique et d'adapter si nécessaire, en partenariat avec des constructeurs intéressés, les solutions technologiques au contexte Suisse.
- **BLUEBONSAI BB5+** R+D 3.4
- Lead: Apex AG Funding: BFE, FOGA, ...
 Contact: Oester Ueli uoester@apex.eu.com Period: 2012–2014
 Abstract: Mit dem Projekt „Blue BONSAI BB5+“ soll die Biogasaufbereitung zu Erdgasqualität für kleine, dezentrale Biogas-Anlagen ermöglicht und die Wirtschaftlichkeit aufgezeigt werden. Eine Pilotanlage mit Kleintankstelle ist bei einem landwirtschaftlichen Biogasbauern ohne Erdgas-Netzanschluss geplant.
- **GÄRGUT - HYGIENE** R+D 3.4
- Lead: FiBL Funding: BLW, BVet, BAFU, BFE
 Contact: Fuchs Jacques jacques.fuchs@fibl.org Period: 2012–2014
 Abstract: En Suisse, très peu de données existent sur l'état hygiénique des digestats produits et sur les risques éventuels qui pourraient découler d'une utilisation inappropriée de ces engrais. De manière générale, il n'existe, ni au niveau Suisse ni au niveau européen, aucune données quantitative sur la charge en germes pathogènes des divers intrants (à l'exception des lisiers).

- SCHADSTOFFARME HOLZFEUERUNGEN (500KW-50MW)**

R+D 3.4

Lead:	Hochschule Luzern HSLU	Funding:	SNF, Schmid AG, BFE
Contact:	Nussbaumer Thomas thomas.nussbaumer@hslu.ch	Period:	2012–2015
Abstract: Im vorliegenden Projekt werden die Massnahmen zur Optimierung der Rostauslegung und des Rostbetriebs untersucht und in drei Arbeitsschritten die Basis für weitere Verbesserungen des Ausbrands bei gleichzeitig tieferen Stickoxidemissionen erarbeitet.			
- SWISS SNG**

R+D 3.4

Lead:	CTU Clean Technology Universe AG	Funding:	BFE, FOGA, Holdigas
Contact:	Gadola Giorgio giorgio.gadola@ctu.ch	Period:	2013–2014
Abstract: Erarbeitung einer Machbarkeitstudie für die Realisierung einer optimierten ersten kommerziellen Anlage zur Erzeugung von synthetischem Erdgas (Biogas) aus Holz mit einer Leistung von ca. 1-2 MWbioSNG für den Standort Mont-la-Ville (VD). Insbesondere stehen dabei die Nutzung der regionalen Holzressourcen sowie die Einspeisung ins lokale Erdgas-Verteilnetz im Vordergrund.			
- OPTIMIERTER, EMISSIONSARMER RETROFIT-HOLZGAS-BRENNER (20KW) MIT GROSSEM REGELBEREICH**

R+D 3.4

Lead:	FHNW	Funding:	BFE, Erdgas Zürich
Contact:	Griffin Timothy timothy.griffin@fhnw.ch	Period:	2013–2015
Abstract: Untersuchung eines Pellet-Holzgasbrenners mit Kondensationskessel bezüglich schadstoffarmer, energetisch optimierter Nutzung von CO ₂ -neutraler Biomasse. Ermitteln der Emissionen in Abhängigkeit der Betriebsphasen und -Parameter. Theoretische und praktische Optimierung mehrstufigen Oxidation zur Emissionsminderung über alle Betriebsphasen. Entwicklung für den Einsatz als Retrofit-Brenner.			
- BIOGAZ - VOIE SÈCHE**

P+D 3.4

Lead:	Morier Cédric	Funding:	BFE
Contact:	Morier Cédric info@dioneurope.com	Period:	2012–2014
Abstract: Ziel ist die Installation einer Trockenvergärungsanlage (Batch Verfahren) auf einem landwirtschaftlichen Betrieb. Die Technik ist in diesem Massstab (landwirtschaftlicher Betrieb keine industrielle Anlage) in der Schweiz noch nicht installiert worden.			
- INVESTIGATION OF SECONDARY ORGANIC AEROSOL FORMATION IN THE PSI SMOG CHAMBER AND AT CERN**

R+D 3.4

Lead:	PSI Paul Scherrer Institut	Funding:	SNF (Projektförderung)
Contact:	Baltensperger Urs urs.baltensperber@psi.ch	Period:	2011–2014
Abstract: Carbonaceous particles comprise a large fraction of the atmospheric aerosol, however, their concentrations and composition as well as formation and transformation mechanisms are still very little understood. The formation and transformation mechanisms of SOA, both from anthropogenic and biogenic sources, will be investigated, both in the PSI smog chamber and at the new CLOUD chamber at CERN.			
- PREDICTING THE COMPLEX COUPLING OF CHEMISTRY AND HYDRODYNAMICS IN FLUIDISED BED METHANATION REACTORS FOR SNG-PRODUCTION FROM WOOD**

R+D 3.4

Lead:	PSI Paul Scherrer Institut	Funding:	SNF (NFP)
Contact:	Schildhauer Tilman tilman.schildhauer@psi.ch	Period:	2012–2015
Abstract: Synthetisches Erdgas aus Holz - Wie kann man die Synthese optimieren? In diesem Projekt untersuchen die Forschenden, wie sich die chemischen Reaktionen, der Stoffübergang und die Fluidynamik in Wirbelschichtreaktoren gegenseitig beeinflussen. Sie prüfen in Experimenten, ob die Reaktorsimulation die realen Abläufe ausreichend genau widerspiegelt. Dies ist wichtig, um mit Hilfe der Simulationen die Prozesse für die Bioerdgaserzeugung zu optimieren			
- STUDYING SALT SOLUTIONS NEAR THE CRITICAL POINT OF WATER USING HIGH PRESSURE CALORIMETRY AND IN-SITU X-RAY ABSORPTION SPECTROSCOPY**

R+D 3.4

Lead:	PSI Paul Scherrer Institut	Funding:	SNF (Projektförderung)
Contact:	Vogel Frederic frederic.vogel@psi.ch	Period:	2011–2014
Abstract: Our motivation is to understand salt formation, precipitation, and recovery in hydrothermal systems relevant for, but not restricted to, technical processes such as hydrothermal gasification of biomass or Supercritical Water Oxidation. In particular, we would like to be able to understand and improve the separation of salts in our hydrothermal gasification process, based on fundamental knowledge of salt formation and precipitation.			

- **DISTRIBUTED PRODUCTION OF ULTRA-PURE HYDROGEN FROM WOODY BIOMASS** R+D 3.4
- Lead: ETHZ Funding: SNF (NFP 66)
- Contact: Müller Christoph muelchri@ethz.ch Period: 2012–2015
- Abstract: Herstellung von hochreinem Wasserstoff aus Holz Im Mittelpunkt dieses Projekts steht ein neuartiger Prozess für die Produktion von hochreinem Wasserstoff aus Holz. Der Prozess basiert auf den Redoxreaktionen von Eisenoxid und könnte dazu beitragen, die Abhängigkeit des Schweizer Verkehrs- und Elektrizitätssektors von kohlenstoffbasierten Energieträgern zu verringern.
- **EFFECTS OF BIOCHAR AMENDMENT ON PLANT GROWTH, MICROBIAL COMMUNITIES AND BIOCHAR DECOMPOSITION IN AGRICULTURAL SOILS** R+D 3.4
- Lead: FiBL Funding: SNF (Projekte)
- Contact: Gättinger Andreas andreas.gattinger@fibl.org Period: 2011–2014
- Abstract: The aim of the proposed project is to investigate the influence of two biochar types on soil-plant systems by determining i) soil nutrient availability, plant growth and nutrient uptake, ii) structure and function of soil microbial communities, iv) the decomposition and fate of biochar in soils. The biochars will be produced by pyrolysis and hydrothermal carbonization (HTC) from the C4-plant Miscanthus gigantea.
- **WOOD2CHEM: A COMPUTER AIDED PLATFORM TO SUPPORT THE OPTIMAL IMPLEMENTATION OF WOOD-BASED BIO REFINERY CONCEPTS** R+D 3.4
- Lead: EPFL Funding: SNF (NFP 66)
- Contact: Marechal Francois francois.marechal@epfl.ch Period: 2012–2015
- Abstract: Wood2Chem: Eine Informatikplattform für die Entwicklung der Bioraffinerie Durch die Einbindung der Herstellung hochwertiger Produkte aus Biomasse eröffnet die Bioraffinerie der Holzindustrie zahlreiche Entwicklungsmöglichkeiten. Die im Rahmen dieses Projektes entwickelte Informatikplattform Wood2Chem ermöglicht die Konzeption innovativer Verfahren für die Verwertung des Rohstoffs Holz in einem ganzheitlichen und integrierten Ansatz.
- **UNDERSTANDING AND MANIPULATING FREE RADICALS IN LIGNIN FOR A CONTROLLED DEPOLYMERIZATION TO CHEMICALS** R+D 3.4
- Lead: PSI Paul Scherrer Institut Funding: SNF (NFP 66)
- Contact: Vogel Frederic frederic.vogel@psi.ch Period: 2012–2015
- Abstract: Freie Radikale im Lignin als Schlüssel zur Herstellung "grüner" Chemikalien. Freie Radikale im Lignin stellen vermutlich den Schlüssel zu seiner chemischen Zerlegung in wertvolle Chemikalien dar. Gelingt es, die Art und Anzahl dieser Radikale zu beeinflussen, könnte dies zu neuen Verfahren für die Herstellung von "grünen" Chemikalien führen.
- **THERMOCHEMICAL PRE-TREATMENT TECHNOLOGY FOR RESIDUES FROM BREWERIES AND OTHER BIOMASS TO ENHANCE ANAEROBIC DIGESTION** R+D 3.4
- Lead: WADI-BRAU-HUUS AG Funding: FP7 Infrastructures
- Contact: Brzoska Julius brauhuus@waedenswiler.ch Period: 2012–2014
- Abstract: The aim of the project is the development of a thermochemical pre-treatment technology to increase the gas yield of brewers spent grains during an anaerobic digestion process.
- **ADVANCED CHEMICAL LOOPING CYCLES FOR THE POLY-GENERATION OF DECARBONISED ENERGY VECTORS** R+D 3.4
- Lead: ETHZ Funding: SNF (Projekte)
- Contact: Müller Christoph muelchri@ethz.ch Period: 2013–2015
- Abstract: Die gegenwärtig verfügbare Technologie für die CO₂ Abtrennung (Aminwäsche) ist mit hohen Kosten verbunden. Um die Kosten für die CO₂ Abtrennung zu reduzieren wird intensiv an neuen Verfahren wie z.B. der chemical looping combustion (CLC) geforscht. Die Entwicklung von hoch-reaktiven Sauerstoffträgern ist für die weitere Entwicklung des CLC Prozesses ausschlaggebend. Das zweite Ziel ist eine technische, ökonomische und ökologische Begutachtung.
- **CHARACTERIZATION AND ENGINEERING OF LIGNIN:PROTEIN INTERACTIONS** R+D 3.4
- Lead: Universität Basel Funding: SNF (NFP 66)
- Contact: Seebeck Florian florian.seebeck@unibas.ch Period: 2012–2015
- Abstract: Mehr als neunzig Prozent der Biomasse weltweit besteht aus Holz. Dessen Potenzial als Brenn-, Bau- und Grundmaterial für chemische Synthesen wird bisher nicht ausgeschöpft, weil Holz biologisch nur schwer abbaubar ist. Hierfür entwickeln die Forschenden in diesem Projekt geeignete biokatalytische Methoden zur Modifikation von Lignocellulose und erschliessen somit neue Wege zur Nutzung der Biomasse Holz.

- **CONCURRENT TRANSFORMATION OF WOOD INTO CHEMICAL COMMODITY FEEDSTOCKS** R+D 3.4

Lead:	EPFL	Funding:	SNF (NFP 66)
Contact:	Dyson Paul paul.dyson@epfl.ch	Period:	2012–2014

Abstract: Simultane Umwandlung von Holz in chemische Grundprodukte Ziel dieses Projektes ist es, Holzbiomasse in wertvolle chemische Produkte umzuwandeln. Dies soll durch die Entwicklung hocheffizienter Nanokatalysatoren sowie den Einsatz multifunktionaler Katalysesysteme erreicht werden. Die Forschungsarbeiten führen potenziell zu neuen, effizienten Reaktionswegen, die in Pilotanlagen in grösserem Massstab zum Einsatz kommen sollen.
- **ENHANCED DIRECT FERMENTATIVE PRODUCTION OF CHEMICALS FROM FORESTRY RESIDUES IN A MEMBRANE BIOFILM REACTOR BY ENZYMATIC IN-SITU LIGNIN MODIFICATION** R+D 3.4

Lead:	Berner Fachhochschule	Funding:	SNF (NFP 66)
Contact:	Studer Michael michael.studer1@bfh.ch	Period:	2012–2015

Abstract: Im Mittelpunkt des Projekts stehen Verfahrensverbesserungen zur Produktion von Bioethanol aus Holz, welches als Alternative zu fossilen Treibstoffen nur sehr geringe Mengen des klimaschädlichen CO₂ emittiert. Mit Hilfe eines speziellen Reaktors und geeigneter Mikroorganismen sollen mehrere bis anhin getrennte Verfahrensschritte vereint und die Gewinnung von Ethanol aus Holz vereinfacht werden.
- **KNOWLEDGE SUPPORT FOR SUSTAINABLE RENEWABLE ENERGY POLICIES: THE PROSPECTS OF PRO-POOR BIOMASS ENERGY VALUE CHAINS IN RURAL-URBAN CONTEXTS IN EAST AFRICA** R+D 3.4

Lead:	Universität Bern	Funding:	SNF (Open Call)
Contact:	Ehrensperger Albrecht albrecht.ehrensperger@cde.unibe.ch	Period:	2013–2016

Abstract: Ein Grossteil der städtischen Bevölkerung in Kenia und Tansania deckt ihren Energiebedarf mit Holzkohle. Die voranschreitende Urbanisierung und der steigende Energiebedarf verstärken den Druck auf die natürlichen Ressourcen im ländlichen Raum. Das Projekt untersucht das Potential und die Realisierbarkeit von nachhaltigen Wertschöpfungsketten verschiedener Biomasse-Energien, die zur Armutsliinderung beitragen können.
- **TRANSFER OF GENES FROM SOIL TO MICROBIAL HOSTS TO IMPROVE PRODUCTION OF LIGNOCELLULOSIC BIOFUELS** R+D 3.4

Lead:	Universität Basel	Funding:	SNF (DocMobility)
Contact:	Ruegg Thomas 0	Period:	2013–2014

Abstract: In der mikrobiellen Umwandlung von Biomasse zu Treibstoffen werden Ionic Liquids (IL) eingesetzt. Diese umweltverträglichen organischen Salze lösen die Biomasse effektiv, womit die Zellulose für den enzymatischen Abbau zu Zuckern zugänglich gemacht wird. Die Toxizität von IL gegenüber Mikroorganismen (z.B. E. coli und Hefe) verhindert jedoch eine effiziente Fermentation. Tolerante Mikroorganismen könnten diesen Engpass lösen.
- **USE OF SCAVENGERS IN THE PRETREATMENT OF LIGNOCELLULOSIC BIOMASS FOR IMPROVED CHEMICALS PRODUCTION** R+D 3.4

Lead:	ETHZ	Funding:	SNF (NFP 66)
Contact:	von Rohr Philipp Rudolf vonrohr@ipe.mavt.ethz.ch	Period:	2012–2014

Abstract: Kombinierte Herstellung von Treibstoffen und Chemikalien aus Holz. Im Mittelpunkt dieses Projekts steht ein neuartiger Ansatz, um Holz für die Produktion von Treibstoffen und Chemikalien vorzubehandeln. Die Forschenden kombinieren dabei den Heisswasseraufschluss mit dem Einsatz sogenannter Radikalfänger.

Wasserkraft



Titelbild:

Kofferdamm für das Einlaufbauwerk des Umleitungsstollen Solis Graubünden (Foto: ewz)

Baustelle für den Einlauf in den Umleitungsstollen für den Speicher Solis an der Albulala in Graubünden. Sobald dieser sogenannte «Kofferdamm» oder «Kreiszellenfangedamm» aus massiven Betonzylindern fertig gestellt ist, kann das Wasser dahinter abgepumpt werden. In der Baugrube, die durch den Kofferdamm vom Speichersee abgetrennt ist, wird das Einlaufbauwerk in den Umleitungsstollen errichtet werden. Der Tunnel ist mit Hilfe eines Schützes normalerweise geschlossen und wird nur bei Hochwasserabflüssen mit starkem Geschiebeeintrag geöffnet, um das mitgeführte Geschiebe direkt ins Unterwasser weiterzuleiten (Foto: EWZ).

BFE Forschungsprogramm Wasserkraft

Überblicksbericht 2013

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE

CH-3003 Bern

Programmleiter BFE (Autor):

Dr. Klaus Jorde, Skat Consulting AG (klaus.jorde@kjconsult.net)

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 die weltweit installierte Leistung wächst jährlich stärker denn je zuvor. In der Schweiz ist Wasserkraft die bedeutendste Quelle für die Generierung von elektrischem Strom. Ungefähr 56 % des benötigten Stroms werden hier mithilfe von Wasserkraft erzeugt. Über die Hälfte davon stammt aus Speicherkraftwerken. Dieser Strom kann auf Abruf bereitgestellt werden, was ihn besonders wertvoll macht. Laufwasserkraftwerke, die das Wasser der Flüsse so abarbeiten, wie es der Wasserführung entspricht, besitzen keine Speichermöglichkeiten. Die attraktiven Standorte in der Schweiz sind seit langem genutzt oder sie stehen unter Schutz. Man schätzt, dass 80–85 % des vorhandenen nutzbaren Potentials heute bereits ausgenutzt werden. Der Ausstieg aus der Kernenergie und das Auslaufen von Stromlieferverträgen mit dem Ausland führen in der Schweiz zu einer massiven Versorgungslücke in naher Zukunft, die geschlossen werden muss. Die Energiestrategie 2050 der Schweiz setzt dabei unter anderem auf einen weiteren Zuwachs der Produktion aus Schweizer Wasserkraft und insbesondere auch auf einen Zuwachs der Produktion aus Pumpspeicherkraftwerken. Der dafür benötigte Pumpstrom könnte z. B. aus Windkraft von der Nordsee stammen. Aus diesen Gründen finden neben den periodisch notwendigen Modernisierungs- und Erneuerungsmassnahmen massive Investitionen in die Wasserkraft statt. Insbesondere bei den Speicher- und Pumpspeicherkraftwerken sind eine Reihe von wesentlichen Erweiterungen und Neubauten im Gang, die für die Bedarfsdeckung der Schweiz aber auch infolge ihrer Rolle im europäischen Verbundnetz versorgungstechnisch not-

wendig sind. Die wirtschaftlichen Bedingungen für solche sehr langfristigen Investitionen sind aufgrund der Unsicherheiten bezüglich der Entwicklung der Strommarktpreise unklar. Diese Unsicherheiten sind investitionshemmend und müssen zumindest in die wirtschaftlichen Betrachtungen und die technische Auslegung mit einbezogen werden. Die Veränderungen des Klimas und das Abschmelzen der Gletscher werden sich auf die Wasserkraftnutzung auswirken. Um gleichzeitig den steigenden betrieblichen Ansprüchen gerecht werden zu können, müssen die Werke und die Speicher z. T. baulich und betrieblich an die sich verändernden Rahmenbedingungen angepasst werden.

Das Forschungsprogramm Wasserkraft unterstützt und fördert die vollständige Nutzung des vorhandenen Wasserkraftpotentials in der Schweiz einschliesslich der Entwicklung der Pumpspeicherkapazitäten. 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 Potentials gemeint, sondern der Anteil, für dessen Nutzung ein gesellschaftlicher und politischer Konsens vorhanden ist. Das Forschungsprogramm trägt unter anderem auch dazu bei, Wissen und Informationen zu schaffen und bereitzustellen, die diese Konsensfindung unterstützen.

Der grösste Teil der Wasserkraftforschung im Bereich der grossen Lauf- und Speicherkraftwerke wird von den grossen Forschungseinrichtungen der Eidgenössischen Technischen Hochschulen

und Universitäten sowie den Fachhochschulen geleistet. Die Fragestellungen beziehen sich dabei zunächst häufig auf Erneuerungs- oder Erweiterungsmassnahmen an einer bestimmten Wasserkraftanlage oder bestimmten Typen von Wasserkraftanlagen. Dort treten Fragestellungen auf, für die es bis heute keine genau untersuchten und allgemein gültigen Lösungsansätze gibt. Während die Wasserkraftindustrie in erster Linie an einer Lösung für das fallspezifische Problem, d. h. für eine einzelne Anlage, interessiert ist, unterstützt die Wasserkraftforschung erweiterte Lösungsansätze, die allgemeingültig und somit auch auf andere Anlagen anwendbar sind.

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 resultiert in vielen Wasserrechtsanträgen, wodurch die kantonalen Behörden zum Teil überfordert sind. Gleichzeitig wächst der Widerstand gegen noch mehr kleine Wasserkraftanlagen.

Weltweit betrachtet wurde nie so viel neue Stromerzeugung aus Wasserkraftwerken in Betrieb genommen, wie zur Zeit. Die grössten Zuwächse finden in den Schwellenländern Asiens, Afrikas und Lateinamerikas statt, wo noch enorme nicht genutzte Ressourcen vorhanden sind. Manche der grossen Projekte sind aufgrund ihrer komplexen sozio-ökonomischen, gewässerökologischen und geopolitischen Auswirkungen äusserst umstritten.

IEA Klassifikation: 3.6 Hydropower

Schweizer Klassifikation: 2.7 Wasserkraft

Programmschwerpunkte

Die Wasserkraftforschung in der Schweiz ist fokussiert auf den Bedarf der Schweizer Wasserkraftindustrie. Die Schweizer Wasserkraft muss die in sie gesetzten Erwartungen an die Stromerzeugung erfüllen, gleichzeitig unterliegt sie vielfältigen äusseren Einflüssen, wie Klimaveränderung, Ansprüchen an den Gewässerschutz oder die Gewässer-sanierung, und sie ist wirtschaftlich und technisch in das europäische Verbundnetz eingebunden. Aufgabe der Wasserkraftforschung ist es daher, die Wasserkraftindustrie dahingehend zu unterstützen, dass sie diese komplexen und sich gegenseitig beeinflussenden Erwartungen bestmöglich erfüllen kann. Das Forschungsprogramm des BFE unterstützt Forschungsvorhaben von Betreibern grosser und kleiner Wasserkraftanlagen aber auch von Herstellern und Lieferanten von Komponenten, wie z. B. Turbinen. Daneben werden auch eigene Projekte von Forschungseinrichtungen oder Planungsbüros unterstützt, wenn die Ergebnisse Verbesserungen bei zukünftigen Planungen für die Schweizer Wasserkraft versprechen. Grundsätzlich sind alle Fragestellungen förderbar, die zu einer weitergehenden Ausnutzung der Schweizerischen Wasserkraftressourcen betragen können. Das Programm ist in die Sparten Gross- und Kleinwasserkraft unterteilt. Die meisten Forschungsprojekte aus dem Bereich der Grosswasserkraft werden gemeinsam mit anderen Geldgebern gefördert und die Wasserkraftindustrie selbst leistet erhebliche Eigenbeiträge.

Die technischen Potentiale der Grosswasserkraft werden bereits zum grössten Teil genutzt und die weiter möglichen Zuwächse in Bezug auf die Produktion sind im Vergleich dazu gering. Aufgrund der Veränderungen im eigenen und im europäischen Strommarkt wird jedoch 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 ergeben sich wirtschaftliche Chancen, aber

auch Risiken. Aus den zunehmenden Lastwechseln ergeben sich veränderte technische Anforderungen und Auswirkungen auf die Schwall-Sunk Regime in den Gewässern unterhalb der Kraftwerke. In verschiedenen Forschungsprojekten wird daher untersucht, wie die Speicherseen und ihre Betriebsweise erweitert und daran angepasst werden können. Auch die hydraulischen und elektromechanischen Komponenten der Kraftwerke müssen dafür angepasst werden. Wasserkraftanlagen, ihre Auslegung und ihr Betrieb werden mittel- bis langfristig schwerer prognostizierbar. Die Unsicherheiten, z. B. bezüglich der Strompreisentwicklung, 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 Revitalisierung der Flüsse im Zusammenhang mit der Wasserkraftnutzung bleibt ein wichtiges Forschungsgebiet. Die Abwärtswanderung der Fische an grossen Flüssen, Fragen im Zusammenhang zu Schwall und Sunk sowie die Wiederherstellung des Geschiebehaltungs sind zentrale Fragen der kommenden Jahre.

Bei den Kleinwasserkraftwerken gibt es noch beträchtliche technische Potenziale, die bisher nicht genutzt sind. Ob und wie weit diese tatsächlich unter technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten noch zur Stromerzeugung herangezogen werden können, ist aber aus Gründen des Gewässer- und Landschaftsschutzes umstritten. Mehrere Kantone haben daher eigene Strategien erarbeitet, wobei gut anwendbare Instrumentarien zur realistischen und flexibel abzustufenden Potentialabschätzung unter anderem mit Fördermitteln aus dem Programm gefördert wurden. Verbesserte und kostengünstige Komponenten, auch solche für spezielle Einsatzbereiche, wie Trinkwasserkraftwerke, werden weiter untersucht und entwickelt.

Rückblick und Bewertung 2012

Aus dem Förderprogramm wurden seit 2008 insgesamt 25 Projekte unterstützt. Im Jahr 2013 wurden 5 neue Projekte in das Programm aufgenommen, gleichzeitig gingen 4 bisherige Projekte zu Ende. Die Mehrzahl der laufenden und neuen Projekte gehörte 2013 zum Bereich der Grosswasserkraft. Es besteht ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Projekten, die sich um technische und wirtschaftliche Verbesserungen bemühen, und Projekten, die ökologische Verbesserungen anstreben.

Ende 2013 wurde das Swiss Competence Center for Energy Research (SCCER) «Supply of Energy» konstituiert. Der zukünftige Beitrag der Wasserkraft zur Energieversorgung der Schweiz entsprechend den Vorgaben der Energiestrategie 2050 ist neben Geothermie der Schwerpunkt dieses Kompetenzzentrums. Die bestehenden und zukünftigen Forschungsaktivitäten des Forschungsprogramms sind mit denjenigen des SCCER vollständig abgestimmt bzw. werden darin integriert. Eine wesentliche Fragestellung wird weiterhin sein, ob und unter welchen Bedingungen die Schweizer Wasserkraft die an sie gestellten Erwartungen aus der Energiestrategie 2050 erfüllen kann.

Der Verband der grossen schweizerischen Stromverbundunternehmen Swisselectric hat 2013 beschlossen, das Forschungsförderungsprogramm «Swisselectric Research» einzustellen. Viele der grösseren Wasserkraftprojekte, die aus dem BFE Forschungsprogramm teilfinanziert wurden, wurden durch wesentliche Beiträge von SER finanziert.

Ausblick

Mit der Energiestrategie 2050 hat die Schweizer Regierung ihre Erwartungen an den zukünftigen Beitrag der Wasserkraft zur Energieversorgung der Schweiz formuliert. Dieser Beitrag basiert einerseits auf einer wesentlichen Steigerung der Erzeugung aus bestehenden und neuen bzw. erweiterten Lauf- und Speicherkraftwerken, zusätzlich aber auch aus Strom aus bestehenden und neuen Pumpspeicherkraftwerken. Der Pumpstrom dafür

soll beispielsweise aus Wind- oder Solarenergie aus dem europäischen Verbundnetz kommen. Eine wesentliche Fragestellung, mit der sich das SCCER «Supply of Energy» in den kommenden Jahre befassen muss, ist die Frage nach

der Realisierbarkeit der Erwartungen an die Wasserkraft bzw. unter welchen Rahmenbedingungen diese realisierbar erscheinen. Neben den Erwartungen aus der Energiestrategie 2050 bewirken weiterhin die Veränderungen im

europäischen Strommarkt, Einflüsse aus der Klimaänderung, Anpassungen an gestiegene Anforderungen an den Gewässerschutz, dass Forschung für eine nachhaltige Nutzung der Wasserkraft erforderlich ist.

Highlights aus Forschung und Entwicklung

Die hier vorgestellten Projekte zeigen einen Ausschnitt aus den Forschungsarbeiten in diesem Programm. Es werden zwei Projekte vorgestellt, die beide zu den grossen Mittel- und Hochdruckanlagen gehören. Beim ersten vorgestellten Projekt geht es um die Speicherverlandung, die für Speicherkraftwerke generell ein Problem darstellt. Weltweit geht jährlich mehr Speicherraum durch Verlandung verloren als dazu gebaut wird. Im europäischen Alpenraum ist die Problematik aufgrund der vergleichsweise stabilen Böden und der Vegetationsdecke weniger ausgeprägt als in anderen Weltregionen. Trotzdem verlanden auch die alpinen Speicher sukzessive und diese Tendenz wird durch den Rückgang der Gletscher und dem Tauen von Permafrostböden verstärkt. Beim zweiten Projekt geht es um Schwebstoffe im Triebwasser aus vergletscherten Einzugsgebieten und die Schäden, welche durch die diese Partikel an den Turbinen entstehen. Auch dies ist ein Problem, welches nicht auf den Alpenraum beschränkt ist, sondern z. B. auch im Himalaya sehr massiv auftritt.

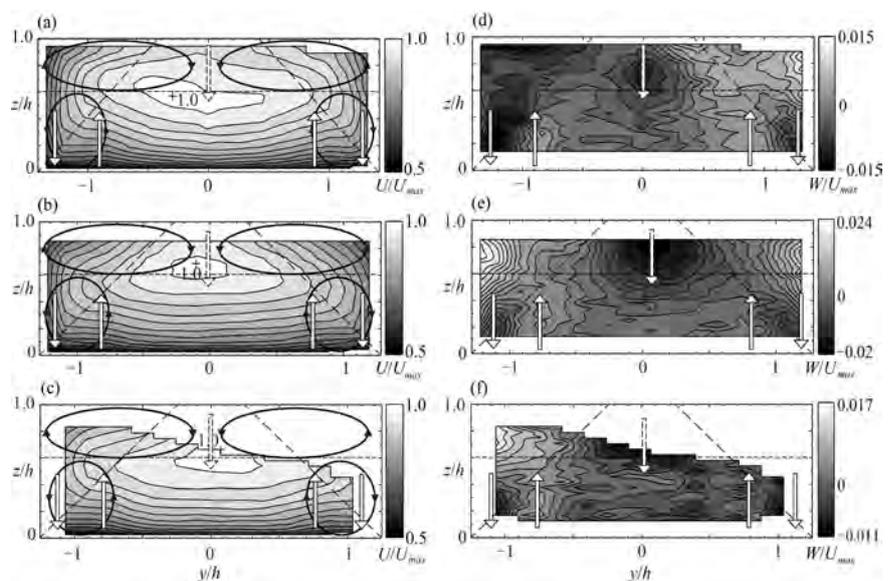
Entwurf und Bemessung von Sedimentumleitstollen

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, der Speicherverlandung entgegenzuwirken. Eine Möglichkeit besteht darin, Hochwässer mit starkem Geschiebetrieb gar nicht erst in die Speicher gelangen zu lassen, weil sich das gesamte Geschiebe dort ablagern würde. Dazu werden so genannte Umleitstollen gebaut, die das Wasser mit dem Geschiebe bei Extremereignissen am oberen Ende des

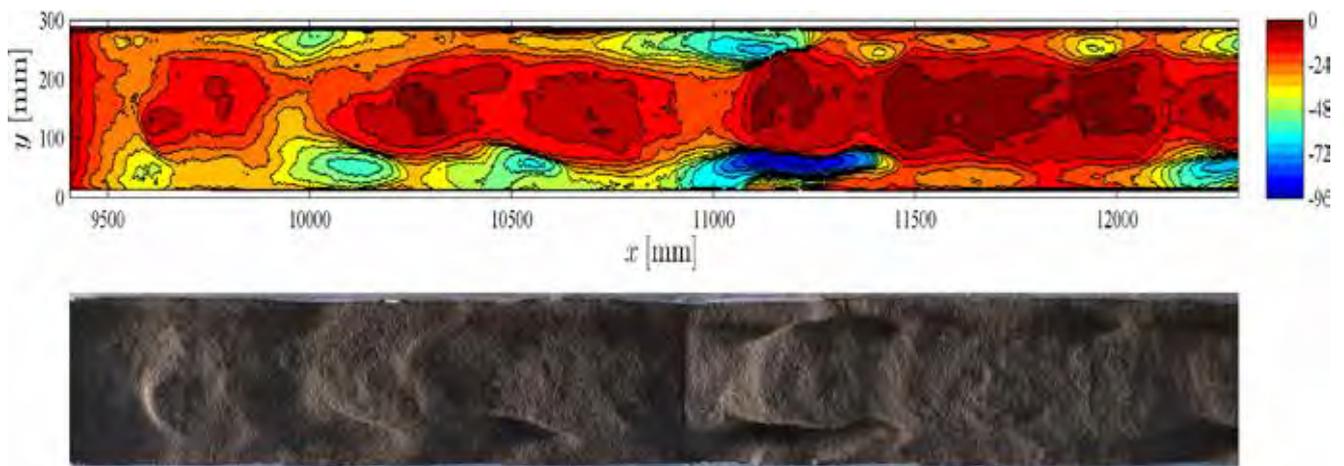
Speichers fassen und daran vorbei leiten. Allerdings gibt es bis heute wegen der hohen Kosten weltweit nur einige wenige davon. Solche Umleitstollen sind nur wenige Tage im Jahr in Betrieb, sind dabei aber extremen Belastungen durch das sehr schnell fließende Gemisch aus Wasser und Geröll ausgesetzt. Das grösste Problem bei den existierenden Stollen ist die starke Abrasion der Sohle infolge der hohen Fließgeschwindigkeiten von bis zu 15 m/s in Kombination mit einer grossen Sedimentfracht. In Fig. 1 sind die Abrasionsschäden zweier Schweizer Sedimentumleitstollen dargestellt. Die Stollen müssen daher häufig inspiziert und entstandene Schäden repariert werden. Mehrere Forschungsprojekte an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydro-

logie und Glaziologie (VAW) der ETHZ befassen sich damit, wie die Stollen optimal angeordnet und gebaut werden können und welche Materialien in den am stärksten beanspruchten Stellen zur Panzerung eingesetzt werden können, um die Schäden zu minimieren und die Reparaturkosten zu senken.

Das hier vorgestellte Forschungsprojekt wurde im Jahr 2011 initialisiert, um vertiefte Erkenntnisse in die Prozesse bei schiessendem Abfluss mit Geschiebetransport zu erlangen und Entwurfskriterien für die Bemessung von Umleitstollen zu entwickeln. Das Forschungsprojekt beruht zunächst auf Laborversuchen und beinhaltet drei verschiedene Versuchsreihen: (1) die Analyse der Turbulenz, (2) die Analyse der Sedimentbe-



Figur 1: Normiertes longitudinales und vertikales Geschwindigkeitsprofil U und V über die Breite der Versuchsrinne. Abflusstiefe $h = 100$ mm. a) U für Froudezahl $F = 2$, b) U für $F = 4$, c) U für $F = 8$, d) V für $F = 2$, e) V für $F = 4$, f) V für $F = 8$.



Figur 2: Oberflächenscan und Foto einer 3 m langen abradierten Strecke nach 930 min Versuchsdauer unter folgender Belastung: $F = 2$, $h = 100$ mm, $Q_s = 200$ g/s, $S = 0,04$, und $D = 11,2$ mm.

wegung, und (3) die Entwicklung der Sohlenabrasion infolge Sedimenttransports bei schiessendem Abfluss. Diese Versuchsreihen geben Einblick in die hydraulischen Prozesse in Sedimentumleitstollen und betrachten die Interaktion von sich fortbewegendem Sediment und dem Abrasionsprozess der Sohle.

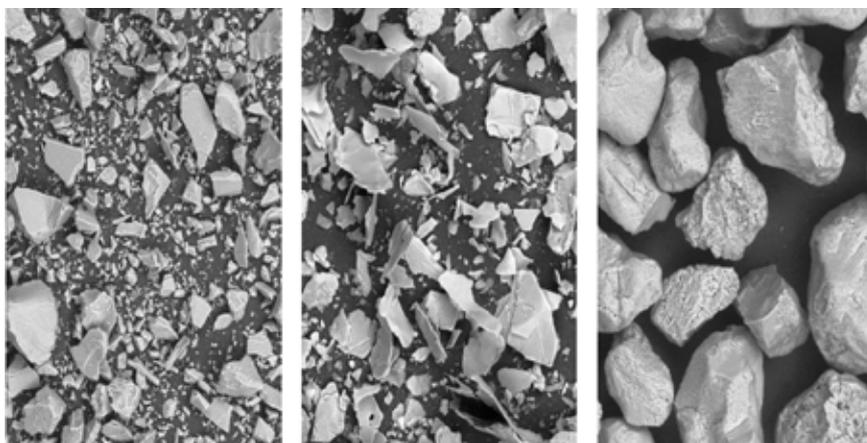
In einer so genannten Kipprinne (eine Rinne mit verstellbarem Gefälle) erfolgten dazu systematische Untersuchungen der Parameter Durchfluss, Sedimentfracht Q_s , Längsgefälle S , Fortbewegungsart des Sediments und Abrasionstiefe der Stollensohle. Die Versuchsrinne

hat eine Länge von 13,50 m und ist 0,30 m breit. Der maximale Durchfluss im Modell betrug 250 l/s, die Rinne kann zwischen $S = 1\%$ und 4% geneigt werden. Die Sedimentfracht wurde in einem Bereich von 50 bis 800 g/s mittels einer Sedimentdotiermaschine hinzugegeben. Der Modellmassstab beträgt etwa 1:15, verglichen mit typischen Abmessungen von existierenden Sedimentumleitstollen. Die abradierbare Sohle des Stollens wurde dabei mittels eines spröden Mörtels simuliert.

In der ersten Versuchsreihe wurde die mittlere und turbulente Fließcharakteristik des schiessenden Abflusses bei drei verschiedenen Froude Zahlen und drei verschiedenen Abflusstiefen mittels eines Laser-Doppler Anemometer Systems (2D-LDA) in einem Querprofil der Versuchsrinne analysiert. In Figur 1 ist beispielhaft das longitudinale und vertikale Geschwindigkeitsprofil bei einer Abflusstiefe $h = 100$ mm und den Froudezahlen $F = 2, 4$ und 8 dargestellt. Charakteristisch für diese Abflüsse ist der Wandeneinfluss, der eine ausgeprägte Sekundärströmung verursacht (dargestellt als Pfeile). Aus diesem Grund befindet sich die maximale Geschwindigkeit U nicht nahe der Wasseroberfläche, sondern bei ca. 60 % der Abflusstiefe. Neben den Geschwindigkeitsprofilen wurden ebenfalls die Turbulenzintensitäten, die Reynolds-Schubspannungen sowie die Sohlenschubspannungen ausgewertet. Gerade letztere sind für das Verständnis des Sedimenttransports im Umleitstollen von zentraler Bedeutung.

In der zweiten Versuchsreihe wurde mittels einer High Speed-Kamera der Transportmodus von Einzelsedimentkörnern und Glaskugeln identischen Durchmessers untersucht. Mit Hilfe eines Particle Tracking-Verfahrens (PTV) wurde analysiert, ob der Stein bzw. die Kugel sich rollend, springend oder in Schwebefortbewegung bewegt. Die Sprunglänge und -höhe sowie die Aufprallgeschwindigkeit des Partikels wurden ausgewertet.

In einer dritten Versuchsreihe wurde die



Figur 3: Unterschiedliche Schwebstoffe, deren Konzentrationen mit dem Laserdiffraktometer im Labor zur Kalibrierung gemessen wurden, a) Feldspatpulver, b) Glimmerpulver, c) Quarzfeinsand.

Abrasion der Stollensohle untersucht. Als leicht abradierbares Ersatzmaterial wurden zwei Mörtelmischungen verwendet, die im Verlauf des Versuchs Verschleisserscheinungen aufwiesen. Bei diesen Versuchen wurden nicht Einzelkörner, sondern die Sedimentfracht betrachtet. Durch eine automatisierte Zugabe des Geschiebes wurde der Einfluss der Sedimentfracht auf den Abrasionsprozess detailliert analysiert. Insgesamt wurden 18 Versuche durchgeführt, wobei die Abflusstiefe ($h = 50$ und 100 mm), das Gefälle ($S = 0,01$ und $0,04$), die Sedimentfracht ($Q_s = 50\text{--}800$ g/s) und der Korndurchmesser ($D = 5\text{--}18$ mm) variiert wurden. In Figur 2 ist ein Oberflächenscan nach insgesamt 930 min Versuchsdauer dargestellt. Zu erkennen sind zwei parallele Abrasionsrinnen, die sich entlang der Wände entwickeln. Daraus lässt sich schliessen, dass der Sedimenttransport in einem geraden Kanal vermehrt an den Aussenwänden stattfindet, was mit den Ergebnissen der Sohlschubspannungsverteilung aus der ersten Versuchsreihe übereinstimmt.

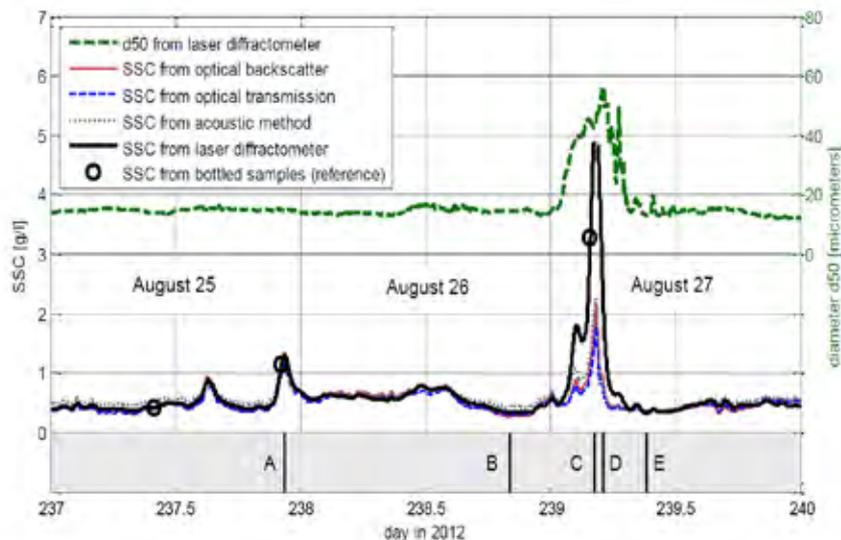
Die Ergebnisse dieser Modellversuche verbessern das Verständnis, wie sich die entscheidenden hydraulischen Parameter unter unterschiedlichen Bedingungen verändern, wie sich das Geschiebe bewegt und welche Abrasionsprozesse dadurch auftreten.

Anhand dieser Erkenntnisse werden die Entstehung und Möglichkeiten zur Reduktion der Abrasionschäden besser verständlich und sie können in die Bemessungsrichtlinien mit eingehen. Der Umleitstollen für den Speicher Solis in Graubünden wurde anhand dieser und weiterer Modellversuche an der VAW der ETH optimiert und 2012 als erster seiner Art in der Schweiz fertig gestellt. Im Jahr 2013 wurde der Stollen erstmals in Betrieb genommen und hat bisher entsprechend den Erwartungen funktioniert. Im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten werden das Betriebsverhalten dieses Umleitstollens und die dort entstehenden Abrasionschäden weiter beobachtet. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen als zusätzliche Grundlagen für die zukünftige Planung, Bemessung und Unterhaltung derartiger Bauwerke.

Schwebstoffmonitoring und Verschleiss von Pelton Turbinen

Eine weitere Möglichkeit, Speicherverlandung zu reduzieren, besteht darin, im Wasser suspendierte Partikel nicht absetzen zu lassen, sondern direkt über die Turbinen mit in das Unterwasser abzuführen. Im Vergleich zum oben vorgestellten Projekt, wo auch grobkörniges Geschiebe (Kies, Steine und Geröll) abgezogen wird, geht es hier also um kleinere Korndurchmesser (Sand, Schluff) mit deutlich weniger als 1 mm Durchmesser. Ist die Turbulenz hoch genug, so bleiben diese Stoffe suspendiert, d. h. sie bleiben in der Schwebe und setzen sich nicht ab. Bei weitgehend abgesenkten Speichern oder bei so genannten Dichteströmungen kann das schwebstoffhaltige Wasser direkt in das Triebwassersystem eingezogen werden. Bei Mittel- und Hochdruckanlagen ohne oder mit nur sehr kleinem Speicher gelangt immer der Teil der suspendierten Partikel bis zur Turbine, die nicht vom Sandfang abge sondert werden.

Nachteil und Problem ist dabei, dass die im Wasser enthaltenen Schwebstoffe Abrasionsschäden an den Turbi-



Figur 4: Ganglinien der Schwebstoffkonzentration (linke Achse) im Vergleich zu Schöpfproben (Kreisssymbole) und der Median-Partikelgrösse (rechte Achse), gemessen im Triebwasser des KW Fieschertal; aus Abgottspon et al. (2013a).

nen verursachen, vor allem wenn es sich um grössere, quarzhaltige und kantige Körner handelt. Das Wasser mit den darin enthaltenen Partikeln trifft mit sehr hoher Geschwindigkeit auf die Becherschaufeln der Peltonräder und verursacht dort kleinste Materialabträge, Abnutzungen und Verformungen, was sich dann auf die Wirkungsgrade der Maschinen auswirkt. Die Laufräder müssen daher in bestimmten Abständen ausgebaut, durch Materialauftrag und neue Beschichtung überholt und wieder eingebaut werden. Je grösser die Fallhöhe ist, je härter und kantiger die im Wasser enthaltenen Schwebstoffe sind und je mehr davon im Wasser enthalten sind, umso häufiger sind diese sehr teuren und aufwändigen Massnahmen erforderlich. Quantitative Angaben über die Zusammenhänge zwischen Schwebstoffaufkommen, Turbinenabrasion und Wirkungsgradabnahme, die für eine technisch-wirtschaftliche Optimierung solcher Wasserkraftanlagen erforderlich wären, sind bisher nicht verfügbar.

An der VAW der ETHZ in Zusammenarbeit mit der Hochschule Luzern, Kompetenzzentrum für Fluidmechanik und Hydromaschinen, wurde dazu ein Forschungsprojekt «Schwebstoff-Monitoring und Verschleiss an Pelton turbinen (Teil a)» durchgeführt. Die Forschungsarbeiten fokussierten darauf, einen Zusammenhang herzustellen zwischen dem Schwebstoffgehalt, der Kornform und den mineralischen Eigenschaften und dem Fortschreiten der Abrasionschäden. In diesem Forschungsprojekt wurden an einer bestehenden Hochdruck-Wasserkraftanlage im Wallis (KW Fieschertal), welches keinen Speicher hat, die Konzentration und Partikelgrössenverteilung der Schwebstoffe im Triebwasser mittels verschiedener Messmethoden (in situ-Laserdiffraktometer, Trübungssonden und einer akustische Methode) kontinuierlich erfasst.

Die Geometrieänderungen und der Materialabtrag an Bechern der Peltonlaufräder sowie die Reduktion des Wirkungsgrads wurden durch mehrere Inspektionen bzw. Messungen dokumentiert.

Im einzelnen wurden in diesem ersten Teil des Forschungsprojekts folgende Ziele verfolgt:

- Verbesserung des Prozessverständnisses (Schwebstoffaufkommen, Verschleisschäden)
- Evaluieren und Untersuchen von Messsystemen (im Labor und am Prototypen) für das Echtzeit-Monitoring der Schwebstoffkonzentration und Partikelgrössenverteilung, mit Fokus auf die Anwendung in Wasserkraftanlagen
- Kontinuierliche Messung der Schwebstoffe im Triebwasser einer bestehenden Hochdruckwasserkraftanlage unter Berücksichtigung der Partikelgrössen
- Periodische Messungen der Abrasionsschäden an Pelton turbinen sowie der Wirkungsgrade
- Zusammenstellen eines möglichst vollständigen Messdatensatzes, welcher auch zur Kalibrierung von numerischen Modellen eingesetzt werden kann

Zunächst wurden dazu im Labor Messungen mit den unterschiedlichen Methoden durchgeführt. Aus den Messdaten mit verschiedener Trübungssonden und einer akustischen Methode wurden Kalibrierkurven für unterschiedliche Korngrössen ermittelt (Figur 3). Weiter wurden die Messdaten des Laserdiffraktometers ausgewertet und mit Referenzmessungen verglichen. Dabei zeigte sich ein bisher in der Literatur nicht quantitativ beschriebener Einfluss vor allem der Partikelform. Es zeigte sich, dass auch

ein Laserdiffraktometer auf die am Einsatzort vorhandenen Partikel zu kalibrieren ist, um eine zufriedenstellende Messgenauigkeit zu erreichen.

Am Prototyp, dem Kraftwerk Fieschertal, wurden anschliessend mit dem Laserdiffraktometer, den Trübungssonden, einer akustischen Methode und mit Laboranalyse von Wasserproben kontinuierlich Daten zum Schwebstoffaufkommen im Triebwasser erhoben. Figur 4 zeigt ein Beispiel von drei Tagen im August 2012. Die Linien im unteren Teil der Abbildung stellen die Schwebstoffkonzentrationen dar, welche mit den verschiedenen Messgeräten ermittelt wurden, nachdem diese basierend auf der Laboranalyse von Schöpfproben (schwarze Kreissymbole) für «normale Verhältnisse», d. h. für relativ feine Partikel, kalibriert wurden. Die grüne Kurve mit Skala am rechten Rand des Diagramms zeigt den Median-Durchmesser der transportierten Partikel im Lauf der Zeit. Gemäss den Messungen werden zeitweise, in Phasen mit erhöhter Schwebstoffkonzentration, auch gröbere Partikel transportiert. Das Laserdiffraktometer erlaubt im Gegensatz zu den andern Messmethoden auch die Messung der Partikelgrösse und ermöglicht, wie erwartet, eine genauere Messung der Schwebstoffkonzentration, wenn die Partikelgrösse zeitlich variiert und kaum mit der Schwebstoffkonzentration korreliert.

In einem zweiten Teil des Projekts werden bestehende Berechnungsansätze zur Prognose des Hydroabrasiv-Verschleisses und der Wirkungsgradabnahme verifiziert und ggf. angepasst. Die Ergebnisse tragen zur Grundlage für die technisch-wirtschaftliche Optimierung von Wasserkraftanlagen bei, die von starkem Hydroabrasiv-Verschleiss betroffen sind.

Nationale Zusammenarbeit

Die meisten der geförderten Projekte aus dem Wasserkraft Forschungsprogramm sind in nationale Kooperationen eingebunden. Grössere Projekte werden von anderen Organisationen co-finanziert, bisher in erster Linie durch Swisselectric Research. Themen aus der Grosswasserkraft werden meistens auch durch die jeweiligen Betreiber mit Eigenbeiträgen in Form von Eigenleistungen unterstützt. Fast jedes einzelne Forschungsprojekt wird damit durch ein nationales Netzwerk gefördert, unterstützt und getragen.

Zusätzlich haben grössere interdisziplinäre Projekte, wie zum Beispiel das Projekt «Fischabstieg» wissenschaftliche Begleitgruppen, in denen externe Experten nach Bedarf mit beratend tätig sind.

Die Diskussionen und Untersuchungen zur Umstrukturierung der Energieversorgung in der Schweiz setzten sich auch 2013 fort. Es wird weiterhin diskutiert, ob die Wasserkraft den wesentlichen zusätzlich vorgesehenen Beitrag zur Stromversorgung liefern kann bzw. wie die dafür erforder-

lichen Rahmenbedingungen geschaffen werden können. Auch in Bezug auf die notwendigen Pumpspeicherkapazitäten sind die bestehenden Rahmenbedingungen derzeit nicht so, dass die aus technischer Sicht notwendigen Investitionen verlässlich getätigt werden. Mit aus diesem Grund wurde das Swiss Competence Center for Energy Research «Supply of Energy» unter anderem mit der Frage, ob die Wasserkraft die in sie gestellten Erwartungen erfüllen könne, ausgeschrieben. Dem Konsortium, welches die Ausschreibung gewonnen hat, gehören die bereits bisher in der Wasserkraftforschung waktiven Forschungsinstitutionen der Schweiz an. Ende 2013 wurde mit der ETHZ als Leading House ein entsprechender Vertrag für die nächsten Jahre unterzeichnet. Die Programmleitung war in diese Verfahren eingebunden. Die laufenden Forschungsprojekte, das Programm mit seinen Schwerpunkten und die an das SCCER SoE gestellten Anforderungen aus dem Bereich Wasserkraft, stimmen weitgehend überein.

Internationale Zusammenarbeit

Mit dem Norwegischen Center for Environmental Design of Renewable Energy CEDREN in Trondheim gibt es einen ständigen Austausch. Dort werden eine Reihe von wasserkraftbezogenen Themen erforscht, die auch für die Schweiz hohe Relevanz besitzen.

Das Forschungsprojekt «Fischabstieg» ist ein internationales Kooperationsprojekt mit deutschen Partnern, die ebenfalls Laufwasserkraftwerke an grossen Flüssen betreiben. Da die Fische sich nicht an politischen Grenzen orientieren, sind für die Sicherstellung der Durchgängigkeit an den internationalen Gewässern auf jeden Fall auch internationale Bemühungen gefragt. Eine Reise des Projektteams in die USA zu einigen der weltweit grössten Fischaufstiegs- und -abstiegshilfen am Mississippi und am Columbia River fand 2013 statt.

Im Projekt «Hydropower Design under Uncertainties» findet eine Zusammenarbeit mit der Engineering Systems Division des Massachusetts Institute of Technology in den USA statt. Das 2013 neu begonnene Projekt zur Habitatmodellierung in Schwall-/Sunk Strecken basiert auf einer Zusammenarbeit mit SJE Ecohydraulic Engineering, einem Ingenieurbüro und spin-off der Universität Stuttgart. Im Projekt zu den Sedimentumleitstollen gibt es eine Zusammenarbeit der Universität Kyoto in Japan.

Insgesamt sind sowohl das Programm insgesamt über die Programmleitung als auch die Forschungsprojekte an den ETHs, Universitäten und Hochschulen international gut vernetzt.

Referenzen

[1] BFE (2012). *Forschungskonzept 2013–2016 Wasserkraft.*

[2] BFE (2013). *Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2012*

[3] Eidgenössische Energieforschungskommission CORE (2013): *Konzept der Energieforschung des Bundes 2013–2016.*

[4] SATW (2012). *Zukunft Stromversorgung Schweiz, Bericht der Akademien der Wissenschaften Schweiz, Bern, 2012*

[5] BFE (2012). *Wasserkraftpotenzial der Schweiz -Abschätzung des Ausbaupotenzials der Wasserkraftnutzung im Rahmen der Energiestrategie 2050*

[6] BFE (2012). *Energiestrategie 2050: Erstes Massnahmenpaket*

[7] Hewicker, C. et al. (2013): *Energiespeicher in der Schweiz - Bedarf, Wirtschaftlichkeit und Rahmenbedingungen im Kontext der Energiestrategie 2050. Studie für das Bundesamt für Energie (BFE).*

[8] Gatzen C. et al. (2013): *Bewertung von Pumpspeicherkraftwerken in der Schweiz im Rahmen der Energiestrategie 2050. Studie für das Bundesamt für Energie (BFE).*

[9] BFE (2013): *Perspektiven für die Grosswasserkraft in der*

Schweiz - Wirtschaftlichkeit von Projekten für grosse Laufwasser- und Speicherkraftwerke und mögliche Instrumente zur Förderung der Grosswasserkraft.

[10] Auel C., Albayrak I., Boes R. (2013): *Entwurf und Bemessung von Sedimentumleitstollen. Schlussbericht zum BFE Forschungsprojekt.*

[11] Felix D., Albayrak I., Boes R. (2014): *Schwebstoff-Monitoring und Verschleiss an Pelton turbinen (Teil a). Schlussbericht zum BFE Forschungsprojekt.*

[12] Hirschi J., Wechsler T., Rey E., Weingartner R. (2013): *HydroPot_integral - Handbuch zur gesamtheitlichen Beurteilung und Abschätzung des Kleinwasserkraftpotentials in einem regionalen und kantonalen Kontext. Schlussbericht zum BFE Forschungsprojekt.*

Weitere Referenzen finden sich in den jeweiligen Schlussberichten zu den Projekten.

Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(* IEA-Klassifikation)

			R+D	3.6.1
● ENTWURF UND BEMESSUNG VON SEDIMENTUMLEITSTOLLEN				
Lead:	VAW der ETH Zürich	Funding:	BFE SER	
Contact:	Robert Boes 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.			
● HYDROPOWER DESIGN UNDER UNCERTAINTIES				
Lead:	LCH der EPF Lausanne	Funding:	BFE	
Contact:	Anton Schleiss 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.			
● MASSNAHMEN ZUR GEWÄHRLEISTUNG EINES SCHONENDEN FISCHABSTIEGS				
Lead:	VAW der ETH Zürich	Funding:	BFE SER VAR EAWAG	
Contact:	Robert Boes boes@vaw.baug.ethz.ch	Period:	2011–2014	
Abstract:	Während Fische aufstiege seit langem erprobt sind und erfahrungsgemäß gut funktionieren, ist die Frage des Fische aufstiegs 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.			

- **RÄUMLICH DIFFERENZIERTE ABSCHÄTZUNG DES KLEINWASSERKRAFTPOTENTIALS IN DER SCHWEIZ - ENTWICKLUNG EINES WERKZEUGS FÜR DIE PRAXIS** R+D 3.6.1

Lead:	Geogr. Institut der Uni Bern	Funding:	BFE
Contact:	Rolf Weingartner rolf.weingartner@giub.unibe.ch	Period:	2012–2013

Abstract: In einem früheren Forschungsprojekt wurde eine Methodik zur Abschätzung des Kleinwasserkraftpotentials unter energiewirtschaftlichen, ökologischen und sozioökonomischen Gesichtspunkten entwickelt. In diesem Projekt soll daraus ein praxistaugliches GIS basiertes Tool entwickelt und in einer Pilotregion angewandt werden.
- **SCHWEBSTOFF-MONITORING UND VERSCHLEISS AN PELTON TURBINEN** R+D 3.6.1

Lead:	VAW der ETH Zürich	Funding:	BFE SER BKW GKW
Contact:	Robert Boes 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.
- **ENTWICKLUNG UND ANWENDUNG EINES AUTOMATISIERTEN FISH-TRACKING MODULS** R+D 3.6.1

Lead:	VAW der ETH Zürich	Funding:	BFE
Contact:	Robert Boes boes@vaw.baug.ethz.ch	Period:	2013–2014

Abstract: Als Ergänzung zum bestehenden Projekt "Fischabstiege" wird in diesem Projekt ein Tool entwickelt, mit dem sich auf Video erfasste Fischbewegungen, z.B. entlang einer Fischleiteinrichtung, automatisch analysieren und auswerten lassen
- **MODELLIERUNG DER HABITATSDYNAMIK IN SCHWALLSTRECKEN UNTERSCHIEDLICHER MORPHOLOGIE UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER HABITATSPRÄFERENZEN VON FISCHEN** R+D 3.6.1

Lead:	EAWAG	Funding:	BFE
Contact:	Christine Weber christine.weber@eawag.ch	Period:	2013–2014

Abstract: Habitatpräferenzen von Zeigerfischarten (*Salmo trutta*) für alpine Gewässer aus verschiedenen Studien werden vergleichsweise untersucht, um zu identifizieren, welche Unterschiede in den Präferenzen in morphologisch unterschiedlichen Gewässerstrecken bestehen. Die Ergebnisse sollen in Richtlinien und verbesserte Modellierungsansätze für Habitateignung in Schwall/Sunk beeinflusste Strecken eingearbeitet werden.

Geothermie



Titelbild:

Bohrplatz Geothermieprojekt St. Gallen (Foto: St. Galler Stadtwerke)

Im Oktober 2013 liefen beim Geothermieprojekt der Stadt St. Gallen diverse Produktionstests. Wie vorgesehen wurde eine Säuerung durchgeführt, um die Durchlässigkeit zu erhöhen. Diese resultierte in einer deutlich höheren Wasserförderung sowie auch einem Austritt von Gas, welches abgefackelt wird.

BFE Forschungsprogramm Geothermie

Überblicksbericht 2013

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 Technik, Nutzung und Entwicklungsstand stark unterscheiden. Die Technik der Erdwärmesondenanlagen (EWS) zur Beheizung von Gebäuden ist heute weitgehend ausgereift und die Systeme können sich erfolgreich am Markt behaupten. Im Jahr 2012 wurden rund 2'500'000 m Erdwärmesonden abgeteuft, was etwa 5'500 neuen Anlagen mit Erdwärmesonden bzw. Geostrukturen entspricht. Gegenüber 2011 ergab sich somit eine Reduktion von etwa 5 %. Bei den Neubauten blieb die Anzahl Installationen praktisch konstant, bei den Sanierungen von Altbauten ergab sich eine Reduktion um etwa 12 % [1]. Für 2013 werden keine grossen Änderungen erwartet. Der anhaltende 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 Geother-

mie 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. Sowohl im allgemeinen Bereich als auch in Zusammenhang mit konkreten Projekten 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 bei verschiedenen Pilotprojekten haben auch gezeigt, dass für die Entwicklung von tiefliegenden Reservoirs 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 in Aktivitäten der Europäischen Union. Die nachhaltige Gewinnung von Wärme aus einem in 5000 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 Geothermieforschung lagen 2013 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 Qualitätssicherung. Von grosser Bedeutung ist neben der Forschung die Realisierung von Pilot- und Demonstrationsanlagen. In den nächsten Jahren sollen erste hydrothermale Projekte für die Strom- und Wärmeerzeugung realisiert werden. Langfristig wird wegen des grossen Potenzials weltweit, aber auch lokal in der Schweiz grosse Hoffnung auf die Technik der EGS gesetzt.

Rückblick und Bewertung 2013

Bei der geothermischen Forschung ergaben sich im 2013 gegenüber den Vorjahren keine grundlegenden Verschiebungen in den Prioritäten. Nach wie vor lag der Fokus auf der tiefen Geothermie. Bei den tiefen hydrothermalen Ressourcen befinden sich derzeit einige Projekte in verschiedenen Stadien der Bearbeitung. Besonders zu erwähnen ist das Wärmeprojekt Schlattingen [3] wo 2012 eine erste Bohrung erfolgreich realisiert wurde. 2013 wurde dann eine zweite, abgelenkte Bohrung abgeteuft, welche eine etwas höhere Ergiebigkeit aufweist. Das

Ziel des Projekts, die Energieversorgung des Betriebs der Firma Grob Gemüse und Landbau mittels geothermischer Wärme, ist somit in greifbarer Nähe.

Wichtige Entwicklungen sind auch beim Projekt der Stadt St. Gallen [4] zu vermelden. Nach erfolgreicher Abteufung der ersten Bohrung bis auf 4'450 m wurden ein Injektionstest sowie eine Säuerung vorgenommen. Im Anschluss daran ergab sich am 19. Juli 2013 ein Gas-Wasser-Austritt, welcher durch die Injektion von schwerer Bohrspülung gestoppt werden musste. Am Folgetag erfolgte eine weitherum spürbare seismische Erschütterung der Magnitude 3,6. Seither werden Messdaten ausgewertet und verschiedene Untersuchungen vorgenommen. Mit den Produktionstests vom Oktober 2013 konnte der erhoffte Nachweis einer relevanten Wasserführung im erschlossenen Malmkalk erbracht werden. Weitere Untersuchungen sind noch im Gange, ein definitiver Entscheid, ob und wie das Projekt weitergeführt werden kann, ist etwa Mitte 2014 zu erwarten.

Bei der Forschung im Gebiet der EGS wurden wichtige Ergebnisse in der Aufarbeitung des Basler Projektes durch das Projekt GEOTHERM erzielt, welches im Berichtsjahr abgeschlossen wurde [5]. Wegen der langfristigen und aufwändigen Forschung in diesem Bereich wurde die internationale Vernetzung über Organisationen wie der Internationalen Energie-Agentur IEA [6], der Internatio-

nal Partnership for Geothermal Technology IPGT [7] oder dem 2012 begonnenen EU-Projekt Geothermal ERA-NET [8] weiter ausgebaut.

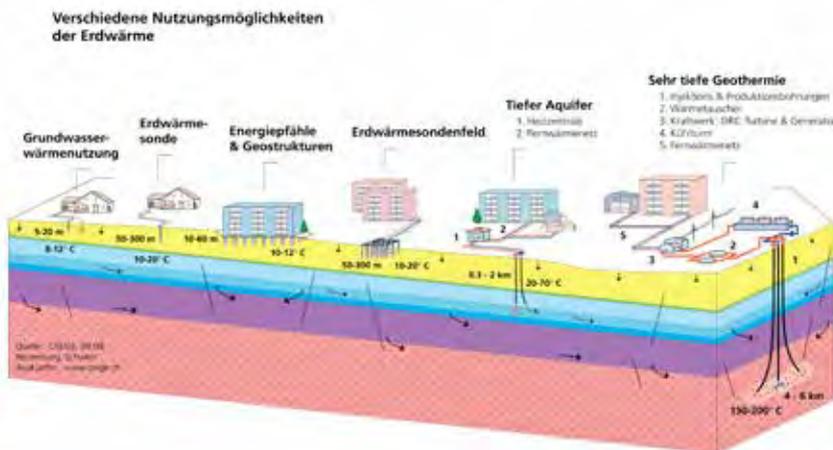
Bei der untierten Geothermie wurden insbesondere Projekte mit tiefen Erdwärmesonden – im Bereich von 300 – 1000 m – unterstützt. Mit solchen Sonden kann geothermische Energie auch in Gebieten gefördert werden, welche sich für den Einsatz der üblichen EWS nicht eignen. Damit kann längerfristig der EWS-Markt weiter ausgebaut werden [9].

Ausblick

Für das Jahr 2014 sind beim Forschungsprogramm keine grundsätzlichen Änderungen geplant. Nachdem mit dem Projekt Schlattingen im hydrothermalen Bereich ein erster Erfolg erzielt wurde, gilt es, die praktische Nutzung dieser Reserve zu realisieren. Das Projekt Schlattingen bietet auch die Möglichkeit, durch weitere Untersuchungen an den Bohrungen wissenschaftliche Erkenntnisse und praktische Erfahrungen zu sammeln. Derzeit offen ist die Situation beim Projekt Geothermie St. Gallen. Obwohl erste Daten ein interessantes umsetzbares Potenzial vermuten lassen, sind weitere Abklärungen notwendig, insbesondere auch bezüglich des seismischen Risikos.

Im Bereich der Enhanced Geothermal Systems wurde das Folgeprojekt Geotherm 2 gestartet, welches von der ETHZ koordiniert wird [10]. Die Mitwirkung von Schweizer Forschern in verschiedenen Arbeitsgruppen der IPGT soll weitergeführt werden.

Eine wichtige Massnahme zur Erreichung der energiepolitischen Ziele ist die Intensivierung der Energieforschung. Der Bund schafft deshalb sieben «Swiss Competence Centers for Energy Research» (SCCER) [11]. Beim an der ETHZ angesiedelten Kompetenzzentrum zum Thema Strombereitstellung nimmt auch die Geothermie einen grossen Stellenwert ein. Ein Ziel ist es etwa, mit dem geplanten Kapazitätsaufbau die Forschungsgrundlagen zu erarbeiten, so dass bis 2050 eine Million Schweizer Haushalte mit Strom aus Erdwärme versorgt werden können.



Verschiedene Nutzungsarten der geothermischen Energie (Quelle: S. Cattin, CREGE)

Highlights aus Forschung und Entwicklung

GEOTHERM: Geothermal Reservoir Processes: Research on Enhanced Geothermal Systems

Enhanced Geothermal Systems (EGSs) entziehen heissen, niedrig-porösen kristallinen Gesteinen Wärme, die in nutzbare Energie umgewandelt wird (z. B. Strombereitstellung oder Heisswasser für Wärmenetze). Die EGS Ressourcen sind mit heute verfügbaren Bohrtechnologien bereits zugänglich, jedoch gibt es noch grosse technische und ingenieurwissenschaftliche Herausforderungen in der Erschliessung der Gesteinsmassen für einen nachhaltigen Entzug der dort vorhandenen Wärme. Das Forschungsprojekt GEOTHERM [5], ein Projekt der anwendungsorientierten Grundlagenforschung, hat sich nach den Ereignissen des 2010 gestoppten EGS Projekts in Basel auf einige Schlüsselfragen konzentriert. Zum einen wurden die Daten des Basler Projekts wissenschaftlich aufgearbeitet und zum anderen hat sich GEOTHERM mit grundlegenden Aspekten der EGS-Technologie beschäftigt. Das EGS-Projekt Basel wurde in Folge eines auf der Oberfläche gespürten Erdbebens der lokalen Magnitude von 3,4 gestoppt. GEOTHERM hat die Reservoirprozesse analysiert, die für dieses Erdbeben (und weiterer solcher von ähnlicher Grösse) relevant waren. Daraus sollte dereinst eine adäquate Echtzeit-Mitigationsstrategie implementiert werden können, um eine kommerzielle Anwendung der EGS-Technologie zu ermöglichen. 5 Module wurden parallel bearbeitet:

Modul 1 (Verständnis der Erzeugung von Gesteinspermeabilität mittels Beobachtungen im Bohrloch) konzentrierte sich auf die Analyse und Interpretation der hydraulischen Daten und Messungen des Basler Bohrlochs. Zentral waren die Bestimmung der natürlichen Verteilung von Rissen und Störungen einerseits und des lokalen, stark heterogenen Spannungsfelds andererseits. Mittels einer neu entwickelten Methode wurde aufgezeigt, dass sowohl die Magnituden als auch die Orientierungen der Hauptspannungsachsen - die Beschreibung des Spannungsfelds - sehr stark variieren. Ähnlich wurde aufgezeigt, dass auch die Festigkeit des Gesteins hoch variabel ist und somit genaue Messungen des Span-

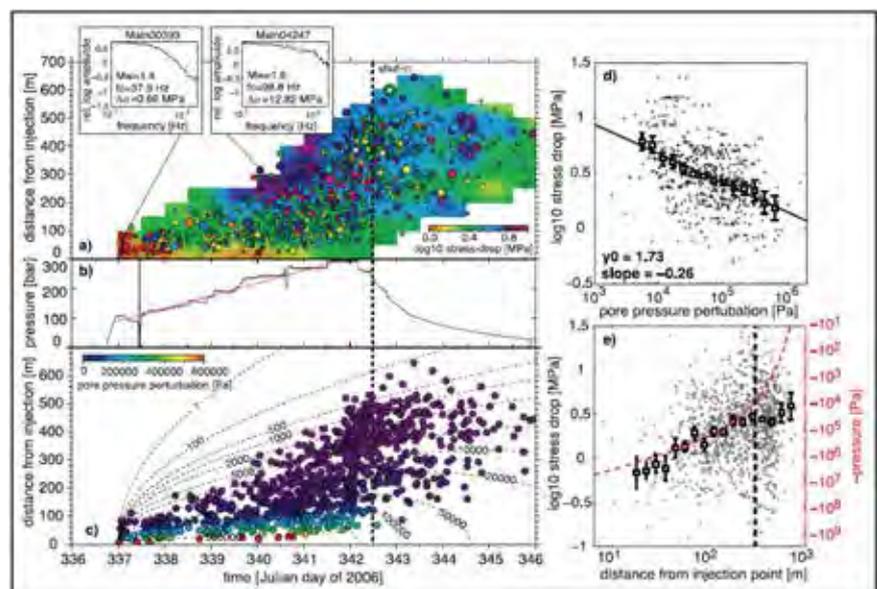
nungsfelds und die Bestimmung der Gesteinsfestigkeiten wichtig sind. Diese Arbeiten wurden in erster Linie durch die Ingenieurgeologie der ETH Zürich durchgeführt.

Modul 2 (Einblicke in die Prozesse der Permeabilitätssteigerung durch die Analyse der seismischen Wellen) basierte auf den seismischen Daten, die im Laufe des Basler Projektes erworben wurden, während und nach der massiven hydraulischen Stimulation. Die Daten wurden mit dem Fluiddruck im Reservoir während und nach der Stimulation und den felsmechanischen Prozessen korreliert. Hier stand die Abschätzung der seismischen Gefährdung durch aktivierte Störungen im Mittelpunkt. Es wurde zum ersten Mal eine klare positive Korrelation zwischen der Grösse des Spannungsabfalls in Folge eines Bruchvorgangs innerhalb des Geothermiereservoirs und der Distanz vom Injektionsabschnitt im Bohrloch (und damit der Druckverteilung) dokumentiert. Des weiteren wurde aufgezeigt, dass die statistische Verteilung einerseits von der Dauer der Injektion abhängt: Je kürzer die Stimulation, desto mehr kleine und weniger grössere Ereignisse traten auf. Andererseits ist die Nachbebensequenz während der Stimulation anders geartet als die Nachbebensequenz während des Druckabbaus nach einer Fluidinjektion. Die Akteure des Arbeitspakets waren

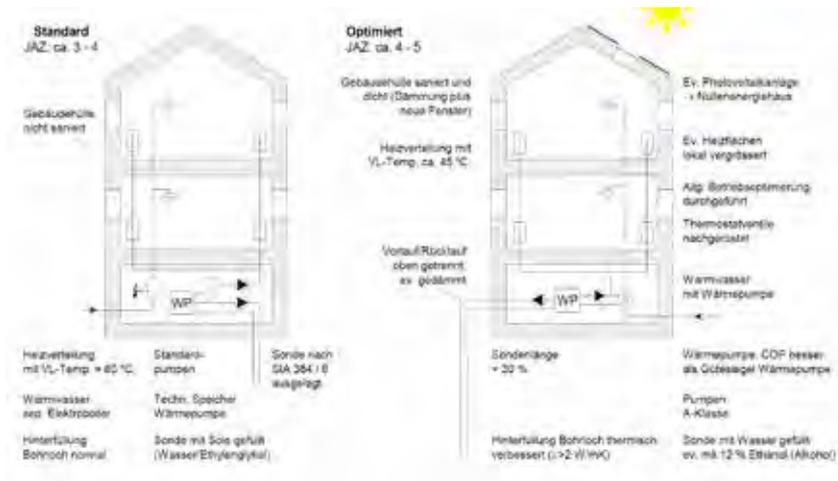
der Schweizerische Erdbebendienst mit Beiträgen der Uni Bonn (Deutschland), dem Earthquake and Volcano Research Center an der Universität von Nagoya (Japan) und der Ingenieurgeologie der ETH Zürich.

Modul 3 (Entwicklung computer-gestützter, numerischer Modelle) befasste sich mit der Umsetzung neuer Konzepte in der Modellierung von Bruchstrukturen in geothermischen Reservoiren. Das Ziel ist es, die Entwicklung und Erzeugung eines EGS-Reservoirs, vor allem der dynamischen Rissbildung mit Hilfe eines neuen Computerprogramms zu modellieren – ein notorisch schwieriges Problem für Reservoiringenieure. Das entwickelte numerische Programm hat eine modulare Struktur. Es ermöglicht die Kopplung von Thermik und Gewässerströmung und kann mit Modulen der Felsmechanik und Geochemie verbunden werden. Diese Arbeit wurde am Institut für Fluidmechanik der ETH Zürich geleistet.

Modul 4 (Fluid-Gestein-Wechselwirkungen und mineralische Ausfällungen) befasste sich mit der numerischen Simulation der über Jahre und Jahrzehnte dauernden Veränderungen in der Permeabilität von Gestein und damit der Effizienz des Wärmetauschs im tiefen Untergrund eines EGS-Reservoirs. Solche Veränderungen hängen in erster Linie von den chemischen Prozessen ab



Figur 1: Distance from the injection point versus time during the stimulation phase. The colour scale is log stress drop, the circle size of events is scaled by magnitude.



Figur 2: Erdwärmesonde bei einer Sanierung: Vergleich einer Standardlösung mit einer optimierten Lösung

(Auslösungserscheinungen von gesteinsbildenden Mineralen und Ausfällungen in strömungsrelevanten Störungen und Brüchen im Gestein und Ausfällungen in den technischen Anlagen im Bohrloch und obertägig. Zentral in diesem Arbeitspaket waren die verbesserte und eine konsistente thermodynamische Charakterisierung und Beschreibung reaktiver, stark salzhaltiger und heisser Grundwässer, neue experimentelle Daten zu den

druckabhängigen Eigenschaften der im Heisswasser gelösten Salze und die numerische Beschreibung, wie Reaktionen sich örtlich und zeitlich durch das Reservoir ausbreiten. Diese Arbeit wurde am Institut für Geochemie und Petrologie der ETH Zürich und dem Laboratory for Waste Management des Paul Scherrer Institut geleistet. .

Modul 5 (Geothermische Energie in

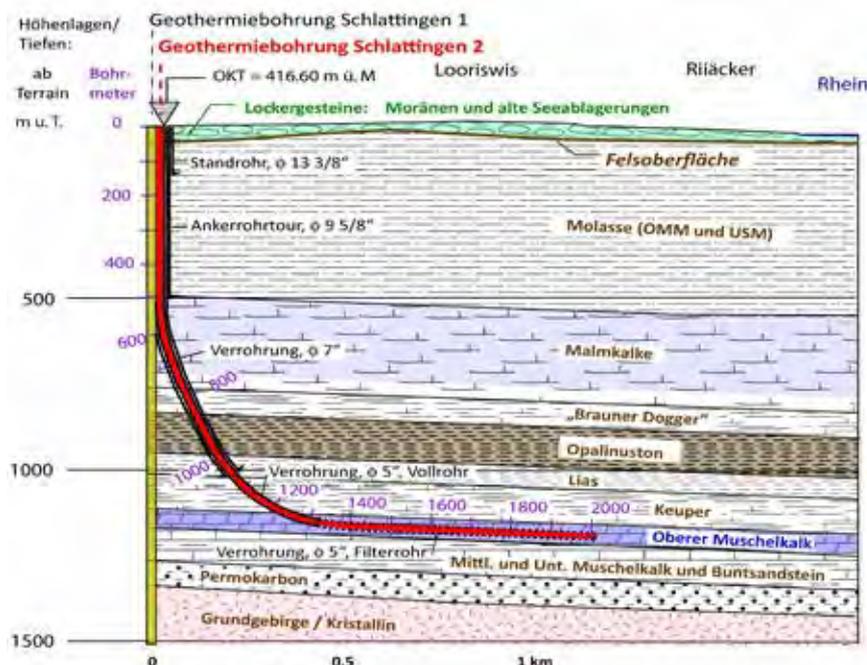
urbanen Gebieten) umfasste die Umsetzung der technischen Ergebnisse im Rahmen von Nachhaltigkeitsstudien in städtischen Regionen. Insbesondere wurde eine Methode für die Raum- und Landnutzung entwickelt, mit der örtlich und regional verfügbare geothermische Ressourcen berücksichtigt werden können. Beispielhaft wurde diese Methodologie im Kanton Waadt angewandt. Diese Arbeiten wurden vom Laboratory of Environmental Engineering Geology der EPF-Lausanne, dem Laboratory for Industrial Energy Systems der EPF-Lausanne und von der Badener Firma AF-Consult of Baden geleistet.

GEO THERM wurde vom Competence Centre for Environment and Sustainability des ETH-Bereichs (CCES), vom Bundesamt für Energie und mit In-kind Beiträgen der Geopower-BaseL unterstützt. Insgesamt wurden 4 Dissertationen, 4 Post-docs und 2 Forschungsassistentinnen finanziert.

Optimierung von Erdwärmesonden

Der Stromverbrauch einer Wärmepumpen-Anlage wird wesentlich vom Wärmebedarf, aber auch von der Jahresarbeitszahl (JAZ) bestimmt. Daher ist es einerseits wichtig, den Wärmebedarf für Heizung und Warmwasser insgesamt zu minimieren - in diesem Bereich kann oft mit wenig Geld viel erreicht werden (bessere Isolierung, bessere Fenster, etc.). Andererseits sollte die Jahresarbeitszahl so hoch wie möglich sein. Auch wenn die Sonde gut gebaut wurde, kann eine Optimierung der Erdwärmesonde im Betrieb die JAZ deutlich erhöhen. Diese Optimierung ist das Hauptthema dieses Projekts.

Das Institut für Facility Management der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) startete im Oktober 2009 das 4-jährige Forschungsprojekt zur weiteren Optimierung von Erdwärmesonden [12]. Die Firma Huber Energietechnik AG in Zürich arbeitet mit. Das Projekt wird unterstützt vom Bundesamt für Energie, vom AXPO Naturstromfonds, von den Elektrizitätswerken des Kantons



Figur 3: Geologischer Profilschnitt Bohrung Schlattingen-2

Zürich (EKZ) und von der Firma Störi Wärmepumpen | Wärmetechnik AG in Au (ZH).

Zielsetzung

Mit der Installation einer Wärmepumpe ist ein Mehrstromverbrauch verbunden. Dieser soll möglichst begrenzt werden. Nur so können Wärmepumpen gegenüber der Öl- und Gasheizung einen deutlichen ökonomischen und ökologischen Vorteil aufweisen. Dazu muss die Jahresarbeitszahl (JAZ), also das Verhältnis von erzeugter Nutzwärme zum Stromverbrauch, deutlich über 3 liegen. Dann können auch bei teilweise fossiler Erzeugung des Stroms der Primärenergieverbrauch und die CO₂-Emissionen stark verringert werden.

Forschungsfelder

Im Forschungsprojekt werden die Möglichkeiten untersucht, die Effizienz von Wärmepumpen mit Erdwärmenutzung

zu verbessern. Eine Möglichkeit, die Effizienz zu verbessern, ist ein optimales Fluid in der Sonde. Eine weitere Möglichkeit ist eine effizientere Umwälzpumpe, um das Fluid in der Sonde umzuwälzen, und deren korrekte Dimensionierung. Im Weiteren werden alternative Sondenbauweisen ermittelt, geprüft und optimiert. Diese sollen insbesondere überall dort eine Lösung ermöglichen, wo eine übliche Erdwärmesonde nicht erstellt werden kann.

Zum Weiteren wird die Möglichkeit, mit Erdwärmesonden zu heizen (Winterfall) und zu kühlen (Sommerfall) untersucht und die Optimierungsmöglichkeiten werden aufgezeigt. Dasselbe gilt für den Betrieb einer Wärmepumpe mit Erdwärmesonde. Wie kann der Nutzer einer solchen Anlage dazu beitragen, dass mit möglichst wenig Strom die nötige Wärme produziert werden kann?

Im zweiten, bis 2013 dauernden Projektteil, werden Pilotanlagen mit unterschiedlichen Fluiden und Sondenbauarten errichtet und über 2 Heizperioden

hinweg messtechnisch erfasst und ausgewertet.

Forschungsergebnisse

Mit den Ergebnissen werden die Anleitungen und Planungshinweise formuliert, die auf dieser Homepage frei zur Verfügung stehen. Sie sind für Bauherren, d. h. für technische Laien, und für Fachleute verfasst. Es werden Informationen und Hilfsmittel für die Bestellung resp. Ausschreibung, sowie für die Planung und Installation einer Wärmepumpenanlage mit Erdwärmenutzung zur Verfügung gestellt. Es werden Empfehlungen zur Optimierung der Anlage resp. der Jahresarbeitszahl gegeben, wie z. B. Fragen der Leistungsmodulation, der kombinierten Wärmeerzeugung und Kühlung, der Sondenregeneration, der hydraulischen Einbindung, der Solepumpe und der Vorlauftemperatur. Diese Unterlagen werden laufend den neuesten Erkenntnissen und Entwicklungen angepasst.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Geothermie-Bohrung Schlattingen 2

Nach erfolgreichem Abschluss der ersten Bohrung in Schlattingen im Jahr 2012 wurde das Projekt mit einer 2. Geothermiebohrung erweitert [3]. Aufgrund der Erkenntnisse der ersten Bohrung wurde eine abgelenkte Bohrung mit einem verlängerten horizontalen Ast im Aquifer geplant. Nachdem das Projekt Schlattingen 2 am 4. Februar 2013 vom Amt für Umwelt des Kantons Thurgau zur Ausführung freigegeben wurde, begannen am 14. Februar die eigentlichen Bohrarbeiten. Am 28. April 2013 konnten sie nach dem Erreichen einer Bohrlänge von 2013 m resp. einer Tiefe von 1172 m unter Terrain abgeschlossen werden.

Die ganze Bohrung Schlattingen 2 liegt auf dem Hoheitsgebiet des Kantons

Thurgau und weist einen minimalen Abstand von rund 300 m zur Landesgrenze nach Deutschland auf. Die Bohrung bezweckte den Zielaquifer –den oberen Muschelkalk resp. dessen Trigonodusdolomit – entlang seiner Schichtlagerung aufzuschliessen, um das darin zirkulierende Thermalwasser optimal erschliessen zu können. Daher wurde die Bohrung Schlattingen 2 ab einer Tiefe von 500 m unter Terrain – d. h. ab dem oberen Bereich der Malmkalke – als gerichtete Bohrung ausgeführt. Anfänglich schritten die Bohrarbeiten sehr zügig voran, doch kam es kurz vor dem Erreichen des Zielhorizontes zu einem Gestängebruch. Im Zuge der nachfolgenden Arbeiten, um das Richtbohrerquipment und den im Bohrloch verbliebenen Teil des Bohrstranges wieder zu bergen, kam es zu Stabilitätsproblemen. Diese führten

letztendlich dazu, dass der erste abgelenkte Bohrlochteil ab 500 m aufgegeben und ab einer Tiefe von 500 m ein neuer «Bohrast» erstellt wurde. Am 16. April 2013 erreichte dieser den Zielhorizont nach einer zurückgelegten Bohrlänge von 1232 m.

Zum Charakterisieren der Gesteinseigenschaften und damit zum Abbilden des Bohrlochs wurden zwei geophysikalische Messserien gefahren. Diese ergaben auch im abgelenkten Bohrlochbereich Resultate mit hervorragender Datenqualität. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse können bei geothermischen Folgeprojekten eine wichtige Planungsgrundlage sein. Die geologischen Ergebnisse der neuen Bohrung Schlattingen 2 bestätigten den aufgrund der Bohrung 1 prognostizierten Schichtaufbau resp. die modellartige Vorstellung des

Schichtaufbaus im Gebiet Schlattingen/Diessenhofen. Obschon erst wenige Testergebnisse vorliegen, kann man bereits heute von weitgehend deckungsgleichen Gesteinseigenschaften und Gesteinstemperaturen ausgehen, wie sie schon bei der Bohrung Schlattingen 1 festgestellt wurden. Für das reine Abteufen der Bohrung wurden – inklusive der Vermessungsarbeiten im Bohrloch und der durch den Gestängebruch entstandenen Verzögerungen – 73 Tage resp. rund 10 Wochen benötigt. Hinzu kamen noch die Aufwendungen für die Testarbeiten, die nach Bohrende auszuführen waren. Die Bohrung wird durch vier Verrohrungen gesichert, d. h. von der angrenzenden Umgebung abgeschottet: Vorerst durch das Standrohr Ø 13 3/8 Zoll, welches bei 141 m die Lockergesteine (Quartär) von den harten Festgesteinen abdichtend trennt. Dann folgen die Abschottungen bei 500 m (oberster Bereich der Malmkalke) durch die Ankerrohrtour Ø 9 5/8 Zoll.

Während der Bohrarbeiten konnte aufgrund der Spülungsbilanz bereits festgestellt werden, dass die hochdurchlässigen Kluftzonen im Bereich des Trigonodus-Dolomit sich im Bereich des untersten Bohrlochabschnitt von 1'870 bis 2'006 m befinden. Aufgrund des geologischen Profils und der ersten Messresultate der geophysikalischen Messungen wurde die Bohrung ausgebaut und eine erste Stimulation mit Salzsäure durchgeführt. Die anschliessend gemessenen Werte von Temperatur und Ergiebigkeit lagen bei 68°C bzw. 10 kg/s, was einem Erfolg entspricht. Nach der Auswertung aller geophysikalischen Loggingdaten konnte bestätigt werden, dass die sich die höchstdurchlässigsten Bereich im untersten Bohrlochabschnitt befinden. Das bedeutet, dass mit der ersten Stimulationsmassnahme nach dem Abschluss der Bohr- und Ausbauarbeiten im Wesentlichen nur diese untersten hydraulisch wirksamen Bereiche stimuliert werden konnten, da die Säuerung über den gesamten verfilterten

Bereich von 1'321 bis 2006 m durchgeführt wurde. Es wird deshalb derzeit die Möglichkeit untersucht, durch gezielte, abschnittweise Stimulation der Bohrung die Ergiebigkeit noch um bis zu 50 % zu steigern. Damit könnte der Wärmebedarf des Gemüse- und Landbaubetriebs weitestgehend mit Geothermie gedeckt und der Stromverbrauch für die Förderung des Thermalwassers und damit die Förderkosten gesenkt werden.

Mit den Geothermiebohrungen Schlattingen kann nach der erfolgreichen Realisierung der Anlage in Riehen (BS) im Jahr 1994 wieder ein Wärmeprojekt zu einem Erfolg geführt werden. Der innovative Ansatz des Projektes im Hinblick auf die Ausführung der zweiten Bohrung kann wegweisend für weitere Wärmeprojekte nicht nur im Kanton Thurgau, sondern der ganzen Schweiz sein. Das Projekt wird einen Beitrag zur Entwicklung der nachhaltigen Landwirtschaft leisten und substantielle Mengen an CO₂ einsparen.

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).

2 - Stromindustrie und Wärmeversorgung:

Axpo AG Neue Energien, Glattbrugg, BKW Energie 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 Landchaft Davos.

3 - Bundesämter, Agenturen und Fachverbände:

Swisstopo, Bundesamt für Umwelt BAFU, Schweizerischer Erdbebendienst SED, Agentur für erneuerbare Energien

und Energieeffizienz (AEE, APES), TA Swiss, Geothermie.ch, SBFI, Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz (FWS) u. a.

4 - Energiefachstellen verschiedener Kantone

5 - Runder Tisch

Am 9. Oktober 2013 wurde gemeinsam mit Geothermie.ch wiederum ein «Round table» zum Thema der Tiefengeothermie durchgeführt mit dem Ziel der verbesserten gegenseitigen Information der verschiedenen Akteure. Die technischen Themen umfassten Aspekte der hydraulischen Stimulation, Fracking, induzierte Seismizität und Co-Produktion von Gas und Wärme. Informiert wurde zudem über den aktuellen Stand der laufenden Projekte sowie über Aktivitäten bei Bund und Kantonen.

6- Wissens- und Technologietransfer:

Auch im Bereich Wissens- und Technologietransfer wurden verschiedene Vorhaben unterstützt, so z. B. der Geothermie Bodensee-Kongress in St. Gallen vom 22./23. Mai 2013 [4], und die Journée Romande de Géothermie in Yverdon am 26. November 2013.

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 vierten 5-Jahresperiode, welche von 2013 bis 2018 dauert. Ziele sind die existierenden Technologien zu verbessern und neue Technologien zu entwickeln, den Know-How-Transfer zu intensivieren, Informationen weltweit 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. Im Berichtsjahr wurde der Annex 8 – Direct Use of Geothermal Energy neu aufgelegt. Die Schweiz übernimmt neu die Koordination dieses Annex und stellt mit Frau Dr. Katharina Link die Leiterin, welche ebenfalls die Querverbindung zur Géothermie. ch sicherstellt.

International Partnership for Geothermal Technology IPGT [7]:

Diese Partnerschaft wurde von Australien, Island und der USA im August 2008 gegründet und 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 Pilot- und Demonstrationsprojekte durchzuführen. Die Organisation bezweckt die Entwicklung der Tiefengeothermie voranzutreiben – insbesondere im EGS-Bereich. Die

Schwerpunkte, welche von 7 Working Groups bearbeitet werden, umfassen (1) Kostengünstige Bohrtechnologien, (2) Zonale Isolation und Packertechnologie, (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. Die einzelnen Arbeitsgruppen haben 2013 verschiedene »white papers« publiziert, welche auf der IPGT-Website aufgeschaltet sind [7].

Geothermal ERA-NET [8]:

Die Schweiz beteiligt sich am europäischen Projekt »Geothermal ERA-NET«, das folgende Länder umfasst: Island (Federführung), Deutschland, Frankreich, Italien, Holland, Ungarn, Slowakei, Schweiz 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.

GeoMol [13]:

Ebenfalls auf europäischer Ebene angesiedelt ist das Projekt GeoMol (»Assessing subsurface potentials of the Alpine Foreland Basins for sustainable planning and use of natural resources«), welches für die Schweiz federführend von swisstopo bearbeitet wird.

Referenzen

[1] Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz FWS: www.fws.ch

[2] Laboratoire de mécanique des sols, EPFL: <http://lms.epfl.ch/research/research-fields/energy-geostructures-thermal-piles>

[3] Website der Firma Grob, Schlattigen: www.grob-gemuese.ch

[4] Website des Pilotprojekts St Gallen: www.geothermie.stadt.sg.ch/

[5] Website des Projekts Geotherm an der ETHZ: 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

[7] International Partnership for Geothermal Technology: www.internationalgeothermal.org

[8] Website des Projekts Geothermal ERA-NET: www.geothermal-eranet.is/

[9] Utilisation de géothermie profonde pour le chauffage de grands bâtiments avec des pompes à chaleur à très haute performance: <http://www.bfe.admin.ch/php/modules/enet/streamfile.php?file=000000011135.pdf&name=000000290895>

[10] Website des Projekts Geotherm-2: www.cces.ethz.ch/projects/nature/geotherm-2

[11] Energie-Kompetenzzentren (SCCER): www.kti.admin.ch/energie/00266/index.html?lang=de

[12] Website des Projekts Erdsondenoptimierung der ZHAW: www.erdsondenoptimierung.ch/

[13] Website des Projekts GeoMol: http://geomol.eu/home/index_html

Weitere Referenzen von allgemeinem Interesse (ohne Verweis):

- GEOTHERMIE.CH: www.geothermie.ch
- International Geothermal Association IGA: www.geothermal-energy.org/
- European Geothermal Energy Council: <http://egec.info/>
- World Geothermal Congress 2015: <http://wgc2015.com.au/>

Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(* IEA-Klassifikation)

- CONSTRUCTIVE RECOMMENDATIONS FOR OPTIMIZED AND RELIABLE HEAT EXCHANGER PILE SYSTEMS** R+D 3.5*

Lead:	EPFL/DGC/LMS, Ecublens	Funding:	BFE
Contact:	Laloui Lyesse lyesse.laloui@epfl.ch	Period:	2010–2014

Abstract: Heat exchanger piles are combining structural functions with energy management functions. They are used to heat or cool buildings. The objective of the project is to derive constructive recommendations for heat exchanger piles, based on scientific knowledge of the interaction between the energy demand and the thermal behaviour of the soil taking into account the effects of temperature cycles applied to the pile/soil system.
- GRETEL II : GEOTECHNICAL RELIABILITY OF THERMO-PILES ENERGY** R+D 3.5

Lead:	EPFL/DGC/LMS, Ecublens	Funding:	BFE
Contact:	Laloui Lyesse lyesse.laloui@epfl.ch	Period:	2010–2013

Abstract: Ziel des Projekts ist es, das Verhalten einer Gruppe von Energiepfählen unter einer Fundamentplatte zu untersuchen. Die Wechselwirkungen zwischen den Pfählen via die Fundamentplatte werden durch in situ-Messungen von Stress, Temperatur und Porendruck des Wassers bei unterschiedlichen thermischen Belastungen der Pfähle untersucht. Mit den Resultaten soll das Designtool Thermo-Pile weiterentwickelt werden.
- GEOTHERMAL RESERVOIR OF THE EGS PILOT PLANT AT SOULTZ-SOUS-FORÊTS (FRANCE): MONITORING OF THE EXPLOITATION AND PREDICTION OF ITS BEHAVIOUR** R+D 3.5

Lead:	Deep Heat Mining Association	Funding:	BFE
Contact:	Vuataz François-D. francois.vuataz@unine.ch	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.
- 3D-RESERVOIRMODELL REGION BASEL FÜR EINE ENERGIE-RELEVANTE NUTZUNG (Z.B. GEOTHERMIE, CARBON STORAGE)** R+D 3.5

Lead:	Universität Basel	Funding:	BFE
Contact:	Huggenberger Peter peter.huggenberger@unibas.ch	Period:	2009–2012

Abstract: Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines geologischen 3D-Modells der Region Basel als neuartiges Werkzeug für die Tiefenreservoirbewirtschaftung und Raumplanung. Das Reservoirmodell kann als Planungsinstrument eingesetzt werden, z.B. zur Evaluierung geothermischer Verfahren (EGS, Doublette u.a.), sein. Es sollen sowohl Reservoireigenschaften, geothermisches Potenzial als auch etwaige Risiken aus dem Modell ableitbar sein.
- GEOTHERM - GEOTH. RESERVOIR PROCESSES: RESEARCH TOWARDS THE CREATION AND SUSTAINABLE USE OF ENHANCED GEOTHERMAL SYSTEMS** R+D 3.5

Lead:	ETHZ Geologisches Inst.	Funding:	BFE
Contact:	Evans Keith Frederick keith.evans@erdw.ethz.ch	Period:	2009–2012

Abstract: A consortium of research groups lead by ETHZ collaborate in a comprehensive program of basic research on key aspects of Enhanced Geothermal Systems (EGSs). Novel observation techniques and process-simulation tools will be developed, partly building on data provided by the industrial developers of the Basel Project. The overall aim of the project is to better understand the relevant processes and to improve the predictability of EGS.
- ERGÄNZUNGSLEISTUNGEN AM BOHRLOCH KGZ DAVOS** R+D 3.5

Lead:	Landschaft Davos Gemeinde	Funding:	BFE
Contact:	Calonder Gian-Paul gian-paul.calonder@davos.gr.ch	Period:	2012–2013

Abstract: Nach erfolgreichem Abschluss der Bohrung auf eine Tiefe von 400 m für die Wärmeversorgung des Kongresszentrums / Hallenbad Davos werden mit Tests Bohrloch-Logs die hydraulischen und geothermischen Eigenschaften der Araser Dolomiten, dem Reservoir für die geothermische Nutzung des Davoser Kongresszentrum, bestimmt. Die Ergebnisse dienen der Auslegung der zukünftigen Nutzung und dienen dem Kanton als Grundlage für die Bewilligung.
- OPTIMIERUNG VON ERDWÄRMESONDEN** R+D 3.5

Lead:	Zürcher Hochschule für angew. Wissenschaften, Wädenswil	Funding:	BFE
Contact:	Hubbuch Markus hubb@zhaw.ch	Period:	2009–2014

Abstract: 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. Im zweiten Projektteil werden alternative Sondenfluide und -bauarten in Pilot- und Feldversuchen getestet und/oder demonstriert. Die Ergebnisse werden ausgewertet und den Nutzern über www.erdsondenoptimierung.ch/ zur Verfügung gestellt.

- PILOTANLAGE ZUR ENTWICKLUNG VON TIEFENBOHR-VERFAHREN MITTELS HYDROTHERMALER FLAMME**

P+D 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: Das Projekt will die Machbarkeit des Bohrverfahrens «thermal spallation drilling» im überkritischen Bereich anhand einer Pilotanlage demonstrieren und die wichtigen Parameter für das «upscaling» in Feldversuche bestimmen. Im Weiteren sollen die Wirtschaftlichkeit der Technologie im Vergleich zur konventionellen Bohrtechnologie untersucht und erste Schritte für die kommerzielle Umsetzung unternommen werden.
- UTILISATION DE GÉOTHERMIE PROFONDE POUR LE CHAUFFAGE DE GRANDS BÂTIMENTS AVEC DES POMPES À CHALEUR À TRÈS HAUTE PERFORMANCE**

R+D 3.5

Lead:	Planair SA, La Sagne	Funding:	BFE
Contact:	Rognon Fabrice fabrice.rognon@planair.ch	Period:	2009–2012

Abstract: Le but consiste à définir 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 : le besoin de place, les coûts de raccordements et les délais de réalisation.
- SPALLATION BOHREN: WECHSELWIRKUNG GESTEIN-FLAMME**

P+D 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 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. Dabei werden folgende Parameter speziell untersucht: Temperatur, Wärmemenge und Einfluss auf Partikelgrösse, Abtransport und Kontrolle der heissen Zone.
- GEOHERMIE-BOHRUNG SCHLATTINGEN 2**

P+D 3.5

Lead:	Grob Gemüse- und Landbau	Funding:	BFE
Contact:	Hansjörg Grob info@grob-gemuese.ch	Period:	2012–2014

Abstract: Mit der Geothermiebohrung Schlattingen 1 konnte nach der Anlage in Riehen wieder ein Wärmeprojekt zum Erfolg geführt werden. Der innovative Ansatz für die zweite Bohrung ist wegweisend für weitere Projekte wie z.B. St. Gallen und Lavey-les-Bains. Ebenfalls werden wertvolle Daten gesammelt, welche z.B. in das intern. Projekt GEOMOL einfließen werden. Das Projekt wird auch einen Beitrag zur Entwicklung nachhaltiger Landwirtschaft leisten.
- GEOMOL CH GEOLOGISCHES 3D-MODELL DES SCHWEIZERISCHEN MOLASSEBECKENS**

R+D 3.5

Lead:	swisstopo	Funding:	BFE
Contact:	Roland Baumberger roland.baumberger@swisstopo.ch	Period:	2012 - 2015

Abstract: Das Projekt GeoMol CH bezweckt, geologische Grundlagen zu wichtigen Fragen zu erarbeiten: Energienutzung, 3D-Raumplanung, Abfalllagerung, Ressourcenmanagement. Folgende Hauptziele werden mit dem Projekt verfolgt: Erstellen einer dreidimensionalen Datenbasis zum Molassebecken, Vereinfachung administrativer Abläufe (Informations- und Bewilligungsverfahren) und Aufarbeitung bereits bestehender Grundlagedaten (Bohrdaten, seismische Linien etc.)
- ENERGIE AUS DEM INNEM DER ERDE: TIEFENGEOHERMIE ALS ENERGIETRÄGER DER ZUKUNFT?**

R+D 3.5

Lead:	TA-Swiss	Funding:	BFE
Contact:	Emiliano Feresin emiliano.feresin@ta-swiss.ch	Period:	2012 - 2014

Abstract: Die interdisziplinäre Studie soll die zukünftigen Perspektiven (Chancen und Risiken) der Tiefengeothermie als Energiequelle aufzeigen. Vorgesehen ist eine umfassende Abklärung, die sowohl technische als auch wirtschaftliche, gesellschaftliche und rechtliche Aspekte der Tiefengeothermie berücksichtigt, unter Berücksichtigung der energiepolitischen Strategie des Bundes und der zu erwartenden politischen Diskussion.
- GEOSIM: METHODEN UND SOFTWARETOOLS ZUR ECHTZEITBEURTEILUNG DES SEISMISCHEN RISIKOS VON GEOHERMIEPROJEKTEN IM RAHMEN DER UMWELTVERTRÄGLICHKEITSPRÜFUNG**

R+D 3.5

Lead:	SED, ETHZ	Funding:	BFE
Contact:	Stefan Wiemer stefan.wiemer@sed.ethz.ch	Period:	2013 - 2015

Abstract: Um das Potenzial der geothermischen Stromerzeugung nutzen zu können, ist es notwendig, das seismische Risiko im Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung mit elastbaren Methoden und Softwaretools in Echtzeit abschätzen zu können. Das Projekt GEOSIM entwickelt dazu die wissenschaftliche Methodik, die Algorithmen und Softwaretools, um die ab dem Jahr 2014 von der Industrie geplanten Pilotprojekte realisieren zu können.

- **IEA-GIA, LEITUNG ANNEX VIII** R+D 3.5
- | | | | |
|----------|---|----------|-------------|
| Lead: | Dr. Roland Wyss GmbH | Funding: | BFE |
| Contact: | Katharina Link link@rwgeo.ch | Period: | 2013 - 2016 |
- Abstract: Annex VIII was established to promote the wider direct use of geothermal water and to learn from the experiences of participants. Today, geothermal water is used for a variety of applications that require heat, such as heating buildings, individually or for whole towns; raising plants in greenhouses, drying crops, heating water at fish farms, snow melting, bathing and for therapeutic purposes and several industrial processes.
- **SEISMISCHE ÜBERWACHUNG DER SÄURESTIMULATION DES GEOTHERMIEPROJEKTS SCHLATTINGEN** R+D 3.5
- | | | | |
|----------|--|----------|------|
| Lead: | SED, ETHZ | Funding: | BFE |
| Contact: | Stefan Wiemer stefan.wiemer@sed.ethz.ch | Period: | 2013 |
- Abstract: Keine Info vorhanden - Gunter ???
- **COTHERM-IPGT GEOLOGISCHE KALIBRATION GEOPHYSIKALISCHER MESSM** R+D 3.5
- | | | | |
|----------|--|----------|-------------|
| Lead: | ETHZ | Funding: | BFE |
| Contact: | Thomas Driesner thomas.driesner@erdw.ethz.ch | Period: | 2012 - 2015 |
- Abstract: COTHERM aims at a better understanding of subsurface processes in natural high-temperature geothermal systems. COTHERM combines cutting-edge hydrological, geochemical and geophysical modeling techniques with case studies on two Icelandic geothermal systems.
- **GEOTHERM 2** R+D 3.5
- | | | | |
|----------|--|----------|-------------|
| Lead: | ETHZ /CCES | Funding: | BFE |
| Contact: | Stefan Wiemer stefan.wiemer@sed.ethz.ch | Period: | 2013 - 2016 |
- Abstract: GEOTHERM-2 continues the work of GEOTHERM as a collaboration of geoscience, engineering and social-science groups at ETHZ, EPFL, the Paul Scherrer Institut (PSI) and industrial (Axpo, GeoEnergy Suisse). Main thematic are geomechanics of reservoir creation, assess and mitigate the risks, modeling of the of reservoir generation process, chemical reaction between fluid and rock and optimizing the use of geothermal energy in cities.
- **REAKTIVIERUNG DER THERMALWASSERBOHRUNG ENGERFELD RHEINFELDEN** R+D 3.5
- | | | | |
|----------|---|----------|------|
| Lead: | Stiftung Thermalquellen Rheinfelden | Funding: | BFE |
| Contact: | Franco Mazzi franco.mazzi@rheinfelden.ch | Period: | 2013 |
- Abstract: Die 1983 erstellte 600 m tiefe Thermalwasserbohrung erschloss ein 27 °C warmes Thermalwasservorkommen, dessen unterer Horizont für ein Thermalbad einige Zeit genutzt wurde, jedoch heute wieder verschlossen ist. Ziel ist die Bohrung wieder zu öffnen, um deren Zustand zu untersuchen. Bei intaktem Zustand soll die Quelle energetisch genutzt werden.

Windenergie



Titelbild:

Die Windenergieanlage in Haldenstein bei Chur [Foto: Suisse Eole]

In Haldenstein wurde die bisher grösste Windenergieanlage der Schweiz in Betrieb genommen. Die Nabhöhe beträgt 119 m, der Rotordurchmesser 112 m.

BFE Forschungsprogramm Windenergie

Überblicksbericht 2013

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE

CH-3003 Bern

Programmleiter BFE (Autor):

Robert Horbaty, ENCO Energieconsulting AG (robert.horbaty@enco-ag.ch)

Bereichsleiterin BFE:

Dr. Katja Maus (katja.maus@bfe.admin.ch)

www.bfe.admin.ch/forschungwindenergie/index

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

Einleitung

Die weltweite Entwicklung der Windenergie hat 2013 einen leichten Dämpfer hinnehmen müssen. Der Zubau der installierten Leistung lag mit 35,5 GW um 9,7 GW tiefer als im Vorjahr. Verursacht wurde dieser Rückgang primär durch einen massiven Einbruch in den USA (von 13,1 GW im Jahr 2012 auf 1,1 GW im Jahr 2013). Dieser scheint aber bereits überwunden, waren doch Ende 2013 wieder Projekte mit 12 GW im Bau, was einem neuen Rekordwert entspricht [1].

In Europa lag der Zubau mit 12,0 GW um 8 % tiefer als im Vorjahr, wobei einem massiven Rückgang in Spanien und Italien ein deutliches Wachstum in Deutschland gegenüber steht. Im Offshore-Bereich konnte mit einem Zubau von knapp 1,6 GW ein Wachstum von 34 % verzeichnet werden [2]. In Deutschland wurden 60 % der neu installierten Onshore-Windenergieanlagen (3,0 GW) in Mittel- und Süddeutschland erreicht. Dabei entfielen 410 MW auf

Rheinland-Pfalz und 250 MW auf Bayern [3].

In der Schweiz sind 2013 6 Anlagen mit einer Leistung von zusammen 13,3 MW in Betrieb gegangen. Auf dem Mont Crosin wurde das erste Re-Powering in der Schweiz durchgeführt, wobei vier fast zwanzigjährige Turbinen ersetzt worden sind. In Haldenstein wurde die bisher grösste Windenergieanlage der Schweiz in Betrieb genommen, welche über eine Nabenhöhe von 119 m und einen Rotor mit 112 m Durchmesser verfügt. Insgesamt beträgt die installierte Leistung der 33 grossen Windenergieanlagen 60 MW. Der Windstromanteil der schweizerischen Stromversorgung liegt noch unter 0,2 % [4].

Im Gegensatz zur bisher bescheidenen Nutzung der Windenergie sind in der Schweiz weiterhin zahlreiche Projekte im Gange. Nach einer Erhebung von Suisse Eole werden in der Schweiz Windenergieprojekte mit einer Leistung vom total 1240 MW vorangetrieben, welche den

bestehenden kantonalen Grundlagen entsprechen. Diese kantonalen Grundlagen (Kriterien, Standortausscheidungen in kantonomer Richtplanung) sind allerdings erst teilweise festgelegt, sodass unklar ist, wie viele Projekte eine Realisierungschance haben werden. Die zentralen Herausforderungen für die weitere Entwicklung der Windenergienutzung in der Schweiz bleiben vor dem Hintergrund der bisher geringen Erfahrungen die Akzeptanz in der Bevölkerung sowie die Beschleunigung und Vereinfachung der Bewilligungsverfahren. Das komplexe Gelände und die teilweise sehr hoch gelegenen Standorte stellen auch technisch besondere Herausforderungen an Planung, Erstellung und Betrieb der Anlagen.

IEA Klassifikation: 3.2 Wind Energy

Schweizer Klassifikation: 2.6 Windenergie

Programmschwerpunkte

Das Forschungsprogramm Windenergie konzentriert sich auf zwei Zielsetzungen. Zum einen soll es dazu beitragen, dass das in der Schweiz vorhandene Potenzial der Windenergie im Rahmen der Energiestrategie 2050 genutzt werden kann. Zum anderen soll die Beteiligung der Schweizer Industrie am Weltmarkt Windenergie weiter erhöht werden. Basierend auf diesen Zielsetzungen und einem mit interessierten Forschungsinstitutionen und Mitgliedern des Firmenbeirats von Suisse Eole durchgeführten Workshop wurden für das Konzept 2013–2016 des Forschungsprogramms Wind [5] folgende neuen Schwerpunkte festgelegt:

- Grundlagen für effiziente Planungs- und Bewilligungsverfahren: Erarbeitung von Grundlagen und innovativen Lösungsansätzen in den Bereichen Akzeptanz sowie Auswirkungen auf die Fauna;
- Ertragsoptimierung an Standorten mit komplexer Topografie: Optimierung des Anlagenertrags an typischen Schweizer Standorten, um die Wirtschaftlichkeit zu optimieren und die Standorte optimal zu nutzen;
- Innovative Anlagekomponenten: Entwicklung von innovativen Anlagekomponenten durch Vernetzung der Schweizer Zulieferindustrie mit Schweizer Forschungsinstitutionen.

Rückblick und Bewertung 2013

Im Berichtsjahr konnten vor allem im Bereich der Akzeptanz vielversprechende Erkenntnisse gewonnen werden, welche in der Schweiz auf ein grosses Interesse gestossen sind und für die weitere Entwicklung der Windenergienutzung von Bedeutung sind.

Bei den Projekten rund um das Thema Ertragsoptimierung an Standorten mit komplexer Topografie schreiten die Arbeiten weiter voran, definitive Ergebnisse stehen aber noch aus. Ein Projekt zur Implementation eines Versuchsaufbaus für Profilmessungen für Windkraftanlagen im Large Subsonic Wind Tunnel Emmen (LWTE-Windkanal) der RUAG Aviation in Emmen wurde abgebrochen, da sich die Messkosten für potenzielle Interessenten als zu hoch erwiesen haben.

Ausblick

Das Forschungsprogramm Windenergie wird sich weiter auf die Schwerpunkte des Konzepts 2013–2016 [5] konzentrieren. Im Schwerpunkt «Grundlagen für effiziente Planungs- und Bewilligungsverfahren» werden Auswertungen und Analysen der Umfragen zu den Wirkungen auf die Anwohner weiter vertieft, wobei insbesondere die Unterschiede unter den untersuchten Standorten betrachtet werden. Zudem werden die Arbeiten zur Vermeidung von Kollisionen

mit Vögeln oder Fledermäusen weiter geführt – unter anderem mit dem Einsatz neuer optoelektronische Detektionssysteme. Im Schwerpunkt «Ertragsoptimierung an Standorten mit komplexer Topografie» werden unter anderem die Studien zur Entwicklung einer Methodik zur Erstellung eines Windkatasters mittels CFD-Simulation und zur Analyse der Nachlaufströmung von Windenergieanlagen weiter vertieft.

Der bisherige Leiter des Forschungsprogramms Windenergie, Robert Horbaty, ENCO AG, hat per Ende 2013 nach 20 Jahren seine Tätigkeit als Programmleiter beendet. Die Tatstache, dass sich die Leistung der grössten verfügbaren Windenergieanlagen in dieser Zeit von 250 kW auf 7500 kW erhöht hat, verdeutlicht die enorme technische Entwicklung der Windenergie in diesem Zeitraum. Ab 2014 wird neu Lionel Perret, Planair SA, die Leitung des Forschungsprogramms übernehmen.

Highlights aus Forschung und Entwicklung

Wirkungen von Windkraftanlagen auf Anwohner in der Schweiz

Das Potenzial der Windenergie in der Schweiz kann nur dann erfolgreich erschlossen werden, wenn die Windenergienutzung sowohl auf lokaler wie auch auf nationaler Ebene durch die Bevölkerung mitgetragen und nicht durch Einsparungen verhindert wird. Generell genießt die Windenergie in der Schweiz eine hohe Akzeptanz, was durch verschiedene Umfragen bestätigt wird. So befürworten z. B. 93 % der befragten Einwohner des Kantons Neuenburg eine weitere Entwicklung der Windenergie, davon 64 % sogar einen starken Ausbau [6]. Konkrete Projekte lösen jedoch oft starke Konflikte aus, wobei die befürchteten Auswirkungen durch Lärm und Sichtbarkeit der Anlagen eine zentrale Rolle spielen.

Ziel des vorliegenden Forschungsprojektes war es, die von Anwohnern von Windenergieanlagen (WEA) in der Schweiz wahrgenommenen Auswirkungen zu analysieren und daraus Empfehlungen für den weiteren Ausbau der Windenergienutzung abzuleiten. Dabei wurden erstmals im Rahmen einer wissenschaftlichen Studie die lokalen Wirkungen von WEA vergleichend ausgewertet und geklärt, ob es zu Mehrfachbelastungen kommen kann, oder ob es ausgleichende Faktoren gibt.

In die Untersuchung wurden Anwohner aller sieben schweizerischen WEA-Standorte (Stand 2012) einbezogen, in denen mindestens eine Anlage von 900 kW oder mehr Leistung steht. Insgesamt wurden 467 Anwohner persönlich interviewt. Als Anwohner galt, wer im Abstand bis zu 5 km zur WEA wohnte. Für die Befragung wurde ein Fragebogen mit insgesamt 614 Einzelfragen verwendet, der basierend auf vergleichbaren Studien entwickelt und für die Schweiz angepasst wurde. Das komplette Interview nahm etwa eine Stunde in Anspruch und wurde in der Amtssprache der jeweiligen Interviewten von geschulten Muttersprachlern durchgeführt.

Die wichtigsten Resultate lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Anwohnerakzeptanz: Sowohl die Einstellung zur Windenergie allgemein wie auch zu den WEA vor Ort fiel deutlich positiv aus. Eine Mehrheit von 78 % der Anwohner befürwortete die WEA vor Ort, eine Minderheit von 6 % war dagegen. Von dieser Minderheit der Gegner engagierten sich 36 % aktiv gegen die WEA z. B. als Mitglied einer Vereinigung gegen Windenergie oder mit Protestbriefen. Hingegen setzten sich nur 6 % der Befürworter aktiv für die WEA ein. Ebenfalls nahmen Gegner relativ häufiger an Bürgerentscheiden teil. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass Windkraftgegner eine Minderheitenmeinung vertreten dürften. Als entscheidend für die Einstellung zu WEA allgemein und vor Ort erwies sich die wahrgenommene Belastung während des Planungs- und Bauprozesses der WEA:

Insgesamt emotionalisieren die Windenergieanlagen nur mässig, durchschnittlich traten keine extremen Gefühlslagen auf. Allerdings sahen die Befragten eigene Interessen sowie die Interessen der Gemeinde nur wenig berücksichtigt. Die Zufriedenheit mit dem Planungsprozess lag durchschnittlich nur im mittleren Bereich. Beteiligungsmöglichkeiten hatte nur eine Minderheit der Befragten wahrgenommen.

Die Mehrheit der Anwohner nahm entweder keine der Emissionen wahr oder fühlte sich von diesen nicht oder nur geringfügig belästigt (76 %). Weitere 18 % fühlten sich mittel bis sehr stark belästigt, ohne jedoch Stresssymptome zu erleben. Bezogen auf das heute geltende Immissionsschutzrecht lag damit für 94 % der befragten Anwohner keine starke Belästigung durch die WEA vor.

Eine Minderheit von 6 % fühlte sich mittel bis stark durch die WEA-Emissionen belästigt und berichtete von Symptomen wie z. B. Probleme beim Einschlafen. Diese Gruppe ist als stark belästigt zu bewerten. Obwohl die Befragten hinsichtlich der Geräusche mit 4,5 % am häufigsten Stresssymptome anführten, spielt die Nähe zu den WEA keine zentrale Rolle für die Entwicklung der Symptome. Hingegen hatten stark Belästigte Sicht auf eine grössere Anzahl von WEA, fielen durch eine höhere Licht- und Lärmempfindlichkeit auf und gaben eine

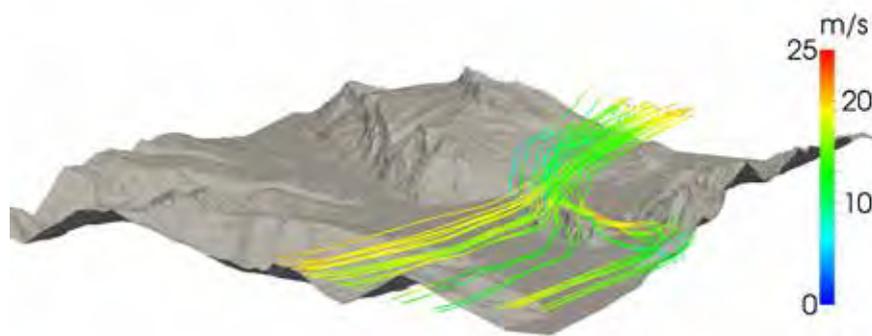
grössere Belastung während der Planungs- und Bauphase an, schätzten die Gerechtigkeit geringer ein und waren weniger zufrieden mit den Partizipationsmöglichkeiten.

Als Empfehlung sollen gemäss den Verfassern der Studie vorhandene technische Möglichkeiten zur Emissionsreduktion soweit wie möglich eingesetzt werden (z. B. Reduktion der Lichtemission der WEA, die bei klaren Wetterlagen als störend erlebt werden kann). Entscheidend für die Akzeptanz sowie die erlebte Belästigung scheinen aber insbesondere die Berücksichtigung der Sicht auf die WEA sowie eine optimale Einbindung der Anwohner in den Planungsprozess zu sein.

Entwicklung einer Methodik zur Erstellung eines Windkatasters mittels CFD-Simulation

Die Lokalisierung geeigneter Standorte ist für die Nutzung der Windenergie zentral. Dies gilt für die Schweiz in speziellem Masse, da aufgrund der Besiedlung und der Topografie nicht beliebig viele geeignete Standorte vorhanden sind. Eine umso höhere Bedeutung kommt deshalb der Einschätzung der Windverhältnisse bei der Standortsuche zu. Die aktuelle Windkarte der Schweiz, welche anhand statistischer Methoden die Daten der verschiedenen Messstationen interpoliert, genügt den Anforderungen für die Standortsuche nur noch beschränkt. Besonders in Regionen mit sehr komplexer Topologie stösst diese Methode an ihre Grenzen und die angegebenen Werte liegen teilweise erheblich neben der Realität.

Ziel dieses Projektes ist die Erarbeitung einer Methodik zur Erstellung eines Windkatasters. In diesem soll das theoretische Potenzial an Windenergie pro installierter Rotorfläche (kWh/m^2) erfasst werden. Im zweiten Teil des Projektes wird ein Windkataster für den Kanton St. Gallen und Teile des Kantons Graubünden erstellt. Eine Erweiterung auf andere Regionen ist in Folgeprojekten möglich. Auch wenn die Genauigkeit des Katasters, wesentlich über derjeni-



Figur 1: CFD Simulation für Föhnwind: Stromlinien um den Fläscherberg, Blickrichtung NW.

gen der heutigen Windkarte liegt, werden umfassende Windmessungen an potenziellen Standorten nach wie vor zwingend bleiben. Der Kataster soll aber künftig als Entscheidungsgrundlage für die Suche und die Auswahl von möglichen Windkraftstandorten dienen.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wird die Physik der atmosphärischen Luftströmungen in einem Modell abgebildet und damit der Einfluss des Geländes auf die Luftströmung im Detail simu-

liert. Das Modell ist ähnlich dem Modell für die alltägliche Wettervorhersage, weist jedoch eine wesentlich höhere räumliche Auflösung und deshalb auch längere Rechenzeit auf. Um den Energieertrag für ein ganzes Jahr zu ermitteln, wird jede relevante Wetterlage durchgerechnet. Die Beiträge jeder Wetterlage zum Jahresertrag werden gemäss ihrer klimatologischen Häufigkeit gewichtet.

Zur Erstellung des Simulationsmodells wurden in einem ersten Schritt die rele-

vanten Wetterlagen evaluiert. Für jede der Wetterlagen wurde ein typisches Wetterereignis evaluiert. Diese Ereignisse müssen möglichst gut durch Messdaten dokumentiert sein, wobei im Rahmen des Projektes auf Werte verschiedener Messkampagnen im Rheintal zurückgegriffen werden konnte, welche im Rahmen des Mesoscale Alpine Programme (MAP) durchgeführt wurden. Ferner wurde geklärt, welche Eingangsdaten zur Simulation genutzt werden können, wobei sich MeteoSchweiz bereit erklärt hat, die relevanten Wetterlagen mit dem neuen COSMO-1-Modell zu berechnen. Dadurch stehen optimale Eingangsdaten für die Simulation zur Verfügung. Für die Simulation wird als zentrales Element ein Turbulenzmodell benötigt. Hier kann aus der Zusammenarbeit mit dem Institut für Fluidodynamik IFD an der ETHZ ein neues Turbulenzmodell verwendet werden, welches die Vorteile von zwei bewährten Turbulenzmodellen kombiniert. Es wird eine Kombination von einem RANS- (Reynolds Averaged Navier Stokes) Modell und einem LES- (Large Eddy Simulation) Modell verwendet.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Nicht vereisende Anemometer – Untersuchung der Wirksamkeit von Anti-Eis-Beschichtungen im Feldversuch

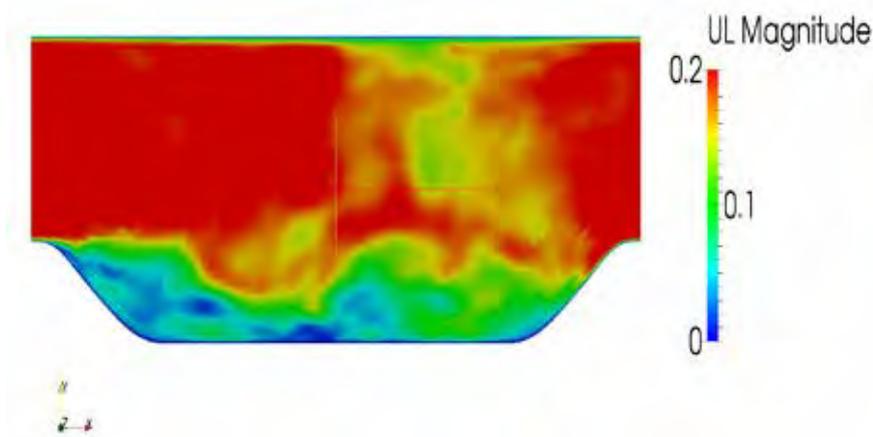
Das Institute of Materials and Process Engineering an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften arbeitet intensiv an der Entwicklung von eishaftungsreduzierenden Beschichtungen für die Anwendung im Bereich Windenergie. Es konnten Beschichtungen realisiert werden, auf denen Eis bei Adhäsionsuntersuchungen im Labormassstab um über einen Faktor 100 schlechter haftet als auf Aluminium. Zwei Anti-Eis-Beschichtungen wurden innerhalb dieses Projekts in Zusammenarbeit mit der Firma Meteotest unter

realen Bedingungen auf dem Höhenzug «Gütsch» getestet (rund 2300 m.ü.M.). Als Modellsystem wurden Anemometer gewählt. Diese spielen durch die Bestimmung der Windgeschwindigkeiten eine zentrale Rolle bei der Eiserkennung auf Windenergieanlagen und müssen trotz vereisender Bedingungen zuverlässige Messwerte liefern. Es wurden sowohl beheizbare als auch nicht beheizbare Anemometerschalen mit den Anti-Eis-Beschichtungen versehen.

Das Projekt beinhaltete eine Optimierung der Beschichtungsapplikation auf Material und Geometrie von Anemometerschalen und die Durchführung von Messungen in der Winterperiode 2012/13. Durch Überwachung der Anemometer anhand von Kamera- und Windmessdaten konnten die Phasen instrumenteller

Vereisung bestimmt werden. Aufgrund von Hardware-Problemen konnten die Windgeschwindigkeiten der unbeschichteten Referenzsensoren über die gesamte Dauer des Pilotprojekts nicht ermittelt werden. Somit musste der Versuch ohne Referenz durchgeführt werden und nur die Performance der beschichteten Sensoren war direkt miteinander vergleichbar.

Eine differenzierte Betrachtung der Vereisungsereignisse der unterschiedlichen Sensoren zeigte, dass keiner der Sensoren während der Winterperiode eisfrei geblieben ist. In Abhängigkeit der unterschiedlichen Beschichtungen der unbeheizten Sensoren wurden zwischen 409 und 712 Stunden (17 und 29,7 Tagen) instrumenteller Vereisung beobachtet. Die beheizten Sensoren zeigten



Figur 2: Strömungsgeschwindigkeit aus einer Simulation durch Kombination zweier Turbulenzmodelle (RANS/LES-Turbulenzmodell) zwischen 37 Stunden und 46 Stunden instrumentelle Vereisung.

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse des Pilotprojekts, dass eine weitere Optimierung der Anti-Eis-Beschichtungen zwingend notwendig ist. Leichte Unterschiede in der Performance der getesteten Beschichtungen bei Vereisungsereignissen lassen es aber als realistisch erscheinen, dass durch eine geeignete Beschichtung gezielt Einfluss auf das Eisadhäsionsverhalten genommen werden kann. Zudem wurde eine deutliche Diskrepanz zwischen den Ergebnissen aus Labor- und Feldversuch beobachtet. Für die effiziente Entwicklung wirkungsvoller Anti-Eis-Beschichtungen ist das Durchführen zuverlässiger Feldversuche zwingend notwendig.

Nationale Zusammenarbeit

An regelmässigen Treffen des Programmleiters mit der BFE-Bereichsleiterin Dr. Katja Maus, dem Verantwortlichen beim BFE für Marktentwicklung, Markus Geissmann 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 des Firmenbeirates von Suisse Eole können Aspekte des Forschungsprogramms mit der Windenergiebranche diskutiert und abgestimmt werden. Die Kooperationen mit anderen Forschungsprogrammen wurden auch im Berichtsjahr weiter geführt. Kontakte zu den Elektrizitätstechnologien und -anwendungen und Energie-Wirtschaft-Gesellschaft stehen im Vordergrund. Folgende Forschungsinstitutionen haben Aktivitäten im Bereich der Windenergie entwickelt: An der EPFL erforscht das Wind Engineering and Renewable Energy Laboratory, WIRE [7] turbulente Strömungen an Windenergieanlagen. Das Labor für Strömungsmaschinen an der ETHZ [8] ermittelt die Einflüsse von Vereisung, Böen und

Turbulenzen auf die Performance von Windturbinen im komplexen Gelände. Die Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften (ZHAW) arbeitet an der Entwicklung von Oberflächen zur Verhinderung von Vereisung der Rotorblätter [9]. Die Stromerzeugung mit Flugdrachen wird im Rahmen von zwei Projekten vorangetrieben. Die Fachhochschule Nordwestschweiz in Windisch, die EMPA sowie die Automatic Control Laboratories von ETHZ und EPFL arbeiten am Projekt SwissKitePower [10]. Die Haute Ecole Arc Ingénierie in Neuchâtel ist am internationalen Projekt KitVes [11] beteiligt. Der Dreh- und Angelpunkt für die Förderung der Windenergie in der Schweiz ist Suisse Eole, die Schweizerische Vereinigung zur Nutzung der Windenergie [12]. Sämtliche Planungsinstrumente, insbesondere ein Map-Server mit allen relevanten Aussagen zu möglichen Windenergiestandorten sind auf der Website von Suisse Eole vorhanden. Hier werden auch für die Praxis wichtige Forschungsergebnisse integriert, wie zum Beispiel die Vereisungskarte.

Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit findet v.a. im Rahmen des IEA Implementing Agreement Wind statt [13]:

Task 11: Base Technology Information Exchange: 2013 fanden zwei Expertentreffen zu den Themen komplexes Gelände und Vorhersage statt. Die Teilnahme steht allen Interessierten aus der Schweiz offen und ist gratis, Reisekosten und Spesen können nicht finanziert werden. http://www.ieawind.org/task_11/task_11_homepage.html

Task 19: Wind Energy in Cold Climate: Seit 2002 beteiligt sich die Schweiz am IEA-Projekt Wind Energy in Cold Climates (WECO). 2013 wurden ein Meeting des IEA Task 19 durchgeführt (Februar 2011: Östersund, Schweden). Wichtige Aktivitäten im Berichtsjahr waren die Erstellung einer Marktstudie für Windenergie im kalten Klima sowie die Integration der Vereisung in die IEC Norm 61400-1 Edition 4 «Design Requirements» basierend auf den Inhalten des Recommended Practices Report vom IEA Task 19. Die Schweiz arbeitet massgebend am Task 19 mit und ist mit René Cattin, Meteotest, im Gremium vertreten <http://arcticwind.vtt.fi/>

Task 28: Social Acceptance of Wind Energy Projects: Der Task 28 wurde 2009 auf Initiative der Schweiz lanciert. Operating Agent ist Robert Horbaty, bis Ende 2013 Programmleiter des Forschungsprogramms Windenergie. 2013 fanden im Mai ein Meeting in Japan statt, welches zu einer «Flash note» zum Thema Monitoring sozialer Akzeptanz geführt hat. Zudem fanden zwei Web-Meetings Anfang April und im September statt. <http://www.socialacceptance.ch/>

Task 31: Wakebench: Mit dem Task 31 sollen best-practice Empfehlungen zur Modellierung der Strömung in Windparks erarbeitet werden. Die Schweiz ist durch Prof. Porte-Agel des Wind Engineering and Renewable Energy Laboratory der EPFL am Task vertreten.

Task 34: Assessing Environmental Effects: Ziel dieses neu geschaffenen Tasks ist der Austausch und die Verbreitung von aktuellen, robusten Erkenntnissen über die Beurteilung und das Monitoring von Auswirkungen von Windenergieanlagen auf die Umwelt. Das Kick-off-Meeting fand Anfang Dezember in Trondheim/Norwegen statt.

Referenzen

[1] Global Wind Energy Council: *Global Wind Statistics*, 5.2.2014

[2] European Wind Energy Association: *Wind in power - 2013 European statistics*, Februar 2014

[3] Deutsche WindGuard: *Status des Windenergieausbaus in Deutschland*, Februar 2014

[4] Schweizerische Vereinigung für Windenergie www.windenergie.ch

[5] Horbaty/Rigassi: *Forschungsprogramm Windenergie - Konzept 2013–2016* http://www.bfe.admin.ch/forschungwindenergie/index.html?lang=de&dossier_id=02869

[6] MIS Trend: *Opinions des Neuchâtelois sur les questions énergétiques*, November 2010. Verfügbar unter: http://www.suisse-eole.ch/fileadmin/PDF/Documentation/EnergiesNE_Etude-MISTrend.pdf

[7] EPFL Lausanne, *Wind Engineering and Renewable Energy Laboratory WIRE*: <http://wire.epfl.ch/page-6109.html>

[8] ETH Zürich, *Laboratory for Energy Conversion*, www.lec.ethz.ch.

[9] ZHAW, *Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften, Winterthur*, Martina Hirayama (martina.hirayama@zhaw.ch), www.zhaw.ch

[10] *Fachhochschule Nordwestschweiz in Windisch, Institut für Aerosol- und Sensortechnik (IAST), EMPA, ETH und EPFL: Swiss-KitePower*, www.swisskitepower.ch

[11] *Haute Ecole Arc Ingénierie in Neuchâtel, Laboratoire de Microstructuration et Optoélectronique LMSO und Laboratoire de Machines – Outils et Fabrication assistée par ordinateur LMO: KitVes*, www.kitves.com

[12] Schweizerische Vereinigung für Windenergie, *Suisse Eole*: www.wind-energie.ch und www.wind-data.ch

[13] Patricia Weis-Taylor: *IEA-Implementing Agreement on Wind Energy Research and Development*, www.ieawind.org

Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(* IEA-Klassifikation)

- 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:	Ndaona Chokani chokani@lec.mavt.ethz.ch	Period:	2011–2014

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.
- FIELD MEASUREMENTS OF WIND TURBINE WAKE** R+D 3.2

Lead:	EPF Lausanne	Funding:	BFE
Contact:	Fernando Porté-Agel fernando.porte-agel@epfl.ch	Period:	2012–2014

Abstract: Field measurements around real wind turbines are essential for an optimal design of windparks, despite their scarcity due to the challenges of measuring the wind in the large volumes. Wind measurements will be performed with 3 LiDARs in order to characterize wind turbine wake flows. Then interaction between wakes will be investigated to optimize power production.
- HIGH POWER, HIGH RELIABILITY OFFSHORE WIND TECHNOLOGY (HIPRWIND)** R+D 3.2

Lead:	ABB Schweiz	Funding:	FP7
Contact:	Aperldoorn Oscar oscar.apeldoorn@ch.abb.com	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.
- 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 war die Implementation und die Inbetriebnahme eines Versuchsaufbaus für Profilmessungen für Windkraftanlagen im Large Subsonic Wind Tunnel Emmen (LWTE-Windkanal) der RUAG Aviation in Emmen. Obwohl die für grosse Windenergieanlagen (>10 MW) erforderlichen Reynoldszahlen erreicht werden konnten, wurde das Projekt abgebrochen, da sich die Messkosten für potenzielle Interessenten als zu hoch erwiesen haben.
- VEREISUNG WEA ST. BRAIS** P+D 3.2

Lead:	Meteotest	Funding:	BFE
Contact:	Cattin René rene.cattin@meteotest.ch	Period:	2009–2014

Abstract: Die Verfügbarkeit der Windenergieanlagen in St. Brais wird 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. Im Rahmen einer Projekterweiterung wird die Wirksamkeit der Blattheizung im laufenden Betrieb der Anlage untersucht.
- SWISSKITEPOWER – NOVEL WIND ENERGY EXTRA** R+D 3.2

Lead:	Fachhochschule Nordwestschweiz	Funding:	BFE
Contact:	Houle Corey corey.houle@fhnw.ch	Period:	2011–2014

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.
- VERIFIZIERUNG DER THEORETISCHEN LEISTUNGSKURVE EINER NEUEN WINDTURBINE** R+D 3.2

Lead:	Agile Wind Power AG	Funding:	BFE
Contact:	Richter Patrick patrick.richter@agilewindpower.com	Period:	2011–2014

Abstract: Ziel dieses Projektes ist es, die effektive Leistung und den Wirkungsgrad eines neuartigen Windkraft-Turbinenkonzepts am einem voll funktionsfähigen Prototyp zu analysieren.

- **AUSWIRKUNGEN VON WKA AUF VOGELWELT** R+D 3.2
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | Vogelwarte Sempach | Funding: | BFE |
| Contact: | Liechti Felix
felix.liechti@vogelwarte.ch | Period: | 2009–2014 |
- Abstract: Vergleichende Studie, Auswirkung WKA auf Vogelwelt (Zugvögel und ansitzende Vögel), Jura, Gotthard, Schwyberg. Aufgrund der Literaturobwohl 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.
- **SOZIALPSYCHOLOGISCHE AKZEPTANZ VON WINDKRAFTPROJEKTEN AN POTENTIELLEN STANDORTEN** R+D 3.2
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | Universität Zürich, Lehrstuhl Sozialpsychologie | Funding: | BFE |
| Contact: | Götz Walter
g.walter@psychologie.uzh.ch | Period: | 2012–2013 |
- Abstract: Das Forschungsprojekt befasst sich mit der lokalen Akzeptanz von Windkraftprojekten in fünf Schweizer Gemeinden. Mittels eines experimentellen Designs wurde der Einfluss von drei Projekt- und Verfahrensparametern auf die lokale Akzeptanz untersucht.
- **WIRKUNGEN VON WINDKRAFTANLAGEN AUF ANWOHNER: EINFLUSSFAKTOREN UND EMPFEHLUNGEN** R+D 3.2
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Psychologie | Funding: | BFE |
| Contact: | Gundula Hübner
gundula.huebner@psych.uni-halle.de | Period: | 2012–2014 |
- Abstract: Ziel des Forschungsprojektes ist es, die von Anwohnern von Windenergieanlagen in der Schweiz wahrgenommenen Auswirkungen zu analysieren. Im Rahmen der Umfragen hat eine deutliche Mehrheit (76%) angegeben, dass die Anlagen keine oder nur geringfügige Auswirkungen auf ihr Wohlbefinden hätten. Umgekehrt fühlen sich 6% der Anwohner stark belästigt. Im Rahmen der weiteren Arbeiten werden die Ergebnisse an den einzelnen Standorten genauer untersucht.
- **VISASIM – VISUELL-AKUSTISCHE SIMULATION ZUR BEWERTUNG DER LANDSCHAFTSVERTRÄGLICHKEIT VON WINDPARKS** R+D 3.2
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | ETH Zurich, IRL – Institut für Raum- und Landschaftsentwicklung | Funding: | SNF |
| Contact: | Ulrike Wissen-Hayek
wissen@nsl.ethz.ch | Period: | 2011–2014 |
- Abstract: Ziel des Projekts VisAsim ist die Entwicklung einer GIS-basierten visuell-akustischen 3D Landschaft, die sowohl eine ästhetische Bewertung des Landschaftsbildes als auch eine akustische Bewertung der neuen Infrastrukturen im jeweiligen Landschaftskontext ermöglicht.
- **NICHTVEREISENDE ANEMOMETER- UNTERSUCHUNG DER WIRKSAMKEIT VON ANTI-EIS-BESCHICHTUNGEN IM FELDVERSUCH** P+D 3.2
- | | | | |
|----------|--|----------|------|
| Lead: | ZHAW Institute of Materials and Process Engineering | Funding: | BFE |
| Contact: | Cornelia Pfaffenroth
cornelia.pfaffenroth@zhaw.ch | Period: | 2013 |
- Abstract: Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden zwei eishaftungsreduzierende Beschichtungen, bei welchen Eis im Labormassstab um über den Faktor 100 schlechter haftet als auf Aluminium, unter realen Bedingungen getestet. Als Modellsystem wurden Anemometer verwendet. Die Ergebnisse zeigten eine deutliche Diskrepanz zwischen den Ergebnissen aus Labor- und Feldversuch, weshalb eine weitere Optimierung der Anti-Eis-Beschichtungen notwendig ist.
- **ENTWICKLUNG EINER METHODIK ZUR ERSTELLUNG EINES WINDKATASTERS MITTELS CFD SIMULATION** R+D 3.2
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | ZHAW Institute of Materials and Process Engineering | Funding: | BFE |
| Contact: | Daniel Oppliger
daniel.oppliger@ntb.ch | Period: | 2013–2015 |
- Abstract: Ziel dieses Projektes ist die Erarbeitung einer Methodik zur Erstellung eines Windkatasters, welcher anschliessend für den Kanton St. Gallen, und Teile des Kantons Graubünden erstellt wird. Dieser Kataster soll künftig als Entscheidungsgrundlage für die Auswahl von sinnvollen Windkraftstandorten dienen.
- **UNTERSUCHUNG ZUR EFFEKTIVITÄT DER FLEDERMAUS- UND VOGELDETEKTION BEI WINDTURBINEN** R+D 3.2
- | | | | |
|----------|--|----------|-----------|
| Lead: | Interwind AG | Funding: | BFE |
| Contact: | Mehmet Hanagasioglu
mehmet@interwind.ch | Period: | 2013–2015 |
- Abstract: Um die Abstellzeiten zu minimieren, ohne die Umweltverträglichkeit zu mindern, wird ein System untersucht, das mittels Kamera und Mikrofonen die Anlage nur im Fall von sich tatsächlich annähernden Vögeln bzw. Fledermäusen ausschaltet. Zusätzlich wird die Effektivität einer akustischen Abschreckung getestet.

- **TEILNAHME AM IEA IMPLEMENTING AGREEMENT R&D WIND ENERGY COMMON FUND** R+D 3.2

Lead: NREL – National Renewable Energy Laboratory	Funding: BFE	
Contact: Maus Katja katja.maus@bfe.admin.ch	Period: 2002–2013	
Abstract: Beitrag zur Teilnahme am IEA Implementing Agreement R&D Wind Energy		
- **TEILNAHME AM IEA IMPLEMENTING AGREEMENT R&D WIND ENERGY TASK 11: "BASE TECHNOLOGY INFORMATION EXCHANGE"** R+D 3.2

Lead: NREL – National Renewable Energy Laboratory	Funding: BFE	
Contact: Maus Katja katja.maus@bfe.admin.ch	Period: 2002–2013	
Abstract: Beitrag zur Teilnahme an den Aktivitäten des IEA Wind Tasks 11: "Base Technology Information Exchange", Erfahrungsaustausch zum Thema Windenergie		
- **PARTIZIPATION AM IEA WIND TASK 19: "COLD CLIMATE"** R+D 3.2

Lead: Meteotest	Funding: BFE	
Contact: René Cattin rene.cattin@meteotest.ch	Period: 2002–2013	
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"** R+D 3.2

Lead: ENCO AG	Funding: BFE	
Contact: Robert Horbaty robert.horbaty@enco-ag.ch	Period: 2008–2013	
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 34 "ASSESSING ENVIRONMENTAL EFFECTS "** R+D 3.2

Lead: NREL – National Renewable Energy Laboratory	Funding: BFE	
Contact: Markus Geissmann markus.geissmann@bfe.admin.ch	Period: 2013	
Abstract: Beitrag zur Teilnahme an den Aktivitäten des IEA Wind Tasks 34: "Assessing Environmental Effects ", Erfahrungsaustausch zur Beurteilung von Umweltwirkungen von Windenergieanlagen		

Barrages

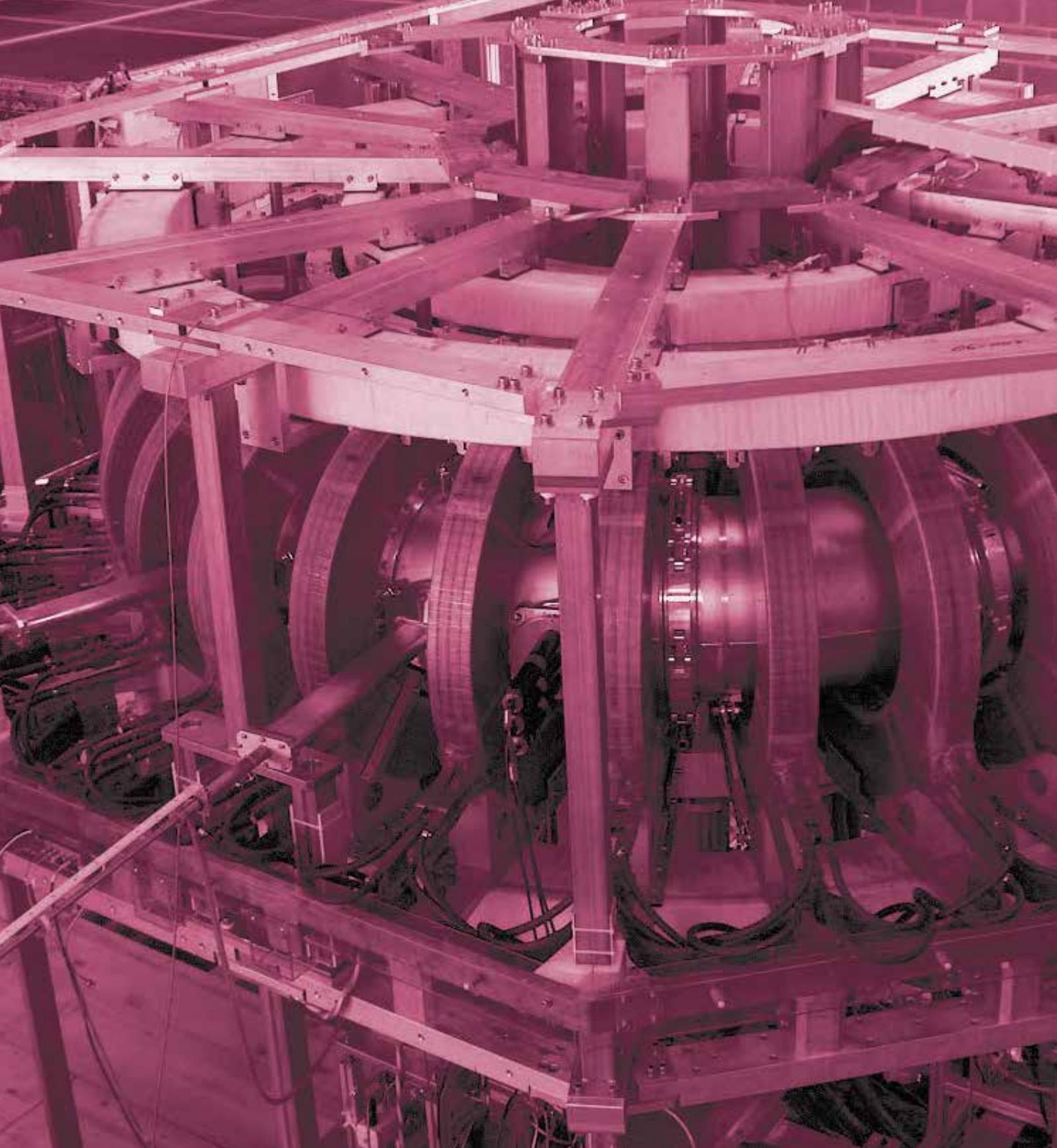


Titelbild:

Barrage de Limmern (canton de Glaris, Suisse)

Dans le projets « Linthal 2015 » une nouvelle centrale de pompage-turbinage souterraine sera construite qui servira à refouler l'eau du Limmernsee vers le Muttssee. Cette nouvelle installation aura une puissance de 1000 MW (source : Luftwaffe).

Weitere Informationen zu Aktivitäten und Forschungsprojekten im Bereich Talsperren finden sich auf der Webseite www.bfe.admin.ch/talsperren.

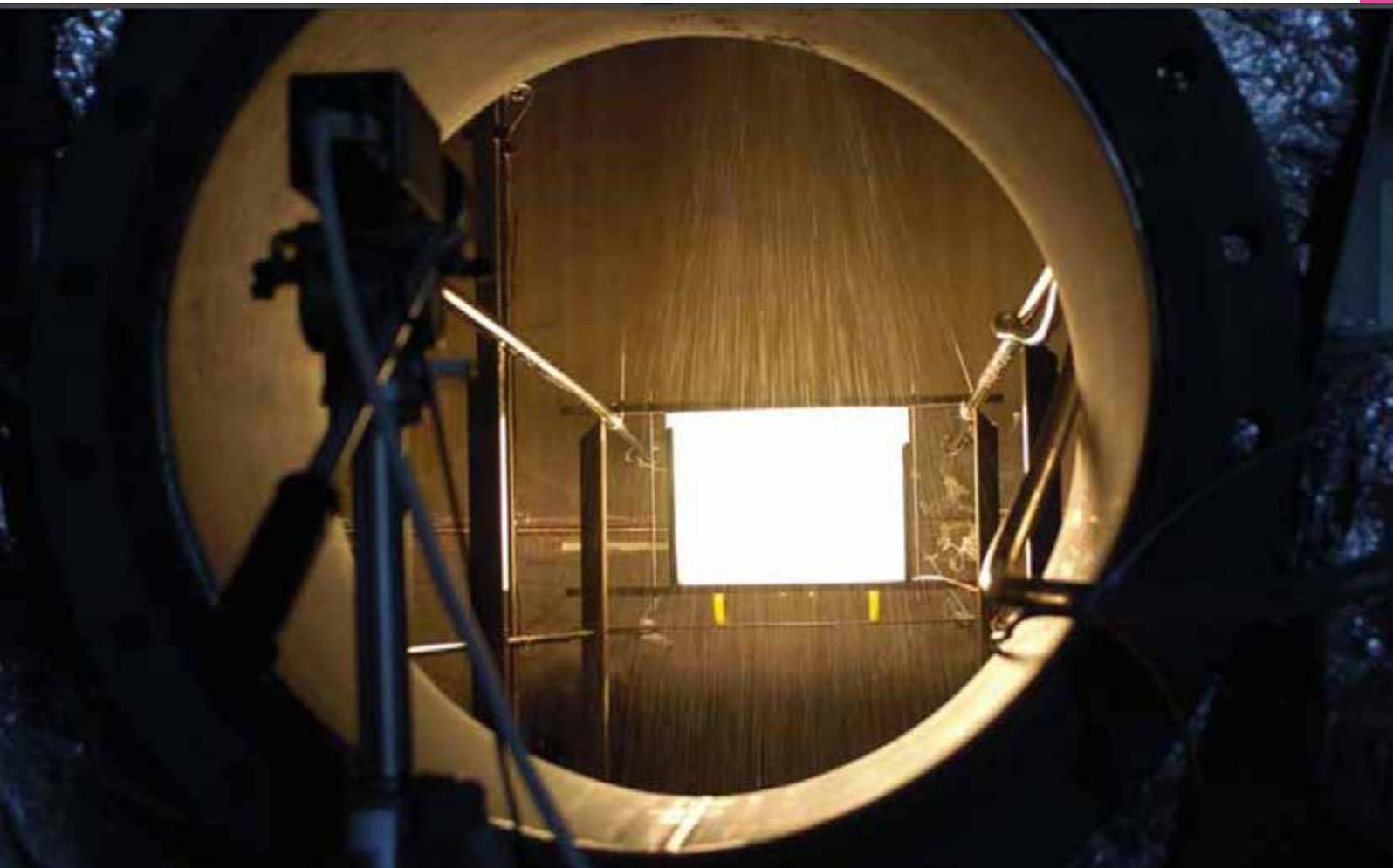


Kernenergie *Énergie Nucléaire*

Bild vorherige Seite:

TORPEX, a toroidal device operated at CRPP-EPFL and dedicated to basic plasma experiments such as studies of plasma turbulence and fast ion physics (EPFL SB CRPP).

Kerntechnik und Nukleare Sicherheit



Titelbild:

Spray droplet characterization experiment at the Nuclear Energy and Safety Research Department (NES), PSI (source: PSI)

Das Forschungsprogramm «Kerntechnik und nukleare Sicherheit» wird nicht direkt vom Bundesamt für Energie (BFE) betreut. Das BFE hat lediglich die Rolle der Auskunftsstelle inne. 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>.

Forschungsprogramm Kerntechnik und Nukleare Sicherheit

Überblicksbericht 2013

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE

CH-3003 Bern

Programmleiter (Autor):

Dr. Martin A. Zimmermann, Dr. Gregory Perret, Dr. Johannes Bertsch, Dr. Bojan Niceno, Dr. Jiri Krepel, Dr. Manuel A. Pouchon

Bereichsleiter BFE:

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

<http://nes.web.psi.ch>

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Introduction

The mission of the Nuclear Energy and Safety research department (NES) at PSI is to maintain nuclear competence and also to follow the international developments in the area of advanced reactor systems. A natural framework for performing this latter task is the participation in international programs, such as GIF and several EU programs.

The largest fraction of the R&D work of NES concerns light water reactors. In this context, in fulfilment of the important

role of Technical Safety Organisation (TSO), a very significant fraction of the NES efforts are devoted to support ENSI and are consequently reported under Regulatory Research.

In the following, selected activities from the non-regulatory research are reported: Experimental reactor physics, investigations on nuclear fuels, experimental and numerical studies of turbulent gas mixing in strong density stratified shear- and non-shear flows and finally a stu-

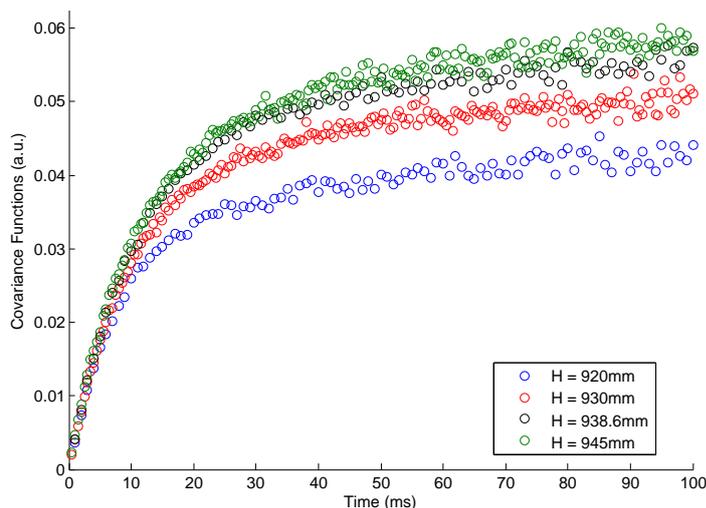
dy on Gen-IV fast-spectrum reactors in uranium and thorium closed fuel cycles. These highlights represent research performed in the Laboratory for Reactor Physics and System Behaviour (LRS), the Laboratory for Thermal-Hydraulics (LTH) and the Laboratory for Nuclear Materials (LNM) and also benefitted from the PSI research infrastructure, viz. the PSI Hotlab and the Swiss Synchrotron Light Source (SLS).

Experimental reactor physics

In the wake of the decision to close the PROTEUS facility, the research activities of the experimental reactor physics group shifted towards re-analysis of past PROTEUS experimental campaigns to foster analytical methods for code validation, and measurements in other facilities to support our industrial partners and promote education.

Analytical methods based on sensitivity and uncertainty quantifications are currently developed in LRS. Among others, they allow us to predict (1) the uncertainties on keff and local parameters (e.g. pin power) due to the uncertainties on nuclear data and technological parameters and (2) how representative a benchmark experiments is of a target

reactor application. The first technique has been applied to the LWR-PROTEUS Phase III programme in which the 3D power distribution of a SVEA-96 Optima2 BWR assembly was measured. As a result, the discrepancy previously observed between the measured pin power and the predictions by CASMO-5 have been partly resolved. The importance of uncertainties on nuclear data and



$$Y(T) = \frac{aD}{(\rho - \beta)^2} f(d) \left(1 - \frac{1 - e^{-aT}}{aT}\right) - 2Rd$$

General model:

$$f(x) = a * (1 - (1 - \exp(-b * x)) / (b * x)) - c$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$\begin{aligned} a &= 0.04472 \quad (0.04419, 0.04524) \\ b &= 0.2035 \quad (0.1945, 0.2126) \\ c &= 0.004885 \quad (0.004394, 0.005376) \end{aligned}$$

Adjusted R-square: 0.9965
RMSE: 0.5628

Figure 1: Example of Feynman-results for several sub-critical levels, i.e. water level (H), and fitting results.

IEA Klassifikation: 4.1 Nuclear Fission

Schweizer Klassifikation: 3.1 Kerntechnik & Nukleare Sicherheit



Figure 2: SLS sample holder with a small strip in the center containing fuel particles

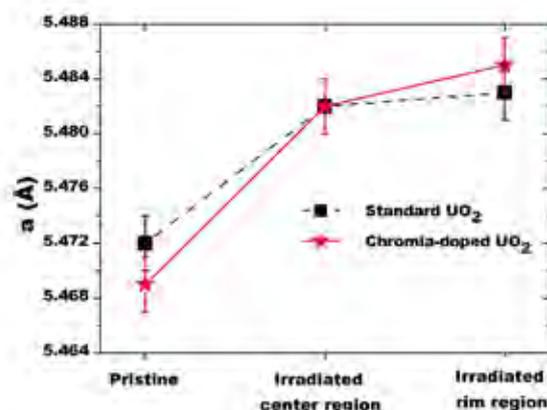


Figure 3: Lattice parameters for irradiated standard and chromia-doped UO₂; increasing burn-up from left to right (solid and dashed lines are to guide the eye).

on position of the assemblies and sub-assemblies has also been quantified and showed to be rather limited for pin power predictions (less than 1% even for the Gadolinium poisoned pins). The second technique has been applied to the same PROTEUS experiments to show how validating core calculations on these experiments are of interest for the real nuclear power plant conditions. To this end, the representative index which accounts for the nuclear data variance-covariance and the sensitivity of the benchmark and application has been computed showing values high enough to consider the PROTEUS experiments as representative of the hot full power conditions of a BWR with void fractions ranging from 0 to 80%.

Experiments have been conducted in the teaching reactor CROCUS of the EPFL to measure the kinetics parameters of the reactor using neutron noise techniques. This project, supported by swissnuclear, allows the validation of generation time and delayed neutron fractions prediction routines recently developed in Monte-Carlo codes and the determination of sub-critical levels. It also fosters education through the development of a practical class for the ETHZ-EPFL nuclear engineering master programme. A measurement station has been developed for this project and tested at PSI and EPFL. As an example, Feynman- α curves measured at several sub-critical

levels in the CROCUS reactor are shown in Fig. 1 together with the fitting of the decay constant $\alpha=(\rho-\beta)/\Lambda$.

Finally, in parallel to these activities, the decommissioning project of the PROTEUS facility has been prepared and submitted to the Swiss Federal Office of Energy (BfE) and the Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate (ENSI). The decommissioning project starts with the post-operation phase, up until 2016, followed by the dismantling of the facility. It will end in about 5 years.

Investigations on Nuclear Fuels

The PSI project Nuclear Fuels of the LNM is engaged in research work on light water reactor fuel, considering the fuel as a complete component which comprises the cladding as well as the oxide fuel pellets.

In the fuel, fission reactions take place leading to the creation of fission products. Gaseous fission products accumulate and form micro-sized bubbles. Eventually, fission gas can lead to swelling of the fuel pellet, to increased inner pressure in the fuel rod and to the detrimental, so-called pellet-cladding interaction. To mitigate these effects fuel vendors optimize their product, trying to amend the fission gas retention in the fuel pel-

let. The strategy is to increase the diffusion path length by creating bigger grain sizes. An effective and economically viable method to reach this goal is to add metal oxides as dopants, e.g. Cr₂O₃.

In this context PSI together with a fuel vendor and swissnuclear have launched a PhD project to analyze the behavior of doped fuel. One aspect of the investigations was the measure the change of the fuel oxide lattice as affected by the doping and the irradiation. Doped and un-doped fuel was received from Areva GmbH, and was then irradiated at the Swiss nuclear power plant of Gösgen (KKG), up to a burn-up of about 40 MW d kg⁻¹.

The method of choice for analyzing lattice changes is X-ray diffraction, using synchrotron radiation at the SLS. Samples were prepared at the PSI Hotlab with a specific grinding method to obtain pulverized microscopic fuel particles on the surface of a cross cut fuel rod section [1, 2]. Particles were collected on an adhesive tape; a couple of those tiny specimens were selected by cutting a small strip of the tape in order to keep the activity below the acceptance limit of the micro-XAS beam line at SLS. The sample preparation method allows determining of the particles' location on the pellet cross section only in a rough manner, e.g. whether they originate from the pellet center or the rim.

Figure 2 presents the sample holder used

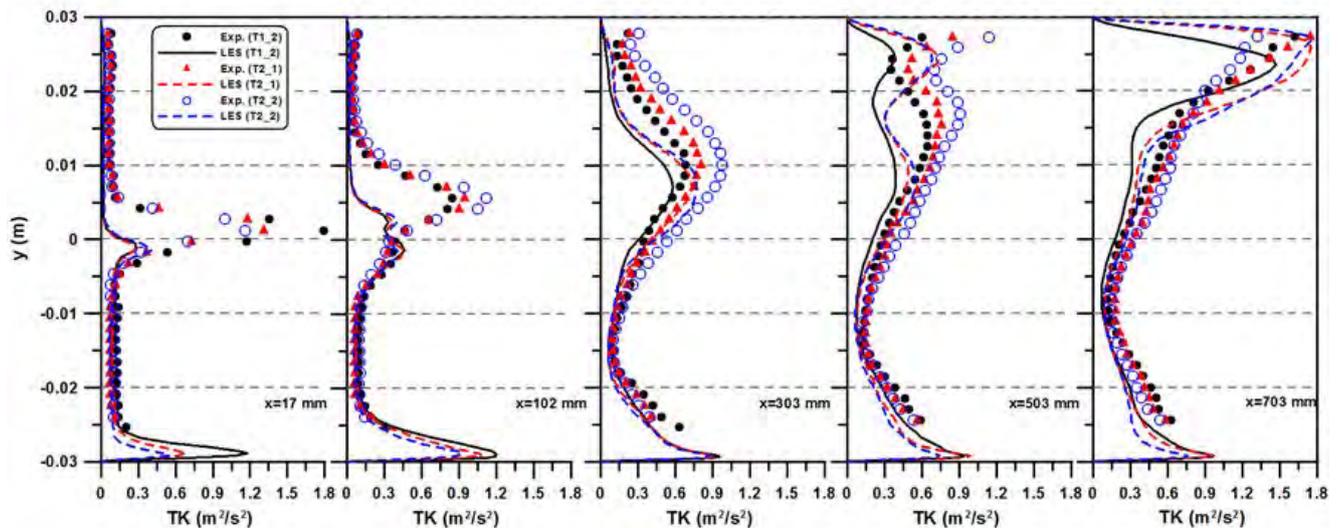
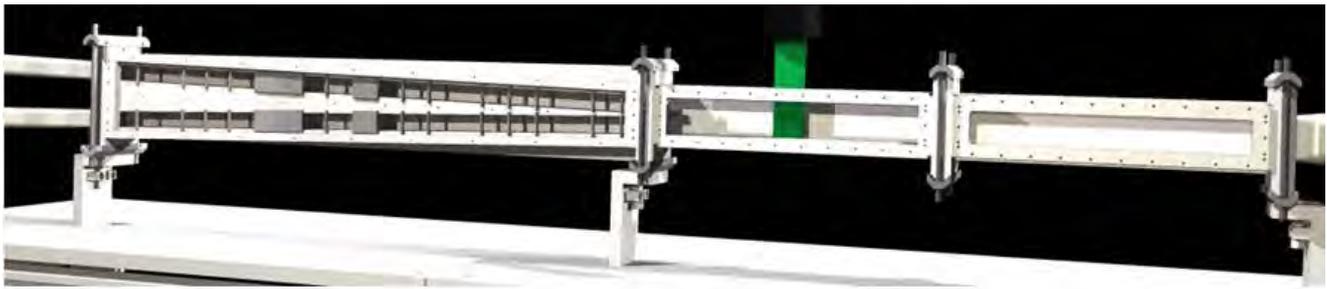


Figure 4: Upper part shows CAD drawing of the HOMER channel. The lower part shows vertical extracted profiles for different downstream positions of turbulent kinetic energy for Helium-Nitrogen mixing experiments compared to numerical results.

at the beam line, containing a small strip with fuel particles. X-ray measurements reveal a shift of the diffraction lines to higher angles for chromia doped fuel (not shown here), implying a lattice

contraction. This lattice contraction can be seen in figure 3 [3]. The value of the chosen lattice parameter increases with increasing burn-up (from pristine to the irradiated rim region); this does not de-

pend whether the fuel is doped or not. While doped fuel apparently works well in reactor operation, there is no noticeable negative effect of the doping on the lattice.

Experimental and numerical studies of Turbulent Gas Mixing in Strong Density Stratified Shear- and Non-Shear Flows

Within the 7th framework program of European Union, a project to investigate thermal hydraulics of innovative nuclear reactor systems (THINS) was launched. The contribution of LTH mainly focused on fundamental understanding about the influence of high density stratification on gas mixing, as it occurs in gas cooled fast reactor systems, where Helium is used as coolant. Due to the tech-

nical relevance in the fields of safety of these reactors, it is of great importance to understand these mixing phenomena. Therefore, an experimental facility was build, consisting of an open gas mixing loop supplying a horizontal channel with a square cross-section, illustrated in the upper part of figure 1. Two gases with density ratios ρ_1/ρ_2 of up to 1/7 interact downstream a horizontal splitter plate,

dividing the inlet section in an upper and a lower leg. For the conducted experiments Reynolds numbers of each leg, range from 3000 to 20'000, where pure Nitrogen, pure Helium and pre-defined mixtures of both were used to create the density difference. In addition, the gas supply loop is able to establish isokinetic ($u_1 = u_2$) or shear layer conditions ($u_1 \neq u_2$). Two dimensional particle

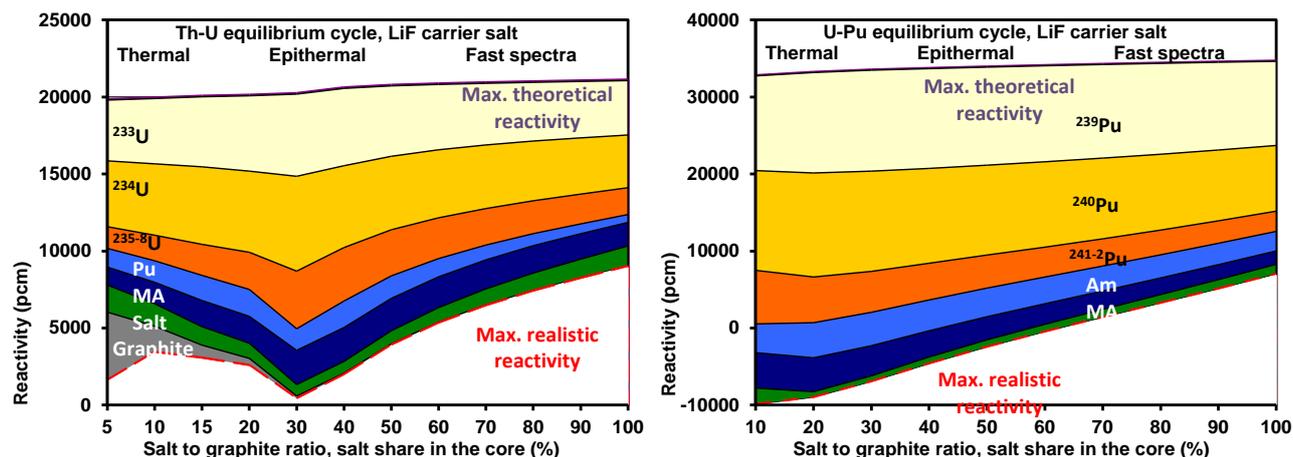


Figure 5: Isotope-wise break-down of reactivity reduction due to parasitic capture in the salt/graphite infinite lattice in equilibrium Th-U (left) and U-Pu (right) cycles for different fuel-to-moderator ratios.

image velocimetry was used to record the flow field in the vertical mid-plane of the measurement section. In addition, computational fluid dynamics analysis (CFD) was performed making use of large eddy simulation methods for model validation and the resulting flow fields were quantitatively compared. Figure 4 shows vertical extracted profiles of turbulent kinetic energy (TK) for three ex-

periments, where Helium and Nitrogen were mixed with different velocity ratios (black: $u_1/u_2 = 1$, red: $u_1/u_2 = 8/7.5$, blue: $u_1/u_2 = 8/7$). Experimental and numerical results are illustrated with symbols and lines, respectively.

The results show an asymmetric development of turbulence intensity further downstream. For all cases the numerical

approach is under predicting the turbulence level. Right after the two streams meet, the discrepancy between experiment and simulation are at maximum, which could be caused by uncertainties in the inlet boundary conditions. More sophisticated experiments are ongoing in conjunction with an international cooperation on solving this flow numerically.

Gen-IV fast-spectrum REACTORS in uranium and thorium closed fuel cycles

The FAST project of LRS is dedicated to the analytical performance and safety evaluation of different types of Generation-IV (Gen-IV) fast reactors. According to the Gen-IV International Forum (GIF) requirements, these reactors should be sustainable, economical, safe, reliable, and proliferation resistant. The majority of the current Gen III and III+ reactors fulfill all GIF requirements except the sustainability, i.e. high efficiency of fuel utilization and minimization of waste. The current thermal-spectrum reactors cannot repetitively recycle their own burned fuel and therefore utilize on average only 5% of the loaded fuel mass. Taking into account the preceding enrichment process, it corresponds to utilization of less than 1% of the natural uranium, while

the remaining 99% is treated as waste. The sustainability goal can be translated into a requirement of fuel cycle closure, or actually repetitive fuel recycling, which may lead to an equilibrium state. The fuel recycling increases utilization of natural resources (up to 90%) and minimizes the waste, but, at the same time, may deteriorate the safety, economics, and proliferation resistance.

Solid-fuel reactors

Recently, the FAST project evaluated the sustainability and safety of Gen-IV Sodium-, Lead- and Gas-cooled Fast Reactors (SFR, LFR and GFR) in U-Pu fuel cycle [4],

concluding that the efficiency of natural uranium utilization in these reactors is high, but safety performance of these reactors may need further investigation and improvement to demonstrate a level as high as the one of current (light-water) reactors. Since thorium represents another potential resource and is more abundant than uranium, the safety and performance parameters of selected Gen-IV reactors were evaluated also for the Th-U cycle in comparison with the U-Pu cycle [5, 6] with the following conclusions:

1. There are less neutrons available in the Th-U cycle compared to the U-Pu cycle; modifications of the core configuration might be needed to enable



Figure 6: Design of the TC measurement setup for high temperatures.

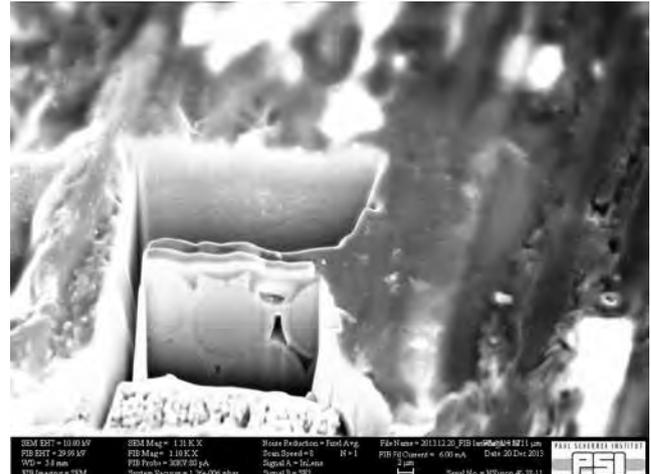


Figure 7: SEM image of a TEM lamella during FIB preparation.

operation in equilibrium Th-U closed cycle. In particular.

- a. Neutrons are better utilized by the fissile fuel in the Th-U cycle. The main fissile isotope ^{233}U of the Th-U cycle has a low probability of parasitic capture of around 10%. The respective ^{239}Pu capture probability in the U-Pu cycle is at least 2.5 times higher.
 - b. Neutrons are better utilized by the fertile material in the U-Pu cycle. More than 10% of fissions happen directly on ^{238}U , compared to only 5% of fissions on ^{232}Th in the Th-U cycle.
 - c. The average number of neutrons produced per fission (2.5 for ^{233}U) in the Th-U cycle is lower than the corresponding number of 2.9 for ^{239}Pu in the U-Pu cycle.
2. The values of the safety parameters are better for the Th-U cycle, partly due to the lower ^{232}Th fission probability.
 3. The Th-U cycle produces less long-lived radioactive minor actinides compared to the U-Pu cycle, but irradiated fuel in the Th-U cycle contains ^{232}U , which has several hard gamma emitters in its decay chain, e.g. ^{208}Tl and ^{212}Bi , increasing therefore the requirements for shielding and consequently to remote handling of the spent fuel.

Generally, the U-Pu cycle appears to be more suitable for the solid fuel fast reactors, since the necessary reprocessing technology is already available. Although thorium can be also used as a sustainable fuel for these reactors, its neutron economy is tight and the fuel reprocessing is more complicated thanks to the presence of hard gamma emitters.

Liquid-fuel reactors

Based on this conclusion, the performance of an additional Gen-IV system, the Molten Salt Reactor (MSR) was also analyzed using the Th-U cycle. MSR has an advantage that the fuel in the form of molten fluoride salts is liquid. Furthermore, some elements like U, Np, and to certain extend also Pu form volatile hexafluorides and can be separated by the volatilization technique, or actually fluorination, which is a robust and tested reprocessing method patented in the US in 1958 [7].

In the past, the MSR was designed as graphite moderated thermal system. Recent European R&D has however focused on the fast spectrum option in order to avoid problems with irradiated graphite and to increase the breeding performance. To compare the advantages of fast and thermal MSRs, a parametric study of the infinite lattice was performed, continuously covering the

spectra from thermal to fast by varying the salt-to-graphite or actually the fuel-to-moderator ratios. The fluoride fuel salt composes of 77.5 molar % of LiF enriched in ^7Li and 22.5 molar % of actinides (in accordance with the EU FP7 EVOL project [8]).

The high neutron efficiency of the Th-U cycle was demonstrated for both the thermal and the fast spectrum MSR. Please note: The fission products have been neglected in this scoping study, causing an overestimation of the thermal spectrum indicators. For illustrative comparison of the neutronic performance of the Th-U and U-Pu equilibrium cycles, the break-down of the theoretically available reactivity was evaluated. Based on a simple neutron balance equation for the infinite multiplication factor k_{inf} , the maximal theoretical reactivity of the infinite lattice was derived. This reactivity was then reduced step by step by the parasitic neutron capture of each isotope in the equilibrium core (see Fig. 5). The resulting value corresponds to the maximal realistic reactivity for the given salt-to-graphite ratio.

According to Fig. 5, the maximal realistic reactivity is achieved in both Th-U and U-Pu cycles for the fast spectrum (100% salt share in the core). However, in the U-Pu cycle the available reactivity only decreases with increasing moderation, whereas in the Th-U cycle there is a secondary local maximum around 15%

salt share in the core, and thus the Th-U cycle can be used in both thermal and fast spectra. The figure also illustrates the different efficiency of the two cycles. The U-Pu cycle produces many neutrons (high theoretical reactivity), but they are parasitically captured by the equilibrium fuel so that the resulting maximal realistic reactivity is lower or comparable to the Th-U cycle. On the other hand, the efficiency of the U-Pu cycle may steeply grow with the spectrum hardening.

Thorium and the related closed Th-U cycle have some appealing features related to enhanced safety and reduced wastes. However, in solid-fuel reactors the issues related to fuel recycling hinder the implementation of the thorium cycle. Thanks to the simplified recycling options in liquid-fuel reactors (e.g. MSR) the Th-U cycle may be better suitable for these very advanced reactor types.

Thermal conductivity study of future silicon carbide based nuclear fuel claddings

In the laboratory for nuclear materials (LNM) a new PhD project focuses on silicon carbide ceramic matrix composites (CMC). This material has promising properties in the field of nuclear claddings and a strong interest has grown

for SiC/SiC claddings in the context of the GFR as well as in that of accident tolerant fuel for LWRs. Silicon carbide features many characteristics which make it an interesting structural material in the nuclear context: it is mechanically stable up to temperatures higher than 1000 °C, does not melt and has good creep properties as well as a very high thermal conductivity (TC). Despite its advantageous properties this material still needs extensive studying before it can be used in nuclear applications: concerns on its behavior in accident cases need solving, manufacturing techniques have to be developed and in addition to this, the degradation of the thermal conductivity after irradiation must be addressed.

In order to gain a better understanding of this degradation, this thesis specifically investigates the role of a key constituent of SiC/SiC composites: the pyrolytic carbon (PyC) layer used to coat the fibers so that they can glide within the matrix. Although this layer is crucial for the mechanical properties of the end product, its role on the thermal conductivity, even more after irradiation, is rather unclear.

The project is made of three main blocks. One of the two experimental parts consists in the microstructural investigation of SiC/SiC nuclear claddings from the industry whereas the other is to measure thermal conductivity on actual cladding tubes. A third, more theoretical part will

provide a model linking the observations made using electron microscopy techniques to the TC measurements. This modeling part will be based on the effective medium theory. More specifically, it will use a cylinder-based model in order to characterize the effective thermal conductivity of the composite material.

An experimental setup allowing one to measure the thermal conductivity via the radial heat flow has been developed and is currently being built. The basic principle is to heat up a cladding tube from the inside and measure the temperature drop across the wall thickness. Although this method is very challenging because of the geometry, it measures the TC in the real geometry, something which cannot be done via the laser flash method.

Electron microscopy is extensively used to study the microstructure of SiC/SiC composites. Both pristine and neutron irradiated SiC/SiC samples are observed. The atomic structure of the graphene sheets of the PyC layer are observed via high-resolution TEM and EELS. In addition to this, a focused ion beam (FIB) is used for sample preparation as well as tomography. The latter will provide macro-structural information such as volume fractions and porosity.

References

- [1] C. Degueldre et al, *J. Nucl. Mater.* 416 (2011) 142
- [2] C. Mieszczynski et al, *Prog. Nucl. Energy* 57 (2012) 130.
- [3] C. Mieszczynski et al, *J. Nucl. Mater.* 444 (2014) 274
- [4] J. Krepel, S. Pelloni, K. Mikityuk. *Comparison of open and closed U–Pu equilibrium fuel cycles for Generation-IV fast reactors with the EQL3D procedure. Nuclear Engineering and Design* 250 (2012) 392–402.
- [5] C. Fiorina, J. Krepel, A. Cammi, F. Franceschini, K. Mikityuk, M. E. Ricotti. *Analysis of thorium and uranium fuel cycles in an iso-breeder lead fast reactor using extended-EQL3D procedure. Annals of Nuclear Energy* 53 (2013) 492–506.
- [6] C. Fiorina, N.E. Stauff, F. Franceschini, M.T. Wenner, A. Stanculescu, T.K. Kim, A. Cammi, M.E. Ricotti, R.N. Hill, T.A. Taiwo, M. Salvatores. *Comparative analysis of thorium and uranium fuel for transuranic recycle in a sodium cooled Fast Reactor. Annals of Nuclear Energy* 62 (2013) 26–39.
- [7] Fluorine process for separation of materials. Patent US 2833617 A. May 6, 1958.
- [8] E. Merle-Lucotte. *Introduction to the Physics of the Molten Salt Fast Reactor. Proceedings of ThEC'13 Conference, Geneva, Oct 28-31, 2013.*

Regulatorische Sicherheitsforschung



Titelbild:

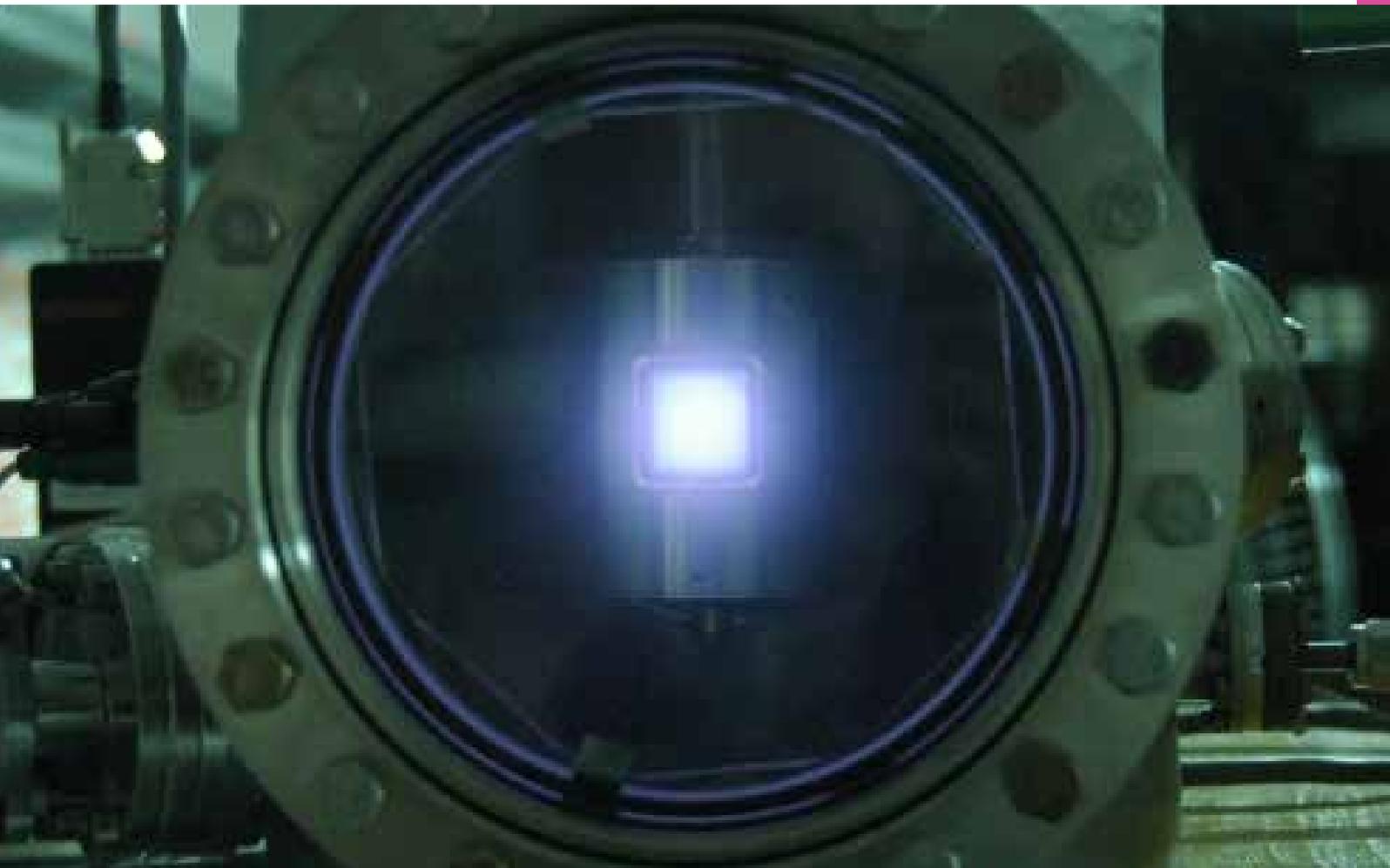
Der Kontrollraum des Halden-Reaktors. Dieser wurde 2012 modernisiert, wozu der Bereich Mensch-Technik-Organisation des HRP wesentliche Beiträge leistete (Quelle: HRP)

Der Forschungsbereich «Regulatorische Sicherheitsforschung» wird vom Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI betreut. Jahresberichte zu allen Projekten des Forschungsprogramms «Regulatorische Sicherheitsforschung» inklusive Publikationen und Details zur nationalen und internationalen Zusammenarbeit finden sich im Erfahrungs- und Forschungsbericht 2012 des ENSI. Er kann unter www.ensi.ch heruntergeladen werden.

Kontakt:

Dr. Reiner Mailänder, Industriestrasse 19, CH-5200 Brugg
(reiner.mailaender@ensi.ch)

Fusion thermonucléaire contrôlée



Page de couverture :

Plasma d'argon pour nettoyer un dépôt sur un miroir par bombardement ionique.

Programme de recherche OFEN Fusion thermonucléaire contrôlée

Rapport de synthèse 2013

Mandant :

Office fédéral de l'énergie OFEN

CH-3003 Berne

Chef de programme (auteurs):

Dr. Laurent Villard (CRPP), Dr. Laurent Marot (Université de Bâle)

Chef de domaine de l'OFEN :

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

<http://crppwww.epfl.ch>

L'auteur de ce rapport porte seul la responsabilité de son contenu et de ses conclusions.

Introduction

Depuis de nombreuses années, la Suisse a été associée aux recherches sur la fusion. En effet, en 1958, la 2ème Conférence internationale sur l'utilisation pacifique de l'énergie atomique s'est tenue à Genève et a donné lieu à la déclassification des recherches en fusion. Trois ans après, en 1961, avec la création du Centre de Recherches en Physique des Plasmas (CRPP) [1], la Suisse s'est jointe au club des nations pionnières dans ce domaine. Dès 1979, un accord de coopération passé avec EURATOM l'associe pleinement au Programme européen de recherches en fusion. La Suisse y apporte des compétences spécifiques et cet accord lui permet de les valoriser au niveau international.

Les avantages et défis de la fusion sont remarquables. Cette technologie devrait

permettre de produire une énorme quantité d'énergie presque sans émission de CO₂. 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 par la réaction devrait pouvoir être entièrement recyclé, et déclaré 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 recherches en 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. Il est à noter que d'immenses progrès ont été effectués: ils ont permis le lancement du projet international ITER, dont la construction est en cours à Cadarache (France). De plus, tous les partenaires d'ITER ont pris l'initiative de préparer l'étape suivante, un réacteur de démonstration capable de produire une quantité appréciable d'électricité. Ce projet appelé DEMO est prévu pour les années 2040-2050 et devrait permettre la réalisation industrielle de l'énergie de fusion.

Les recherches menées au CRPP, basé à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), ainsi qu'à l'Université de Bâle s'inscrivent pleinement dans un cadre à la fois européen et international.

Développements en 2013 au niveau européen

Nouveau programme européen de recherches en fusion (EUROfusion)

Au niveau européen, 2013 était la dernière année du 7ème Programme Cadre de Recherche et de Développement (PCRD), auquel le Programme européen de recherches en fusion est rattaché. Le PCRD suivant, appelé Horizon 2020, a été finalisé et approuvé en 2013, et durera de 2014 à 2020. Par rapport au 7ème PCRD, la partie Fusion de Horizon 2020 présentera des nouveautés. Son plan de travail est exclusivement basé sur le document « EFDA Roadmap to the realisation of fusion energy » [2]. Le but de cette „Roadmap“ traduit celui formulé par EURATOM, à savoir la réalisation d'un réacteur de démonstration DEMO vers les années 2050. Pour cela, la „Roadmap“ inclut dans son plan de travail des études de physique, des activités de R&D pour la technologie nécessaire à DEMO, ainsi qu'un important volet consacré à l'éducation de nouvelles

générations de scientifiques et d'ingénieurs.

Les Unités de Recherche des pays membres d'EURATOM et des pays associés (la Suisse) participeront à l'exécution scientifique de la „Roadmap“ dans le cadre du consortium EUROfusion. L'année 2013 a été consacrée à la préparation d'EUROfusion, avec des discussions approfondies entre toutes les Unités de Recherche concernées sur la structure de ce consortium et de ses statuts. A la fin de 2013, un Memorandum of Understanding établissant EUROfusion a été proposé pour signature. En parallèle, l'implémentation du plan de travail pour l'année 2014 a été également finalisée. A l'issue d'un processus compétitif sur le plan européen, les Unités de Recherche membres d'EUROfusion se sont vues attribuer des tâches et projets scientifiques et promettre un financement pour les mener à bien. Il est prévu qu'un contrat de cofinancement soit signé entre EURA-

TOM et le EUROfusion dans la seconde moitié de 2014, finalisant ainsi le processus de transformation du Programme européen de recherches en fusion.

Participation européenne à la construction d'ITER

Participer à la construction d'ITER constitue l'autre axe fort des activités européennes dans le domaine de la fusion. Cette participation demeure sous la responsabilité de l'entreprise européenne commune Fusion for Energy (F4E). Suite au départ en retraite du Directeur Général F. Briscoe en 2012, le Governing Board de F4E a élu pour le remplacer le danois H. Bindslev, qui a pris ses fonctions en 2013. La planification d'ITER reste une préoccupation majeure de tous les partenaires du projet, et un nouveau plan « réaliste » pour la production du premier plasma est en préparation.

Classification de l'AIE : 4.2 Nuclear Fusion

Classification Suisse : 3.2 Fusion

Développements en 2013 au niveau extra-européen

Tout comme EURATOM, plusieurs autres partenaires d'ITER (comme la Chine, la Corée ou l'Inde) visent également la réalisation de DEMO vers 2050. Ceci montre qu'un consensus international existe sur l'industrialisation de la fusion dans la deuxième moitié du XXIème siècle, et une confirmation en a même été donnée

en octobre 2013 lors de la XXème World Energy Conference en Corée. Les participants à la séance de discussion « Fusion : Betting on a different future » y ont en effet conclu que la réalisation de DEMO pour 2050 est un objectif réalisable.

Par ailleurs, les groupes de recherches suisses sont actifs dans certains des 8 Implementing Agreements (IA) pour la fusion mis en place par l'Agence internationale de l'énergie (IEA). La Suisse participe à ces IA par l'entremise de son association avec EURATOM.

Développements en 2013 entre la Suisse et EURATOM

En 2013, le Parlement Suisse a approuvé à une large majorité de financer la participation de la Suisse au programme Horizon 2020 complet, donc y compris à ses parties consacrées à la fusion nucléaire.

Tout au long de 2013, des représentants suisses ont pris une part active à la préparation d'EUROfusion tant sur les

plans administratif scientifique. L'EPFL a signé le Memorandum of Understanding établissant EUROfusion et y représente l'ensemble des chercheurs suisses actifs dans le domaine de la fusion. Des projets du CRPP et de l'Université de Bâle ont été sélectionnés pour le programme scientifique de l'année 2014. De plus,

trois membres du CRPP ont été choisis comme chefs de projets d'Eurofusion. La Suisse devrait donc jouer un rôle important dans le cadre du Programme européen de recherches en fusion sous Horizon 2020.

Highlights Recherche et Développement

CRPP

En 2013, le CRPP a participé 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 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 hyperfréquences ; au PSI, les activités sont consacrées à la supra-conductivité. De plus, le CRPP participe aux expériences sur le Joint European Torus (JET), qui reste à ce jour la plus grande expérience de fusion magné-

tique au monde en opération. Toutes ces activités de recherche ont abouti en 2013 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 [3].

L'excellence scientifique se manifeste aussi dans la formation : le CRPP a une trentaine de doctorants dont plusieurs ont obtenu en 2013 leur titre de doctorat. Enfin, en 2013, le CRPP a maintenu ses tâches d'enseignement de base et ses nombreuses activités de relations publiques visant à expliquer la physique des plasmas et la fusion contrôlée à des non-spécialistes.

Travaux sur le tokamak TCV

La machine TCV (Tokamak à configuration variable) sur lequel travaille le groupe du même nom 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.

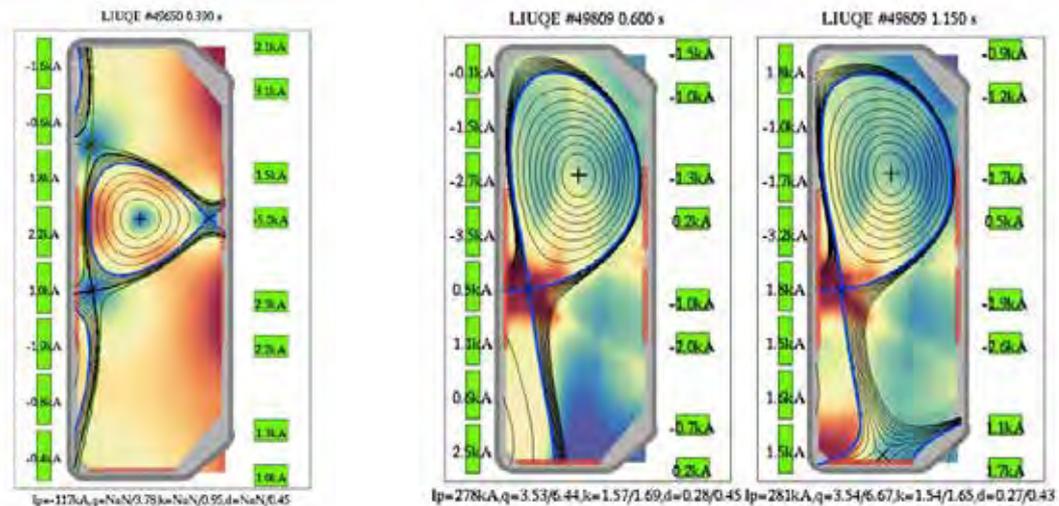


Fig.1: Configurations exotiques du plasma dans le tokamak TCV. A gauche, le triple-X. Au milieu, une configuration X standard évoluant à droite vers le super-X.

Le tokamak TCV a été exploité de façon très intensive en 2013, en prévision d'un arrêt prévu en 2014. Ce « shut-down » permettra une modification importante de la chambre à vide en vue de l'installation d'un nouveau système par injection de faisceaux de neutres de 1 MW pour chauffer les ions du plasma. Les travaux préparatoires pour la modification de la chambre à vide de TCV ont été achevés, et des contrats industriels ont pu être signés. Cette deuxième phase de l'augmentation de chauffage de TCV démarra début 2014, pour une mise en service prévue en 2015. En attendant, une moisson impressionnante de résultats scientifiques a pu être récoltée en 2013.

- Un nouveau régime de confinement amélioré, appelé « IN-mode », a été découvert sur TCV. Il est caractérisé par des profils très raides de la densité près du bord du plasma, alors que les gradients de température restent plus modestes, ce qui permet d'éviter certaines instabilités et les phénomènes transitoires délétères associés, tout en obtenant un bien meilleur confinement. Ce régime a le potentiel de conduire à une plus haute efficacité pour l'opération d'un réacteur de fusion. Une campagne de mesures a été entreprise pour analyser en détail la région près du bord (les 10% extérieurs de la colonne de plasma). Une

des découvertes majeures est que les profils, dans cette région, ne sont pas aussi « rigides » que ceux plus à l'intérieur du plasma. La « rigidité » des profils résulte du fait que le transport turbulent augmente très rapidement au-delà d'un certain gradient dit « critique » : une augmentation même très importante de la puissance ne résulte alors qu'en une augmentation modeste de la température. Le fait que cette rigidité soit absente, ou pour le moins réduite, dans les régions périphériques, permet d'expliquer l'amélioration du confinement dans certains régimes d'opération.

- Plusieurs études ont porté sur la détermination du seuil de puissance nécessaire pour atteindre le mode de confinement amélioré prévu comme scénario principal pour ITER, dit « H-mode ». Dans ITER, la première phase de l'opération sera effectuée dans de l'hydrogène, puis de l'hélium (afin d'éviter l'activation), avant de passer au deutérium. Les mesures effectuées sur TCV ont montré que le seuil de puissance est 15-20% plus élevé pour l'hydrogène et l'hélium que pour le deutérium. Ce seuil est en outre fortement dépendant de la longueur de la séparatrice extérieure.

- Les régimes d'opération avancés du tokamak ont continué à être étudiés. Les barrières de transport électroniques (caractérisées par des gradients localement très élevés de la température électronique) ont été revisitées en bénéficiant de mesures de haute qualité des propriétés ioniques : aucune barrière n'apparaît sur les ions. Une documentation complète du comportement du champ électrique radial pendant la formation des barrières de transport a été recueillie.
- Un régime d'opération très intéressant pour un réacteur a été revisité : celui pour lequel le courant dans le plasma est entièrement généré par l'effet dit de « bootstrap », qui est un mécanisme couplant les gradients de température et de densité avec le courant plasma dans la direction toroïdale. L'opération d'un tokamak nécessite la présence d'un courant, et la méthode traditionnelle, dite « ohmique », basée sur le phénomène d'induction électromagnétique, résulte en un temps limité de l'opération lorsque le transformateur est complètement déchargé. Avec 100% de courant généré par l'effet bootstrap, l'opération d'un tokamak peut devenir vraiment continue. Plus de 100% de courant bootstrap a même pu être obtenu sur TCV en rechar-

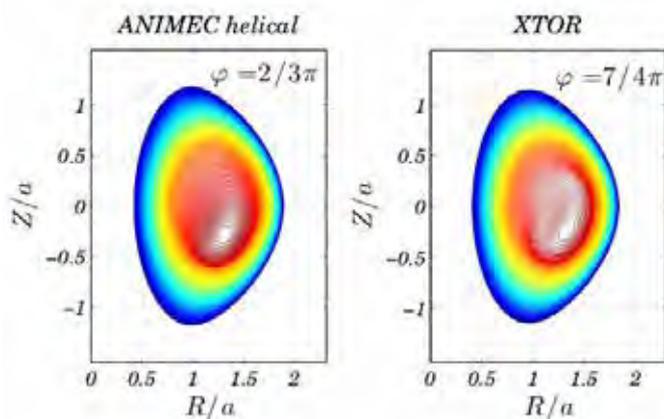


Fig. 2 : Vues en coupe du tokamak MAST présentant une déformation hélicoïdale du cœur. À gauche, le résultat d'un calcul numérique d'un état d'équilibre 3D ; à droite, le résultat d'une simulation dynamique non linéaire. Cette déformation a pour conséquence de modifier la déposition d'énergie des faisceaux de neutres rapides.

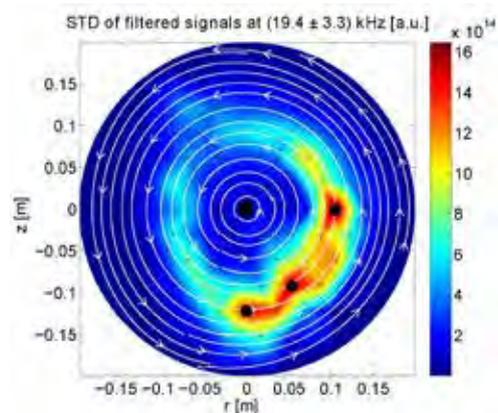


Fig. 3 : Dans une configuration Torpex avec conducteur toroidal (point noir au centre), des surfaces magnétiques sont créées (lignes blanches) et les fluctuations de densité (contours de couleur) sont observées par des sondes.

geant le transformateur ohmique, ce qui montre définitivement la robustesse de cet effet.

- L'amélioration du confinement en fonction de la forme triangulaire de la section du plasma, un phénomène mis en évidence sur TCV, a reçu toute l'attention des chercheurs. Une campagne intensive a été conduite dans le but de documenter les propriétés de la turbulence et des instabilités associées, grâce à une combinaison unique de plusieurs diagnostics : imagerie à contraste de phase, corrélation de l'émission cyclotronique électronique et rétrodiffusion Doppler. Une forte réduction de l'amplitude de la turbulence a été détectée dans les décharges à triangularité négative, jusque bien à l'intérieur du plasma, là où paradoxalement la forme des surfaces magnétiques n'est pratiquement pas triangulaire. Ceci pose un défi à la théorie.
- L'étude à plusieurs diagnostics de phénomènes liés à la turbulence, en particulier des oscillations dites géodésiques-acoustiques (GAM) s'est poursuivie. En changeant le courant plasma dans une même décharge, une transition entre la présence d'un mode global, de fréquence bien définie, et celle d'un continu de fréquences a pu être observée pour la première fois.

- Grâce à son système de chauffage électronique de 4.5MW, l'équipe TCV est également pleinement engagée dans l'étude fondamentale de l'interaction onde-particule et en particulier de la dynamique des électrons rapides. Avec un nouveau diagnostic de rayons X durs, les premières images tomographiques d'un tokamak non circulaire ont été obtenues. Les asymétries prédites par la théorie ont été confirmées expérimentalement.
- La physique du bord du plasma est aussi un domaine d'activité important pour l'équipe TCV, tant pour les configurations conventionnelles que pour les formes de plasmas plus sophistiquées. Dans un réacteur de fusion tel que DEMO, il sera impératif qu'une large fraction de la puissance soit dissipée par rayonnement, afin d'éviter une trop forte charge de la paroi. Dans cette perspective, des impuretés de Néon ont été injectées pour augmenter la fraction de puissance rayonnée. En comparant une forme de plasma dite « snowflake », développée sur TCV, avec une forme plus conventionnelle, il a été montré que le snowflake rayonne 15% de plus : ceci est dû à son plus grand volume rayonnant.
- La flexibilité de la forme de TCV a été exploitée pour valider une récente

prédiction théorique de la rotation du plasma au bord du plasma. Cette théorie prédit notamment l'inversion de la direction de rotation lorsque le point-X du diverteur est déplacé vers l'extérieur. Les résultats expérimentaux confirment cette prédiction.

- Des formes de plasma encore plus exotiques ont été tentées avec succès à la fin de la campagne 2013 : le triple-X (3 points X régulièrement espacés le long de la frontière du plasma) et le super-X (caractérisé par la présence d'un deuxième point X sur une des jambes du diverteur), voir Fig. 1. Ceci forme une base pour l'exploration future des propriétés potentiellement favorables de ces nouvelles formes.
- Le contrôle en temps réel prend de plus en plus d'importance. Cet aspect imprègne pratiquement tous les thèmes scientifiques de l'équipe TCV. Au cœur de ces développements, les chercheurs ont démontré la capacité de calculer très rapidement (à une échelle de temps inférieure à la milliseconde) un équilibre reconstruit à partir des mesures du plasma, afin de l'inclure dans la boucle de contre-réaction en temps réel. Cette fonctionnalité nouvelle a été utilisée entre autres pour contrôler certaines instabilités en injectant de la puissance RF

à des endroits bien précis du plasma. La démonstration d'un prototype de contrôleur de forme généralisé a aussi pu être effectuée avec succès.

Théorie et simulation numérique

Le groupe de Théorie et simulation numérique se focalise sur une approche de la compréhension des machines de fusion basée sur les principes premiers de la physique. Ceci est essentiel pour interpréter les résultats des expériences existantes et prédire ceux des machines de fusion futures. Comprendre et simuler le comportement du plasma représente un défi considérable, nécessitant à la fois des théories analytiques avancées et des codes de calcul numérique à la pointe du progrès. Ces codes, développés au CRPP et dans le cadre de collaborations internationales, sont utilisés en production sur certaines des plateformes de calcul à haute performance (HPC) parmi les plus performantes au monde et en Suisse : Helios (IFERC-CSC, au Japon, financé dans le cadre de l'accord « Broader Approach », et dont l'accès est réservé aux participants aux Programmes de recherches en fusion européen et japonais), ainsi que Rosa (CSCS) et Lemanicus (Cadmos) en Suisse. Des dizaines de millions d'heures de calcul ont été allouées à des projets dirigés par des membres du CRPP. L'expertise du groupe en matière de HPC a continué d'être sollicitée, en particulier par la participation active d'un de ses membres au projet « High Level Support Team » du Programme européen de recherches en fusion.

Les activités du groupe de théorie et simulation numérique portent sur les domaines de recherche suivants. (1) La simulation de la turbulence dans le cœur des tokamaks ; (2) L'analyse des instabilités fluides (MHD) dans les tokamaks et d'autres configurations tridimensionnelles, ainsi que leur interaction avec les particules rapides ; (3) L'investigation de la dynamique des plasmas au bord des réacteurs de fusion.

Le groupe maintient des liens très étroits avec le groupe TCV, avec une activité im-

portante dans la modélisation et l'interprétation des résultats expérimentaux. Les investigations de la turbulence dans la machine TORPEX constituent également un atout important pour le groupe.

- Il a été montré que la turbulence dans le tokamak TCV, causée par des instabilités produites par les électrons piégés, génère des oscillations, appelées modes géodésiques acoustiques. La mesure de ces oscillations avec divers diagnostics a été comparée avec succès à des simulations numériques globales. Cette étude a permis de confirmer la validité des modèles théoriques.
- Les premières simulations globales de la turbulence dans des tokamaks ayant la forme d'ITER ont été accomplies en utilisant le modèle des électrons piégés. Une première étude a montré que les effets globaux dus à la taille finie du plasma sont d'une importance comparable à ceux obtenus avec un modèle plus simple supposant une réponse adiabatique des électrons. De plus, par comparaison avec des simulations dans des plasmas ayant les mêmes paramètres sauf la forme circulaire du plasma, l'effet bénéfique de la forme du plasma d'ITER, qui se manifeste par une réduction substantielle du transport de chaleur dû à la turbulence, a pu être mis en évidence.
- La dynamique des ions et des électrons dans un plasma est très différente. C'est le cas en particulier au voisinage de certaines surfaces bien particulières du plasma, appelées « surfaces rationnelles ». Une recherche systématique de la dynamique de la turbulence et de l'effet des surfaces rationnelles a été menée, en comparant entre eux les résultats de différents modèles pour la dynamique des électrons. Il a été montré que les électrons passants créent des structures formant des barrières de transport aux voisinages des surfaces rationnelles.
- Le transport turbulent de chaleur dans les tokamaks est généralement caractérisé par une augmentation très rapide au-delà d'un certain gradient de température critique, résultant en

des profils rigides : une augmentation de la puissance ne résulte qu'en un changement de gradient très modeste. Cependant, il a été montré que les profils sont rigides au cœur du plasma, mais beaucoup moins en périphérie, et que de plus cette rigidité dépend de la forme triangulaire du plasma, résultant en un confinement amélioré pour des triangularités négatives.

- Les tokamaks ont été conçus pour avoir un axe de symétrie. Cependant, il a été montré que même avec un bord axisymétrique, le cœur du plasma pouvait se déformer en hélice. Deux approches théoriques différentes ont été appliquées à la description de ces phénomènes : d'une part, en considérant que le plasma atteint un état d'équilibre hélicoïdal et d'autre part en considérant que cet état résulte d'une évolution non linéaire saturée d'une instabilité à partir d'une configuration symétrique. Pour la première fois, ces deux approches ont pu être comparées en détail (Fig. 2). Cette brisure spontanée de symétrie a des conséquences sur le transport des ions rapides : ceux-ci sont en effet partiellement expulsés du cœur du plasma. Le groupe a pu calculer cet effet et le comparer avec succès avec l'expérience conduite sur le tokamak MAST (UK).
- L'étude de la dynamique dans les régions périphériques du plasma (« Scrape-Off Layer », SOL) a également progressé. Des comparaisons systématiques des caractéristiques de la turbulence entre les simulations numériques non linéaires 3D et les mesures expérimentales sur plusieurs tokamaks (TCV, JET, C-MOD, Compass et Tore Supra) ont été menées, avec un bon accord sur une grande plage de paramètres.
- Il y a de plus en plus de preuves expérimentales que les écoulements du plasma dans le SOL jouent un rôle crucial en déterminant la rotation du cœur du plasma. Grâce à des simulations 3D de la turbulence, le groupe a mis en évidence les mécanismes qui conduisent à l'apparition de cette rotation.

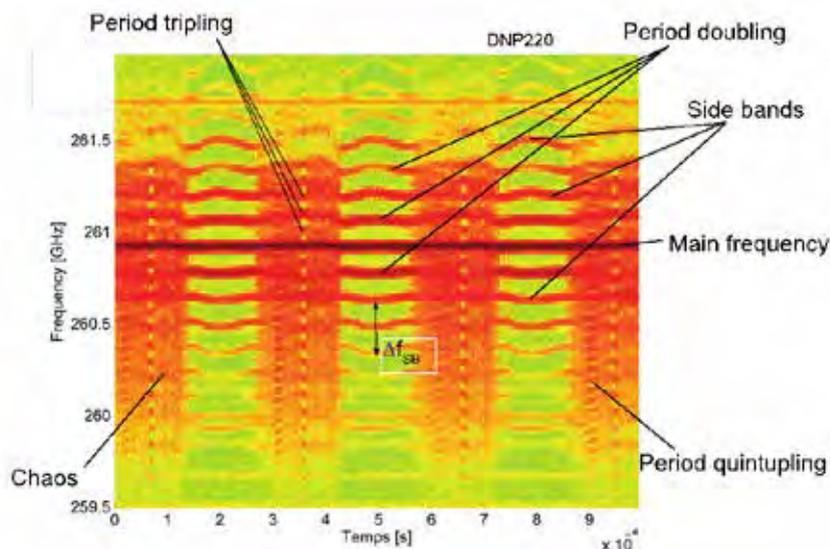


Fig. 4 : Spectrogramme mesuré expérimentalement des fréquences d'un gyrotron au voisinage de 261 GHz, mettant en évidence l'apparition de phénomènes de doublement de la période menant à des phases chaotiques.

- Les effets de la pression finie sur la turbulence dans le SOL ont été investigués. Lorsque celle-ci augmente, la turbulence acquiert des structures globales de grande longueur d'onde, ce qui conduit à un transport de plus en plus important.

Travaux sur TORPEX

Le programme de recherches conduit par le groupe TORPEX sur la machine du même nom est motivé 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.

- Afin d'imiter ce qui se passe dans le bord d'un tokamak, avec une région où les lignes de champ sont confinées et une région où celles-ci touchent la paroi, un conducteur toroidal a été ajouté à la configuration de base de Torpex., Ceci permet de créer des lignes de champ magnétique avec torsion et ainsi de former une région

avec des surfaces magnétiques fermées (Fig. 3).

- L'année 2013 a été consacrée à la caractérisation de cette configuration avec surfaces magnétiques fermées. Le plasma obtenu a une densité, une température et un potentiel électrostatique comparables au cas sans conducteur toroidal. La forme du plasma, toutefois, change pour pratiquement s'aligner avec les surfaces magnétiques. Les fluctuations de densité dans de tels plasmas ont montré une structure dite « ballonnée », c'est-à-dire dont l'amplitude est maximale dans les régions où la courbure du champ magnétique est défavorable. Des oscillations quasi-cohérentes ont également été identifiées.
- L'autre sujet principal d'investigation a été l'étude de l'interaction des ions rapides avec la turbulence. Dans un réacteur, des ions rapides sont générés par le processus de fusion, mais aussi par l'injection de faisceaux de neutres ou encore d'ondes RF. Dans Torpex, c'est une source miniature d'ions de Lithium qui est utilisée. Le transport des ions rapides a été mesuré et comparé avec des simulations numériques qui incluent un diagnostic synthétique.

Technologie de chauffage

Le groupe Gyrotron poursuit ses activités dans le développement de sources RF millimétriques, essentielles pour le bon fonctionnement d'un réacteur de fusion. Le groupe est impliqué dans plusieurs programmes de recherche: le chauffage EC (electron cyclotron) de TCV, le système EC d'ITER et celui du stellarateur W7X. Un effort significatif a porté sur l'extension des capacités de la simulation numérique des sources RF de haute puissance et de haute fréquence.

- Un nouveau développement de codes numériques a été accompli, permettant de calculer de l'interaction entre le faisceau d'électrons et les ondes RF. L'évolution dynamique du champ RF est ainsi obtenue. Ces codes ne bénéficient pas seulement à l'effort de R&D pour la fusion, mais aussi au développement de concepts avancés pour la spectroscopie à résonance magnétique nucléaire, ainsi que pour les recherches fondamentales sur les systèmes dynamiques fortement non-linéaires d'ondes et de particules en interaction.
- Ces nouveaux codes ont permis au groupe de prédire, puis de démontrer expérimentalement l'existence d'un régime intermittent, avec des pulsations de l'ordre de la nanoseconde. Des phénomènes dynamiques très riches ont été mis en évidence, avec notamment, pour la première fois, l'observation d'une transition vers un régime chaotique par un phénomène dit de « cascade avec doublement de la période » (Fig.4).

Dans le cadre du système EC d'ITER, deux projets sont en cours en collaboration avec des laboratoires européens. Le premier porte sur le développement des gyrotrons à 170 GHz délivrant 1MW que F4E devra livrer à ITER, et pour lequel le CRPP est le coordinateur. Le second concerne le développement de l'antenne qui servira à lancer les ondes EC dans ITER (Fig. 5), pour lequel le CRPP est chargé du design de l'optique pour la propagation du faisceau.

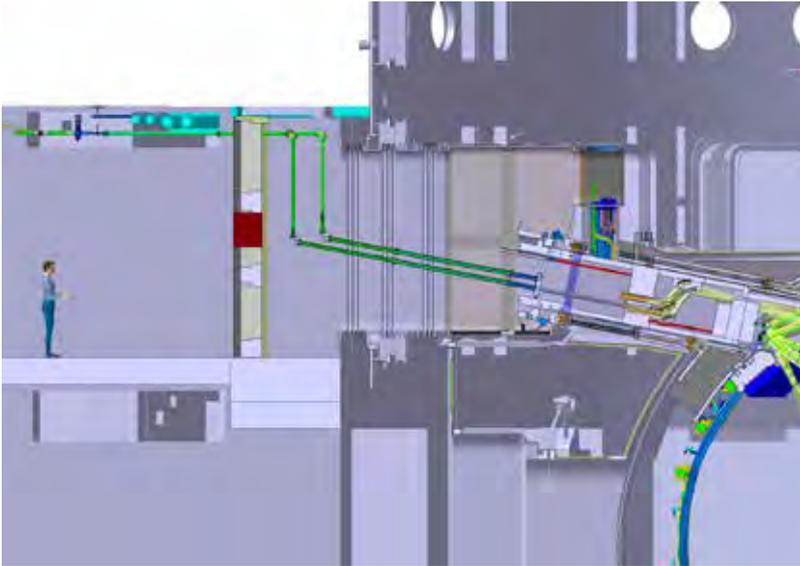


Fig. 5 : Vue en coupe du lanceur d'ondes EC dans ITER.

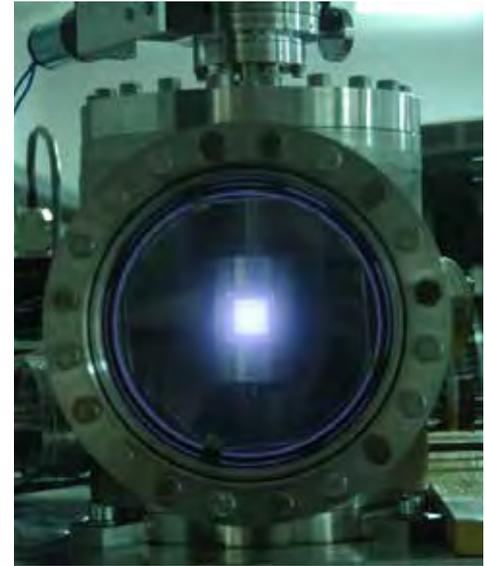


Fig. 6 : Plasma d'argon pour nettoyer un dépôt sur un miroir par bombardement ionique.

Supraconductivité

Le groupe Supraconductivité, localisé au PSI, a poursuivi ses activités dans le test et la qualification des conducteurs pour ITER sur l'installation Sultan, conformément au contrat signé en 2012 avec l'ITER Organisation (IO). Ces tests concernent les câbles pour les bobines de champ toroïdal, poloïdal, pour le solénoïde central et les bobines de correction.

En parallèle à ces activités, la mise en service de l'installation EDIPO a été poursuivie, avec des tests du champ magnétique et du transformateur qui seront terminés en 2014.

Le troisième volet des activités du groupe est le développement des conducteurs et des bobines pour le réacteur DEMO dans le cadre de l'IA "Power Plant Physics and Technology" de l'IEA.

Activités internationales sur les tokamaks

Les CRPP a conduit plusieurs activités sur le tokamak JET (UK), qui est à ce jour le plus grand au monde en opération.

- Des expériences ont été menées, sous la conduite du CRPP, qui ont montré pour la première fois la pertinence de l'application d'ondes RF aux fréquences cyclotroniques ioniques (ICRH) pour contrôler les oscillations répétitives en « dents-de-scie » qui apparaissent spontanément lors de l'opération. Ces dents-de-scie, lorsqu'elles sont de trop forte amplitude, peuvent déclencher d'autres instabilités du plasma et ainsi conduire à une dégradation de la qualité du confinement. Il est d'autant plus important de pouvoir les contrôler dans un réacteur que la présence des ions rapides générés par le processus de fusion a pour effet de créer des dents-de-scie géantes. Les résultats de 2013 montrent spécifiquement qu'un scénario compatible avec les paramètres d'ITER, soit une injection ICRH avec résonance du côté à bas champ, est efficace pour réduire l'amplitude des dents-de-scie.
- La mesure de la composition isotopique (mélange deutérium-tritium) est nécessaire dans un réacteur de fusion, afin de pouvoir optimiser sa performance. L'idée est de mesurer les fréquences propres de certaines oscil-

lations du plasma, appelées « modes d'Alfvén toriques », et de pouvoir en inférer sa composition isotopique à différentes positions. Des expériences menées par le CRPP sur JET ont montré la pertinence de cette approche. Les résultats indiquent que cette méthode devrait être applicable aux futurs réacteurs (ITER, DEMO).

Université de Bâle: Etudes concernant l'interaction plasma - paroi dans ITER (PWIS)

Dans le cadre de l'étude de l'interaction plasma - paroi dans ITER, un point a été spécialement étudié à l'aide du tokamak JET. Il s'agit de l'étude de nettoyage de miroirs utilisés pour réfléchir la lumière du plasma vers les instruments de diagnostic d'ITER [4]. Ce nettoyage peut être réalisé en appliquant un plasma radio fréquence directement sur le miroir. Une nouvelle enceinte à vide a été réalisée et est en cours de test à JET. L'idée est d'enlever un dépôt de béryllium (élément de la première paroi d'ITER) déposé sur des miroirs. Le béryllium étant toxique ces expériences doivent être menées dans un environnement contrôlé tel que JET propose.

References

[1] Website CRPP: crpp.epfl.ch/

[2] EFDA roadmap to the realisation of fusion energy: <http://www.efda.org/wpcms/wp-content/uploads/2013/01/JG12.356-web.pdf>

[3] Rapports annuels du CRPP: <http://crpp.epfl.ch/page-48260-fr.html>

[4] L. Marot, E. Meyer, Universität Basel : Studies related to plasma-wall interaction in ITER (RA/IB): <http://nanolino.unibas.ch/pages/research/fusion.htm>

Radioaktive Abfälle



Titelbild:

Infoveranstaltung zur regionalen Partizipation

Teilnehmende einer Infoveranstaltung im partizipativen Verfahren der Standortsuche für ein geologisches Tiefenlager (Quelle: BFE)

BFE Forschungsprogramm Radioaktive Abfälle

Überblicksbericht 2013

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE

CH-3003 Bern

Programmleiterin BFE (Autorin):

Simone Brander, Bundesamt für Energie (simone.brandner@bfe.admin.ch)

Bereichsleiterin BFE:

Simone Brander (simone.brandner@bfe.admin.ch)

www.radioaktiveabfaelle.ch

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

Einleitung

Das Forschungsprogramm *Radioaktive Abfälle* koordiniert die regulatorischen Forschungstätigkeiten des Bundes und 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) [1], der Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA) [2] sowie einer Fachhochschule in den Jahren 2006/07 erarbeitet und mit der Arbeitsgruppe des Bundes für die nukleare Entsorgung (Agneb) konsolidiert.

Im Rahmen des Forschungsprogramms werden neben technisch-naturwissenschaftlichen Projekten auch solche aus geistes- und sozialwissenschaftlichen Bereichen durchgeführt. Letztere werden vom BFE betreut, das ENSI ist für die regulatorische Sicherheitsforschung

zuständig. Sowohl das BFE als auch das ENSI initiieren Projekte in ihrem Bereich, vergeben Aufträge und stellen die Finanzierung sicher. Die Agneb begleitet und koordiniert die Umsetzung und Aktualisierung des Forschungsprogramms. Die einzelnen Forschungsprojekte werden wissenschaftlich begleitet, wobei in den jeweiligen Begleitgruppen je nach Projekt die entsprechenden Bundesstellen sowie Hochschulen und weitere Expertinnen und Experten vertreten sind. Im Jahr 2013 bildeten die Themen *Abfallbewirtschaftung im Vergleich, Lagerauslegung, Pilotlager: Auslegung und Inventar, Monitoringkonzept und -einrichtungen* (ENSI) sowie *Preservation of Records, Knowledge and Memory (RK&M) across Generations, Umweltpolitische Fragen* und die Begleitforschung zum *Aufbau der regionalen Partizipation* (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 2013–2016 die folgenden Schwerpunkte:

- *Langzeitaspekte*: Wissenserhalt und Markierungskonzepte;
- *Sachplanverfahren geologische Tiefenlager*: Regionale Partizipation;
- *Lagerkonzepte*: Abfallbewirtschaftung im Vergleich, Schutz der Umwelt, Pilotlager, Monitoringkonzept und -einrichtungen, Verschlussmassnahmen in Krisensituationen, materialwissenschaftliche Fragen, Lagerauslegung, Teil 1+2;
- *Ethik/Recht*: Umweltpolitische Fragen, Schutzziele.

Rückblick und Bewertung 2013

Im Berichtsjahr konnten seitens BFE zwei Projekte abgeschlossen werden. Die Berichte zur Studie *Gesellschaftliche Veränderung und Entsorgung radioaktiver Abfälle* und zur Begleitforschung zum *Aufbau der regionalen Partizipation* wurden fertiggestellt, letzterer wird jedoch erst anfangs 2014 publiziert. Zudem wurde im April 2013 das Projekt *Umweltpolitische Fragen* gestartet, welches

Entscheidungsgrundlagen für BFE und ENSI liefern soll. Seitens ENSI wurden die bisherigen Projekte *Abfallbewirtschaftung im Vergleich* sowie die Projekte zu den Themen *Monitoring, Pilotlager und Lagerauslegung* weitergeführt, wobei im Projekt *Lagerauslegung* der Teil zu den schwach- und mittelradioaktiven Abfällen (SMA) abgeschlossen werden konnte.

Ausblick

Im Jahr 2014 wird basierend auf dem Ergebnisbericht zum Aufbau der regionalen Partizipation eine Begleitstudie zur *regionalen Partizipation (Schritt 2)* vom BFE lanciert, welche die Partizipation ab der Gründung der Regionalkonferenzen beleuchtet. Diese Studie beinhaltet zudem das Teilprojekt *Frauen und Jugendliche & technische Langzeitprojekte am Beispiel der Entsorgung radioaktiver Abfälle*, worin untersucht wird, wie Frauen und Jugendliche mit technischen Themen umgehen und wie diese Gruppen vermehrt in Partizipationsprozesse einbezogen werden können..

Für das Projekt *Abfallbewirtschaftung im Vergleich* sind zur Frage der Anwendbarkeit der technischen Verordnung über

Abfälle (TVA) bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle zusätzliche Abklärungen vorgesehen. Die Veröffentlichung des endgültigen Projektberichts ist in der ersten Jahreshälfte 2014 in Verbindung mit einem Symposium zum Thema «Abfallbewirtschaftung» vorgesehen.

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 Kernenergie-Agentur (NEA), einem spezialisierten Organ der Organisation für europäische und wirtschaftliche Zusammenarbeit (OECD). Ziel dieses Projekts ist es, bis 2014 ein gemeinsames Dokument zu erarbeiten, welches verschiedene Themenbereiche abdecken soll, damit – basierend auf den selben internationalen Standards – jedes Land einen passenden Aktionsplan zusammenstellen kann.

Im Jahr 2013 wurde ein Wiki-Pilot entwickelt, um die Ergebnisse der Projekts festzuhalten und zugänglich zu machen. Dieser wurde getestet und soll im Frühling 2014 veröffentlicht werden. Auch wurde beschlossen, im Herbst 2014 in Verdun (F) eine internationale Konferenz zu organisieren, um die Projektergebnisse vorzustellen und zu diskutieren.

Begleitstudie zum Aufbau der regionalen Partizipation

Um die Interessen und Bedürfnisse der Bevölkerung hinsichtlich der Standortwahl von geologischen Tiefenlagern in der Schweiz zu berücksichtigen, wurden in allen sechs potenziellen Standortregionen Partizipationsgremien (Regionalkonferenzen) gegründet, welche aus Vertreterinnen und Vertretern der betroffenen Gemeinden, Organisationen sowie weiteren Einwohnerinnen und Einwohnern bestehen. Im Rahmen der regionalen Partizipation haben sie die Möglichkeit, ihre Region zu vertreten und Anliegen in die Planung einzubringen. Der Prozess der Bildung dieser Gremien zwischen 2009 und 2011 wurde von einer Begleitforschung beleuchtet.

Dazu wurde eine ausführliche Dokumentenanalyse durchgeführt und qualitative Interviews mit den am Aufbau der Partizipation Beteiligten geführt. Neben der Dokumentation des Aufbauprozesses soll dadurch ein Teil des Wissens und der Erfahrungen der involvierten Akteurinnen und Akteure aufbereitet und in den weiteren Verlauf der Partizipation aufgenommen werden. Dazu wurden die wichtigsten Erkenntnisse in Form von «Lessons Learned» zusammengefasst und Empfehlungen abgegeben.

In der Kommunikation wurden verschiedene Punkte angesprochen, welche verbessert werden könnten. So ist von Anfang an das Ziel der Partizipation klar und einfach verständlich zu vermitteln. Zudem sollten während des Prozesses die Rollen und Aufgaben der Beteiligten genau definiert werden. Der Weg, wie diese Ziele zu erreichen sind, soll jedoch bewusst für die Regionen offen gelassen werden. Empfehlenswert ist ebenfalls der Austausch von Erfahrungen zwischen den Regionen. Hinsichtlich der Zusammensetzung der Konferenzen zeigt sich, dass diese die verschiedenen Interessen ausreichend vertreten. Bezüglich soziodemographischer Faktoren ist die Zusammensetzung der Gremien hingegen nicht ausgewogen. So fehlen insbesondere junge Teilnehmende und Frauen. Das Bewusstsein der Beteiligten, dass auch soziodemographische Faktoren beim Aufbau der Partizipation zu berücksichtigen sind, ist deshalb von grosser Wichtigkeit.

Abfallbewirtschaftung im Vergleich

Das ENSI hat das Projekt gemeinsam mit dem Bundesamt für Umwelt (BAFU), dem Bundesamt für Gesundheit (BAG) sowie unter Berücksichtigung von fachlichen Beiträgen der Kommission für nukleare Sicherheit (KNS) bearbeitet. Bei Bedarf wurden Vertreterinnen und Vertreter der Nuklearindustrie (Abfallproduzierende, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle – Nagra) als Expertinnen respektive Experten einbezogen.

Das Projekt beinhaltet eine Bestandsaufnahme zur aktuellen Bewirtschaftung der radioaktiven und nicht-radioaktiven

Abfälle sowie strategische und technisch-wissenschaftliche Überlegungen zur Bewirtschaftung der radioaktiven Abfälle, insbesondere zur Abfallminimierung, zum Umgang mit organikahaltigen radioaktiven Abfällen und zur Verbringung metallischer Werkstoffe in geologische Tiefenlager.

Mit dem Projekt wird ein Vergleich der Regelungen im Umweltschutzgesetz und in der Gesetzgebung zur Bewirtschaftung radioaktiver Abfälle angestrebt. Die Projektergebnisse liefern gemäss aktuellem Stand von Wissenschaft und Technik gezielte Optimierungsmöglichkeiten für die Behandlung spezifischer Abfallströme aus kerntechnischen Anwendungen. Die wichtigsten Punkte dazu sind:

Organische Abfälle

Bezüglich organischer Abfälle sind die Ionenaustauscherharze (IAH) aus dem Betrieb der bestehenden Kernkraftwerke im Hinblick auf die zentralen Fragestellungen des Projekts massgebend. Sie tragen nach Aufsättigung des verschlossenen Tiefenlagers für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) durch mikrobiellen Abbau zur Produktion von Gasen bei, erhöhen durch komplexierende Abbauprodukte die Mobilität der Radionuklide und führen zu einer beschleunigten Degradation der Zementbarrieren im Nahfeld. Als Massnahme zur Reduktion der IAH-Mengen stehen ein optimaler Reaktorbetrieb (d.h. dichter Brennstoff) und der Einsatz von adäquaten (korrosionsresistenten) Werkstoffen im Vordergrund. IAH liessen sich in einem Pyrolyseprozess mineralisieren.

Metallische Abfälle

Bei den metallischen schwach- und mittelaktiven Abfällen (SMA) handelt es sich vorwiegend um Stilllegungsabfälle aus Eisen oder Stahl aus Kernkraftwerken und Grossforschungsanlagen. Trennen, dekontaminieren, freimessen und wieder verwenden erweisen sich als erfolgversprechende und prüfungswerte Massnahmen zur Reduktion der Abfallmengen, die durch die Abfallverursachenden bereits weitgehend umgesetzt wurden. Optimierungspotenzial besteht gegebenenfalls durch das Einschmelzen aktivierter und kontaminierter Metalle

oder durch eine verlängerte Abklinglagerung über die gesetzlich erlaubten 30 Jahre hinaus. Durch eine solche Abklinglagerung ist nicht zu erwarten, dass sich die Entsorgungssituation für Kernkraftwerkabfälle aus dem Betrieb und der Stilllegung signifikant ändert. In Anbetracht der sich ankündigenden neuen IAEA [3]-Freimessgrenzen, die zu einer beträchtlichen Zunahme des Abfallvolumens bei deren Einführung führen, kann aber eine konsequente 30-jährige Abklinglagerung diese Zunahme des Abfallvolumens in erheblichem Masse kompensieren. Für radioaktive Abfälle aus Grossforschungsanlagen, welche einen grossen Teil von metallischen Komponenten beinhalten, würde eine Verlängerung der Abklingzeit zu einer Reduktion der einzulagernden Abfälle führen.

Hochaktive Abfälle

Bei den hochaktiven Abfällen (HAA – verbrauchte Brennelemente und verglaste Spaltproduktlösungen aus der Wiederaufarbeitung) stammt 98 % der produzierten Gesamtgasmenge von den Lagerbehältern aus Stahl. Als Massnahme zur Reduktion der produzierten Gasmenge im HAA-Lager steht die Verwendung alternativer Behältermaterialien wie zum Beispiel eine Kupferummantelung oder keramische Werkstoffe im Vordergrund.

In Übereinstimmung mit den Projektergebnissen hält der Bundesrat in seinen Auflagen für das Entsorgungsprogramm 2016 unter anderem fest, dass die Entsorgungspflichtigen im Hinblick auf einen zusätzlichen Gewinn für die Sicherheit des geologischen Tiefenlagers angemessene Optimierungsmaßnahmen nach aktueller Erfahrung und dem Stand von Wissenschaft und Technik aufzuzeigen und zu prüfen haben [4].

Forschungsprojekte zu den Themen Monitoring, Pilotlager und Lagerauslegung

Das Projekt «*Lagerauslegung*» beschäftigt sich mit der Auslegung der verschiedenen Lagerteile und deren Beziehung zueinander sowie mit der Erschliessung und bautechnischen Auslegung der untertägigen Anlagen. Der für die Projek-

arbeit erstellte umfangreiche Fragebogen zu auslegungsrelevanten Themen bei SMA- und HAA-Lagern wurde 2013 weiter bearbeitet, der SMA-Fragenteil wurde abgeschlossen. Die Fragen wurden jeweils seitens der im Projekt beigezogenen Experten zunächst individuell beantwortet; die Antworten wurden dann anlässlich der Sitzungen fachlich diskutiert und vom ENSI zusammengefasst.

Thema projektinterner Diskussionen war auch die Frage, inwiefern sich verschiedene Lagerteile gegenseitig beeinflussen können. Es wurden Aspekte der Gebirgsmechanik, der Temperatur, der Hydrogeologie, der Chemie und der Gasentwicklung betrachtet und festgestellt, dass die meisten Einflüsse örtlich begrenzt bleiben, folglich nur eine beschränkte räumliche Trennung der Lagerteile vorgenommen werden muss.

Das Projekt «*Pilotlager: Auslegung und Inventar*» untersucht die notwendigen Anforderungen an das Pilotlager, an dessen Platzierung, Bestückung und die wichtigsten zu überwachenden Parameter.

Im Berichtsjahr wurden Erfahrungen aus den Aufsichtskommissionen für die Tiefbohrungen in der Schweiz erläutert. Über drei Jahrzehnte hat die HSK (ENSI-Vorgängerorganisation) als eine von mehreren relevanten Behörden auf Gemeinde-, Kantons- und Bundesebene die Sondierbohrungen der Nagra begleitet. Ziel der Aufsichtskommission war es, die Aufsichtsarbeiten zu koordinieren und den gegenseitigen Informationsfluss sicherzustellen. Die kantonalen und kommunalen Vertreterinnen und Vertreter wurden oft von Expertinnen und Experten oder Vertreterinnen und Vertretern der lokalen Opposition begleitet. Eine wesentliche Erkenntnis aus den damaligen Erfahrungen ist die hohe Bedeutung der Öffentlichkeitsarbeit für das Gelingen strittiger Projekte. Die Information der Bevölkerung sollte auch seitens Behörde, nicht nur seitens Betreiberinnen und Betreiber erfolgen.

Zudem wurde im Berichtsjahr ein Vergleich nationaler und internationaler Regelungen für das Monitoring durchgeführt. Die IAEA SSR-5 [5] definieren die Anforderung, dass ein Monitoring

vor und während Bau und Betrieb eines geologischen Tiefenlagers durchgeführt werden soll.

Das Monitoringprogramm dient dazu, die Funktionsfähigkeit der hintereinander gestaffelten Barrieren des Tiefenlagers während der Bau-, Betriebs- und Verschlussphase hinsichtlich Betriebs- und Langzeitsicherheit zu beurteilen. Die Verantwortung der Aufsichtsbehörde liegt in der Definition der Anforderungen an das Programm, an der Überprüfung von dessen Implementierung sowie in der regelmässigen Kontrolle des Programms und seiner Ergebnisse.

Das Projekt «*Auslegung und Inventar des Pilotlagers*» wird voraussichtlich noch bis Ende 2014 fortgesetzt. Die bisherigen Ergebnisse werden in einem Bericht festgehalten.

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 und Entscheidungsgrundlagen hinsichtlich der Überwachung liefern. Die Aktivitäten des Projekts waren auch 2013 eng an die Aktivitäten und Resultate des internationalen EU-Forschungsprogramms MoDeRn (Monitoring Developments for Safe Repository Operation and Staged Closure) geknüpft. Der Schwerpunkt der Projektarbeiten des ENSI konzentrierte sich deshalb wie im Vorjahr auf die Sichtung der umfangreichen Ergebnisse aus dem MoDeRn-Forschungsprogramm. Im März 2013 fand dazu eine internationale Konferenz in Luxembourg statt, an welcher die Schlussresultate des vierjährigen MoDeRn-Projektes präsentiert wurden. Eine Vielzahl der technischen Berichte wurde 2013 fertiggestellt. Die Veröffentlichung des Schlussberichtes wird Anfang 2014 erfolgen. Von zentraler Bedeutung für das ENSI sind die Statusberichte zu den heute verfügbaren Messtechniken, neue Monitoring-Entwicklungen wie seismische Tomographie und WIFI-Datenübertragungen sowie

weiterer Klärungsbedarf im Rahmen neuer Forschungsarbeiten.

Gesellschaftliche Veränderung und Entsorgung radioaktiver Abfälle

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts wurden am 26. März 2013 mit einer Medienmitteilung [6] veröffentlicht. Die Studie wurde von der B,S,S. Volkswirtschaftliche Beratung AG in Basel in Zusammenarbeit mit Basler & Hofmann, Dr. Andreas M. Walker Strategieberatung und der EMPA für das Forschungsprogramm Radioaktive Abfälle im Rahmen des Schwerpunkts «Ethik und Recht» erarbeitet.

Auf Basis einer umfangreichen Literaturanalyse wurden vier Bilder von unterschiedlichen Zukünften in 100 Jahren definiert: Bilder 1 und 2 zeigen einen Zustand mit einem Tiefenlager. In Bild 1 ist dieses bereits verschlossen, in Bild 2 ist es offen, beziehungsweise es befindet sich in der Beobachtungsphase. In den Bildern

3 und 4 gibt es kein Tiefenlager, in Bild 3 aus politischen Gründen, in Bild 4, weil andere technische Lösungen gefunden wurden.

Anschliessend wurden mögliche Auswirkungen gesellschaftlicher Veränderungen auf jedes dieser Bilder untersucht und mit Expertinnen und Experten diskutiert. Beurteilt wurden insgesamt 15 Risiken und Chancen möglicher gesellschaftlichen Entwicklungen. In den Bildern ohne Tiefenlager besteht die Chance, künftig von heute noch unbekanntem, wissenschaftlich-technischen Erkenntnissen zur Lagerung von radioaktiven Abfällen zu profitieren. Gleichzeitig beinhalten die Bilder ohne Tiefenlager aber auch ausgeprägte Risiken, so zum Beispiel im Falle eines Bürgerkriegs, eines terroristischen Anschlages oder bei Verlust von Fachwissen.

Bei den Beurteilungen handelt es sich um qualitative Betrachtungen. Eine Quantifizierung der Chancen und Risiken ist aufgrund der hohen Unsicherheit solcher Zukunftsbetrachtungen nicht möglich.

Hingegen können ethische und gesetzgeberische Fragestellungen aufgezeigt werden.

Umweltpolitische Fragen

Das im April 2013 gestartete Forschungsprojekt soll Entscheidungsgrundlagen für das BFE und das ENSI liefern. Es soll aufzeigen, wo Konsistenz mit aktuellen umweltpolitischen Grundsätzen (u. a. Vorsorgeprinzip, Nachhaltigkeit, intergenerationelle Ethik und Gerechtigkeit) besteht, wo es allenfalls Handlungsbedarf gibt und welche Entwicklungen sich für die kommenden Jahre abzeichnen.

Das Projekt beruht im Wesentlichen auf einer Literaturrecherche, den Erfahrungen des Projektteams sowie Experteninterviews. Im Schlussbericht werden die Auslegeordnung und daraus abgeleitete Empfehlungen zuhanden von BFE und ENSI dokumentiert werden. Die Veröffentlichung des Forschungsberichts ist für Frühling 2014 geplant.

Nationale Zusammenarbeit

Im Auftrag der Agneb (Arbeitsgruppe des Bundes für die nukleare Entsorgung) führt das BFE das Forschungssekretariat des Forschungsprogramms Radioaktive Abfälle. Das Forschungssekretariat stellt im Hinblick auf die Umsetzung der geplanten Forschungsprojekte die Koordination mit dem ENSI und den anderen Bundesstellen sicher. Die Umsetzungsgruppe des Forschungsprogramms setzt sich aus Vertretungen von BAFU, BFE, ENSI, KNS, PSI und Swisstopo

zusammen. Das Forschungsprogramm Radioaktive Abfälle 2013–2016 wurde von der Agneb im Juni 2013 verabschiedet und die Organisation der Arbeit zwischen der Umsetzungsgruppe des Forschungsprogramms und der Agneb festgelegt. Zudem wurde im Juni 2013 ein «Newsletter Tiefenlager» dem Thema Forschung gewidmet und verschiedene Projekte vorgestellt.

Internationale Zusammenarbeit

OECD/NEA – Forum on Stakeholder Confidence (FSC)

Vom 17. bis 19. September 2013 fand in Paris (F) das 14. jährliche Treffen statt. Zum ersten Mal nahmen Vertretende aus Südkorea und Russland teil. Die Schwerpunkte waren der Informationsaustausch über die Tätigkeiten des RWMC (Radioactive Waste Management Committee der Internationalen Atomenergie-Organisation), Berichte aus den Mitgliedsländern, das Thema Transparenz sowie die Aktualisierung und Diskussion der fünf FSC-Arbeitsprogramme.

Internationale Zusammenarbeit: ENSI

Die Mitarbeit in nationalen Kommissionen im Ausland sowie internationalen Arbeitsgruppen bietet dem ENSI Ge-

legenheit, 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.

Referenzen

[1] Per Ende 2011 aufgelöst. Die Nachfolgeorganisation (Expertengruppe Geologische Tiefenlagerung EGT) existiert seit 2012.

[2] Per 1. Januar 2008 aufgelöst.

[3] International Atomic Energy Agency (Internationale Atomenergie-Organisation)

[4] SBR (2013): Verfügung zum Entsorgungsprogramm 2008 der Entsorgungspflichtigen sowie zum Bericht zum Umgang mit den Empfehlungen in den Gutachten und Stellungnahmen zum Entsorgungsnachweis vom Oktober 2008, Schweizerischer Bundesrat, Bern, 28. August 2013.

[5] Specific Safety Requirements. Sicherheitsstandards zum Schutz von Mensch und Umwelt der Internationalen Atomenergie-Organisation IAEA bezüglich der Entsorgung radioaktiver

Abfälle.

[6] <http://www.news.admin.ch/message/index.html?lang=de&msg-id=48278>

Publikationen

BFE (2013): Gesellschaftliche Veränderung und Entsorgung radioaktiver Abfälle, Forschungsbericht, B,S,S. Volkswirtschaftliche Beratung in Kooperation mit Basler & Hofmann, Dr. Andreas M. Walker Strategieberatung und EMPA, Basel, 22. März 2013.

BFE (2014): Aufbau der regionalen Partizipation im Sachplanverfahren zur Standortsuche von geologischen Tiefenlagern. Umsetzung und Erfahrungen. Bern, 29. 1. 2014.

Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(* IEA-Klassifikation)

- ABFALLBEWIRTSCHAFTUNG IM VERGLEICH**

Lead:	ENSI	Funding:	ENSI
Contact:	Markus Hugi markus.hugi@ensi.ch	Period:	2008–2014

Abstract: Das Projekt beinhaltet strategische und technisch-wissenschaftliche Überlegungen zur aktuellen Bewirtschaftung der radioaktiven und nicht-radioaktiven Abfälle, insbesondere zur Abfallminimierung, dem Umgang mit organikahaltigen radioaktiven Abfällen und der Verbringung von metallischen Werkstoffen in geologische Tiefenlager. Wo relevante Regelungen und Prinzipien des Umweltschutzgesetzes ungenügend berücksichtigt werden, wird ein Handlungsbedarf aufgezeigt.

R+D 7.2*
- WISSENERHALT UND MARKIERUNGSKONZEPTE**

Lead:	OECD	Funding:	BFE
Contact:	Simone Brander simone.brander@bfe.admin.ch	Period:	2010–2014

Abstract: Um die Markierungsfrage auf internationaler Ebene koordiniert anzugehen, beteiligt sich die Schweiz an einem Projekt der Nuklearen Energie-Agentur (NEA) der Organisation für europäische und wirtschaftliche Zusammenarbeit (OECD). Ziel dieses Projekts ist es, bis ins Jahr 2014 ein gemeinsames Dokument zu erarbeiten, welches verschiedene Themenbereiche abdecken soll, damit jedes Land einen passenden Aktionsplan zusammenstellen kann.

R+D 7.2
- LAGERAUSLEGUNG**

Lead:	ENSI	Funding:	ENSI
Contact:	Meinert Rahn meinert.rahn@ensi.ch	Period:	2010–2014

Abstract: Dieses Forschungsprojekt beschäftigt sich mit der Auslegung der verschiedenen Lagerteile und deren Beziehung zueinander, wobei die lokale geologische Situation und die Eigenschaften des Wirtgesteins zu berücksichtigen sind.

R+D 7.2
- PILOTLAGER: AUSLEGUNG UND INVENTAR**

Lead:	ENSI	Funding:	ENSI
Contact:	Ann-Kathrin Leuz ann-kathrin.leuz@ensi.ch	Period:	2010–2014

Abstract: Dieses Forschungsprojekt untersucht die notwendigen Anforderungen an ein Pilotlager, z. B. an dessen Platzierung, Bestückung und die wichtigen zu überwachenden Prozesse.

R+D 7.2
- MONITORINGKONZEPT UND -EINRICHTUNGEN**

Lead:	ENSI	Funding:	ENSI
Contact:	Erik Frank erik.frank@ensi.ch	Period:	2010–2014

Abstract: Dieses Forschungsprojekt soll einen Überblick über mögliche Monitoringkonzepte und -techniken verschaffen, die bei der Überwachung eines geologischen Tiefenlagerungs während allen Schritten der Realisierung angewendet werden sollen. Es ist eng mit dem EU-Projekt MoDeRn verknüpft.

R+D 7.2
- GESELLSCHAFTLICHE VERÄNDERUNG UND ENTSORGUNG**

Lead:	BFE	Funding:	BFE
Contact:	Simone Brander simone.brander@bfe.admin.ch	Period:	2012–2013

Abstract: Dieses Forschungsprojekt liefert zuhanden des Bundesamts für Energie (BFE) und des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats (ENSI) Empfehlungen zum Umgang mit gesellschaftlichen Veränderungen im Bereich der Entsorgung radioaktiver Abfälle.

R+D 7.2
- AUFBAU DER REGIONALEN PARTIZIPATION**

Lead:	BFE	Funding:	BFE
Contact:	Simone Brander simone.brander@bfe.admin.ch	Period:	2012–2014

Abstract: Diese Studie dokumentiert den Prozess des Aufbaus der Partizipationsgremien in den Standortregionen zwischen 2009 und 2011. Das Wissen und die Erfahrungen wurden aufgearbeitet und sollen so in den laufenden Prozess eingebracht werden.

R+D 7.2

● **UMWELTPOLITISCHE FRAGEN**

R+D 7.2

Lead: BFE

Funding: BFE

Contact: Brander Simone

simone.brandner@bfe.admin.ch

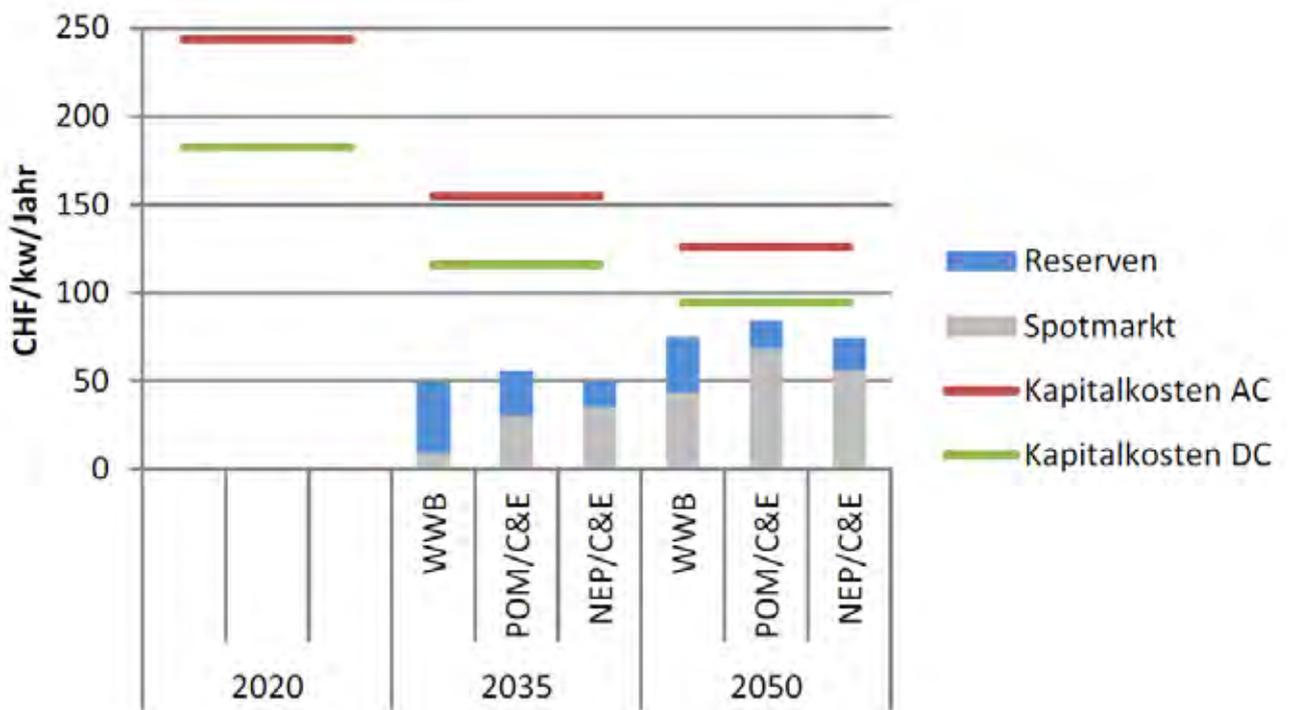
Period: 2012–2014

Abstract: Diese Studie zeigt auf, wo hinsichtlich der Entsorgung radioaktiver Abfälle Konsistenz mit aktuellen umweltpolitischen Grundsätzen besteht, wo allenfalls Handlungsbedarf besteht und welche Entwicklungen sich für die kommenden Jahre abzeichnen. Die Untersuchung liefert dadurch Entscheidungsgrundlagen für BFE und ENSI.



Querschnittsprogramme Programmes Transverseaux

Energie-Wirtschaft-Gesellschaft



Titelbild:

Entwicklung der Wirtschaftlichkeit von Energiespeichern [1]

Entwicklung der Wirtschaftlichkeit von Energiespeichern ohne Einbeziehung der Erlöse aus der Teilnahme am Intraday-Markt und der Erbringung von Regelenergie für die Szenarien «Weiter wie bisher», «Politische Massnahmen Bundesrat» sowie "Neue Energiepolitik" der Energieperspektiven 2050. Diese Szenarien werden mit der Stromangebotsvariante «C&E Fossil-zentral und Erneuerbare» kombiniert, in der von einem verstärkten Zubau der erneuerbaren Stromproduktion ausgegangen wird.

BFE Forschungsprogramm Energie-Wirtschaft-Gesellschaft

Überblicksbericht 2013

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE

CH-3003 Bern

Programmleiterin BFE (Autorin):

Dr. Anne-Kathrin Faust, Bundesamt für Energie (anne-kathrin.faust@bfe.admin.ch)

Bereichsleiterin BFE:

Dr. Anne-Kathrin Faust (anne-kathrin.faust@bfe.admin.ch)

www.ewg-bfe.ch

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

Einleitung

Das Querschnittsprogramm Energie-Wirtschaft-Gesellschaft (EWG) befasst sich mit ökonomischen, soziologischen, psychologischen sowie politologischen Fragestellungen bezüglich der Umwandlung, der Verteilung und der Nutzung von Energie. Das Forschungsprogramm dient sowohl der Entwicklung neuer als auch der Überprüfung bestehender energiepolitischer Instrumente.

Energiemärkte weisen verschiedene Unvollkommenheiten auf, was dazu führen kann, dass nur durch Intervention des Staates volkswirtschaftlich effiziente Resultate möglich sind. 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 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. CO₂-Emissionen) und die Knappheit der fossilen Energieträger rücken letztlich auch Entscheidungen betreffend der Generationengerechtigkeit ins Licht. Energiepolitik ist aus all diesen Gründen nötig. Sie versucht gleichzeitig so ver-

schiedene 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 volkswirtschaftlichen Auswirkungen, 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 Energie-Wirtschaft-Gesellschaft befasst sich mit den energiepolitischen Rahmenbedingungen und dem Verhalten der Akteure in den drei Wirtschaftssektoren «Haushalte» (Gebäude und Elektrogeräte), «Verkehr» und «Dienstleistungen und Industrie», wie sie auch den Perspektivmodellen zu Grunde liegen. Des weiteren wird im Programmschwerpunkt «Energieforschung und Technologietransfer» analysiert, inwiefern und mit welchen Instrumenten der Staat Innovation und Technologietransfer fördern kann. Fragen der Strom- und Wärmeerzeugung werden unter dem Schwerpunkt «Umwandlungssektor, erneuerbare Energien und Marktordnung» behandelt. Der Bereich »sektorübergreifende Energiepolitik« erstellt Studien, die sich mit den politischen und sozioökonomischen Rahmenbedingungen sowie deren gesamtwirtschaftlichen Einfluss beschäftigen. Diese Forschung dient dazu, das Verhalten der Marktakteure und das Zusammenspiel von verschiedenen Märkten besser zu verstehen, und leistet so zum Beispiel einen wichtigen Beitrag zur Abschätzung der ökonomischen Effekte von möglichen Energieszenarien. Zusätzlich fördert das EWG – Programm die Erarbeitung neuer Datenbasen, die der Forschergemeinde zur Verfügung gestellt werden und so vergleichbare Ausgangslagen schaffen sowie die Qualität angewandter Studien verbessern.

Das Forschungsprogramm EWG initiiert und begleitet sowohl angewandte For-

schungsarbeiten an den Hochschulen, als auch politiknahe Projekte bei Beratungsfirmen.

Rückblick und Bewertung 2013

Das Forschungsprogramm hat auch 2013 eine breite Palette unterschiedlicher Projekte unterstützt. So wurden interessante Erkenntnisse in verschiedenen Bereichen gewonnen. Zum einen wurde in Feldexperimenten der Einfluss von Information auf den Energieverbrauch von Haushalten untersucht (siehe Highlight «Die Auswirkung von Information auf den Stromverbrauch»). Des weiteren wurden die Determinanten von Investitionsentscheidungen in erneuerbare Energien sowie der Einfluss von Energiepreisen auf Innovation analysiert (siehe Highlight «Der Einfluss von Energiepreisen auf grüne Innovation»). Der mögliche Beitrag von Speichertechnologien zum Umbau der Stromversorgung im Rahmen der Energiestrategie 2050 sowie die derzeitige und zukünftige Marktsituation für neue Pumpspeicher (siehe Highlight «Bewertung von Pumpspeicherkraftwerken in der Schweiz im Rahmen der Energiestrategie 2050») bildeten 2013 einen weiteren Forschungsschwerpunkt. Ausserdem sind verschiedene energieökonomische Modelle zur Abschätzung der volkswirtschaftlichen Effekte von energiepolitischen Instrumente entwickelt worden oder befinden sich noch in der Entwicklung. Zusätzlich hat das EWG – Forschungsprogramm

Projekte in den Bereichen Mobilität, neue Arbeitsformen, Energieeffizienz und Demand – Response – Mechanismen unterstützt.

Das diesjährige Treffen der Schweizerischen Gesellschaft für Volkswirtschaft und Statistik fand in Neuchâtel zum Thema «die Energiewende und ihre Herausforderungen» statt. Dieses bot den Forschern ein Forum zur Besprechung ihrer energieökonomischen Forschungsarbeiten.

Ausblick

Viele aktuelle Projekte werden im Jahr 2014 weiterlaufen. Diese versprechen unter anderem Antworten auf Fragen nach den bestimmenden Faktoren beim Kauf von energieverbrauchenden Gebrauchsgütern sowie nach den Reaktionen von Firmen und Haushalten auf veränderte Energiepreise. Auch der Einfluss von Energiekonsum und Energiesystem auf den Wohlstand wird untersucht. Zudem befassen sich Projekte mit der Weiterentwicklung von energieökonomischen Modellen, die es erlauben, die ökonomischen Effekte von möglichen Energieszenarien und energiepolitischen Instrumenten abzuschätzen.

Anfang 2014 wird zudem eine Ausschreibung stattfinden. Geförderte Projekte sollen wichtige Erkenntnisse zur erfolgreichen Umsetzung der Energiestrategie 2050 erarbeiten.

Highlights aus Forschung und Entwicklung

Im Jahr 2013 wurden im Rahmen des EWG – Forschungsprogramms Projekte unterstützt, die breitgefächerte Fragestellungen mit verschiedenen Modellierungsansätzen untersucht haben.

Die Auswirkung von Information auf den Stromverbrauch

Neben einer Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien sieht die Energiestrategie 2050 unter anderem eine Reduzierung des Endenergie- und Stromverbrauches vor. Verschiedene Instrumente können verwendet werden, um diese Abnahme zu erreichen. Eine davon ist eine verbesserte Information der Verbraucher über ihren Stromkonsum. Das EWG – Forschungsprogramm betreut mehrere Projekte, die sich mit dem Energiesparpotenzial beziehungsweise den zeitlichen Verlagerungsmöglichkeiten der Energienachfrage in Haushalten aufgrund verbesserter Information über den Verbrauch beschäftigen. Stellvertretend für diese Forschung wird hier das Projekt «Smart Metering, Beratung oder Sozialer Vergleich: Was beeinflusst den Elektrizitätsverbrauch?» vorgestellt. Diese Studie [2] erforscht, ob und wie sich mittels zusätzlicher Information der Stromverbrauch reduzieren lässt.

Die Studie hat das Verhalten von 5000 Haushalten untersucht, bei denen es sich um ewz - Kunden handelte. Die Teilnehmer wurden nach dem Zufallsprinzip in fünf Gruppen unterteilt, die alle verschiedene Informationen über ihren Stromverbrauch erhalten haben. Die Kontrollgruppe bekam keinerlei zusätzliche Information, während der zweiten Gruppe eine kontinuierliche und detaillierte Information über den eigenen Stromkonsum mittels einer Smart Meter-Anzeige vermittelt wurde. Diese erlaubte es den Haushalten, sich in Echtzeit über ihren Stromkonsum zu informieren. Eine weitere Gruppe hat an einer professionellen Stromberatung teilgenommen, und die letzten beiden Gruppen wurden in verschiedenem Masse über den Stromkonsum eines vergleichbaren Haushaltes informiert.

Im Rahmen der Studie wurden die

Stromzähler der Studienhaushalte über einen Zeitraum von 15 Monaten insgesamt acht Mal abgelesen. Diese Zählerdaten haben so den Stromverbrauch im Quartal vor der Einführung sowie monatlich im ersten Quartal und quartalsweise für die drei verbleibenden Quartale nach Einführung der Intervention gemessen. Studienhaushalten mit Smart Meter-Anzeige wurde ein Smart Metering-fähiger Zähler montiert. Dieser Zähler hat in einem Zeitraum von ein paar Wochen vor, sowie über ein Jahr nach dem Ausliefern der Anzeige den Stromverbrauch viertelstündig aufgezeichnet. Schliesslich wurden alle Studienhaushalte vor Beginn der Intervention, quartalsweise während der Intervention und nach Ablauf der Intervention bezüglich einer Reihe von Merkmalen befragt. Diese Datenbasis erlaubte eine umfassende Beurteilung der kurz- sowie auch mittelfristigen Auswirkungen der zusätzlichen Informationen auf den Stromverbrauch.

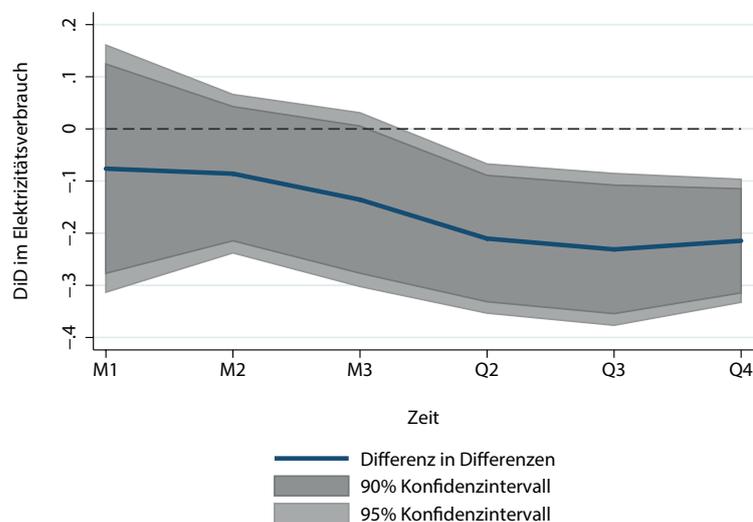
Ergebnisse der Studie zeigen, dass der Stromverbrauch allein durch Information signifikant reduziert werden kann. Dieses Resultat lässt sich der Figur 1 entnehmen. Diese weist die Veränderung des Stromverbrauchs pro Tag der Teilnehmenden mit Smartmeter-Anzeige (Gruppe G1) im Vergleich mit der Kontrollgruppe (Gruppe G0) aus. Die durchgezogene Linie beschreibt den Effekt der Smartmeter-Anzeige auf den Stromkonsum im Untersuchungszeitraum. Die Effekte in den ersten drei Monaten nach

Installation (M1, M2 und M3) werden gesondert von den Effekten im zweiten bis vierten Quartal nach Installation (Q2, Q3 und Q4) ausgewiesen. Der Effekt der Smart Meter-Anzeige ist statistisch nachweisbar von Null verschieden, wenn die schraffierten Bereiche die Null-Linie nicht überdecken.

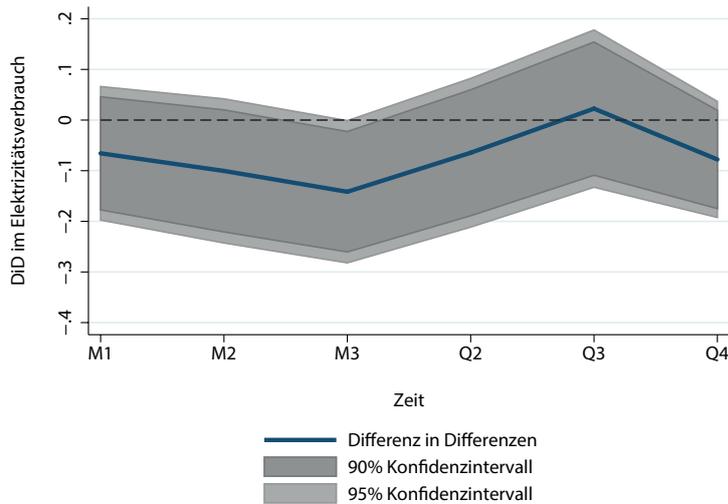
Tatsächlich sinkt der Tageskonsum dank der Smartmeter-Anzeigen mittelfristig um rund 3,2%. Der Rückgang im Verbrauch lässt sich nicht nur unmittelbar nach Installation der Anzeige, sondern auch im Verlauf der gesamten Beobachtungsphase feststellen. Smartmeter-Anzeigen führen also zu einer nachhaltigen Reduktion des Elektrizitätsverbrauchs. Zudem erlauben die Anzeigen auch eine teilweise Verlagerung des Stromverbrauches in Niedertarifzeiten.

Sozialer Wettbewerb scheint hingegen nur zu geringen Einsparungen führen zu können. Tatsächlich waren die Stromeinsparungen der beiden Gruppen, die über den Verbrauch eines Vergleichshaushaltes informiert wurden, am Ende der Beobachtungsperiode nicht signifikant. Die Häufigkeit der Rückmeldung scheint dabei eine wichtige Rolle zu spielen. Figur 2 zeigt eine Abnahme des Effektes der Information, wenn diese nur noch einmal im Quartal statt monatlich an die Haushalte weitergegeben wird.

Professionelle Beratung vermittelt zu guter Letzt zwar Hinweise zu Einsparmöglichkeiten, führt jedoch zu keinem



Figur 1: Veränderung des Stromverbrauches, Smart-Meter Anzeige



Figur 2: Veränderung des Stromverbrauches, sozialer Wettbewerb

Rückgang des Stromverbrauches. Die Studie zeigt somit, dass der Stromverbrauch von Haushalten allein durch aktuelle Verbrauchsinformation signifikant reduziert werden kann. Das Projekt unterstreicht die Wichtigkeit eines zeitnahen, kontinuierlichen und detaillierten Feedbacks, um den Stromverbrauch signifikant zu senken.

Der Einfluss von Energiepreisen auf «grüne» Innovation

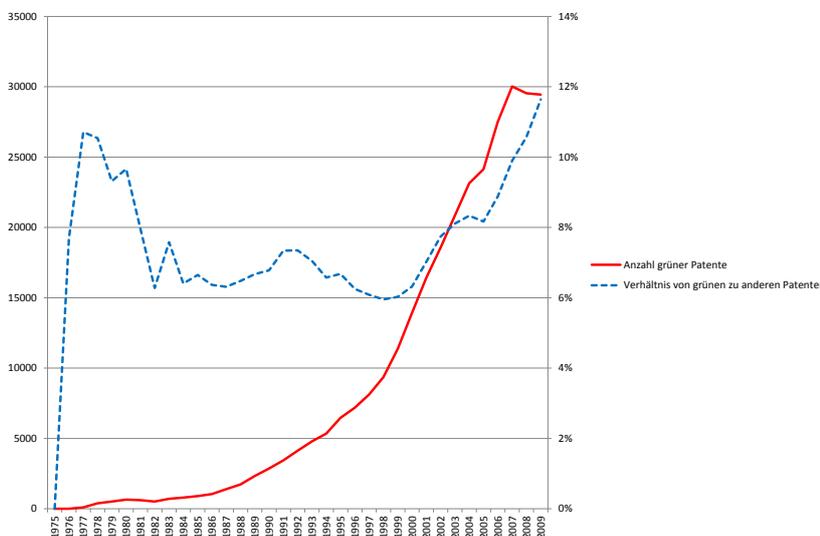
Auf dem Weg zu einer effizienteren und

nachhaltigeren Energienutzung, wie sie von der Schweiz angestrebt wird, spielen grüne Innovation und der damit verbundene technologische Fortschritt eine wichtige Rolle. Aufgrund des «öffentlichen Gut»-Charakters des Wissens sowie des Auftretens von positiven Externalitäten wie verringerten CO₂-Emissionen beim Nutzen von grünen Innovationen ergeben sich Marktunvollkommenheiten. Dies hat zur Folge, dass ohne staatliche Förderung eine aus volkswirtschaftlicher Sicht ungenügende Anzahl von technischen Neuerungen entstehen würde. Energiepreise können als Mass von umweltpolitischen Massnahmen dienen, da sie zum grossen Teil

auf internationalen Märkten entstehen, und Unterschiede zwischen verschiedenen Ländern hauptsächlich auf politische Interventionen zurückzuführen sind. Es erscheint folglich wichtig, ein gutes Verständnis über den Zusammenhang zwischen Innovation und Energiepreisen zu entwickeln, um die Frage beantworten zu können, ob umweltpolitische Massnahmen greifen und höhere Energiepreise tatsächlich zu technologischem Fortschritt führen.

Die Autoren untersuchen den Einfluss von Energiepreisen auf grüne Innovation [3]. Dabei wird grüne Innovation anhand von Patentanmeldungen in mit Hilfe des von der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) geschaffenen Indicator of Environmental Technologies definierten umweltrelevanten Feldern gemessen. Die Figuren 3 und 4 zeigen die Entwicklung von Patentanmeldungen und Energiepreisen während der vergangenen 30 Jahre. Mit Daten zu Patentanmeldungen in 10 Industriesektoren in 18 OECD-Mitgliedsstaaten, die für 95 % aller zwischen 1980 und 2009 angemeldeten Innovationen weltweit verantwortlich zeichnen, wird insbesondere der Einfluss von Energiepreisen auf die Anzahl von grünen Innovationen und auf die relative Anzahl von grünen zu anderen Patentanmeldungen aufgezeigt. Dazu schätzen die Autoren eine Wissensproduktionsfunktion, die, neben Arbeit und Kapital, Energiepreise und die Anzahl der in der Vergangenheit angemeldeten Patente beinhaltet.

Panel-Schätzverfahren bestätigen den positiven Effekt von Energiepreisen auf grüne Innovation. Die von den Autoren bevorzugte Schätzvariante ergibt eine bei einem Schwellenwert von 10 % statistisch signifikante Elastizität von 0,27. Daraus lässt sich ableiten, dass eine 10-prozentige Erhöhung der Energiepreise, die hier im Mittel über eine Fünfjahresperiode gemessen werden, einen 2,7-prozentigen Anstieg der grünen Patentanmelderate nach sich zieht. Dieses Ergebnis hält auch Robustheitstests bezüglich der Spezifikation der Schätzung oder der Definition der Stichprobe stand. Der Einfluss von Energiepreisen auf den Quotienten von grünen zu nicht grü-



Figur 3: Weltweite Entwicklung von Patentanmeldungen, 1975–2009

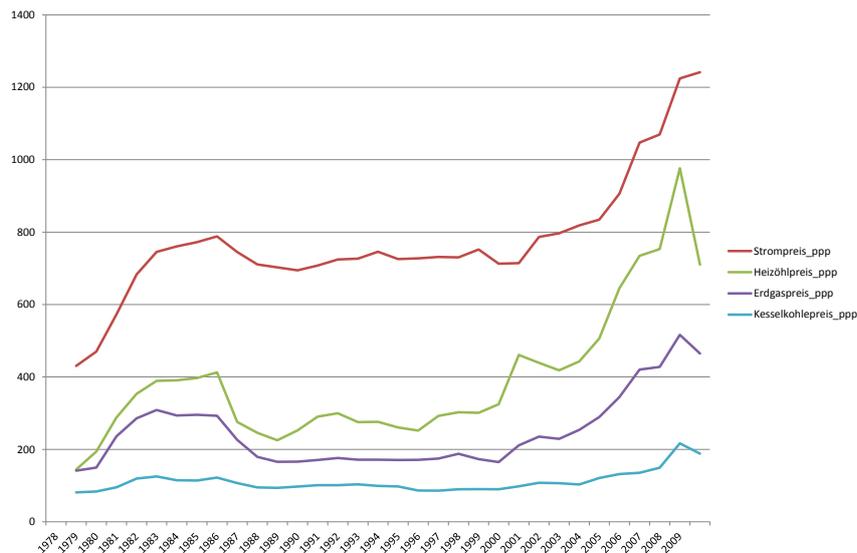
nen Innovationen lässt sich gar mit einer signifikanten Elastizität von 0,45 beziffern. Der höhere Effekt auf Quotienten als auf die Anzahl grüner Patentanmeldungen weist zudem auf einen möglichen «crowding out effect» der umweltrelevanten technischen Neuerungen hin. Ausserdem zeigen die Schätzungen, dass das bereits erarbeitete Wissen, gemessen an der Anzahl vergangener Patentanmeldungen, einen positiven Effekt auf die Anzahl neuer grüner Patentanmeldungen hat. Dies stimmt sowohl für den grünen als auch für den nicht grünen Wissensbestand, wobei der Einfluss von umweltrelevanten technischem Wissen grösser ausfällt.

Zudem stellen die Autoren fest, dass obwohl die Gesamtzahl der Patentanmeldungen bedeutend ist, die Schweiz, was die relative Anzahl von grünen zu nicht grünen Innovationen angeht, unterdurchschnittlich abschneidet. Als mögliche Erklärungen für dieses Phänomen werden die Präsenz vieler forschungintensiver Branchen, bei denen ein eher geringes Potenzial für grüne Innovation besteht (z. B. Pharmaindustrie) bzw. die Opportunitätskosten sehr hoch sind, sowie die im Verhältnis zu anderen Ländern zurückhaltende explizite Förderung grüner Technologiefelder genannt.

Die Ergebnisse der Studie belegen, dass Energiepreise ein effektives Politikinstrument zur Förderung grüner Innovation darstellen. Dies bedeutet somit, dass steigende Energiepreise mit grünem technologischem Fortschritt einhergehen, eine wichtige Erkenntnis im Rahmen der Entwicklung einer nachhaltigen Energiestrategie.

Bewertung von Pumpspeicherkraftwerken in der Schweiz im Rahmen der Energiestrategie 2050

Der Schweizer Bundesrat setzt im Rahmen seiner Energiepolitik wie die Europäische Union auf einen Ausbau der erneuerbaren Energien. Dieser Umbau des Energiesystems stellt bedingt durch lastferne Erzeugung und volatile Einspeisung aus Wind und PV-Anlagen Herausforderungen an das Elektrizitäts-



Figur 4: Energiepreise für Elektrizität, Heizöl (leicht), Erdgas und Kesselkohle (in TonnelÖl Equivalent (toe); PPP angepasst) pro Jahr, 1978–2009

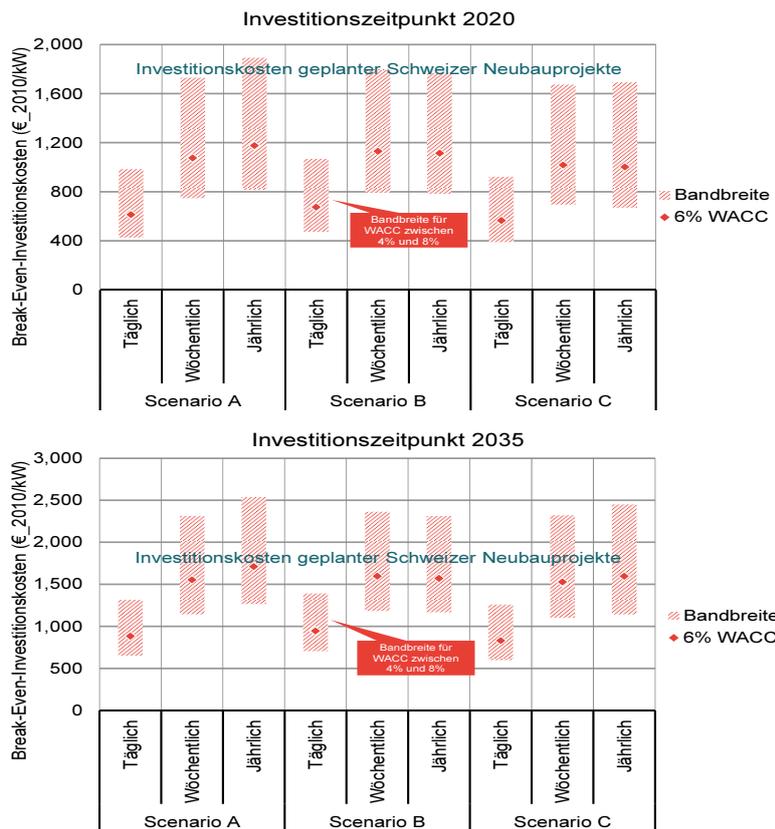
system, und verlangt nach vermehrten Energiespeichermöglichkeiten. In diesem Rahmen könnte Schweizer Pumpspeicherkraftwerken eine wichtige Rolle zukommen und das Land sich als «Batterie Europas» profilieren. Die Entscheidung für Pumpspeicherzubauten hängt jedoch von deren Wirtschaftlichkeit ab. Dazu fehlen gesicherte Kenntnisse, weshalb die Studie [4] «Bewertung von Pumpspeicherkraftwerken in der Schweiz im Rahmen der Energiestrategie 2050» sich dieser Problematik widmet.

Die Studie untersucht Wirtschaftlichkeit und Regulierungsbedarf von Pumpspeicherkraftwerken in der Schweiz. Basierend auf drei Szenarien, die die Entwicklung der politischen und energiewirtschaftlichen Szenarien bis 2050 abbilden, simulieren die Autoren mit Hilfe von Strommarktmodellen die zukünftige Entwicklung des Kraftwerkparcs in der Schweiz und Europa sowie die sich daraus ergebenden stündlichen Schweizer Strompreise für die Jahre 2020, 2035 und 2050. Auf der Basis der so ermittelten Preise errechnet ein Einsatzoptimierungsmodell die Deckungsbeiträge typisierter Pumpspeicherprojekte in der Schweiz, woraus sich die erwartete Wirtschaftlichkeit der Anlagen ableiten lässt. So ermitteln die Autoren Break-even-Investitionskosten für Basiskraftwerke. Diese definieren, bis zu welchen Investitionskosten ein Pumpspeicherprojekt noch rentabel ist. Figur 5 zeigt die Ergeb-

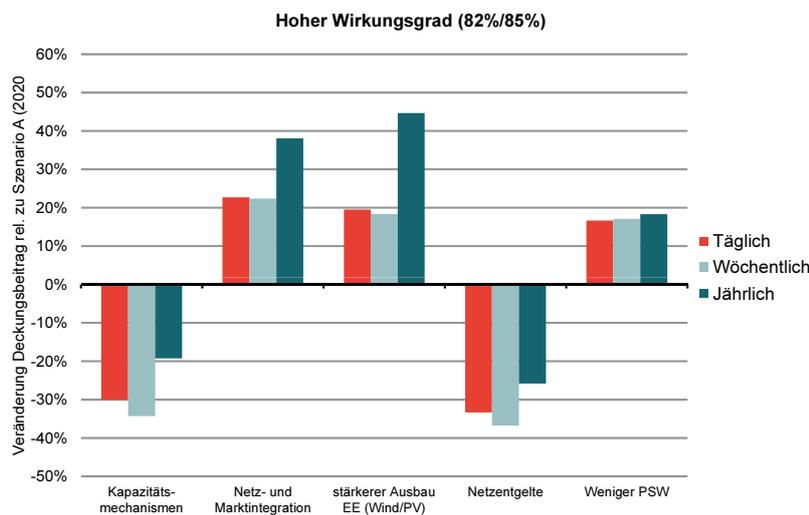
nisse dieser Berechnungen.

Heute liegen die Investitionskosten für Neubauten von Pumpspeichern in der Schweiz zwischen 1600 und 2000 EUR/kW (siehe Webseiten der Projektentwickler von Nant de Drance, Linthal 2015 und Lagobianco). Die Simulationen der Autoren errechnen für 2020 Break-even-Investitionskosten von 500 bis 1600 EUR/kW und lassen so Zweifel an der Wirtschaftlichkeit von Pumpspeichern aufkommen. Bei einem späteren Investitionszeitpunkt im Jahr 2035 verbessert sich die Anlagenwirtschaftlichkeit aufgrund des Ausbaus der erneuerbaren Energien in Europa sowie der höheren Strompreise zu Tageszeiten, an denen diese Erneuerbaren nicht eingespeist werden, jedoch merklich (siehe Figur 5). Unabhängig vom Investitionszeitpunkt haben Kapitalkosten einen grossen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit, ebenso wie der Betriebshorizont. Tatsächlich müssen Pumpspeicher nicht nur auf den reinen Tagesbetrieb setzen, sondern können auch Strompreisdifferenzen zwischen Tagen und Jahreszeiten nutzen. Dies führt zu einer Verdoppelung der Break-even-Investitionskosten.

Sensitivitätsrechnungen ermitteln zudem den Einfluss von Kapazitätsmechanismen, Netzintegration, stärkerem Ausbau von erneuerbaren Energien, Netzentgelten für Pumpstrom sowie den Preiseffekt der Pumpspeicher auf die Deckungsbeiträge der Basiskraftwerke. Die Analysen zei-



Figur 5: Break-even-Investitionskosten für Basiskraftwerke für Investitionszeitpunkte 2020 und 2035, fiktive Referenzanlagen mit hohem Wirkungsgrad (82 bzw. 85 %) und unterschiedlichen Reservoirvolumina bzw. Betriebshorizont



Figur 6: Einfluss auf die Deckungsbeiträge für das Jahr 2020 in den Sensitivitäten im Vergleich zu Szenario A

gen, dass der Regulierungsrahmen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Pumpspeicherprojekte haben kann (siehe Figur 6).

Die Auswirkungen einer Einführung von Kapazitätsmechanismen in der Schweiz hängen stark von deren Ausgestaltungsdetails ab. Kapazitätszahlungen allein für ausländische Kraftwerke stellen jedoch ein erhebliches Risiko für Schweizer Pumpspeicher dar, sofern diese nicht ebenfalls von Kapazitätszahlungen profitieren, aber die preissenkenden Effekte aus dem Ausland auf die Schweizer Strompreise Einfluss nehmen würden. Eine stärkere Anbindung des Schweizer Stromsystems erscheint hingegen wegen der erhöhten Preisvolatilität vor allem als Chance für Schweizer Pumpspeicher. Die Konsequenzen eines erhöhten Ausbaus der erneuerbaren Energien in Europa sind unklar, da dieser gegenläufige Effekte hat (erhöhter Preisvolatilität und guten Einkaufspreisen in den Abend- und Nachtstunden stehen durch vermehrte PV-Einspeisung sinkende Preise in den Mittagsstunden entgegen). In den Sensitivitätsanalysen überwiegt der positive Effekt auf die Deckungsbeiträge. Ein Netzentgelt für Pumpstrom kann ebenfalls signifikante Auswirkungen haben. So kann ein Netzentgelt in Höhe von 5 EUR/MWh die Deckungsbeiträge der Basiskraftwerke um bis zu ca. 40 % senken. Preiseffekte der Pumpspeicher werden anhand des Zubaus von 2 GW statt 4 GW Pumpspeichern errechnet. Der Deckungsbeitrag aller Speicher steigt so um knapp 20 % pro Jahr.

Die Ergebnisse der Studie deuten darauf hin, dass viele der derzeit geplanten Pumpspeicher-Projekte voraussichtlich später realisiert werden als geplant, sofern der Projektstand eine Verschiebung zulässt. Langfristig können geplante Pumpspeicher-Projekte in der Schweiz jedoch umgesetzt werden und einen wichtigen Baustein der Energiewende in Europa bilden, wobei die Ausgestaltung der Regulierungsmassnahmen einen massgeblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Pumpspeicher haben wird.

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. Das Forschungsprogramm unterstützt ebenfalls nationale und internationale Konferenzen, welche durch Schweizer Institute organisiert werden, so zum Beispiel 2013 das Treffen der Schweizerischen Gesellschaft für Volkswirtschaft und Statistik in Neuchâtel zum Thema «Die Energiewende und ihre Herausforderungen». 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 die Resultate jeweils unter Interessierten gestreut, an Fachtagungen und akademischen Konferenzen präsentiert und in Fachzeitschriften publiziert.

Internationale Zusammenarbeit

In diversen Projekten sind internationale Hochschulinstitutione 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);
- Demand Side Management (DSM), Task XXIV: Closing the Loop;
- Co-Operative Programme on Smart Grids (ISGAN).

Referenzen

[1] C.Hewicker et al.: *Energiespeicher in der Schweiz: Bedarf, Wirtschaftlichkeit und Rahmenbedingungen im Kontext der Energiestrategie 2050, Schlussbericht, 2013.*

[2] K.Degen et al.: *Smart Metering, Beratung oder Sozialer Vergleich: Was beeinflusst den Elektrizitätsverbrauch?, Schlussbericht, 2013.*

[3] M.Ley et al.: *The Impact of Energy Prices on Green Innovation, Final report, 2013.*

[4] C.Gatzen et al.: *Bewertung von Pumpspeicherkraftwerken in der Schweiz im Rahmen der Energiestrategie 2050, Schlussbericht, 2013.*

Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

(* IEA-Klassifikation)

- BEWERTUNG VON PUMPSPEICHERKRAFTWERKEN IN DER SCHWEIZ IM RAHMEN DER ENERGIESTRATEGIE 2050**

R+D 7.2*

Lead:	Frontier Economics	Funding:	BFE
Contact:	Christoph Gatzen christoph.gatzen@frontier-economics.com	Period:	2012–2013

Abstract: Die „Energiestrategie 2050“ sieht für die CH tiefgreifende Umwälzungen der Stromwirtschaft vor. Der Bundesrat sieht in diesem Kontext großes Potenzial für neue Pumpspeicher in der CH, Investoren zweifeln jedoch an deren Wirtschaftlichkeit. Im Projekt wird die derzeitige und zukünftige Marktsituation für neue Pumpspeicher analysiert und wichtige Treiber und Handlungsbedarf bezüglich des heutigen Regulierungsrahmens werden identifiziert.
- CITE MODELL - WEITERENTWICKLUNGEN**

R+D 7.2

Lead:	ETH Zürich	Funding:	BFE
Contact:	Lucas Bretschger lbretschger@ethz.ch	Period:	2011–2014

Abstract: Das Computable Induced Technical Change and Energy (CITE) Modell wird schrittweise weiter ausgebaut. Im Vordergrund steht dabei eine Verfeinerung des Energiesektors. Das bestehende Top-Down Modell wird somit durch ein detailliertes bottom-up Element erweitert. Weiter sollen die wichtigsten Handelspartner im Modell integriert werden. Dies ermöglicht aussagekräftigere Analysen zu den möglichen Auswirkungen von energiepolitischen Instrumenten.
- EFFECTS OF ENERGY PRICES ON INNOVATION (INNOVATIONSEFFEKTE VON ENERGIEPREISEN)**

R+D 7.2

Lead:	ETH Zürich, KOF Konjunkturforschungsstelle	Funding:	BFE
Contact:	Martin Wörter woerter@kof.ethz.ch	Period:	2012 - 2013

Abstract: Im Rahmen dieser Studie untersuchen wir die Auswirkung von höheren Energiepreisen auf die Innovationstätigkeit der Firmen im Bereich umweltfreundlicher Produkte. Darüber hinaus wollen wir wissen, ob die Energiepreiseffekte unterschiedlich auf umweltfreundliche Innovation und herkömmliche Innovationen wirken.
- EINE EVALUATION DER AUSWIRKUNGEN VON ENERGIEEFFIZIENZMASSNAHMEN AUF DEN STROMVERBRAUCH VON HAUSHALTEN**

R+D 7.2

Lead:	ETH Zürich, CEPE	Funding:	BFE
Contact:	Massimo Filippini mfilippini@ethz.ch	Period:	2012–2015

Abstract: Dieses Forschungsprojekt hat folgende Ziele: 1. Ökonometrische Schätzung der Haushalts-Stromnachfrage auf der EVU-Ebene. 2. Evaluation der Energieeffizienzmassnahmen auf der EVU-Ebene 3. Ökonometrische Schätzung der Haushalts-Stromnachfrage und die Schätzung der Nachfrage nach Haushaltsgeräten auf der Mikro-Datenbasis.
- ELECTRA: ELECTRICITY MARKETS AND TRADE IN SWITZERLAND AND ITS NEIGHBOURING COUNTRIES: BUILDING A COUPLED TECHNO-ECONOMIC MODELING FRAMEWORK**

R+D 7.2

Lead:	Econability F. Vöhringer	Funding:	BFE
Contact:	Frank Vöhringer voehringer@econability.com	Period:	2011–2015

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.
- ENERGIE-INVESTITIONSENTSCHEIDUNGEN BEI STRATEGISCHEN UND INSTITUTIONELLEN INVESTOREN**

R+D 7.2

Lead:	HSG, Lehrstuhl für Management Erneuerbarer Energien	Funding:	BFE
Contact:	Rolf Wüstenhagen rolf.wuestenhagen@unisg.ch	Period:	2012–2013

Abstract: Die Energiewende bedingt Investitionen in erneuerbare Energien. Strategische sowie institutionelle Investoren haben Anreize, in erneuerbare Energien zu investieren. Einige Unternehmen richten ihr Geschäftsmodell auf erneuerbare Energien aus, andere reagieren zögerlich. Dieses Projekt untersucht, wie Portfoliomanager erneuerbare Energien wahrnehmen. Kernstück ist ein Reaktionstest, um die implizite Einstellung gegenüber Energieträgern zu messen.
- ENERGIESPEICHER IN DER SCHWEIZ: BEDARF, WIRTSCHAFTLICHKEIT UND RAHMENBEDINGUNGEN IM KONTEXT DER ENERGIESTRATEGIE 2050**

R+D 7.2

Lead:	DNV KEMA	Funding:	BFE
Contact:	Oliver Werner oliver.werner@dnvkema.com	Period:	2012–2013

Abstract: Im Rahmen der Energiestrategie 2050 untersucht dieses Projekt den möglichen Beitrag von Speichertechnologien zum Umbau der Stromversorgung sowie die notwendigen Bedingungen. Im ersten Projektschritt erfolgt eine Bestandsaufnahme und eine Projektion der Entwicklung von Speichertechnologien. Darauf aufbauend wird der technische Bedarf ermittelt. Zuletzt werden zukünftige Anwendungsgebiete auf Netzebenen sowie die Wirtschaftlichkeit untersucht.

- | | | | |
|-----------|---|----------|-----------|
| ● | ENTWICKLUNG EINES ENTSCHEIDUNGSFINDUNGSMODELLS ZUR BESCHREIBUNG DES ENTSCHEIDUNGSVERHALTENS BEIM KAUF VON ELEKTROGERÄTEN | R+D | 7.2 |
| Lead: | ETH Zürich, Professur für Consumer Behavior | Funding: | BFE |
| Contact: | Michael Siegrist msiegrist@ethz.ch | Period: | 2012–2015 |
| Abstract: | Die Förderung der Energieeffizienz ist ein wichtiger Ansatzpunkt zur Reduktion des Stromverbrauchs. Im Rahmen dieses Projekts soll ein Modell zur Beschreibung des Entscheidungsverhaltens beim Erwerb von Elektrogeräten entwickelt werden. Es soll aufgezeigt werden, wie Konsumenten bei der Verarbeitung von Produktinformationen beim Kauf von Elektrogeräten vorgehen und wie der Fokus verstärkt auf Energieverbrauchsdaten gelenkt werden kann. | | |
- | | | | |
|-----------|--|----------|---------------|
| ● | OPEN-SOURCE MODEL DEVELOPMENT AND SCENARIO ANALYSIS IN COLLABORATION WITH THE WORLD ENERGY COUNCIL | R+D | 7.2 |
| Lead: | Paul Scherrer Institute (PSI) | Funding: | BFE, PSI u.a. |
| Contact: | Hal Turton hal.turton@psi.ch | Period: | 2012–2013 |
| Abstract: | Das Ziel des Projekts ist die quantitative Szenarienanalyse für das globale Energiesystem. In Zusammenarbeit mit dem Weltenergieerat werden mögliche Entwicklungen in der Energiegewinnung (fossil, nuklear und erneuerbare), in deren Umwandlung und im Endverbrauch in einem detaillierten Kostenoptimierungsmodell mit Zeithorizont Jahr 2050 untersucht. Das Modell umfasst 15 Weltregionen und wird als Open-Source Modell ausgelegt. | | |
- | | | | |
|-----------|--|----------|-----------|
| ● | SEPIA: SOCIAL CUSHIONING OF ENERGY PRICE INCREASES AND PUBLIC ACCEPTABILITY | R+D | 7.2 |
| Lead: | Econability F. Vöhringer | Funding: | BFE |
| Contact: | Frank Vöhringer voehringer@econability.com | Period: | 2012–2015 |
| Abstract: | SEPIA untersucht Massnahmen zur sozialen Abfederung von Energiepreiserhöhungen hinsichtlich ihrer ökonomischen Wirkungen und gesellschaftlichen Akzeptanz. Das Gleichgewichtsmodell GENESwIS berechnet die ökonomischen Wirkungen. Eine repräsentative Umfrage untersucht die Einschätzungen der Bevölkerung, die i.d.R. von den Berechnungen stark abweichen. Gesucht werden Ansätze für Design und Akzeptanzsteigerung ökonomisch sinnvoller Massnahmen. | | |
- | | | | |
|-----------|---|----------|-----------|
| ● | SMART METERING, BERATUNG ODER SOZIALER VERGLEICH - WAS BEEINFLUSST DEN ELEKTRIZITÄTSVERBRAUCH? | R+D | 7.2 |
| Lead: | Uni Lausanne | Funding: | BFE |
| Contact: | Rafael Lalive rafael.lalive@unil.ch | 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. | | |
- | | | | |
|-----------|---|----------|---------------------|
| ● | SWISS TIMES ENERGY SYSTEM MODEL (STEM) FOR TRANSITION SCENARIO ANALYSES | R+D | 7.1 |
| Lead: | Paul Scherrer Institute (PSI) | Funding: | BFE + PSI (in-kind) |
| Contact: | Hal Turton hal.turton@psi.ch | Period: | 2010–2014 |
| 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. | | |
- | | | | |
|-----------|---|----------|-----------|
| ● | TECHNOLOGICAL SUCCESSION AND SUBSTITUTION ELASTICITIES | R+D | 7.2 |
| Lead: | ETH Zürich, KOF | Funding: | BFE |
| Contact: | Peter Egger egger@kof.ethz.ch | Period: | 2010–2013 |
| Abstract: | This project develops an empirical model of the determinants of energy prices in 28 OECD countries over the period 1980–2009. Results show that higher income per capita and lower efficiency in energy distribution tend to raise energy prices whereas higher net imports of energy and more abundant energy resource endowments reduce them. Countries that use the same types of energy resources are likely to transmit energy price shocks to each other. | | |
- | | | | |
|-----------|--|----------|-----------|
| ● | TOU-PRICING: TIME OF USE PRICING | R+D | 7.2 |
| Lead: | ORDECSYS | Funding: | BFE |
| Contact: | Alain Haurie alain.haurie@ordecsys.com | Period: | 2012–2014 |
| Abstract: | Das Projekt TOU hat zum Ziel den Einfluss von Demand-Response Mechanismen zu bewerten. Um das Potenzial dieser Technologien zu evaluieren ist es essenziell die Reaktion von Verbrauchern zu betrachten. Nachdem wir die Akzeptanz analysiert haben, werden wir eine Energiemodellierung entwickeln, die den potenziellen Beitrag von Demand-Response unter Berücksichtigung der Akzeptanz von Verbrauchern zur Energieeinsparung bewerten kann. | | |

- **VERBRAUCHSFEEDBACK FÜR DIE WARMWASSER-NUTZUNG** R+D 7.2
- | | | | |
|----------|------------------------------------|----------|-----------|
| Lead: | ETH Zürich, Bits to Energy Lab | Funding: | BFE |
| Contact: | Thorsten Staake
tstaake@ethz.ch | Period: | 2012–2013 |
- Abstract: Ziel der Feldstudie ist die Untersuchung des Einflusses von sozialen Vergleichen, Selbsteinschätzung, und erklärter Absicht zu sparen auf die private Energienutzung. Insbesondere wird der Einfluss von Feedback-Informationen auf die Warmwassernutzung bei 700 Zürcher Haushalten untersucht. Durch die Berücksichtigung einer vorherigen Studie zu Feedback-Informationen auf den Stromverbrauch werden Quervergleiche angestellt.
- **NEME - NEGAWATT STATT MEGAWATT: FORSCHUNG ZUR ERHÖHUNG DER UMSETZUNGSRATE VON STROMEFFIZIENZMASSNAHMEN** R+D 7.2
- | | | | |
|----------|---|----------|---------------------|
| Lead: | Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften (ZHAW) | Funding: | BFE + Pro Evolution |
| Contact: | Jürg Rohrer
juerg.rohrer@zhaw.ch | Period: | 2013–2014 |
- Abstract: In 250'000 KMU der Schweiz liegt ein Stromeinsparpotential in der Grössenordnung von 10% des Schweizer Stromverbrauches brach. In einem interdisziplinären Ansatz werden Massnahmen erarbeitet, wie die Einsparpotentiale am effizientesten umgesetzt werden könnten. Die Erkenntnisse sollen sowohl in die bestehenden als auch in neue Einsparprogramme einfließen.
- **VERWO: SMART ENERGIE FÖRDERUNG: ENERGIE- UND UMWELTBEWUSSTES VERHALTEN IM WOHNBEREICH (PILOTPROJEKT)** R+D 7.2
- | | | | |
|----------|---|----------|---------------|
| Lead: | Verein Jugendwohnnetz Stadt Zürich (Juwo) | Funding: | BFE, EWZ u.a. |
| Contact: | Christian Portmann
cportmann@juwo.ch | Period: | 2013–2014 |
- Abstract: Das Juwo vermietet günstigen Wohnraum an junge Erwachsene. In einem Pilotprojekt wird in Wohngemeinschaften versucht mittels Energiebotschaftern und Smart-Metering-Geräten (Strom+Duschwasser) auf ein energiebewusstes Verhalten hinzuwirken. Begleitende Impact- und Outcome-Analysen werden von der Sozialforschungsstelle Universität Zürich und der Schweizerischen Agentur für Energieeffizienz durchgeführt. Geplant ist ein einfacher Praxisleitfaden.
- **ANAEM - AUSWIRKUNGEN NEUER ARBEITSFORMEN AUF DEN ENERGIEVERBRAUCH UND DAS MOBILITÄTSVERHALTEN VON ARBEITNEHMENDEN** R+D 7.2
- | | | | |
|----------|---|----------|------|
| Lead: | Ernst Basler + Partner AG | Funding: | BFE |
| Contact: | Sabine Perch-Nielsen
sabine.perch-nielsen@ebp.ch | Period: | 2013 |
- Abstract: Räumlich flexible Arbeitsformen wie Home Office oder mobiles Arbeiten haben vielfältige Auswirkungen. Im Rahmen dieser Studie wurde untersucht, wie stark diese Arbeitsformen heute in der Schweiz verbreitet und welches die Motive und Hemmnisse von Unternehmen sind. Ausserdem wurden die Auswirkungen auf die Mobilität und Energienachfrage sowie auf die Innovationsleistung und Arbeitsproduktivität analysiert.
- **FLEXI : DÉTERMINATION DU POTENTIEL DE FLEXIBILISATION DE LA DEMANDE ÉLECTRIQUE** R+D 7.2
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | Planair S.A. | Funding: | BFE |
| Contact: | Lionel Perret
lionel.perret@planair.ch | Period: | 2013–2014 |
- Abstract: Le projet vise à répondre à la question du potentiel de flexibilisation de la demande électrique des ménages afin de maximiser la part de consommation locale d'énergie solaire photovoltaïque. Le but est de quantifier de manière précise la couverture de la demande électrique d'un ménage ou d'un ensemble de ménages avec une production solaire locale en fonction de l'utilisation de technologies "smart" de flexibilisation de la demande.
- **SITUATIONSANALYSE ZUR REALISIERUNG EINES INITIALMARKETS FÜR H2-FAHRZEUGE** R+D 7.2
- | | | | |
|----------|---|----------|--------------------|
| Lead: | Paul Scherrer Institute (PSI) | Funding: | BFE + Kt. AG + PSI |
| Contact: | Philipp Dietrich
philipp.dietrich@axpo.com | Period: | 2013 |
- Abstract: The project delivers a situation analysis of prevailing technical, economic and social aspects for the commercial introduction of fuel cell electric vehicles and hydrogen fuel in Switzerland as well as on key action areas for the establishment of a beneficial and supportive political framework.
- **ENERGY ELASTICITIES AND THE REBOUND EFFECT: A COMPREHENSIVE EMPIRICAL ANALYSIS** R+D 7.2
- | | | | |
|----------|---|----------|-----------|
| Lead: | Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät Universität Basel | Funding: | BFE |
| Contact: | Lukas Mohler
lukas.mohler@unibas.ch | Period: | 2013–2015 |
- Abstract: This research project aims at providing a comprehensive assessment of energy use patterns in Switzerland, contributing to the topics of the econometric estimations section of the EWG call for proposals. The proposed econometric estimations cover several different types of energy elasticities, different energy sources and services as well as households' consumption and firms' production.

- **ENERGY-USING DURABLES: DRIVING FORCES OF PURCHASE DECISIONS** R+D 7.2

Lead: ETH Zürich, Institute for Environmental Decisions	Funding: BFE
Contact: Renate Schubert schubert@econ.gess.ethz.ch	Period: 2013–2015

Abstract: One of the key determinants of purchase decisions regarding energy-using products are consumers' discount rates. Measured discount rates are an amalgam of many, typically unobservable, factors, which makes it difficult to gauge the extent of an energy efficiency gap. One of the key research questions is, therefore, whether white-goods markets in Switzerland are, in fact, characterized by an energy efficiency gap.
- **USING SUBJECTIVE WELL-BEING DATA FOR ENERGY POLICY ANALYSIS** R+D 7.2

Lead: Ecoplan AG	Funding: BFE
Contact: André Müller mueller@ecoplan.ch	Period: 2012–2014

Abstract: The project assesses energy supply and the structure of the energy system in terms of citizens' utility, operationalised as subjective well-being (SWB). The research questions include: How does the supply and consumption of different forms of energy contribute to SWB? What are citizens' implied preferences for configurations of the energy supply system? What is the impact for SWB of living close to power stations and other energy facilities?
- **VOESOPHE - MASSNAHMEN DER ENERGIESTRATEGIE 2050: BEGLEITENDE VERHALTENSÖKONOMISCHE UND SOZIALPSYCHOLOGISCHE HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN** R+D 7.2

Lead: Econcept	Funding: BFE
Contact: Walter Ott walter.ott@econcept.ch	Period: 2013

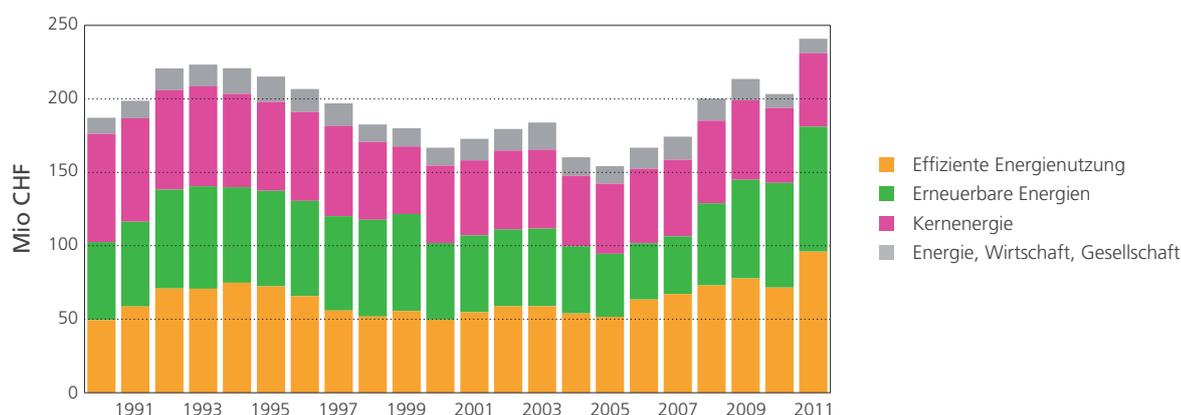
Abstract: Die Studie hat das Ziel, den Einfluss von verhaltensökonomischen und sozialpsychologischen Faktoren sowie von Rebound-Effekten auf die Wirksamkeit und die Ausgestaltung energiepolitischer Massnahmen zu analysieren. Ausgehend davon werden Empfehlungen für die Konzeption und Umsetzung ausgewählter Massnahmen der Energiestrategie 2050 des Bundes abgeleitet, um deren Akzeptanz, Umsetzung und Wirksamkeit zu verbessern.

Zahlen und Fakten

Faits et chiffres

Seit 1977 erfasst das Bundesamt für Energie (BFE) die Ausgaben der öffentlichen Hand für Forschungs-, Pilot- und Demonstrationsprojekte im Energiebereich. Die Erhebung erfolgt über eine Selbstdeklaration der Projektangaben, wobei die thematische Einordnung und eine abschliessende Prüfung der Projekte durch das BFE erfolgen. Die tatsächlichen Ausgaben der öffentlichen Hand werden dadurch eher unterschätzt. Jährlich werden rund 1500 Projekte erfasst, geprüft und statistisch ausgewertet. Eine Übersicht der Datenerhebung ist unter www.energieforschung.ch veröffentlicht.

Depuis 1977, l'OFEN enregistre les dépenses des collectivités publiques pour les projets de recherche ainsi que les projets pilotes et de démonstration dans le secteur de l'énergie. Le relevé s'effectue sur la base d'une déclaration spontanée des données du projet et l'OFEN procède au classement thématique et à l'examen final des projets. Les dépenses effectives des collectivités publiques ont ainsi tendance à être sous-estimées. Chaque année, environ 1500 projets sont enregistrés, examinés et évalués statistiquement. Un aperçu des données saisies est publié sous www.recherche-energetique.ch.



Langzeitüberblick über die für die Energieforschung aufgewendeten öffentlichen Mittel. Die Daten werden in Realwerten, d. h. teuerungskorrigiert für das Jahr 2012, dargestellt. Die Werte bewegen sich zwischen 0,3 und 0,65 Promille des Bruttoinlandsprodukts.

Aperçu à long terme des fonds publics dépensés pour la recherche énergétique. Les données sont présentées en valeurs réelles, c'est-à-dire corrigées du renchérissement pour l'année 2012. Les valeurs se situent entre 0,3 et 0,65 pour-mille du produit intérieur brut.

SNF	KTI	BFE	ENSI	SBE / FPG	EU / FP7	Kantone	Diverse	
4.5	20.4	23.4	2.2	0.4	28.9	8.8	14.0	240.9
1.9	8.4	9.7	0.9	0.2	12.0	3.7	5.8	100.0

Herkunft der öffentlichen Mittel in Mio CHF für Forschungs-, Entwicklungs-, Pilot- und Demonstrationsprojekte. (ETH = Bereich: ETHZ, EPFL, Empa, PSI, Eawag, WSL; SNF = Schweizerischer Nationalfonds; KTI = Kommission für Technologie und Innovation; BFE = Bundesamt für Energie; ENSI = Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat; SBE / FPG = Staatssekretariat für Bildung, Forschung und Innovation; EU / FP7 = Europäische Union; Kt./Gmd. = Kantone und Gemeinden).

Provenance des fonds publics en millions de CHF pour les projets de recherche et de développement ainsi que les projets pilotes et de démonstration. (EPF = domaine : EPF Zurich, EPF Lausanne, Empa, PSI, Eawag, WSL ; FNS = Fonds national suisse ; CTI = Commission pour la technologie et l'innovation ; OFEN = Office fédéral de l'énergie ; IFSN = Inspection fédérale de la sécurité nucléaire ; SEFRI = Secrétariat d'Etat à la formation, à la recherche et à l'innovation ; UE = Union européenne ; cant./cnes. = cantons et communes).

	2010	2011
Effiziente Energienutzung	71,5	96,0
Energie in Gebäuden	12,3	15,1
Verkehr	9,5	18,3
Akkumulatoren und Supercaps	2,7	1,7
Elektrizitätstechnologien & -anwendungen	10,1	12,9
Netze & Systeme	4,9	6,0
Wärme-Kraft-Kopplung	1,3	1,3
Brennstoffzellen	7,1	16,2
Verbrennung	12,8	11,5
Kraftwerk 2020 & CO ₂ -Rückhaltung und -Sequestrierung	7,3	6,4
Verfahrenstechnische Prozesse	3,6	6,6
Erneuerbare Energien	71,3	85,0
Sonnenenergie	33,5	41,8
Solarwärme und Wärmespeicherung	5,4	5,5
Photovoltaik	17,3	21,4
Solare Hochtemperaturprozesse	10,7	14,9
Wasserstoff	14,9	15,8
Umgebungswärme (inkl. Wärmepumpen, Kälte)	2,7	2,1
Biomasse & Holz (inkl. Abfälle, Klärschlamm)	9,2	12,7
Geothermie	6,8	5,9
Windenergie	2,0	3,5
Wasserkraft	2,2	3,2
Kernenergie	51,0	50,0
Kernspaltung (Fission)	28,2	26,6
Sicherheit	19,4	17,4
Radioaktive Abfälle	5,4	5,4
Vorausschauende Forschung	3,4	3,8
Kernfusion	22,8	23,4
Plasmaphysik, Heizmethoden	16,1	16,6
Fusionstechnologie	6,7	6,8
Querschnittsthemen	9,4	9,9
Energie, Wirtschaft, Gesellschaft (EWG)	7,6	6,8
Wissens- & Technologie-Transfer (WTT)	1,2	2,1
Allgemeine verwaltungsinterne Forschungscoordination	0,6	1,0
Gesamt	203,2	240,9

Aufwendungen der öffentlichen Hand für die anwendungsorientierte Energieforschung inklusive Pilot- und Demonstrationsprojekte in Mio. Schweizer Franken (Nominalwerte). Im Bereich der Kernfusion wird in erster Linie Grundlagenforschung betrieben, in Anlehnung an die internationale Praxis werden die Forschungstätigkeiten aber trotzdem zur Energieforschung gezählt. Interdisziplinäre Projekte werden dem jeweils dominierenden Forschungsbereich zugerechnet.

Dépenses des collectivités publiques pour la recherche énergétique appliquée, y compris les projets pilotes et de démonstration en millions de francs suisses (valeurs nominales). Dans le domaine de la fusion nucléaire, on se consacre prioritairement à la recherche fondamentale ; mais à l'instar de la pratique internationale, les activités de recherche font malgré tout partie de la recherche énergétique. Quant aux projets interdisciplinaires, ils sont imputés au domaine de recherche dominant.

Bundesamt für Energie BFE
Energieforschung
3003 Bern

Office fédéral de l'énergie OFEN
Recherche énergétique
3003 Berne

www.energy-research.ch

