Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE

Département fédéral de l'environnement,
des transports, de l'énergie et de la communication DETEC

Office fédéral de l'énergie OFEN

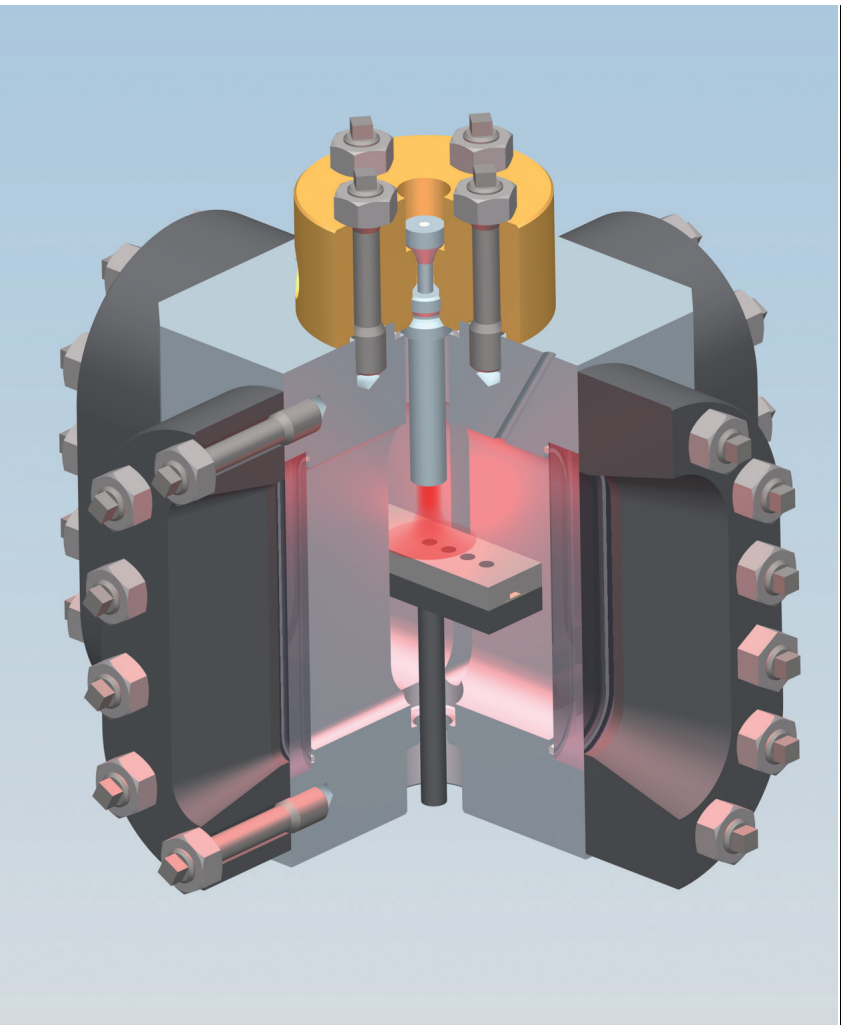
Juni 2009 / juin 2009

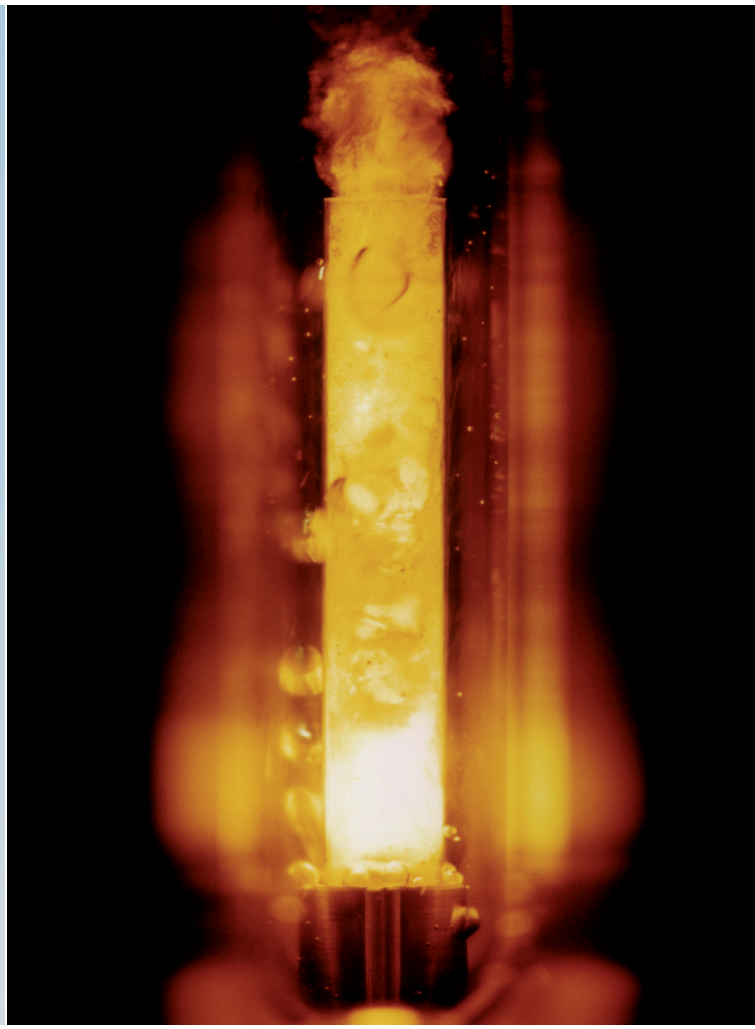
Energie-Forschung 2008

Überblicksberichte der Programmleiter

Recherche énergétique 2008

Rapports de synthèse des chefs de programme





ENERGIEFORSCHUNG
RECHERCHE ÉNERGÉTIQUE
2008

Vorwort / *Avant-propos* 3

Highlights 2008 5

Überblicksberichte / *Rapports de synthèse*

Effiziente Energienutzung / *Utilisation efficace de l'énergie*

Forschungsprogramm Energie in Gebäuden 15
Forschungsprogramm Verkehr 29
Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien und -anwendungen 39
Forschungsprogramm Netze 51
Forschungsprogramm Wärmepumpen, WKK, Kälte 61
Forschungsprogramm Verbrennung 73
Forschungsprogramm Kraftwerk 2020/CCS 85
Forschungsprogramm Brennstoffzellen und Wasserstoff 99
Forschungsprogramm Verfahrenstechnik 117

Erneuerbare Energie / *Sources d'énergie renouvelables*

Programme de recherche Chaleur solaire et stockage de chaleur 123
Forschungsprogramm Photovoltaik 135
Programme de recherche Utilisation industrielle de l'énergie solaire 153
Forschungsprogramm Biomasse und Holzenergie 163
Forschungsprogramm Wasserkraft 183
Forschungsprogramm Geothermie 191
Forschungsprogramm Windenergie 201

Kernenergie / *Énergie nucléaire*

Forschungsprogramm Kerntechnik und Nukleare Sicherheit 211
Forschungsprogramm Regulatorische Sicherheitsforschung 227
Programme de recherche Fusion thermonucléaire contrôlée 239
Forschungsprogramm Radioaktive Abfälle 245

Querschnittsprogramme / *Programmes transversaux*

Forschungsprogramm Energiewirtschaftliche Grundlagen 249

Anhänge / *Annexes* 263

Eidgenössische Energieforschungskommission (CORE)
Commission fédérale pour la recherche énergétique (CORE) 263

Zuständigkeiten bei den Forschungsprogrammen
Responsables des programmes de recherche 264

Vorwort

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

Die *Projektliste der Energieforschung des Bundes 2006/2007* gibt Auskunft über die Aufwendungen der mit öffentlichen Mitteln finanzierten Energieforschung sowie eine detaillierte Zusammenstellung der Geldflüsse. 2007 kamen rund 55 % der von der öffentlichen Hand aufgewendeten 174,2 Mio. Franken aus dem ETH-Bereich. Das BFE war mit einem Anteil von 15 % noch vor der EU (10 %) zweitgrösster Finanzgeber. Die meisten Geldmittel kamen der effizienten Energienutzung zugute (67,2 Mio. Franken), 52 Mio. flossen in die Kernenergie und 39,3 Mio. in die erneuerbaren Energie. Für energiewirtschaftliche Grundlagen wurden 15,6 Mio. Franken aufgewendet.

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

Juni 2009

Bundesamt für Energie (BFE)

Titelbild: *Pilotprojekt zur Erforschung von revolutionären Bohrtechnologien − thermische anstatt mechanische Gesteinszerkleinerung mit Hilfe einer im Wasser stabilen Flamme. (Quelle: ETH Zürich)*

Avant-propos

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

La *Liste des projets de la recherche énergétique de la Confédération 2006/2007* renseigne sur les dépenses des pouvoirs publics au titre de la recherche énergétique ainsi que sur la composition des flux de financement. En 2007, près de 55 % des 174,2 MCHF déployés par les collectivités publiques étaient issus du Domaine des EPF. Avec une part de 15 %, l'OFEN occupait encore le deuxième rang des bailleurs de fonds, devant l'UE (10 %). La plus grande part des moyens financiers étaient inscrits au titre de l'utilisation efficace de l'énergie (67,2 MCHF), alors que 52 MCHF étaient attribués à l'énergie nucléaire et 39,3 MCHF aux sources d'énergie renouvelables. 15,6 MCHF étaient consacrés aux fondements de l'économie énergétique.

Le présent volume rassemble les rapports de synthèse annuels des chefs de programme de l'OFEN. On y trouvera décrits les progrès obtenus dans le cadre des divers projets cofinancés par l'OFEN. Il y est également fait mention des travaux de recherche accomplis grâce à d'autres moyens publics et/ou privés. Le progrès détaillé des projets est documenté dans les rapports annuels et finaux spécifiques qui peuvent être téléchargés du site www.recherche-energetique.ch. La reproduction d'extraits du présent document est autorisée, à condition d'en indiquer la source.

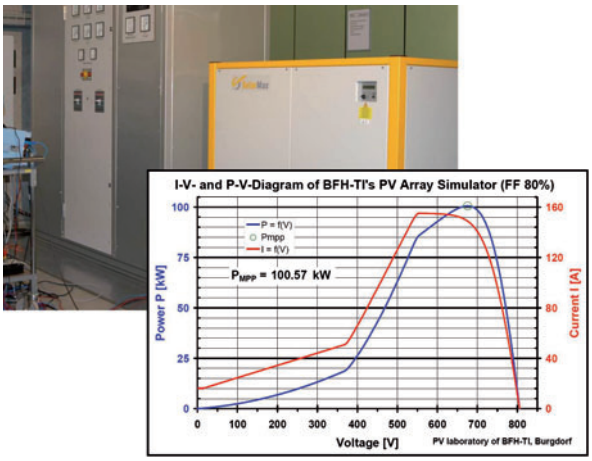
Juin 2009

Office fédéral de l'énergie (OFEN)

Page de titre: *Projet pilote pour l'étude des technologies de forage révolutionnaires − fragmentation de roche thermique au lieu de mécanique à l'aide d'une flamme stable dans l'eau. (source : EPF Zurich)*

Highlights 2008





Beschichtung, die Vereisung verhindert

Um Eisschlag und Ausfallzeiten infolge Vereisung bei Windturbinen zu vermeiden, werden die Rotorblätter üblicherweise mit einer Warmluftbeheizung versehen. In Analogie zu arktischen Fischen, bei denen Eiweisse ein Gefrieren des Blutes auch bei Temperaturen unter 0 °C verhindern, wird an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften eine Antifreeze-Beschichtung für Rotorblätter entwickelt, die auch für eisfreie Hochspannungsleitungen und Windschutzscheiben, oder für Tiefkühltruhen, die nicht mehr abgetaut werden müssen, Verwendung finden könnte.

Un revêtement contre la glace

Afin d'éviter les chutes de glace et les arrêts dus au givre sur les éoliennes, les pales des rotors sont normalement pourvues d'un chauffage à air chaud. Par analogie avec la physiologie des poissons arctiques chez lesquels des protéines empêchent le sang de geler même en deçà de 0° C, la Haute École de Zurich de sciences appliquées a développé un revêtement antigel pour les pales de rotor. Il pourrait également être employé pour rendre libres de givre les lignes à haute tension, les pare-brises, ou pour les congélateurs qu'il ne faudrait ainsi plus dégivrer.

> Seite/*page* 201

100-kW-Solargenerator Simulator

Am Photovoltaiklabor der Berner Fachhochschule Technik und Informatik in Burgdorf wurde ein 100-kW-Solargenerator Simulator aufgebaut, welcher weltweit der grösste seiner Art ist. Mit diesem Gerät können Wirkungsgradkennlinien und Maximum Power Point Tracking (MPPT) von Wechselrichtern bis zu 100 kW Leistung gemessen werden.

Un simulateur de générateur solaire de 100 kW

Le simulateur de générateur solaire de 100 kW qui a vu le jour au Laboratoire de photovoltaïque de la Haute école spécialisée bernoise Technique et informatique à Burgdorf est le plus performant de ce type au monde. Il permet de mesurer les courbes d'efficacité et le *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) d'onduleurs jusqu'à 100 kW.

> Seite/*page* 135



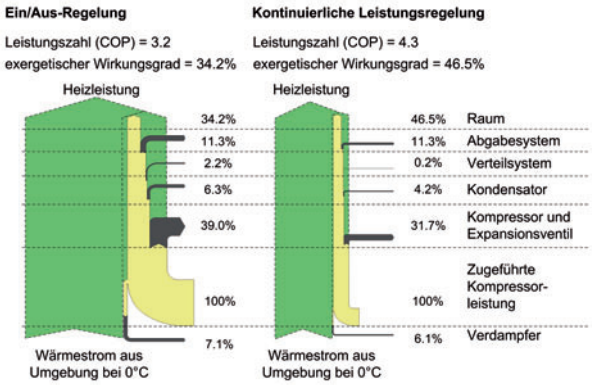
Mini-Bohrgerät für Erdwärmesonden

Ein kleines und leichtes Bohrsystem wurde für den Erdwärmesonden-Anlagenbau im Wohnbereich entwickelt. Die maximale Bohrtiefe beträgt 100-120 m. Insbesondere Erdwärmesonden-Anlagen für Minergie-Bauten sollen rasch und kostengünstig realisiert werden können. Wegen seiner kleinen Abmessungen und der geringen Lärmentwicklung lässt sich das Bohrgerät auch in dicht überbauten und schwer zugänglichen Zonen einsetzen. Ein Zufahrtsweg von 1 m Breite genügt; auch kann das Gerät per Kran platziert werden.

Un appareil de forage miniature pour sondes géothermiques

Un système de forage léger, de petite taille et se prêtant à l'installation de sondes géothermiques dans des zones d'habitation a été mis au point. La profondeur de forage maximale est de 100 à 120 m. Il devrait notamment permettre de réaliser rapidement et à moindre coût des installations de sondes géothermiques pour des bâtiments Minergie. En raison de ses faibles dimensions et des émissions sonores limitées, cet appareil de forage peut aussi être utilisé dans des zones d'habitat dense et difficilement accessibles. Une voie d'accès d'un mètre de large suffit et l'appareil peut éventuellement être mis en place avec une grue.

> Seite/*page* 191



Exergieanalyse von Luft/Wasser-Wärmepumpen

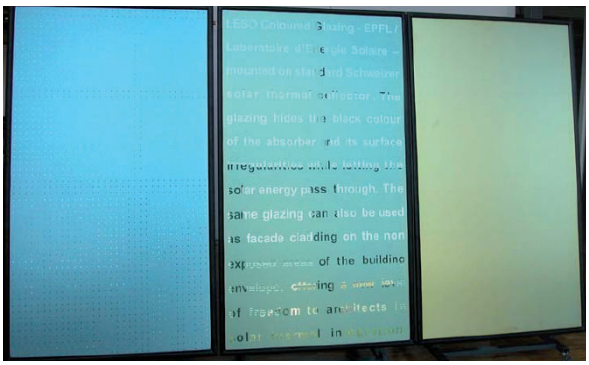
Im Projekt wird mit Hilfe der Exergieanalyse gezeigt, dass die Ursache für die mässig gute Effizienz herkömmlicher Wärmepumpensysteme in der ungünstigen Betriebscharakteristik der Ein/Aus-geregelten Wärmepumpe liegt. Mit zunehmender Aussentemperatur steigt die Leistungszahl solcher Anlagen zwar an, im Gegensatz dazu nimmt der exergetische Wirkungsgrad – als thermodynamisch einwandfreie Bewertungsgrösse – jedoch ab. Die wichtigste Massnahme zur Erreichung einer markanten Effizienzsteigerung ist die Reduktion der Temperaturgefälle für die Wärmeübertragung. Eine geeignete Leistungsregelung verbessert die Jahresarbeitszahl gegenüber der Ein/Aus-Regelung markant.

Analyse éxergétique des pompes à chaleur air/eau

Ce projet vise à montrer à l'aide de l'analyse exergétique que le rendement médiocre des systèmes de pompes à chaleur conventionnels tient à leur caractéristique de fonctionnement défavorable basé sur une régulation par tout ou rien. Quand la température extérieure augmente, leur coefficient de performance croît effectivement, mais, au contraire, leur rendement exergétique diminue également en tant que valeur thermodynamique d'évaluation fiable. La principale mesure permettant d'améliorer sensiblement ce rendement est de réduire les différences de température pour la transmission de chaleur. Une régulation ainsi adaptée améliore considérablement le coefficient de performance annuel par rapport à la régulation par tout ou rien.

> Seite/*page* 61





Aufbereitungs- und Betankungsanlage für landwirtschaftliche Biogasanlagen

Die Aufbereitung von Biogas zu Treibstoff ist eine Alternative zur Strom- und Wärmeproduktion. Am Markt erhältliche Anlagen sind jedoch gross und teuer, und somit ungeeignet für landwirtschaftliche Anwendungen. Neu ist die Kombination von Gasverdichtung und Biogasaufbereitung mit grossem Potenzial zur Kostenreduktion. Die Entspannungsdestillation ist das wirtschaftlich interessanteste Verfahren. Eine Marktstudie zeigt, dass die Aufbereitungsanlage bis zu einem Preis von CHF 350'000 im Vergleich zur Anschaffung eines zweiten Blockheizkraftwerks konkurrenzfähig ist. Ein Funktionsmuster demonstriert die Machbarkeit. Das Beispiel zeigt das Interesse von KMUs an praxisorientierten Forschungsprojekten anschaulich.

Des installations de traitement et de remplissage pour du biogaz agricole

La transformation du biogaz en carburant est une alternative à la production d'électricité et de chaleur. Les installations accessibles sur le marché sont cependant trop grandes respectivement trop chères et donc inadaptées pour l'agriculture. La nouveauté consiste à combiner la condensation du gaz et la transformation du biogaz, d'où un fort potentiel de réduction des coûts. La distillation par détente s'avère le procédé le plus rentable. Une étude révèle également que, comparée à l'achat d'une seconde centrale à énergie totale équipée, l'installation de transformation est concurrentielle jusqu'à un prix de 350'000 CHF Un modèle de fonctionnement en a démontré la faisabilité. Cet exemple illustre l'intérêt des PME pour des projets de recherche axés sur la pratique.

> Seite/*page* 163

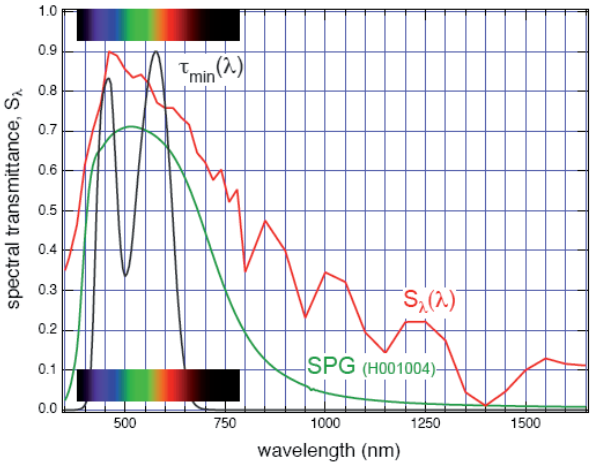
Farbige Solarkollektoren

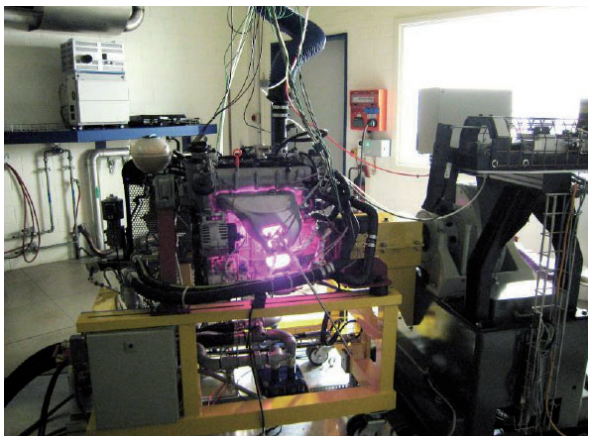
Die Montage thermischer Kollektoren in der Fassade hat gegenüber der Dachmontage mehrere Vorteile, insbesondere eine konstantere Produktion von Wärme über das Jahr und ein vermindertes Überhitzungsrisiko. Ziel dieses Projektes ist es, eine vereinfachte Anwendung von Sonnenkollektoren in Fassaden zu ermöglichen, indem der Absorber hinter einer farbigen Beschichtung versteckt wird, welche die Solarenergie durchlässt. Die Machbarkeit dieses Konzepts konnte ebenso gezeigt werden, wie die zu erreichende Qualität, jedoch muss eine ökonomisch akzeptable industrielle Produktion noch erreicht werden. Den Architekten eröffnen die neuen Gläser interessante Möglichkeiten zur Gestaltung von aktiven Fassaden mit einheitlichem Erscheinungsbild.

Des capteurs solaires en couleur

Par rapport au montage sur le toit, l'installation de capteurs thermiques en façade présente plusieurs avantages, notamment une production de chaleur plus constante sur l'année et une diminution des risques de surchauffe. Le but de ce projet est de permettre une utilisation facilitée de capteurs en façade en proposant un verre qui cache l'absorbeur derrière une couche colorée tout en laissant passer l'énergie solaire. On a pu démontrer la faisabilité du concept et la qualité que l'on peut en attendre, mais il faut encore rendre la production industrielle économiquement viable. Au niveau architectural, les caractéristiques particulières de ces nouveaux verres ouvrent également des possibilités très intéressantes en permettant l'agencement de façades actives uniformes.

> Seite/*page* 123





Neue Beschichtungen für transparente Gebäudeteile

Überhitzung von Gebäuden mit hohem Glasanteil ist ein weit verbreitetes Problem. Im vorliegenden Projekt werden kommerzielle Sonnenschutzgläser spektral-optisch, winkelabhängig und thermisch untersucht. Es wurde gezeigt, dass im Vergleich zu den aktuellen Sonnenschutzgläsern die solarthermische Belastung des Innenraums bei gleichem Lichttransmissionsgrad um einen Drittel reduziert werden kann. Erreicht wird dieser Effekt über eine konsequente Begrenzung der spektralen, M-förmigen optischen Transmission auf das sichtbare Licht. Die Machbarkeit dieses neuen Glases wurde zusammen mit der Firma Glas Trösch demonstriert und das «M-Glas» steht kurz vor der Markteinführung.

Des revêtements optiques pour les parties de bâtiments transparentes

La surchauffe des bâtiments présentant une surface vitrée importante est un problème largement répandu. Ce projet étudie des vitrages solaires commerciaux du point de vue optique, thermique et de l'angle d'incidence solaire. Il en ressort que, par rapport aux vitrages solaires actuels, la charge solaire thermique à l'intérieur du bâtiment avec un degré de transmission de lumière identique peut être réduite d'un tiers. Ce résultat est obtenu en limitant strictement à la lumière visible la transmission optique en forme de M. La faisabilité de ce nouveau vitrage a été démontrée en collaboration avec la société Glas Trösch et ce « vitrage-M » va bientôt être lancé sur le marché.

> Seite/*page* 15

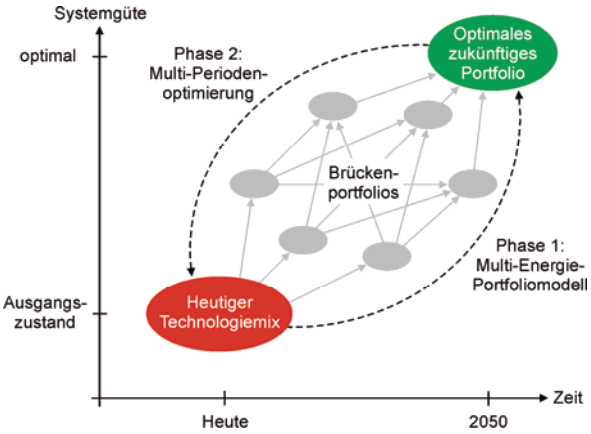
Erd-/Biogasfahrzeuge

Im CLEVER Projekt werden Technologien erforscht, um Methan (Erdgas/Biogas) in Fahrzeugen effizient nutzen zu können. Methanfahrzeuge sind angepasste Benzinfahrzeuge, welche die Kraftstoffeigenschaften nur ungenügend nutzen. Im Projekt wird eine neuartige Verbrennung erforscht und umgesetzt, zudem wird ein Hybridantrieb integriert. 2009 wird ein geräumiges Demonstrationsfahrzeug aufgebaut, welches CO_2 Emissionen im Bereich von 110 g/km aufweisen soll. Das Projekt ist eine Zusammenarbeit der Empa, der ETH Zürich sowie Volkswagen Forschung und der Robert Bosch GmbH.

Des véhicules roulant au gaz naturel/biogaz

Le projet CLEVER étudie de nouveaux procédés permettant d'utiliser de façon plus efficiente le méthane (gaz naturel/biogaz) dans les véhicules. Les véhicules à méthane sont généralement des véhicules à essence modifiés, tirant insuffisamment profit des propriétés du carburant. Ce projet a pour but d'étudier et de mettre en œuvre un nouveau mode de combustion ; de plus un moteur hybride sera entièrement élaboré. Un véhicule prototype devant émettre seulement 110 g de CO_2 par km doit voir le jour en 2009. Ce projet réunit l'Empa, de l'EPF Zurich ainsi que Volkswagen-Forschung et Robert Bosch GmbH.

> Seite/*page* 29



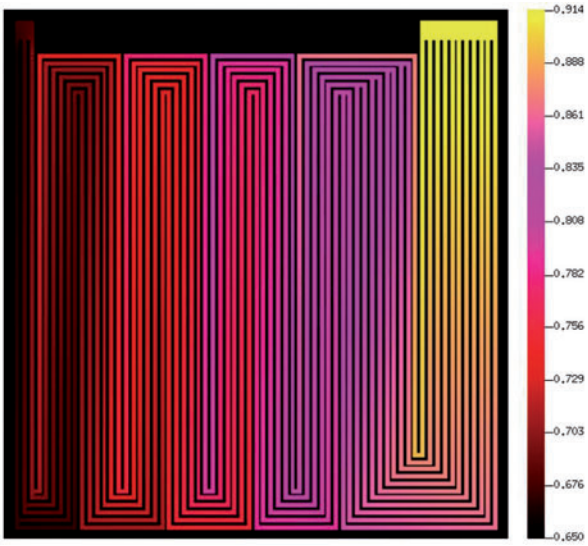
Vision of Future Energy Networks

Dieses Projekt beschäftigt sich mit der Entwicklung von Szenarien wie Übertragungs- und Verteilnetze für verschiedene Energieträger (Elektrizität, Gas, Fernwärme etc.) in 30 bis 50 Jahren aussehen können. Im Arbeitspaket Risikoanalyse und Investitionsstrategien werden Methoden entwickelt, mit denen optimale Energieerzeugungsportfolios bestimmt werden können. Ein solches Portfolio stellt einen möglichen Technologiemix zur Deckung der zukünftigen Energienachfrage dar, wobei ökonomische, ökologische und technische Kriterien gleichermassen berücksichtigt werden.

Vision of Future Energy Networks

Ce projet vise à développer des scénarios décrivant à quoi pourraient ressembler dans 30 à 50 ans les futurs réseaux de transport et de distribution de différents agents énergétiques (électricité, gaz, chaleur à distance, etc.). Dans le cadre de travaux d'analyse du risque et de conception de stratégies d'investissement, des méthodes destinées à définir des portefeuilles optimaux de fourniture d'énergie sont élaborées. Chacun de ces portefeuilles représente un mix technologique permettant de couvrir la future demande énergétique, tout en tenant compte également de critères économiques, écologiques et techniques.

> Seite/*page* 51



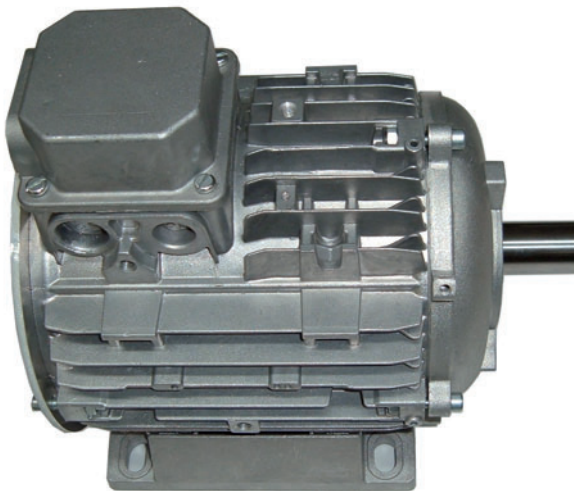
Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen

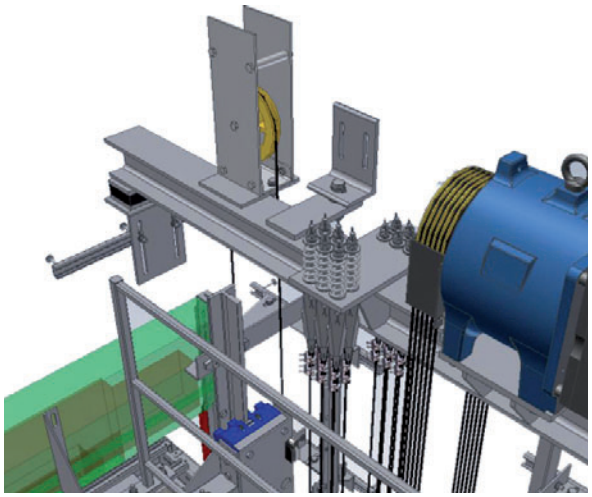
PEM-Brennstoffzellensysteme zeichnen sich durch eine kompakte Bauweise und durch eine hohe Leistungsdichte aus. Solche Systeme arbeiten bei relativ tiefen Temperaturen (~100 °C), lassen sich schnell ein- und ausschalten und besitzen hohe elektrische Wirkungsgrade von bis zu 50 %. Federführende Grundlagen- und Entwicklungsarbeiten im Bereich PEM-Brennstoffzellen finden im Labor für Elektrochemie am Paul Scherrer Institut (PSI) statt. Das Bild zeigt das Flussfeld einer Mikro-PEFC des PSI mit einer aktiven Fläche von 1 cm x 1 cm. Gemessen wurde hier der Verbrauch von Sauerstoff entlang des kathodischen Flussfeldes.

Des piles à combustible à membrane électrolyte polymère

Les piles à combustible à membrane électrolyte polymère (PEMFC) se caractérisent par leur compacité et une densité de puissance élevée. Elles fonctionnent à des températures relativement basses (~100 °C), peuvent être activées et éteintes rapidement et présentent un degré d'efficacité électrique allant jusqu'à 50 %. Le Laboratoire d'électrochimie de l'Institut Paul Scherrer (IPS) est à la pointe de la recherche et du développement sur le sujet. La photo montre le champ de flux d'une micro-pile à combustible à membrane électrolyte polymère de 1 cm x 1 cm. La mesure correspond à la consommation d'oxygène le long du champ de flux cathodique.

> Seite/*page* 99





Effizienter Permanentmagnetmotor

Obwohl bekannt ist, dass Permanentmagnetmotoren einen ausgezeichneten Wirkungsgrad aufweisen, sind diese im Moment aus wirtschaftlichen Gründen kaum auf dem Markt erhältlich. Um deren Durchbruch im Markt zu beschleunigen, wurde ein effizienter 3-kW-Permanentmagnetmotor in einem IEC-Normgehäuse als Prototyp gebaut und ausgemessen. Messungen haben einen hohen Wirkungsgrad von knapp 90 % ergeben, was höher ist als die heute gängigen, effizienten Asynchronmotoren in diesem Leistungsbereich. In einer Projektergänzung wird die Effizienz weiter erhöht und mit der Anwendung als Förderpumpe gekoppelt.

Un moteur à aimants permanents efficace

Bien qu'il soit notoire que les moteurs à aimants permanents ont un excellent rendement, ils sont actuellement quasiment absents du marché, et ce pour des raisons économiques. Afin d'accélérer leur percée, un moteur à aimants permanents de 3 kW a été installé à titre de prototype dans un boîtier normalisé IEC. Les mesures ont révélé des performances de près de 90 %, c'est-à-dire supérieures à celles des moteurs asynchrones couramment utilisés aujourd'hui dans cette gamme de puissance. Le projet va se poursuivre dans le but d'améliorer encore le rendement de ce type de moteurs et de les utiliser dans des pompes d'alimentation.

> Seite/*page* 39

Neue Technologie bei Aufzügen

Mit diesem Projekt wurde ein neuartiger Strom-Umrichter entwickelt, der eine substantielle Verbesserung der bisherigen Energieeffizienz von Aufzügen und Förderanlagen ermöglicht. Dank diesem konnte nicht nur eine Rückspeisung der Energie beim Bremsen realisiert werden, sondern der Strom-Umrichter kann beim Stillstand des Aufzugs vom Netz getrennt werden und hat damit keinen Stand-by-Verlust. Dies ist sehr bedeutend, haben doch frühere Arbeiten aufgezeigt, dass Personenlifte – insbesondere im Wohnbereich – einen Stand-by-Anteil von teilweise über 70 % am Gesamtstromverbrauch aufweisen.

Une nouvelle technologie pour les ascenseurs

Ce projet a donné le jour à un nouveau type de convertisseur de courant permettant d'améliorer nettement le rendement actuel des ascenseurs et des installations de transport. L'énergie peut non seulement être réinjectée lors du freinage, mais le convertisseur de courant peut également être coupé du réseau en cas d'arrêt de l'ascenseur, ce qui évite les pertes d'énergie dues au mode veille. Cela a son importance, sachant que des travaux précédents ont révélé que le mode veille des ascenseurs – notamment dans les habitations – peut représenter plus de 70 % de la consommation totale de courant.

> Seite/*page* 39





Effizientes Zugsmanagement der SBB

Nachdem ein erstes Projekt bei den SBB in verschiedenen Bereichen der Traktion Einsparungen in der Grösse von mehreren 100 GWh/Jahr aufgezeigt hat, wird im Folgeprojekt die Stromeinsparung durch energieeffizientes Zugsmanagement verifiziert. Dieses Projekt erfolgt in Erweiterung des bei den SBB in Entwicklung stehenden, intelligenten Zugmanagements. Der primäre Spareffekt entsteht durch Vermeidung von Signalhalten und vorausschauende Fahrweise durch Vorgabe eines optimierten Fahrprofils. Die Einsparungen werden alleine auf 100 GWh/Jahr geschätzt.

CFF : une gestion efficace du trafic

Un premier projet ayant révélé chez les CFF des potentiels d'économies de plusieurs centaines de GWh par an dans différents domaines relatifs à la traction, une nouvelle étude doit maintenant vérifier les économies d'énergie possibles grâce un écoulement fluide du trafic. Ce projet vient compléter la gestion intelligente du trafic en développement aux CFF. Les économies résultent en premier lieu de l'évitement de signaux d'arrêts et d'un style de conduite anticipatif reposant sur un profil de parcours optimisé. Les économies dues à ces seules mesures sont estimées à 100 GWh/an.

> Seite/*page* 39

Die verbrauchsabhängige Heiz- und Warmwasserkostenabrechnung

Die Kosten für Heizung und Warmwasser gerecht aufteilen und so die Mietenden zum sorgsamen Umgang mit Energie animieren. Das ist das Ziel der verbrauchsabhängigen Heiz- und Warmwasserkostenabrechnung (VHKA). Trotz der erwiesenen Wirkung und Einführung seit den 1980er-Jahren, fristet die energiepolitische Massnahme in vielen Kantonen ein Schattendasein. Im Hinblick auf die Zukunft der VHKA werden verschiedene Varianten untersucht; man könnte die VHKA in Altbauten für alle Kantone wieder obligatorisch einzuführen. Eine andere Variante empfiehlt, die Bemühungen auf Bundes- und kantonaler Ebene vollständig auf den Neubau zu konzentrieren.

Le décompte individuel des frais de chauffage et d'eau chaude

Inciter les habitants des immeubles à baisser leurs besoins en énergie en leur fournissant les informations sur leur consommation et en répartissant les coûts énergétiques en fonction de la consommation effective, c'est là l'objectif du décompte individuel des frais de chauffage et d'eau chaude (DIFC). Même si son effet est prouvé et bien que le DIFC ait été introduit depuis les années 1980, l'ampleur de sa mise en œuvre est très faible et quasiment nulle dans de nombreux Cantons. Pour mieux assurer l'avenir du DIFC, plusieurs variantes sont étudiées. L'une d'entre elles recommande l'obligation du DIFC pour les anciens bâtiments dans tous les Cantons. Une autre variante recommande de concentrer l'effort de la Confédération et des Cantons exclusivement sur les nouvelles constructions.

> Seite/*page* 249



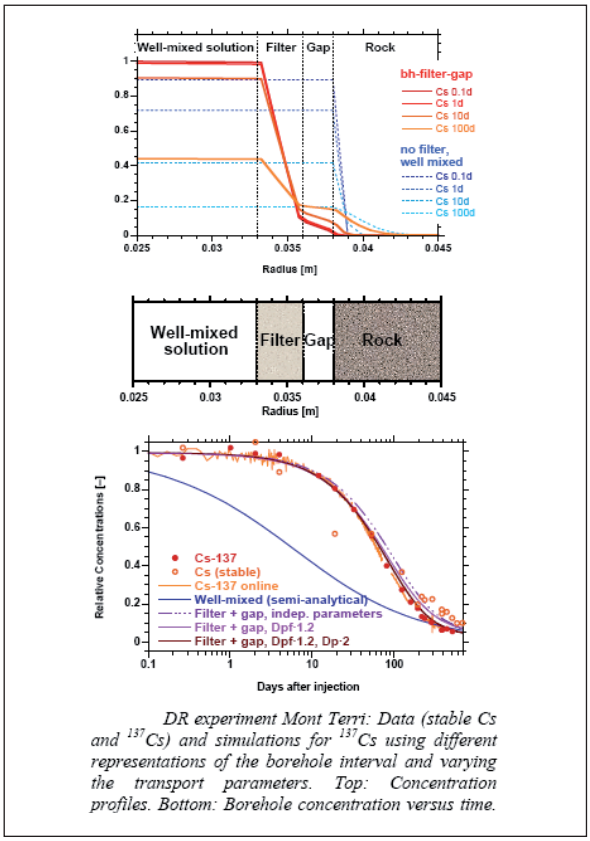
Tessiner Prototyp eines solarthermischen Konzentrators

Das Projekt Solair startete Ende 2007 und wurde 2008 erfolgreich abgeschlossen. Im Projekt der Firma ALE Airlight Energy wurde ein neues Konzept für einen effizienteren und rentableren Konzentrator zur solarthermischen Energieproduktion entwickelt. Die neue Technologie beruht auf einer aufblasbaren Struktur, welche die Sonnenstrahlung konzentriert. Dadurch sollten künftig die Kosten für solche Anlagen stark gesenkt werden können, so dass diese ökonomisch interessant werden.

Un prototype de concentrateur solaire développé au Tessin

Le projet Solair a démarré à la fin de 2007 et s'est terminé avec succès en décembre 2008. Le présent projet de la société ALE Airlight Energy a comme objectif le développement d'un nouveau concept de système de concentrateur efficace et rentable pour la production d'énergie solaire thermique. La technologie exploite une structure gonflable pour concentrer le rayonnement solaire. Cette nouvelle disposition permet de réduire les coûts d'investissement du champ de concentrateurs et promet d'être économiquement compétitive.

> Seite/*page* 153

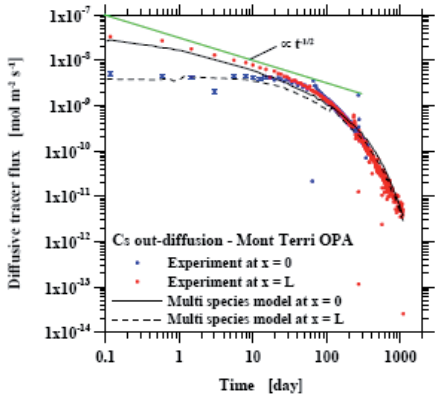


DR experiment Mont Terri: Data (stable Cs and ^{137}Cs) and simulations for ^{137}Cs using different representations of the borehole interval and varying the transport parameters. Top: Concentration profiles. Bottom: Borehole concentration versus time.

La gestion des déchets nucléaires

Dans le cadre du Plan sectoriel pour la gestion des déchets nucléaires « Dépôts en couches géologiques profondes », deux aspects prioritaires sont considérés : la sécurité à long terme et l'environnement, car les déchets doivent être isolés de l'environnement humain pour la durée de leur radiotoxicité. En octobre 2008 est présenté par la Nagra une proposition de six régions potentielles d'accueil pour les déchets faiblement et moyennement radioactifs (DFMR) et trois pour les déchets hautement radioactifs (DHR). Un rapport « Programme de gestion » a également été présenté dans lequel sont traitées, entre autres, les questions relatives aux inventaires des radionuclides et leur assignement aux différents types de dépôts.

Une étude traite de l'influence de la minéralogie, de la chimie aqueuse sur les phénomènes de sorption ; elle a abouti à des banques de données de sorption en vue des études d'évaluation de performance utilisées lors de la sélection des régions. Ces banques de données regroupent les catégories principales de roches : argileuses, granitiques et calcaires, ainsi que les diverses chimies des eaux rencontrées en Suisse. Les isotopes radioactifs constitutifs des déchets nucléaires (immobilisés dans des matrices et des conteneurs stockés en profondeur dans des couches géologiques inertes et étanches) ne doivent, à la longue, pouvoir ni se dissoudre



Blind prediction of caesium out-diffusion measurements in compacted Opalinus Clay based on the MCOTAC code incorporating a mechanistic Cs sorption model and the best-fit value for the effective Cs diffusion coefficient from through-diffusion experiment, obtained using the same model.

massivement dans l'eau, ni diffuser, ni migrer pour être transportés jusqu'à la surface.

Les travaux de R&D dans ce domaine portent sur l'immobilisation de ces éléments chimiques, soit par complexation, soit par adsorption, par la formation de carbonates sur la sorption des actinides et des lanthanides sur les argiles, dont les fameuses Argiles dites à Opalinus. Les travaux expérimentaux, tels ceux entrepris dans les galeries du Mont Terri par la Nagra, sont complétés par des modèles de transport multi-espèces (logiciel MCOTAC) qui calculent les diffusions, les sorptions et les échanges compétitifs des divers radionuclides présents dans les déchets nucléaires qui seraient dissous sous forme d'ions dans l'eau des pores des argiles.

Expériences et calculs ont porté en 2008 sur le comportement « modèle » du Césium. La valeur prédictive des analyses de sécurité sera renforcée par une compréhension améliorée de ces systèmes.

> Seite/*page* 211

Entsorgung radioaktiver Abfälle

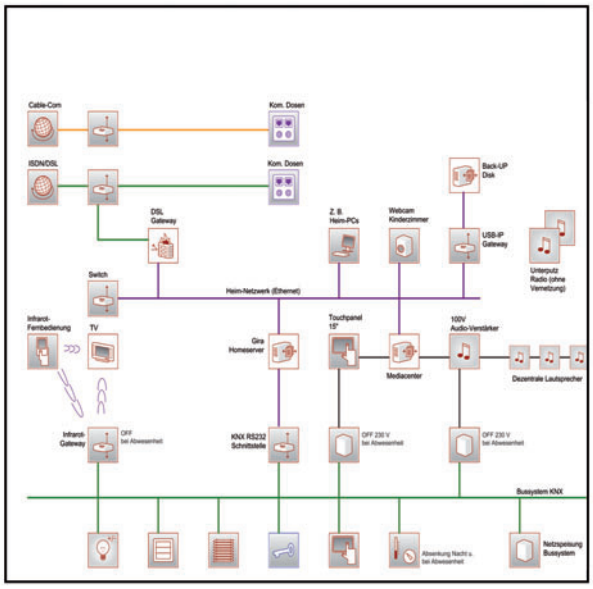
Der Sachplan «Geologische Tiefenlager» für die Entsorgung radioaktiver Abfälle berücksichtigt unter anderem Aspekte der langfristige Sicherheit und der Umwelt, da die Abfälle für die Dauer ihrer Radiotoxizität von unserem Lebensraum isoliert werden müssen. Die NAGRA schlug im Oktober 2008 sechs potenzielle Standortregionen vor für die schwach- und mittelaktiven Abfälle (SMA) und drei Regionen für die hochaktiven Abfälle (HAA). Zudem werden im «Entsorgungsprogramm» Fragen zu den Inventaren der Radionuklide und ihre Zuteilung zu den verschiedenen Arten von Lagern behandelt.

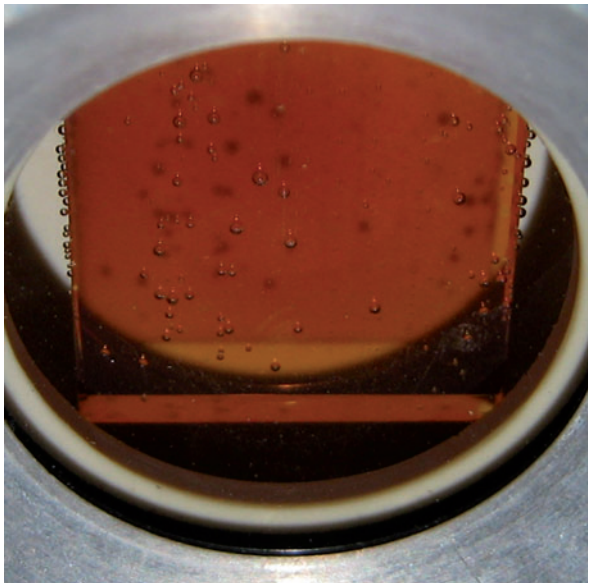
Eine Studie behandelt den Einfluss der Mineralogie und Nasschemie auf die Sorptionsphänomene. Resultate sind in Sorptionsdatenbanken zusammengefasst, und werden für die Leistungsbewertungsstudien im Rahmen der Auswahl der Regionen verwendet. Die Datenbanken umfassen die wichtigsten Gesteinskategorien – Ton-, Granit- und Kalkgestein – sowie Aspekte der Fluidchemie. Radioaktive Isotope, aus denen die Nuklearabfälle bestehen (die in Matrizen und Behältern eingeschlossen, in stabilen und dichten geologischen Schichten tiefengelagert werden), dürfen sich langfristig weder in grossem Umfang im Wasser auflösen, noch diffundieren oder migrieren und so an die Oberfläche gelangen.

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in diesem Bereich beschäftigen sich mit der Immobilisation dieser chemischen Elemente durch Komplexbildung oder Adsorption, unter anderem mit dem Einfluss der Komplexierung durch Bildung von Karbonaten auf die Sorption der Aktiniden und Lanthaniden auf die Tonminerale, darunter den berühmten Opalinuston. Die Versuchsarbeiten, die von der Nagra beispielsweise im Mont Terri durchgeführt werden, werden durch rechnergestützte Transportmodelle für komplexe Chemie (Software MCOTAC) ergänzt. Diese berechnen die Diffusionen, die Sorptionen und den kompetitiven Austausch der verschiedenen Radionuklide in den radioaktiven Abfällen, die als Ionen im Wasser des Porenraums des Tongesteins gelöst wären.

Im Jahr 2008 befassten sich die Versuche und Berechnungen mit dem Modellverhalten von Cäsium. Der Prognosewert der Sicherheitsanalysen wird durch ein besseres Verständnis dieser Systeme erhöht werden.

> Seite/*page* 211





Die Vernetzung im Haushalt muss effizienter werden

Der Vernetzung im Haushalt (Home Automation) wird eine grosse Zukunft vorausgesagt, der dadurch generierten Strommehrverbrauch dürfte aber erheblich sein. Im Projekt wurde nachgewiesen, dass eine einfache Haussteuerung mit auf dem Markt verfügbaren Komponenten nur etwa 1–3 % mehr Strom verbraucht. Parallele Messungen in zwei neu realisierten Einfamilienhäusern haben hingegen gezeigt, dass der Stromverbrauch wegen der Vernetzung um 37–54 % zunimmt. Deshalb bestehen erhebliche Einsparpotenziale. Primär verfügen die Komponenten über keine Stand-by-Funktionen, womit diverse Anlagen unnötigerweise ständig laufen.

La domotique doit être plus efficace

On prédit un grand avenir à la domotique (*home automation*). Mais la consommation d'électricité supplémentaire concomitante devrait être considérable. Le projet révèle qu'une simple gestion domotique avec les composants disponibles sur le marché ne consomme que de 1 à 3 % d'électricité en plus. Toutefois, des mesures réalisées en parallèle dans deux maisons individuelles nouvelles ont montré que la domotique fait augmenter la consommation de courant de 37 à 54 %. Il existe donc des potentiels d'économies notables, car il y a des composants qui ne disposent pas de fonction de veille ; il en découle que certaines installations fonctionnent inutilement en permanence.

> Seite/*page* 39

Eisenoxid Photoanoden zur solaren Wasserstoff-Produktion

Im Rahmen des Projekts *PEChouse* wurde 2007 an der EPFL ein Schweizer Kompetenzzentrum für Photoelektrochemie (PEC) eingerichtet. Allgemeines Ziel ist die Weiterentwicklung der direkten photoelektrochemischen Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff. Speziell sollen in dem Projekt neue Halbleiter-basierte PEC-aktive Materialien entwickelt werden, um langfristig einen Systemwirkungsgrad von 10 % für die Umwandlung von solarer Energie zu Wasserstoff zu erreichen. 2008 wurden erste, viel versprechende Resultate mit einer neuen Abscheideanlage erreicht sowie leistungsfähige Substrat-Materialien für Eisenoxid Photoanoden identifiziert.

Un projet de cellule à l'hydrogène solaire

Dans le cadre du projet *PEChouse,* un centre de compétence suisse pour la photoélectrochimie a été créé en 2007 à l'EPFL. Ses recherches portent sur la décomposition photoélectrochimique directe de l'eau en hydrogène et en oxygène. Le projet vise notamment à développer de nouveaux matériaux associant les PEC (cellules photoélectrochimiques) à base de semi-conducteurs, afin d'atteindre à long terme un degré d'efficacité de 10 % au niveau de la transformation de l'énergie solaire en hydrogène. En 2008, un nouveau séparateur a donné des résultats prometteurs et des matériaux performants pour le substrat des photo-anodes d'oxyde de fer ont été identifiés.

> Seite/*page* 99

Rapport de synthèse 2008 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2008 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Energie in Gebäuden

Charles Filleux
filleux.ren@bhz.ch



Sensolux® Beleuchtungssteuerung

Der neu entwickelte Funk-Präsenzmelder Sensolux® kann mit batterielos betriebenen Funkschaltern ergänzt werden. Projekt «Evaluation und Konzeption von Systemen zur einfachen Nachrüstung von Beleuchtungen mit Bedarfssteuerungen». (Grafik aus [27])

Programmschwerpunkte

Um die ehrgeizigen Ziele der 2000-Watt-Gesellschaft im Gebäudebereich mit Zielhorizont 2050 zu erreichen, sind verstärkte Anstrengungen notwendig. Das Programm Energie in Gebäuden strebt an, durch Schaffen von Wissen, Technologieentwicklungen und Begleitmassnahmen innovative Lösungsansätze im Sinne eines CO_2-neutralen Gebäudesektors einzuleiten. Die Sichtbarkeit von neuen Technologien und Konzepten soll mittels Pilot- und Demonstrationsprojekte erzielt werden. Das Forschungsprogramm setzt hauptsächlich auf Technologien, welche längerfristig ausgerichtet sind, ohne jedoch kurz- und mittelfristige Ziele zu vernachlässigen. Die Forschungsschwerpunkte und Ziele für die Jahre 2008–2011 sind:

Schwerpunkt 1: Gebäude- und Siedlungskonzepte für eine 2000-Watt-kompatible Bauwerksentwicklung

Es ist eine ganzheitliche, d.h. Disziplinen übergreifende Strategie sowie technologische Basis für das «Gebäude als Gesamtsystem» zu entwickeln, unter besonderer Berücksichtigung der grauen Energie und der standortinduzierten Mobilität.

Schwerpunkt 2: Konzepte, Technologien und Planungswerkzeuge für die energetische Gebäudesanierung

In Zusammenarbeit mit Industriepartnern sollen Konzepte, Technologien und Planungswerkzeuge für Gebäudeerneuerungen unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen in bestehenden Bauten (technisch, ökonomisch, konstruktiv) entwickelt werden.

Schwerpunkt 3: Heizen, Kühlen und Lüften im 2000-Watt-kompatiblen Gebäude

Entwickeln einfacher Gebäudetechnikkonzepte für Neubauten sowie für die Erneuerung des Gebäudebestands welche sich auf Verzicht fossiler Brennstoffe und Integration erneuerbarer Energien abstützen.

Schwerpunkt 4: Effizienzsteigerung beim Stromverbrauch in Gebäude

Es sind Technologien zu entwickeln, welche zu wesentlichen Verbesserungen der elektrischen Effizienz von Gebäuden und der Optimierung der Integration der Tageslichtnutzung im Gebäude führen.

Schwerpunkt 5: Innovative Materialien und Komponenten für den Gebäudebereich

Nutzen von Synergien aus Materialwissenschaften, Chemie, Physik und Nanotechnologie, um neuartige Baustoffe und Komponenten zu entwickeln.

Pilot- und Demonstrationsprojekte (P+D)

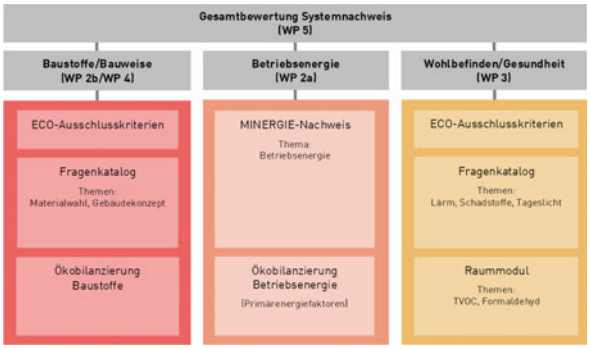
Förderung von Leuchtturmprojekten zur Demonstration von Schlüsseltechnologien mit Fokus auf die Gebäudesanierung sowie Erstanwendungen neuer Technologien und Systeme in Neubauten und Bestandsbauten.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2008

Ende 2008 waren im Forschungsprogramm 49 Projekte angesiedelt. Die Zahl der P+D-Projekte konnte wieder leicht erhöht werden, so dass derzeit 6 P+D-Projekte im Gang sind. Im Berichtsjahr konnten 19 Projekte abgeschlossen werden. Dazu kommen 24 Jahresberichte aus laufenden Projekten.

Gebäude- und Siedlungskonzepte für eine 2000-Watt-kompatible Bauwerksentwicklung

Mit dem Projekt *Systemnachweis Minergie-Eco* [1] wurden erfolgreich die Methoden und Softwarebausteine geschaffen, die den Betriebsenergieverbrauch, die Umweltbelastung durch Baustoffe und die gesundheitlichen Aspekte eines Gebäudes in einem benutzerfreundlichen EDV-Werkzeug zusammenführen und quantifizieren. Dieses Werkzeug soll die Basis für das Label Minergie-Eco bilden, wobei andere Energiestandards (SIA Normen 380/1, 380/4, SIA-Merkblatt 2031 und Minergie) ebenfalls mit eingebunden werden. Das Projekt baut auf den bereits vorhandenen anerkannten Grundlagen wie dem Gebäudelabel Minergie-Eco, der Software Lesosai, der KBOB/Ecobau/IPB-Empfehlung «Ökobilanzdaten im Baubereich», dem elektronischen Bauteilkatalog, den SIA-Merkblättern 2031 «Energieausweis für Gebäude» und 2032 «Graue Energie» sowie diversen SIA-Normen auf und soll somit für eine hohe Akzeptanz sorgen. Um die verschiedenen Aufgaben hierzu themenspezifisch zu gliedern, wurde das Projekt in verschiedene Workpackages (siehe Figur 1) unterteilt. Weiter ist in Figur 1 der Aufbau des Systemnachweises dargestellt. Gut zu erkennen sind hierbei die drei Bereiche Baustoffe/Bauweise, Betriebsenergie und Wohlbefinden/Gesundheit, für die es eine quantitative Berechnungsmethode gibt (Ökobilanzierung,



Figur 1: Aufbau und Bestandteile des Systemnachweises, Minergie-Eco. (Grafik aus [1])

Energienachweis, teilweise Fragenkatalog und Raummodul). Diese teilweise quantitativen Berechnungsmethoden sollen die heutigen angewandten qualitativen und halb-quantitativen Bewertungsverfahren von Minergie-Eco ablösen.

Der Einsatz des Systemnachweises kann sowohl für Neubauten als auch für Sanierungen erfolgen. Für letztere wurde ein separates Berechnungsverfahren entwickelt. Zur Überprüfung der Methodik wurden 13 verschiedene Gebäude analysiert und die Resultate auf ihre Plausibilität getestet, um schliesslich Beurteilungswerte abzuleiten und festzulegen. Das Fazit der untersuchten Gebäude zeigt, dass die Bewertung sehr streng ist. Das hat zur Folge, dass die Anforderungen schon in einer frühen Planungsphase berücksichtigt werden müssen, um Minergie-Eco erreichen zu können.

Mit der Version 2.0 des Programms *Energy Design Guide II (EDG II)* [2], das auf der an der ETH entwickelten Methodik der Klimaflächen basiert, wurde in diesem Jahr das Simulationsprogramm weiter entwickelt und die Benutzerfreundlichkeit verbessert. Eine Erweiterung gegenüber dem früher entwickelten EDG I ist die neu geschaffene



Figur 2: Jahresrun, Abbildung der Temperaturverläufe, Leistungsverläufe und Sonnenschutz, Nachtauskühlung und Komfortband. (Grafik aus [2])

Möglichkeit der quantitativen Optimierung, wodurch der Leistungs- und Energiebedarf direkt abgelesen werden kann. Um diese Verbesserungen bzw. neuen Entwicklungen auf ihre Plausibilität zu prüfen, wird anhand zweier konkreten Beispiele untersucht, inwieweit die in früheren Untersuchungen vorgeschlagenen Verbesserungen qualitativ eingearbeitet sind bzw. wie sie zu handhaben sind.

Da rund 80 % der folgenreichsten Entscheidungen für den Planungsablauf in den ersten 20 % des Planungsprozesses getroffen werden, wurde im November 2008 das Projekt *Design Performance Viewer 2.0 – Evolution und Weiterentwicklung* [3] gestartet. Mit dem momentan bestehenden, prototypisch entwickelten Softwaretool kann derzeit eine grobe Analyse von Energieflüssen, Exergieflüssen, Systementscheidungen und der Kosten in einem sehr begrenzten Umfang erstellt werden. Dieses Softwaretool soll weiter entwickelt werden, damit eine verfeinerte Analyse sowie eine grössere Anwendbarkeit möglich wird. Durch die verbesserte Bedienerfreundlichkeit des Tools soll nachhaltiges Planen gefördert werden.

Neben drei weiteren Projekten in Lausanne, Luzern und Zürich ist auch das über 100 Hektar grosse Basler Gundeldingerfeld im Projekt *Nachhaltigkeitsprojekte auf dem Gundeldingerfeld in Basel* [4] mehr als fünf Jahre lang untersucht und fertig gestellt worden. Bei der Suche nach Kriterien zur nachhaltigen Quartiersentwicklung wurden folgende fünf Themen vertieft analysiert: Ökologie Gebäude, Ökologie Mobilität, Raumplanung, Gesellschaft und Wirtschaft. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass sich die Nachhaltigkeitsprojekte auf dem Grundeldingerfeld nicht nach den allgemein gültigen Projektierungs- und Finanzierungsgrundsätzen realisieren lassen, sondern die bestehende Ausgangslage wie die tatsächlichen Bedürfnisse der Nutzer und deren Zahlungsbereitschaft absolut bestimmende Faktoren für die Weiterentwicklung und die Optimierung der Bausubstanz sind. Mit der Fertigstellung des Projektes *Die Wirkungen von MuKEn, Minergie und Minergie-P – kombinierte Energie und Kostensimulation zur Untersuchung der Auswirkungen des Bauherrenentscheides für einen Standard bezüglich Kosten* [5] ist anhand von 38 Gebäuden untersucht worden, welche Kosten entstanden wären, wenn die anderen Standards mit dem vorliegenden Gebäude umgesetzt worden wären. Durch die Berechnungen mit einem Energiebilanztool sind die Gebäude bezüglich Kosten und Ertragssimulation verglichen worden. Dabei wurden die verschiedenen Bauteile schrittweise optimiert, wobei immer das Bauteil verbessert wurde, welches das beste Kosten-Nutzenverhältnis aufwies. Die Ergebnisse der Auswertung zeigen eine gute Übereinstim-

mung mit den vom Verein Minergie publizierten Kostenangaben. Weiter zeigte sich, dass die Kosten innerhalb eines Gebäudestandards aufgrund der Qualität und Ausführung sehr unterschiedlich sein können, sowie dass die Gebäudeausrichtung, die Kompaktheit und die Wärmebrücken dabei eine zentrale Rolle spielen. Ziel des Projektes *CO_2-minimiertes Bauwerk – Systemische Betrachtung von klimagerechten Bauten* [6] ist das Erstellen eines ganzheitlichen und Disziplin übergreifenden Grundlagenpapiers zur Thematik klimagerechter Bauwerke sowie das Formulieren einer Definition, die der Komplexität von klimagerechten bzw. Treibhausgas minimierten Bauwerken gerecht wird. Die Auswirkungen verschiedener Vorgaben im SIA-Effizienzpfad auf die Erreichung der 2000-Watt-Gesellschaft per 2050 sollen im Verlauf des Projekts *Vorstudie zum Gebäudeparkmodell Schweiz – Machbarkeitsuntersuchung anhand des neuen SIA-Effizienzpfades Energie* [7] unter Berücksichtigung des gesamtschweizerischen Gebäudeparks ermittelt werden. Das Projektziel ist es, eine Aussage darüber zu machen, ob und unter welchen Bedingungen und mit welchen notwendigen Zwischenschritten die für das Jahr 2050 vorgeschlagenen Maximalwerte der 2000-Watt-Gesellschaft erreicht werden können. Dies soll mittels einer energiewirtschaftlich basierten dynamischen Bottom-up-Modellierung mit der Systemgrenze Schweiz, die die unterschiedlichen Strukturen des Gebäudeparks (Bauperioden, Sektoren und Nutzung) abbildet, erreicht werden. Der im 2007 erstellte und erfolgreich eingesetzte elektronische Bauteilkatalog ist mit rund 100 Konstruktionen aus dem BFE-Sanierungskatalog ergänzt worden: *Integration des BFE-Sanierungskatalogs in den elektronischen Bauteilkatalog* [8]. Dabei sind die aktuellen Ausgaben von KBOB/Ecobau/IPB-Empfehlung «Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1» berücksichtigt worden. Methodisch wurde den Regeln des SIA-Merkblatts 2032 «Graue Energie von Gebäuden» gefolgt. Mit *Swisswoodhouse – ein Gebäude für die 2000-Watt-Gesellschaft* [9] wurde 2008 ein Projekt gestartet, bei dem ein Gebäudekonzept in Holzbauweise entwickelt wird, welches durch seine grosse Individualität bezüglich Raumkomfort und Architektur eine Alternative zu zersiedelten Einzelgebäuden (EFH) bietet und für die 1-zu-1 Umsetzung in die 2000-Watt-Gesellschaft geeignet ist. Aus energetischer Sicht ist dazu der Minergie-P-Standard Voraussetzung. Für die weitere Zielsetzung eines «Gesamtsystems Gebäude» soll hier auch der Ressourcenbedarf beachtet werden (graue Energie ca. 100 MJ/m^{2}a). Während der Kostenoptimierung hat sich gezeigt, dass die gewählte Grösse des Gebäudes (Swisswoodhouse, 1'200 m^2, 10 Wohnungen) zu hohen Kosten führt, welche sich jedoch bei einer konventionellen Bauweise stark ähneln. Deshalb wird weiterhin an dem Gesamtsystem festgehalten, wobei bis Sommer 2009 ein Investor gefunden werden muss. Neben dem BFE wird Swisswoodhouse auch vom BAFU gefördert. Im Zuge des inzwischen abgeschlossenen Projekts *Sommerlicher Wärmeschutz bei Wohngebäuden in Holzbauweise* [10] wurde in einer umfangreichen Messreihe das thermische Verhalten, insbesondere der Einfluss der Bedienung des Sonnenschutzes und Fensterlüftung von insgesamt acht Wohngebäuden untersucht, die dem Minergie-Standard entsprechen und im Systemholzbau realisiert wurden. Die wesentlichen Erkenntnisse aus der Untersuchung sollen als Minergie-Flyer publiziert werden und als Basis zur Präzisierung der Minergie-Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz von Wohngebäuden in Holzbauweise dienen. Bereits jetzt können bezüglich der Anpassung der Kriterien zur Globalbeurteilung des sommerlichen Wärmeschutzes von Holzbauten im Minergie-Nachweis einige Empfehlungen abgeleitet werden. Im Herbst 2008 wurde das Projekt *Gesamtenergieeffizienz von Minergie-P-Wirtschaftsbauten – Optimierung der Gebäudehülle vs. Optimierung der Gesamtenergieeffizienz* [11] gestartet. Hintergrund dieses Projektes ist, dass der Verein Minergie seit 2003 mit dem Standard Minergie-P einen Wegweiser aufgestellt hat, der aufgrund der aktuellen Energie- und Klimasituation weit über den Wohnbau Akzeptanz findet. Gerade bei Dienstleistungsbauten stellt sich aber die Frage, ob durch die extrem gute Gebäudehülle kombiniert mit den typischerweise hohen internen Lasten nicht zusätzlicher Kühlenergiebedarf erzeugt wird, so dass die Gesamtenergiebilanz negativ beeinträchtigt wird. Ziel des Projektes ist es deshalb, mittels thermischen Simulationen zu überprüfen, ob die Vorgaben von Minergie-P für Bürobauten im Sinne der Gesamtenergiebetrachtung die richtigen Anreize setzen (Betrachtung: Primärenergie für Wärme, Kälte und Beleuchtung).

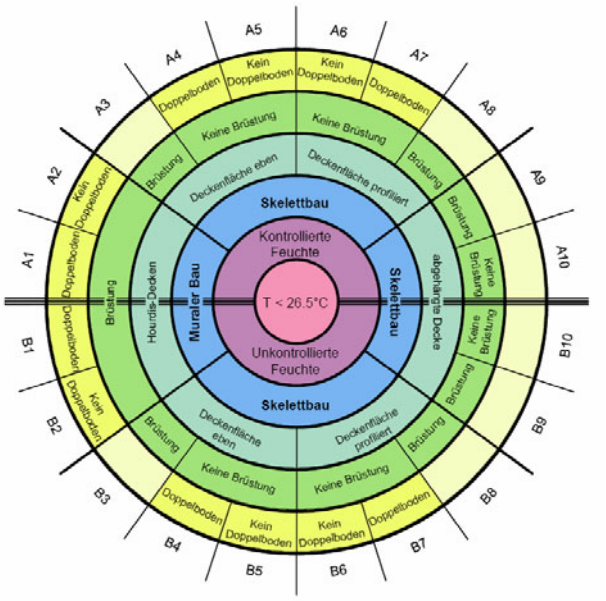
Konzepte, Technologien und Planungswerkzeuge für die energetische Gebäudesanierung

Im Rahmen der Projekte zur nachhaltigen Quartierentwicklung bestand die Aufgabe darin, die beiden Werkzeuge Retrofit Advisor und Epiqr+ miteinander zu vergleichen: *Analisi comparativa degli strumenti Retrofit Advisor e Epiqr+* [12]. Hierzu wurden fünf Gebäude in Chiasso ausgewählt. Beim Retrofit Advisor sind drei Eingriffstiefen möglich. Die Programmführung erlaubt es auch Nichtfachpersonen das Werkzeug zu benutzen. Epiqr+ ist eher für vertiefte Untersuchungen geeignet und ermöglicht die Definition mehrerer Massnahmepakete. Die Berechnung der Kosten für

die Sanierung mit den beiden Tools führt zu stark unterschiedlichen Resultaten. Das Projekt *Nachhaltige Quartiersentwicklung Grünau-Werdwies Zürich – Auswirkungen der Ersatzbauten Bernerstrasse/Werdwies* [13] startete im Frühjahr 2008. Darin werden die Auswirkungen der Ersatzbauten Werdwies (vormals Bernerstrasse) im Grünauquartier Zürich in den Bereichen ökologisches Bauen und Energieverbrauch, Wirtschaftlichkeit, soziale, gesellschaftliche und versorgungsbezogene Aspekte detailliert untersucht. Dazu wurden Administrativdaten, Daten der Liegenschaftenverwaltung der Stadt Zürich, Interviews mit Akteuren und Quartier-Stakeholdern sowie Befragungen der Bewohner/innen der städtischen Siedlung verwendet. Mit neuen Lösungen für die Wohnbauerneuerung auf Basis standardisierter Renovationsmodule sowie eines gesamtheitlichen Renovationskonzepts befasst sich das Projekt *IEA-ECBCS Annex 50 Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Buildings* [14]. Im Rahmen einer internationalen Zusammenarbeit ist das definierte Ziel, Bauerneuerungen zu realisieren, die dem Stand von Minergie-Neubauten entsprechen. Das Projekt *Wohnbausanierung auf tiefstem Energieverbrauch – IEA-SHC Task 37: Advanced Housing Renovation by Solar & Conservation* [15] befasst sich europaweit erfolgreich mit Sanierungsprojekten, bei denen Energieeinsparungen bis zu 80 % erreicht werden. Da aus diesen Erfahrungen enorm viel gelernt werden kann, und so die Hemmnisse von Bauherren abgebaut werden können, wird in diesem BFE-Projekt, welches sechs nationale Objekte umfasst, eine systematische Dokumentation erstellt, in der bewährte Detaillösungen für die Ausführung neuer Sanierungen bereitgestellt werden.

Heizen, Kühlen und Lüften im 2000-Watt-kompatiblen Gebäude

Die Ergebnisse der abgeschlossenen Arbeiten des Projektes *CO_2-gesteuerte Lüftungen in Schulen (Energieeinsparungen durch CO_2-gesteuerte Lüftungen)* [16] zeigen, dass mechanisch gelüftete Schulräume bei richtigem Betreiben in der Lage sind, optimale Luftbedingungen bei minimalem Energieverbrauch zu gewährleisten. Hierbei ist jedoch anhand von Messungen an drei verschiedenen Schulen mit unterschiedlichen Lüftungssystemen festgestellt worden, dass bei den heutigen Lüftungsanlagen viele Betriebsprobleme vorhanden sind. Bezüglich der CO_2-Steuerung verschiedener Schulräume wird ersichtlich, dass bei stark variierenden bzw. schwachen Belegungen eines Schulraumes die Art der Steuerung durchaus von Bedeutung sein kann. Im Vergleich mit den gemessenen Schulräumen der verschiedenen Schulen kann sich aus dem Lüftungsbetrieb mittels einer CO_2-Steuerung gegenüber einer Zeitsteuerung bis zu 40 % Energieeinsparung ergeben. Mit dem Einsatz von Kühlsystemen bei der Sanierung von Dienstleistungsgebäuden hat sich das Projekt *Hocheffiziente Kühlsysteme für Gebäudesanierungen* [17] beschäftigt. Im Projektverlauf wurden hocheffiziente Alternativen zur konventionellen Klimaanlage definiert und auf ihre Einsetzbarkeit und Effizienz im Betrieb hin untersucht. Das Ergebnis des inzwischen abgeschlossenen Projektes ist ein Überblick über die am Markt erhältlichen effizienten Kühlsysteme für Raumkühlung. Dieser Überblick soll in einer Broschüre für Bauherren und Architekten zusammengestellt werden, die einen Vergleich von den untersuchten Kälteabgabe- und -erzeugersystemen und eine Entscheidungshilfe (vgl. Figur 3) beinhaltet. Um zusätzliche Aussagen über ein energieeffizientes Gesamtsystem zu erhalten, wurden an einem Beispielobjekt über einen Zeitraum von 2 Monaten im Sommer 2007 Messungen durchgeführt und ausgewertet. Die Erkenntnisse aus dieser Messreihe fliessen ebenfalls in die Broschüre ein.



Figur 3: Entscheidungshilfe, Teil Abgabesysteme. (Grafik aus [17])

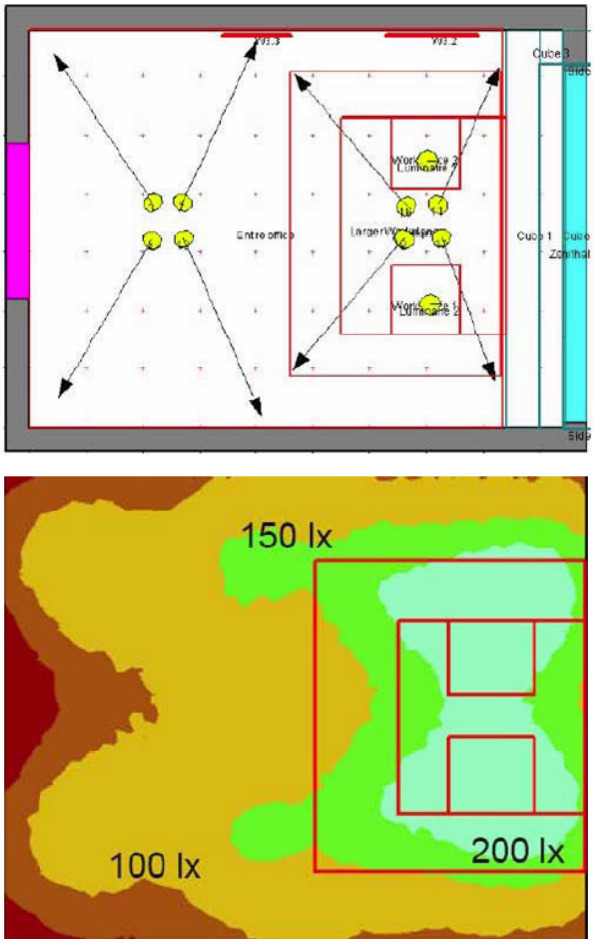
Im Projekt *Konventionelle Wärmeabgabesysteme und deren Regulierung für die Raumkühlung* [18] soll eine Raumtemperaturregulierung für konventionelle Wärmeabgabesysteme entwickelt werden, die sowohl im Winter als auch im Sommer für die Raumkonditionierung (Heizen und Kühlen) eingesetzt werden kann. Hierbei liegt das Augenmerk auf der Entwicklung eines umkehrbaren Thermostatventils bzw. Thermostatkopfs, welcher wahlweise den Heiz- und Kühlbetrieb reguliert. Ein weiteres Projektziel ist es, messtechnisch und rechnerisch zu untersuchen, wie weit Heizkörper- und Bodenheizsysteme für

die Raumkühlung eingesetzt werden können. Aufgrund der Tatsache, dass in den letzten Jahren europaweit ein Anstieg des Energiebedarfs für die Gebäudekühlung zu beobachten war, wurde das Projekt *Passive Cooling of Buildings by Nighttime Ventilation* [19] bearbeitet und erfolgreich abgeschlossen. Hierbei wurde festgestellt, dass trotz der vorhandenen passiven Kühlsysteme diese nur bedingt eingesetzt werden, was auf die Unsicherheiten in der Prognose der thermischen Komfortbedingungen zurückzuführen ist. Da die Effektivität der Nachtkühlung stark von den klimatischen Randbedingungen des Standorts abhängig ist, wurde eine Methode zur Quantifizierung des klimatischen Kühlpotenzials entwickelt und der Einfluss des Klimawandels untersucht. Mittels Gebäudesimulationen sowie Testraumversuchen wurden verschiedene Nachtkühlungen in Kombination mit Mischlüftung und Verdrängungslüftung an der Universität Aalborg untersucht. Aus diesen gewonnen Erkenntnissen wurde eine Methode entwickelt, die eine Abschätzung der möglichen Anwendung von Nachtlüftung schon während einer frühen Planungsphase ermöglicht. Für die Auslegung von Luft-Erdwärmetauschern wird im Projekt *Easypipes* [20] in Ergänzung zu bestehenden quasistationären Berechnungstools für das dynamische Simulationsprogramm TRNSYS eine neue Routine (Type 260) entwickelt. Ziel des Projektes *IEA-ECBCS Annex 42 FC+Cogen-Sim – The Simulation of Building-Integrated Fuel Cell and other Cogeneration Systems* [21] war die experimentelle und simulationsbasierte Untersuchung der Leistungsfähigkeit kleiner Brennstoffzellen- und anderer Mikro-WKK-Geräte für den Einsatz in Wohngebäuden. Im Rahmen dieses Projektes wurden typische Bedarfsprofile für Haushaltsstrom definiert, Modelle für Micro-WKK-Systeme entwickelt und in bestehende Simulationsprogramme implementiert sowie verschiedene Systemkonfigurationen anhand der erstellten Modelle berechnet. Daraus resultierte eine generelle Methodik, mit der ein bezüglich Energie, Emissionen und Kosten optimales Einsatzgebiet solcher Geräte eruiert werden kann. Damit steht nun ein Instrumentarium zur Verfügung, um sinnvolle Einsatzbereiche für Mikro-WKK-Geräte für Wohngebäude und Gebäude ähnlicher Nutzung zu ermitteln. Untersuchungen an verschiedenen Klimatisierungssystemen, die nach dem offenen Absorptions-Prinzip funktionieren, wurden bereits in den 1980er Jahren durchgeführt. Das Potential zur Steigerung der Energieeffizienz wurde bei Forschungen aufgezeigt, was Mitte der fünfziger Jahre zum Bau solarbetriebener Systeme führte. Aus verschiedenen Gründen war diese Technologie nicht konkurrenzfähig gegenüber etablierten Technologien, jedoch konnte die Identifizierung der Hauptursachen des Misserfolges wie z.B. Korrosion oder Aerosole in der Zuluft aufgezeigt werden. Diese Hauptursachen wurden im Sommer 2008 im Projekt *Open Absorption System for Cooling and Air Conditioning using Membrane Contactors* [22] näher untersucht. Hierbei wurden innovative Lösungen für das Korrosionsproblem (ausschliessliche Verwendung von Kunststoffen) und zur Effizienzsteigerung des Absorptionsprozesses (Stabilisierung der Arbeitstemperatur) erfolgreich geprüft. Ebenfalls mit Lüftungsgeräten befasst sich das Projekt *Haustechnik-Kompaktgeräte, Erkenntnisse aus der Praxis* [23]. Aufgrund der Tatsache, dass bei Minergie-P-Bauten der Heizleistungsbedarf bei ca. 10–15 W/m^2 liegt, können zur Erfüllung der Funktionen Heizen, Lüften und Wassererwärmung neue Technologien wie Haustechnik-Kompaktgeräte eingesetzt werden. Das bedeutet, dass der relativ geringe Heizwärmebedarf über die Zuluft abgedeckt wird und somit kein hydraulisches Heizsystem benötigt wird, was zu namhaften Kosteneinsparungen führt. Durchgeführte Messungen zweier von gesamthaft drei Minergie-P-Gebäuden zeigen, dass sich die Raumlufttemperaturen, Warmwasserverfügbarkeit und die Luftqualität im komfortablen Bereich bewegen. Die von Minergie-P verlangten Energie-Verbrauchszahlen werden ausser bei erhöhten Raumtemperaturen (>23 °C) weit gehend eingehalten. Trotz zunehmender Sensibilisierung der Gebäudebesitzer auf Umweltfragen gibt es bisher keine Möglichkeit, die Energieflüsse in Gebäuden (v. a. Heizenergie und Stromverbrauch) automatisiert und kostengünstig zu überwachen und im Internet darzustellen. In der Hauptphase des Projektes *Energie im Gebäude online (Egon)* [24] soll dem Abhilfe geschaffen werden. Mit Hilfe einer Vor-Ort-Messung des Energieverbrauchs sowie entsprechenden Berechnungen aus Wettermodellen und Satellitenbildern können die Aussentemperatur und die Einstrahlung bestimmt und danach automatisch einem Server zur Auswertung gesendet werden. Es zeichnet sich ab, dass sich bereits nach wenigen Messtagen der Jahresenergieverbrauch relativ zuverlässig prognostizieren lässt. Auswertungen im kommenden Jahr sollen zeigen, wie robust und zuverlässig die berechneten Resultate sind. Im Projekt *Energiesparpotential von Hausautomation für das private Wohnen in der Schweiz* [25] konnten die gewünschten Ziele des Erfassens des thermischen und elektrischen Energiebedarfs von repräsentativen Wohnräumen aufgrund mangelnder Zusagen verschiedener Liegenschaftsbesitzer nicht erreicht werden. Aus diesem Grund wurde vom Projektkonsortium in einer frühen Phase des Projektes die vorläufige Sistierung beantragt.

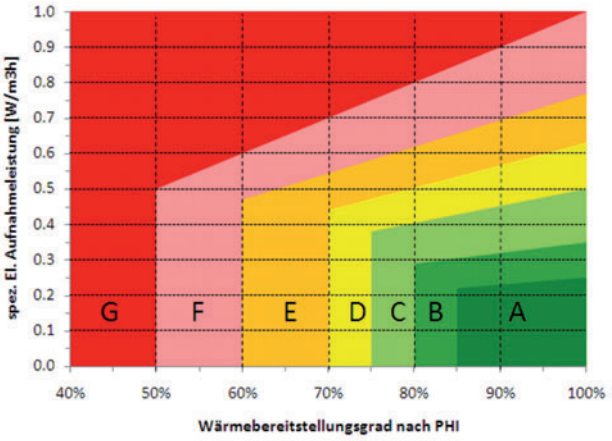
Effizienzsteigerung beim Stromverbrauch in Gebäuden

Die grossen technischen Fortschritte bei den Komponenten der natürlichen wie auch künstlichen Beleuchtung werden es zukünftig ermöglichen, kombinierte Beleuchtungssysteme mit einer installierten Leistung von weniger als 3 W/m^2 zu erreichen. Dies zeigt das Projekt *High performance Integrated Lighting Systems (Green lighting)* [26]. Im Rahmen dieses Projekts wird der Einsatz von LED an einem Arbeitsplatz an der EPFL erprobt und mit umfangreichen Messungen begleitet. Die Aktivitäten im Projekt finden Eingang in das internationale Projekt *IEA-ECBCS Annex 45 Energy Efficient Electric Lighting of Buildings.*

Ebenfalls Energieeinsparpotenziale sollen mit dem Abschluss des Projektes *Evaluation und Konzeption von Systemen zur einfachen Nachrüstung von Beleuchtungen mit Bedarfssteuerungen* [27] aufgezeigt werden. Da ein Nachrüsten von bestehenden Beleuchtungen mit Bedarfssteuerungen oft ästhetisch unbefriedigend und installationstechnisch aufwändig ist, werden bei diesem Projekt anhand bestehender Beleuchtungsinstallationen verschiedene Sanierungskonzepte entwickelt, die eine einfache Umrüstung auf eine Bedarfssteuerung mit Präsenzmeldern ermöglichen. Aufgrund dieser Konzepte wurde von einem Industriepartner (Firma Hardmeier Electronics) ein Funk-Präsenzmelder (PIR) entwickelt, der mittels einer installierten indoor Fotozelle gespeist wird und somit ohne jegliche Versorgungsleitung montiert bzw. installiert werden kann. Verschiedene Pilotanlagen haben hierbei die Neuentwicklung erfolgreich bestätigt. Auch Wirtschaftlichkeitsberechnungen zeigen deutlich, dass eine nachgerüstete Bedarfssteuerung sowie der Einsatz in Neuanlagen durchaus Erfolg versprechend sind. Eine übliche Massnahme, um in Gebäuden Energie zu sparen, ist die Anpassung der Betriebszeiten der haustechnischen Anlagen an die jeweiligen Belegungszeiten. Hilfsmittel wie Zeitschaltuhren, CO_2-Fühler oder 4-Zeilen-Displays von Heizungsanlagen stehen zwar zur Verfügung, jedoch sind diese entweder aufgrund der unregelmässigen Belegung einzelner Räume oder wegen der komplizierten Bedienung der Programmierung nicht immer optimal anzupassen. Um die Betriebszeiten auf die tatsächlichen effektiven Belegungszeiten abzustimmen, wird im Projekt *Internetbasiertes Reservationssystem – Internetbasierte Einstellung von Zeitsteuerungen haustechnischer Anlagen* [28] ein Internet basiertes Reservationssystem entwickelt, welches den Benutzern erlaubt, die Raumbelegung auf einer Webseite anzumelden. Das Reservationssystem, das mit den haustechnischen Anlagen kommuniziert, soll die optimale Einstellung der Absenkzeiten ermöglichen und entsprechend Energie sparen. Es wurde in zwei Versuchsobjekten erfolgreich installiert und kann unter www.hetag.ch online betrachtet werden. Das Projekt *Reduktion des Elektrizitätsverbrauchs von Klein-Lüftungsanlagen* [29] wurde 2007 gestartet, da in der Schweiz seit 2005 ein jährlich stark steigender Absatz von Komfortlüftungsgeräten, insbesondere im Bereich der Luftvolumenströme bis zu 350 m^3/h, festgestellt wurde (Quelle: www.energie-cluster.ch). Ziel hierbei ist es, dass bei der Geräteentwicklung der Zielwert des SIA-Merkblatt 2023 von 0,2 W/(m^3/h) eingehalten wird, was nur mit einem optimalen Luftverteilsystem mit geringem Druckverlust erreicht werden kann. Eine durch den Energie-Cluster eingeführte Deklaration für Komfortlüftungsgeräte verwendet für die Energie-Effizienzklasse die spezifische Ventilatorleistung p_{SPF} sowie den Wärmebereitstellungsgrad nach «Passivhaus Institut» bei Nennluftstrom. Entsprechend dieser Kombinationen ergibt sich eine Klasseneinteilung (siehe Figur 5).



Figur 4: Kombination von künstlicher Beleuchtung mittels LED und natürlicher Beleuchtung basierend auf dem Prinzip anidolischer Lichtlenkung. Oberes Bild: Verteilung und Ausrichtung der LED an der Decke; unteres Bild: Beleuchtungsintensität auf der Höhe der Arbeitsfläche bei 80 Lumen/Watt Lichtleistung. (Grafik aus [26])



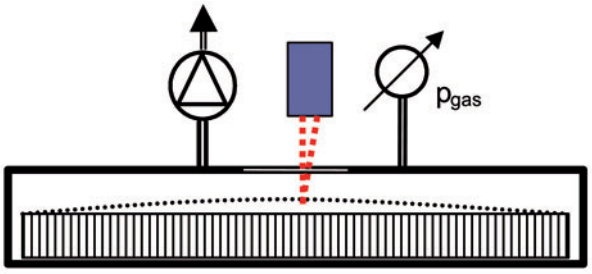
Figur 5: Kombinierte energetische Beurteilung. (Grafik aus [29])

Ein Vergleich von gemessenem Stromverbrauch in einem Bürogebäude mit berechneten Werten auf der Basis von SIA 380/4 bzw. SIA Richtlinie 2024 zeigt grössere Abweichungen: Die berechneten Werte sind deutlich höher. Da nicht in jedem Fall detaillierte Messwerte ermittelt werden können, wird im Projekt *Prevision et justification des consommations d'électricité pour 3 categories de bâtiment* [30] nach einer Methodik gesucht, um aus Zählerablesungen und der Analyse der Verbrauchsprofile signifikante Vergleichswerte zu erhalten. Im Frühjahr 2008 wurde das internationale Projekt *IEA-ECBCS Annex 49 Low Exergy Systems for High Performance Buildings and Communities* [31] in Zusammenarbeit mit insgesamt zwölf europäischen Ländern gestartet. Das Hauptziel der Schweizer Vertreter liegt darin, verschiedene Verfahren zu entwickeln, die einen geringen Verbrauch an Exergie aufweisen.

Innovative Materialien und Komponenten für den Gebäudebereich

Langzeitmessungen, die teilweise schon seit über vier Jahre erfasst werden, zeigen im Projekt *Weiterentwicklung, QS und Langzeitverhalten von Vakuumisolationspaneelen mit mechanischem Schutz* [32] auf, wie sich Vakuumisolationspaneele im eingebauten Zustand verhalten. Für die vorhandenen Messprojekte wurden ein Terrassendachbereich und ein Kühl-/Tiefkühlraum (Bodenplatte) mit aufwändiger Messtechnik ausgerüstet. Die Messdaten beider Projekte zeigen, dass die installierten Vakuumisolationspaneele planmässig funktionieren. Jedoch sind beim Einsatz im Flachdachbereich gegenüber demjenigen im Kühlraumboden grössere Alterserscheinung aufgetreten, was auf die höhere Temperatur- und Feuchtigkeitsbelastung zurückzuführen ist.

Da die Anforderungen an den Wärmeschutz der Gebäudehülle in Zukunft weiter eine wichtige Rolle spielen wird und die üblichen Dämmstärken von

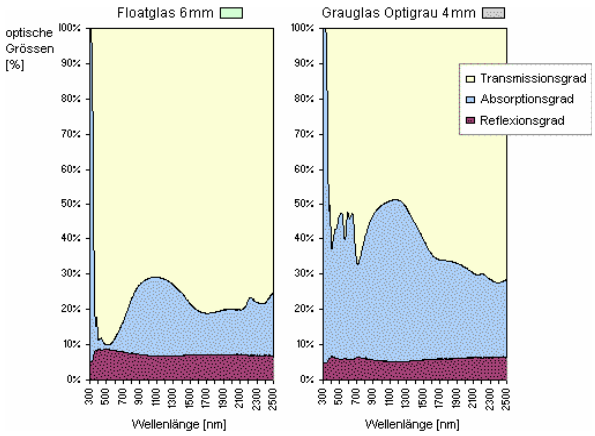


Figur 6: Messprinzip zur Bestimmung des Innendrucks. (Grafik aus [32])

Minergie und Minergie-P bei bis zu 30 cm liegen, rückt der Einsatz von Vakuumdämmpaneelen (VIP) zunehmend in den Vordergrund. Die Zielsetzung des nun abgeschlossenen Projektes *Bauelemente und Systeme mit VIP für Aussenwandkonstruktionen* [33] ist die Entwicklung und praktische Anwendung von Bauprodukten und Systemen mit VIP, die den besonderen Eigenschaften des Materials gerecht werden. Hierbei werden verschiedenste Beschichtungsmaterialien getestet, welche die VIP beim Einsatz am Bau vor mechanischen Beschädigungen schützen sollen. Um sicherzustellen, dass die Vakuumpaneele stets den technischen Anforderungen entsprechen, ist eine umfangreiche Qualitätssicherung von der Produktion (bereits vorhanden) bis zur Überwachung im eingebauten Zustand erforderlich. Hierbei wurde von der Firma Va-Q-tec eine Methode entwickelt, mit der eine berührungslose Überprüfung von fertig montierten Fassadenelementen erfolgen kann. Anhand von Prototypen wurden die Eigenschaften der veredelten VIP beurteilt, wobei diese Arbeiten noch über die Projektdauer hinaus gehen. Ein weiteres Einsatzgebiet eines Vakuumisolationspaneels zeigt der Abschluss des Projektes *Thermotragelemente (TTE) aus hochfestem Faserverbundstoff und integrierten Vakuumisolationspaneelen* [34]. Dabei wurde ein Balkonanschlusselement als TTE entwickelt, welches die statischen, mechanischen und die thermischen Eigenschaften zur Minimierung von Wärmebrücken erfüllen soll. Das Konzept des Elementes besteht darin, die hohen mechanischen Beanspruchungen, die von überstehenden Balkonplatten durch die Dämmschicht in das Gebäude geleitet werden müssen, mit thermisch und mechanisch hochwertigen Faserverbundstoffen zu übertragen. Die erzielten Resultate zeigen, dass die Entwicklung des Elements noch nicht am Ende steht, jedoch bei einer Weiterentwicklung der gewonnen Erkenntnisse ein Anschlusselement, welches sich von der Konkurrenz abhebt, erreicht werden kann. Beim Projekt *A Feasibility Analysis of Evacuated Glazing with Advanced Thermal Properties* [35] wurde im letzten Jahr erfolgreich ein neuer Kantenschutz (Randabdichtung) für Vakuumverglasungen entwickelt. In diesem Jahr liegt der Schwerpunkt der Arbeiten bei der Vakuumiso-

liierverglasung, mit der ein Gesamtwärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) von 0,2–0,5 W/m²K erreicht werden kann. Das bedeutet im Vergleich zu einer herkömmlichen Zwei- bzw. Dreischeibenwärmeschutzverglasung (U-Wert: 0,7–1,0 W/m²K) eine Energieeinsparung zwischen 40 % und 80 %. Das Projekt *Neue optische Beschichtungen für transparente Gebäudeteile im Hinblick auf einen verbesserten sommerlichen Wärmeschutz* [36] wurde im Berichtsjahr erfolgreich abgeschlossen. Durch die Entwicklung neuer Beschichtungen für transparente und transluzente Teile in der Gebäudehülle kann ein Beitrag für den sommerlichen Wärmeschutz geleistet werden. Hierbei soll die solare Strahlungsbelastung von Innenräumen bei identischer Helligkeit gegenüber den heutigen Beschichtungen markant reduziert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass mit handelsüblichen Materialien und Methoden neue Mehrschichtsysteme entwickelt werden können, die der theoretischen und optimalen Transmission ähnlich sind. Hierbei sind Reduktionen der solaren Einstrahlung zwischen 17 % und 29 % gegenüber handelsüblichen Sonnenschutzfenstern möglich, was zu einer entsprechend geringeren Überhitzung bei Gebäuden mit hohem transparentem Anteil führt.

Als Grundlage und Fundament des Projektes *Vakuumdämmung im Baubereich – Deklaration und Auslegung* [37] soll in Zusammenarbeit mit verschiedenen VIP-Herstellern und Vertriebspartnern ein solides aber sicheres Grundlagengerüst aufgebaut werden. Erfolgreich abgeschlossen wurde bereits die definitive Fassung des Wärmebrückenkatalogs für VIP-gedämmte Konstruktionen sowie ein Dokument, das die Qualitätssicherung und das Deklarationsraster für VIP-Eigenschaften definieren. Zurzeit laufen die Labormessungen zur Bestimmung des Alterungsverhaltens der VIP (Produkte der Projektpartner) sowie Feldmessungen zur Ermittlung von Transport- und Handling-Schäden.



Figur 7: Mit dem Cary-Spektrometer gemessener Transmissionsgrad τ, Reflexionsgrad ρ sowie Absorptionsgrad α = 1 – τ – ρ in gestapelter Darstellung. (Grafik aus [36])

Nationale Zusammenarbeit

Im Berichtsjahr hat die **Begleitgruppe des Forschungsprogramms** vor allem bei der Evaluation der eingereichten Projekte der Ausschreibung 2008 mitgewirkt. Frau Giuseppina Togni, langjähriges Mitglied der **CORE** und Patin des Forschungsprogramms, ist per Ende 2008 infolge Erreichen der Amtszeitbeschränkung aus der CORE und auch als Programmpatin zurückgetreten. Für ihre Betreuung und wertvolle Unterstützung des Forschungsprogramms Energie in Gebäuden sei an dieser Stelle ganz herzlich gedankt.

Die Kontakte mit Forschungsteams der **Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich** (Prof. Dr. Hj. Leibundgut, Prof. Dr. H. Wallbaum, Prof. Dr. L. Guzzella) sowie mit dem Forschungsteam von Prof. Dr. J. L. Scartezzini an der **École Polytechnique Fédérale de Lausanne** sind bewusst intensiviert worden. Mehrere neue Forschungsprojekte konnten initiiert werden. Die Kontakte zur Universität Basel finden mit der Emeritierung von Prof. Dr. Oelhafen einen vorläufigen Abschluss.

Kontakte zum **nationalen Kompetenznetzwerk Brenet** *(Building and Renewable Energies Network of Technology,* www.brenet.ch) wurden speziell zu einzelnen Themen der Ausschreibung 2008 wie «Kraftwerk Gebäude» gepflegt.

Mit den **BFE-Forschungsprogrammen** Elektrizitätstechnologien und -anwendungen, Wärmepumpen/Wärme-Kraft-Kopplung/Kälte, Solarwärme und Photovoltaik findet fallweise eine direkte Zusammenarbeit statt.

Eine erfolgreiche Zusammenarbeit besteht mit dem Verein **Energie-Cluster.ch** (www.energie-cluster.ch) im Rahmen der beiden Innovationsgruppen Vakuumisolationspaneele (VIP) und Komfortlüftung. Neu hat die Programmleitung des Forschungsprogramms Energie in Gebäuden am Workshop vom 8. September 2008 zum Thema Plusenergiehaus aktiv teilgenommen.

Gemeinsame Projekte im Bereich Nachhaltiges Bauen werden insbesondere mit den Vereinen **Ecobau** und **Minergie** resp. dem **Hochbauamt der Stadt Zürich** durchgeführt.

Das BFE ist in der Begleitgruppe des Projekts *Use of Weather and Occupancy Forecasts for Optimal*

Building Climate Control (OptiControl) der ETHZ, MeteoSchweiz und Empa, welches durch **Swissselectric Research** unterstützt wird, durch den Programmleiter vertreten.

In der Berichtsperiode sind zu Händen der **Kommission Technik und Innovation (KTI)** vier Projektgesuche im Bereich Gebäude korreferiert worden. Die Anzahl der bewilligten Projekte im Bereich Gebäude ist in der KTI nach wie vor niedrig.

Internationale Zusammenarbeit

Internationale Kontakte werden sowohl in direkter Zusammenarbeit in Projekten, in Netzwerken wie auch durch Teilnahme an internationalen Konferenzen wahrgenommen.

Internationale Energieagentur (IEA)

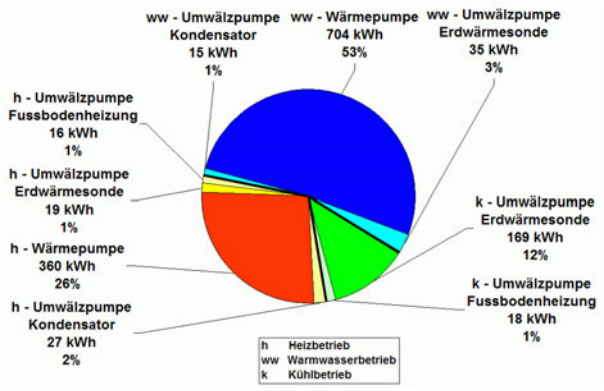
- Auf der Ebene Projektarbeit findet weiterhin eine gute und intensive Zusammenarbeit mit den IEA-Programmen **Energy Conservation in Buildings and Community Systems (ECBCS)** und **Solar Heating and Cooling (SHC)** statt. Die Schweiz war im Berichtsjahr im Rahmen des BFE-Forschungsprogramms «Energie in Gebäuden» in folgenden Projekten engagiert:
- *Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Buildings* [14]
- *Solar & Conservation Renovation of Housing* [15]
- *Energy Efficient Electric Lighting for Buildings* [26]
- *Low Exergy Systems for High Performance Buildings and Communities* [31]

EU Framework Programme 7 (FP7)

Als Nachfolge des Eranets Erabuild ist das BFE auch im Nachfolgeprojekt **Eracobuild**, des *European Research Area Networks for Construction and Operation of Buildings* vertreten, welches am 1.11.2008 startete. Eracobuild dient der Vernetzung und dem Informationsaustausch der Programmverantwortlichen aus den verschiedenen Mitgliederstaaten und verfolgt das Ziel gemeinsamer Ausschreibungen (joint calls).

Pilot- und Demonstrationsprojekte

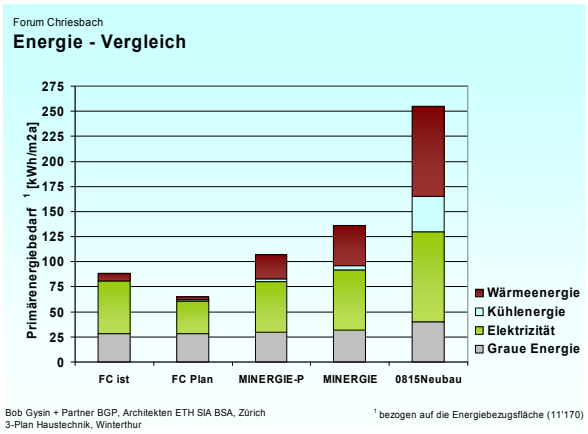
In Basel wurde im Jahr 2007 mit dem Projekt *Cosy Place – Sanfte Kühlung mit Erdwärmesonden im Minergie-P Wohnungen* [38] das erste Mehrfamilienhaus im Minergie-P-Standard erstellt, welches mittels einer erdgekoppelten Wärmepumpe über eine Niedertemperatur-Fussbodenheizung/-kühlung im Winter beheizt und im Sommer passiv gekühlt wird. Es wird erwartet, dass die thermische Behaglichkeit durch den passiven Kühlbetrieb mit geringem Zusatzaufwand deutlich gesteigert werden kann. Auf Basis einer messtechnischen Untersuchung, die von November 2007 bis Herbst 2008 dauerte, soll im Rahmen dieses Projektes das Praxisverhalten und der Benutzereinfluss untersucht werden. Die ersten Auswertungen der erdgekoppelten Wärmepumpenanlage während der Messperiode zeigt eine gute Effizienz im Heiz- und Kühlbetrieb. So liegt der Wärmeerzeugernutzungsgrad im Kühlbetrieb zwischen 8 und 12, im Heizbetrieb bei 3,7–4,3 sowie für den Wassererwärmungsbetrieb zwischen 2,5 und 3.



Figur 8: Auswertung Sommer, Teil 1 (01.05.2008-12.08.2008), bezogene Elektrizität. (Grafik aus [38])

Um die Zielerreichung des ersten Plus-Energie-Mehrfamilienhauses bezüglich Wärme und Elektrizitätsbilanz sowie Temperaturverhalten zu überprüfen, wurde im Herbst 2008 das Projekt *Erfolgskontrolle Plus-Energie-MFH in Bennau* [39] gestartet. Aufgrund verschiedener Bauverzögerungen kann das Messprojekt bzw. die Auswertung voraussichtlich erst im April 2009 erfolgen. Hierbei sollen alle wesentlichen Parameter des Gebäudes und das Anlagenverhalten (PV, Fassadenkollektoren und Speicherbewirtschaftung) über einen Zeitraum von zwei Jahren gemessen, ausgewertet und anschliessend in einem Bericht dargestellt und ausgewertet werden. Die bisherigen Arbeiten liegen aufgrund

der Verzögerung der Entwicklung des Messkonzeptes sowie der planerischen Integration in die vorgesehene Steuerung und bei der Energieerfassung der Haustechnik zurück. Ebenfalls eine Erfolgskontrolle wird beim Projekt *Erfolgskontrolle Zweifamilienhaus in Stansstad* [40] durchgeführt. Hierbei handelt es sich um ein Gebäude aus dem Jahre 1962, welches im Minergie-P-Standard saniert wurde. Das Messprojekt erfasst die Temperaturen und Feuchten in den beiden Wohnungen sowie beim zentralen Komfortlüftungsgerät, die erzeugte Wärmeenergie des Pelletofens und der 9 m^2 grossen thermischen Solaranlage sowie die Wärmeabgabe an die Wohnungen und das Brauchwarmwasser. Das Projekt *Minergie-P-Sanierung eines Mehrfamilienhauses aus dem Jahre 1946* [41] wurde im Herbst 2008 begonnen. Hauptziel hierbei war eine möglichst schnelle und reibungslose Sanierungsphase bzw. Anbauphase des Mehrfamilienhauses gemäss Minergie-P-Standard, was auch grösstenteils gelungen ist (Umbauzeit drei Monate). Das Langzeitprojekt *Messung Solarix-Wandheizsystem* [42] konnte im Berichtsjahr endlich in Betrieb genommen werden. Die seit August 2008 aufgezeichneten Messwerte sollen wichtige Hinweise der transparenten Wärmedämmung (TWD)-Fassade liefern, wobei momentan noch verschiedenste Optimierungen vorgenommen werden. Die weiteren Projektziele wie beispielsweise eine Beurteilung der Effizienz des Kühl- und Wärmeverteilsystems sowie detaillierte Energiebilanzen werden im folgenden Jahr erstellt. Das Projekt *Energie-Detailbilanz Eawag Forum Chriesbach* [43] ist ein Vorzeigeobjekt für ein nach Kriterien der nachhaltigen Entwicklung gebautes Forschungs-, Schulungs- und Verwaltungsgebäude. Zwei Jahre nach Inbetriebnahme wurde im Sommer 2008 die offizielle Phase der Betriebsoptimierung abgeschlossen, obwohl noch weitere Optimierungen folgen werden. Die Energiebilanzen zeigen, dass das Gebäude den hohen Erwartungen entspricht, obwohl die momentanen Strom- und Wärmeverbräuche mit 6 kWh/m^{2}a (statt 2,1 kWh/m^{2}a) bzw. 17,4 kWh/m^{2}a (statt 10,8 kWh/m^{2}a) zwar höher als geplant, aber trotzdem immer noch sehr tief sind.



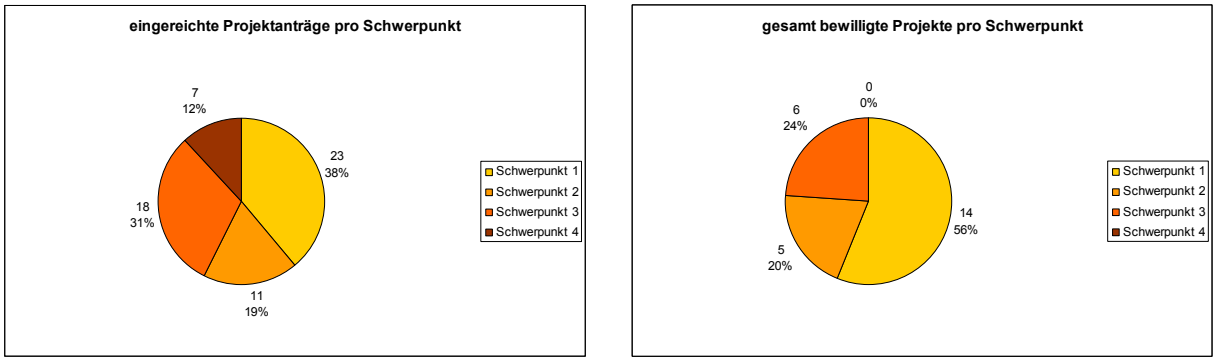
Figur 9: Vergleich des effektiven Verbrauchs an Primärenergie (Forum Chriesbach) mit den Planwerten und anderen Standards. (Grafik aus [43]).

Bewertung 2008 und Ausblick 2009

Auftakt im Jahr 2008 war die Verabschiedung des **Vierjahreskonzepts des Forschungsprogramms Energie in Gebäuden für die Jahre 2008–2011** durch die **CORE**. Auf Anregung der CORE wurden im Forschungsprogramm der wissenschaftlich/technologische Anspruch an die eingereichten Projekte heraufgesetzt.

Im Berichtsjahr wurde eine breit angelegte **Ausschreibung** zu den Schwerpunkten 1 bis 4 des Vierjahresprogramms durchgeführt. Gesamthaft wurden 59 Projektskizzen eingereicht, wobei für 26 Anträge eine vorbehaltlose Förderung bzw. eine Förderung mit Auflagen erfolgte. Die Verteilung der Projektanträge auf die vier Schwerpunkte ist in Figur 10 aufgezeigt.

Eine weiter führende Auswertung befindet sich auf dem Webauftritt des Programms: www.bfe.admin.ch/forschung/gebaeude.



Figur 10: Ergebnis der Ausschreibung. (Grafik Charles Filleux)

Für die Zeitspanne 2006 bis 2008 ist die Förderquote durch das BFE ermittelt worden. Diese betrug im Durchschnitt 56 % und basiert auf 62 ausgewerteten Projekten.

Eine erfreuliche Zusammenarbeit gestaltete sich mit Jürg Wellstein, der im Berichtsjahr folgende Beiträge über Projekte im Bereich Gebäude verfasst hat:

- Brennstoffzellen und Co-Generation: Artikel im Haustech; V. Dorer, Empa
- Plattform Zukunft Bau: Beitrag im Tec21; Ch. Filleux, Programmleiter
- Erneuerung mit Modultechnik: Bau & Architektur; M. Zimmermann, Empa
- Ökologische Bewertung WKK: HK Gebäudetechnik; A. Primas, Basler & Hofmann.

Liste der F+E-Projekte

Unter www.bfe.admin.ch/forschung/gebaeude (Rubrik Projekte) sind die Jahres- und Schlussberichte sowie weitere Informationen verfügbar.

[1] S. Lenel, (lenel@intep.com), Arbeitsgemeinschaft Intep/E4tech/heig-vd, Zürich, Lausanne, Yverdon: Systemnachweis Minergie-Eco (Systemnachweis für nachhaltige Hochbauten) (Schlussbericht Projekt 101463).

[2] B. Keller, (bkeller@hbt.arch.ethz.ch), Professur für Bauphysik, ETH, Zürich, B&H, Zürich: Weiterentwicklung der Klimaflächenmethode und -software zu erhöhter Praxistauglichkeit (Schlussbericht Projekt 100025).

[3] F. Thesseling, (thesseling@hbt.arch.ethz.ch), ETHZ, Professur für Gebäudetechnik, Zürich: Design Performance Viewer 2.0, Evolution und Weiterentwicklung (Jahresbericht Projekt 102781).

[4] A. Binz, (armin.binz@fhnw.ch), W. Müller, (werner.mueller@fhnw.ch), JP. Voyame, FHNW Institut Energie am Bau, Muttenz: Nachhaltigkeitsprojekt auf dem Grundeldingerfeld in Basel (Schlussbericht Projekt 100102).

[5] Ch. Zeyer, (christian.zeyer@eplusu.ch), E Plus U Energie- und Umweltberatung GmbH, Bern: Die Wirkung von MuKEn, Minergie und Minergie-P – kombinierte Energie und Kostensimulation zur Untersuchung der Auswirkungen des Bauherrenentscheides für einen Standard bezüglich Kosten (Schlussbericht Projekt 101694).

[6] P. Schwehr, (peter.schwehr@hslu.ch), HLSU Kompetenzzentrum Typologie & Planung in Architektur, Horw: CO_2 minimiertes Bauwerk – Systemische Betrachtung von klimagerechten Bauten (Jahresbericht Projekt 102376).

[7] H. Wallbaum (wallbaum@ibb.baug.ethz.ch), ETH, Zürich, M. Jakob TEB Energy GmbH, Zürich: Vorstudie zum Gebäudeparkmodell Schweiz – Machbarkeitsuntersuchung anhand des neuen SIA-Effizienzpfades Energie (Jahresbericht Projekt 102824).

[8] M. Di Paolantonio (info@holligerconsult.ch) Holliger Consult GmbH, Epsach: Integration des BFE-Sanierungskatalogs in den elektronischen Bauteilkatalog (Schlussbericht Projekt 102522).

[9] M. Koschenz, (markus.koschenz@reuss-engineering.ch), Reuss Engineering AG, Gisikon: Swisswoodhouse – Ein Gebäude für die 2000-Watt-Gesellschaft (Jahresbericht Projekt 102526).

[10] M. Ménard (menard@lemonconsult.ch), M. Nutt (nutt@lemonconsult.ch) Lemon Consult GmbH, Zürich, P. Keller (patrick.keller@hslu.ch) Hochschule Luzern, Technik & Architektur, Horw: Sommerlicher Wärmeschutz bei Wohngebäuden in Holzbauweise (Schlussbericht Projekt 102675).

[11] R. Gadola, (reto.gadola@hslu.ch), Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Luzern, HLSU, Luzern: Gesamtenergieeffizienz von Minergie-P-Wirtschaftsbauten (Jahresbericht Projekt 102773).

[12] D. Pittet, daniel.pittet@supsi.ch, L. Ghirlanda, ISAAC – DACD, Scuola Universitaria della Svizzera Italiana SUPSI, Trevano Canobbio: Analisi comparativa degli strumenti Retrofit Advisor e Epiqr+ (Raporto finale 101311).

[13] W. Ott, (walter.ott@econcept.ch), Econcept, Zürich, Nachhaltige Quartierentwicklung Grünau-Werdwies Zürich (Jahresbericht Projekt 102531).

[14] M. Zimmermann, (mark.zimmermann@empa.ch), Empa, Dübendorf: IEA-ECBCS Annex 50 Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Buildings (Jahresbericht Projekt 101902).

[15] R. Hastings, (robert.hastings@aeu.ch), AEU, Wallisellen: Wohnungssanierung auf tiefstem Energieverbrauch – IEA-SHC Task 37: Advanced Housing Renovation by Solar & Conservation (Jahresbericht Projekt 101968).

[16] W. Hässig, (haessig@sustech.ch), hässig sustech gmbh, B&H, Zürich: CO_2-gesteuerte Lüftungen in Schulbauten – Energieeinsparungen durch CO_2-gesteuerte Lüftungen (Schlussbericht Projekt 101714).

[17] P. Karlström, (petra.karlstroem@bhz.ch), Basler&Hofmann AG, Zürich: Hocheffiziente Kühlsysteme für Gebäudesanierungen (Schlussbericht Projekt 101464).

[18] J. Schnyder (schnyder-energie@bluewin.ch), Energie-Dienstleistungen, Bronschhofen, R. Rusterholtz (roger.rusterholtz@ntb.ch), NTB, Buchs: Konventionelle Wärmeabgabesysteme und deren Regulierung für die Raumkühlung (Jahresbericht Projekt 102523).

[19] H. Manz, (heinrich.manz@empa.ch), N. Artmann, (nikolai.artmann@empa.ch), Empa, Dübendorf P. Heiselberg, (ph@civil.aau.dk), Aalborg University, Aalborg: Passive Cooling of Buildings by Night-time Ventilation (Schlussbericht Projekt 101308).

[20] W. Weber (willi.weber@unige.ch) Universtité de Genève, Carouge: Easypipes (Jahresbericht Projekt 102371).

[21] V. Dorer, (viktor.dorer@empa.ch), Empa, Dübendorf: IEA-ECBCS Annex 42 The Simulation of Building Integrated Fuel Cell and Other Cogeneration Systems (Schlussbericht (Zusammenfassung) Projekt: 100888).

[22] M. Conde, (mconde.petit@mrc-eng.com), M. Conde Engineering, Zürich: Open Absorption System for Cooling and Air Conditioning using Membrane Contactors (Schlussbericht Projekt 101310).

[23] W. Hässig, (haessig@sustech.ch), Hässig sustech GmbH, Uster: Haustechnik-Kompaktgeräte – Erkenntnisse aus der Praxis (Jahresbericht Projekt 101714).

[24] S. Stettler, P. Toggweiler, (info@enecolo.ch), Enecolo AG, Mönchaltdorf: Energie im Gebäude online (Egon) – Hauptphase (Jahresbericht Projekt 102242).

[25] Th. Schumann, (info@adhoco.com), Adhoco AG, Winterthur: Energiesparpotential von Hausautomation für das private Wohnen in der Schweiz (Schlussbericht Projekt 101963).

[26] J.-L. Scartezzini, (jean-louis.scartezzini@epfl.ch), EPF LESO-PB, Lausanne: High Performance Integrated Lighting Systems (Green lighting) (Jahresbericht Projekt 101352).

[27] M. Stalder, (m.stalder@energienetz.ch), Ingenieurbüro für Energietechnik, Rifferswil, R Naef, (naef@naef-energie.ch), Naef Energietechnik, Zürich: Evaluation und Konzeption von Systemen zur einfachen Nachrüstung von Beleuchtungen mit Bedarfssteuerungen (Schlussbericht Projekt 101479).

[28] A. Huber, (huber@hetag.ch), M. Woodtli, (woodtli@hetag.ch) Huber Energietechnik AG, Zürich: Internetbasiertes Reservationssystem – Internetbasierte Einstellung von Zeitsteuerungen haustechnischer Anlagen (Schlussbericht Projekt 101731).

[29] R. Furter, (rudolf.furter@hlsu.ch), HTA, Luzern/Horw: Reduktion des Elektrizitätsverbrauchs von Kleinlüftungsanlagen (Jahresbericht Projekt 101977).

[30] Ch. Weinmann (cwe@weinmann-energies.ch) Weinmann-Energies SA et Ecost, Echallens: Prevision et justification des consommations d'électricité pour 3 categories de bâtiment (Jahresbericht Projekt 102747).

[31] F. Meggers (meggers@hbt.arch.ethz.ch), ETH Zürich, B&H, Zürich: IEA-ECBCS Annex 49 Low Exergy Systems for High Performance Buildings and Communities (Jahresbericht Projekt 102532).

[32] H. Simmler, (hans.simmler@empa.ch) Empa, Dübendorf, Industireipartner: ZZ Wancor AG, Regensdorf, Porextherm GmbH, Kemten: Weiterentwicklung, QS und Langzeitverhalten von Vakuumisolationspaneelen mit mechanischem Schutz (Schlussbericht Projekt 101478).

[33] A. Binz, (a.binz@fhbb.ch), G. Steinke, FHNW, Muttenz: Bauelemente und Systeme mit VIP für Aussenwandkonstruktionen (Schlussbericht Projekt 101434).

[34] M. Motavalli, (masoud.motavalli@empa.ch), O. Huth, (olaf.huth@empa.ch), Empa, Dübendorf: Thermotragelemente TTE aus hochfestem Faserverbundstoff und integrierten Vakuumisolationspaneelen (VIP) (Schlussbericht Projekt 101307).

[35] M. Koebel, (matthias.koebel@empa.ch), Empa, Dübendorf: A Feasibility Analysis of Evacuated Glazing with Advanced Thermal Properties (Jahresbericht Projekt 102341).

[36] P. Oelhafen, (peter.oelhafen@unibas.ch), I. Mack (iris.mack@unibas.ch), G. Reber (georges.reber@unibas.ch), Universität Basel, Basel: Neue optische Beschichtungen für transparente Gebäudeteile im Hinblick auf einen verbesserten sommerlichen Wärmeschutz (Schlussbericht Projekt 100761).

[37] M. Erb, (markus.erb@eicher-pauli.ch), Dr. Eicher + Pauli AG, Basel, H. Simmler, (hans.simmler@empa.ch) Empa, Dübendorf: Vakuumdämmung im Baubereich – Deklaration und Auslegung (Jahresbericht Projekt 102134).

Liste der P+D-Projekte

[38] R. Dott, (ralf.dott@fhnw.ch), FHNW, Muttenz: Cosy Place – Sanfte Kühlung mit Erdwärmesonden im Minergie-P Wohngebäude (Jahresbericht Projekt 102265).

[39] A. Gütermann, (ag@amena.ch) amena ag, Winterthur: Erfolgskontrolle Plus-Energie-MFH in Bennau (Jahresbericht Projekt 102661).

[40] P. Keller, (patrick.keller@hslu.ch), Hochschule Luzern, Technik & Architektur, Luzern: Erfolgskontrolle Zweifamilienhaus Rohrer in Stansstad (Jahresbericht Projekt 102664).

[41] R. P. Miloni, (miloni@swissonline.ch), Miloni & Partner, Lichtplanung Architektur, Hausen Aargau: Minergie-P-Sanierung eines Mehrfamilienhauses aus dem Jahre 1946 – Profit statt Dynamit (Jahresbericht Projekt 102680).

[42] P. Oesch, (p.oesch@twdmueller.ch), Gebr. Mueller AG, Bern: Messungen SOLARIX-Wandheizsystem (Jahresbericht Projekt 100404).

[43] H. Güttinger, (www.herbert.guettinger@eawag.ch), EAWAG, Dübendorf, Empa, Dübendorf, 3-Plan Haustechnik AG, Winterthur: Energie-Detailbilanz des Eawag-Forum Chriesbach (Jahresbericht Projekt 102374).

Impressum

Juni 2009
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
Druck: Ackermanndruck AG, Bern-Liebefeld
Bezug der Publikation: www.energieforschung.ch

Programmleiter
Dr. Charles Filleux
Basler & Hofmann AG
Forchstrasse 395
CH-8032 Zürich
filleux.REN@bhz.ch

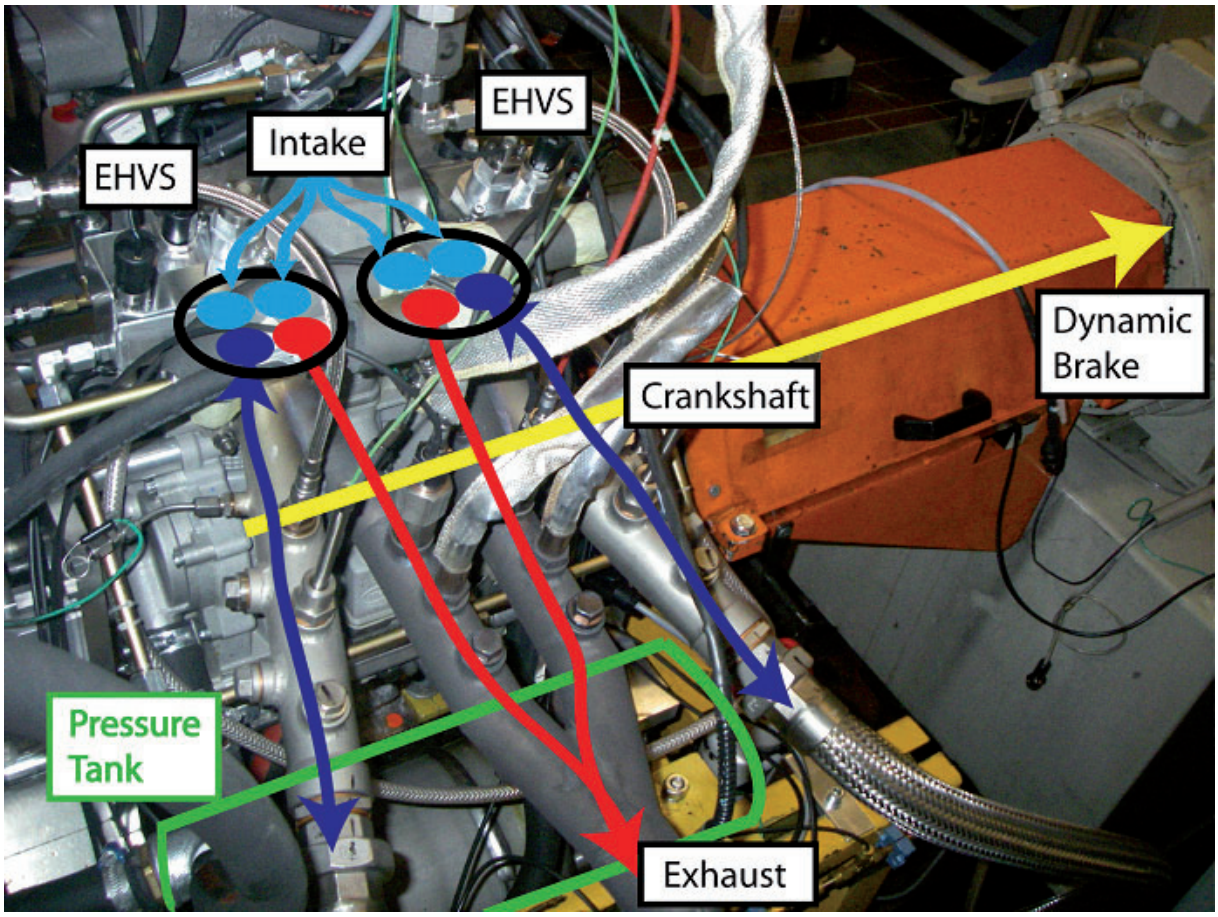
Bereichsleiter
Andreas Eckmanns
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
andreas.eckmanns@bfe.admin.ch

Rapport de synthèse 2008 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2008 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Verkehr

Martin Pulfer

martin.pulfer@bfe.admin.ch



Eine Weltneuheit: Der pneumatische Hybrid, hier auf dem Prüfstand

Auf dem dynamischen Prüfstand hat das Antriebskonzept bis anhin ein Einsparpotenzial von 32 % nachgewiesen.

Programmschwerpunkte

Der Verkehr ist mit 33 % des Gesamtbedarfs der grösste Energieverbraucher in der Schweiz. Von 1997 bis 2007 ist der Gesamtenergiebedarf der Schweiz um gut 10 %, derjenige des Verkehrs aber um 15 % gestiegen. Die Gründe für die Zunahme des Verbrauchs im Verkehrsbereich sind:

- die steigende Bevölkerungszahl;
- das Anwachsen des Anteils der das Automobil nutzenden Bevölkerung;
- die steigende Motorisierung und der Trend zu schwereren, komfortableren Personenwagen;
- die steigende Verkehrsleistung bei praktisch allen Verkehrsmitteln;
- die vermehrte Staubildungen;
- die verlängerte Freizeit und dadurch ein erhöhter Freizeitverkehr.

Der Hauptverbraucher im Verkehr ist das Automobil. Dieses wird von der Industrie bezüglich Verbrauch, Emissionen, Sicherheit und auch Komfort laufend verbessert. Diese Grössen sind jedoch stark konkurrenzierend. Gleichzeitig neigt das Kaufverhalten der Autokäufer zu immer leistungsstärkeren, grösseren und schwereren Fahrzeugen und/oder die Käufer werden mit der Werbung und der Beratung in ihrem Kaufverhalten beeinflusst.

Das Forschungsprogramm Verkehr untersucht deshalb Ansätze und Massnahmen zur Absenkung des Energieverbrauchs, insbesondere beim Hauptverbraucher, dem motorisierten Individualverkehr. Dadurch soll der Energieverbrauch und generell die Umweltbelastung abgesenkt sowie der Industrie- und Bildungsstandort Schweiz gestärkt werden. Eine Verringerung des Energieverbrauchs beim Individualverkehr wird dabei vor allem mit folgenden Ansätzen angestrebt:

- Leichtbau von Fahrzeugen;
- Hocheffiziente Antriebssysteme;
- kleine Verkehrssysteme, wie z.B. E-Bikes.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2008

Leichtbau von Fahrzeugen

Im Grundlagenprojekt *MC3 – Future Mobility using Communication, Computation and Control* [1] untersucht die ETH die Möglichkeiten und die Voraussetzungen für einen radikalen Leichtbau von Fahrzeugen, der eine Absenkung des spezifischen Verbrauchs um Faktor 3 zum Ziel hat. Das Gesamtprojekt ist in drei Teilprojekte unterteilt:

- neue Materialien für Leichtbaufahrzeuge;
- autonome Fahrzeuge und Zusammenstossvermeidung;
- Optimierung und Steuerung für Drive-by-Wire-Fahrzeuge.

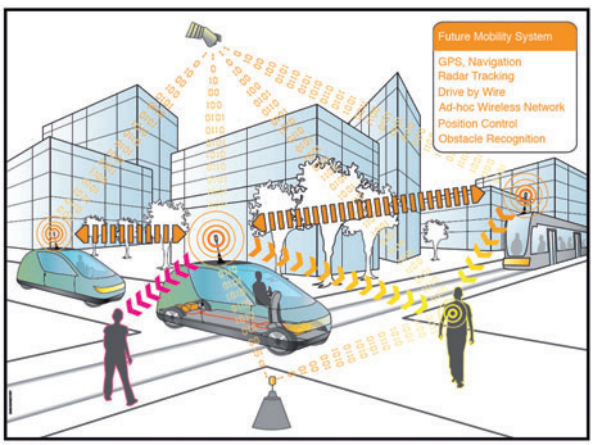


Bild 1: Vision eines vernetzten, energieeffizienten und sicheren Verkehrssystems.

Das Projekt *Leichtbau im Automobil mit Hilfe von Bionik-Simulation* [2] der Georg Fischer AG, Schaffhausen, erfolgt in enger Zusammenarbeit mit der Firma Alcan, Neuhausen. *Dazu* wurde ein Team von vier Mitarbeitern aufgebaut, das sich mit der Auslegung und der Simulation von Chassis- und Strukturbauteilen in faserverstärkten Kunststoffen (FVK) beschäftigte. Kontakte zu Forschungseinrichtungen wie dem Kunststoffzentrum Erlangen, der RWTH Aachen oder dem DLR Stuttgart, sowie zu Maschinenherstellern wie Husky, Diefenbacher und Engel und zu Materialproduzenten wie EMS Chemie, Bayer, Bond Laminates) wurden aufgebaut.

Im Berichtsjahr wurde das bereits 2007 gestartete Teilprojekt mit dem Fraunhofer-Institut ICT in Pfinztal zur Simulation eines Chassis-Leichtbau-Elementes erfolgreich abgeschlossen. Diese Simulationen legten die Basis für die weiterführenden Arbeiten an einem Tunnelquerträger und einer Tanktrennwand. Beide Sicherheitsbauteile bieten sich als FVK-Teile an, weil sie entweder ein grosses Gewichtseinsparpotenzial oder flächige Strukturen aufweisen.

Obwohl aus den ersten Simulationen mehrere FVK-Bauteil-Varianten resultierten, die Vorteile im Bereich Steifigkeit, Kosten und/oder Gewicht bie-

ten würden, wurde Mitte Jahr in einem Projektausschuss auf Konzernebene entschieden, dass das Leichtbau-Projekt nur mit Fokus auf Bioniksimulation weitergeführt werden soll. Das Risiko eines wirtschaftlichen Misserfolgs mit FVK-Bauteilen wurde im Moment als zu hoch eingestuft. Nach einer gründlichen Dokumentation der bisherigen Ergebnisse in FVK, wurden die Bioniksimulationen im 4. Quartal gestartet.

Die Gewichtseinsparung mit Bionikkonstruktionen liegt nun auf anderen Bauteilgruppen, sodass der Fokus auf neuen Bauteilen liegt. Die Bauteile werden aktuell aus Eisen und Aluminium bei GF gefertigt und bieten ein grosses Gewichtseinsparpotenzial.

Antriebe

Das Institut Mess- und Regeltechnik der ETH Zürich (IMRT) hat als Weltneuheit ein *hybrides Antriebskonzept* [3] entwickelt, das aus einem Verbrennungsmotor und einem pneumatischen Unterstützungssystem besteht. Die pneumatische Hybridisierung von Verbrennungsmotoren stellt in vielerlei Hinsicht eine attraktive Alternative zur deutlichen Senkung des CO_2-Ausstosses von Fahrzeugen dar: Sie ist deutlich kostengünstiger als eine elektrische Hybridisierung bei vergleichbarem Einsparpotenzial. Zudem kann für dieses Konzept eine hohe Kundenakzeptanz erwartet werden, da eine hervorragende Fahrdynamik erzielt werden kann. Damit sich ein solch neuartiges Konzept auch für eine Serienproduktion in der Zukunft durchsetzen kann, müssen die erwarteten Vorteile des Konzepts anhand eines Motoren-Prototyps nachgewiesen werden. Dazu musste sowohl ein geeigneter Motor umgerüstet als auch ein Prüfstand aufgebaut werden, der diesen Motor ansteuern und dessen Kraftstoffverbrauch und andere relevante Grössen messen kann.

Für die Umrüstung zu einem pneumatischen Hybridmotor wurde der Zweizylinder-Benzinmotor MPE750 gewählt. Der Motor wurde von der Firma Swissauto Wenko AG konstruiert und für dieses Projekt entsprechend der Spezifikationen des IMRT umgerüstet. Je ein Auslassventil pro Zylinder wurde umfunktioniert zu einem Ladeventil. Die Ladeventile verbinden die Brennräume des Zylinders mit einem 30 Liter fassenden Drucklufttank aus Stahl. Sie müssen vollvariabel angesteuert werden können, um die verschiedenen Motormodi zu ermöglichen. Für diese Ansteuerung wurde das elektrohydraulische Ventilsystem (EHVS) vom Projektpartner Bosch eingesetzt.

Der modifizierte Motor ist über eine Kupplung an eine hochdynamische elektronische Bremse angeschlossen. Sie ermöglicht einerseits stationäre Tests durch Konstanthalten der Drehgeschwindigkeit und andererseits, das Verhalten eines ganzen Fahrzeugs mit Getriebe in einem definierten Fahrzyklus zu emulieren. Für die genaue Erfassung des Motorverhaltens ist eine hohe Anzahl von Sensoren notwendig. Die Signale dieser Sensoren werden in einem zentralen Computer erfasst. Der Computer kann mithilfe einer dSpace-Plattform die Signale in Echtzeit mit einer Taktfrequenz von 1 kHz (bzw. für die Zylinderdruckerfassung mit einer Auflösung von 0,75 ° Kurbelwinkel) verarbeiten und daraus zusammen mit den Benutzervorgaben wieder neue Befehle für die Aktuatoren generieren. Einige dieser Aktuatoren müssen nicht (wie die meisten anderen) auf Zeitbasis, sondern auf Kurbelwinkelbasis angesteuert werden. Diese Aufgabe übernimmt ein FPGA (Field Programmable Gate Array), welcher Signale im Abstand von 0,1 ° Kurbelwinkel vom Motor erhält. Der FPGA steuert dann die jeweiligen Leistungsverstärker entsprechend der Befehle des zentralen Computers auf der Kurbelwinkelebene an. Die problemspezifischen Leistungsverstärker für die Ansteuerung des EHVS wurden am IMRT eigens für dieses Projekt hergestellt.

Mit dieser Prüfstandskonfiguration konnte der modifizierte Motor mit voller Funktionalität in Betrieb genommen werden. Nach der Installation des Turboladers wird die effektive Kraftstoffersparnis eines Fahrzeugs mit diesem Motor ermittelt.

Das Projekt *Optimierte Strategien für parallele Hybridfahrzeuge* [3] des IMRT der ETH Zürich verfolgt das Ziel, mit der Entwicklung einer modellbasierten Betriebsstrategie für parallele Hybridfahrzeuge den Treibstoffverbrauch zu minimieren. Die Strategie bestimmt anhand des vom Fahrer gefor-

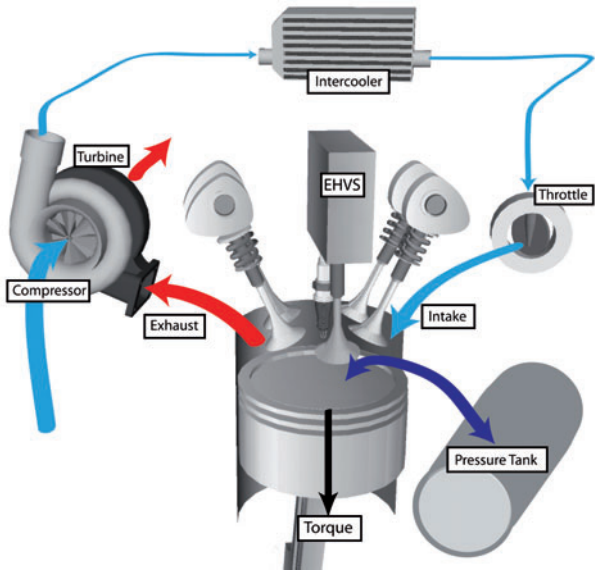


Bild 2: Prinzipskizze des pneumatischen Hybridantriebs.

derten Drehmoments zu jedem Zeitpunkt die optimale Momentenaufteilung zwischen Elektro- und Verbrennungsmaschine. Zu berücksichtigende Beschränkungen sind sowohl die Limitierungen der Maschinen in Drehmoment und Drehzahl, als auch die Limitierungen der Batterie in Strom, Spannung und vor allem Ladestand. Des Weiteren soll die Strategie in Echtzeit auf einem Steuergerät in einem Fahrzeug einsetzbar sein. Dies bedingt, dass die Strategie kausal ist, das heisst, dass die Auswertung der Momentenaufteilung nur auf real verfügbaren Informationen basiert.

Um die Güte der Betriebsstrategie quantifizieren zu können, wird der aus der kausalen Betriebsstrategie resultierende Treibstoffverbrauch a posteriori mit dem theoretischen, mittels dynamischer Programmierung (DP) ermittelten Optimum für ein gegebenes Fahrmuster verglichen.

Es konnte gezeigt werden, dass eine in Zusammenarbeit mit der Robert Bosch GmbH entwickelte kausale Strategie bezüglich des Treibstoffverbrauchs sehr nahe beim Optimum liegt. Diese Strategie basiert auf einem Äquivalenzfaktor, welcher elektrische Energie gegen Treibstoffenergie gewichtet. Dieser Faktor ist wesentlich für die Ladungserhaltung der Batterie und hängt vom Fahrmuster und vom Fahrzeug ab. Die Auswertung dieser Strategie gegenüber dem a posteriori ausgewerteten globalen Optimum mittels DP zeigt, dass sie sehr nahe ans Optimum führt. Die Untersuchung hat allerdings auch aufgezeigt, dass die Strategie – sobald der Ladestand der Batterie gegen seine Grenzen läuft – sich vom Optimum entfernt. Dies passiert meist, wenn relativ grosse

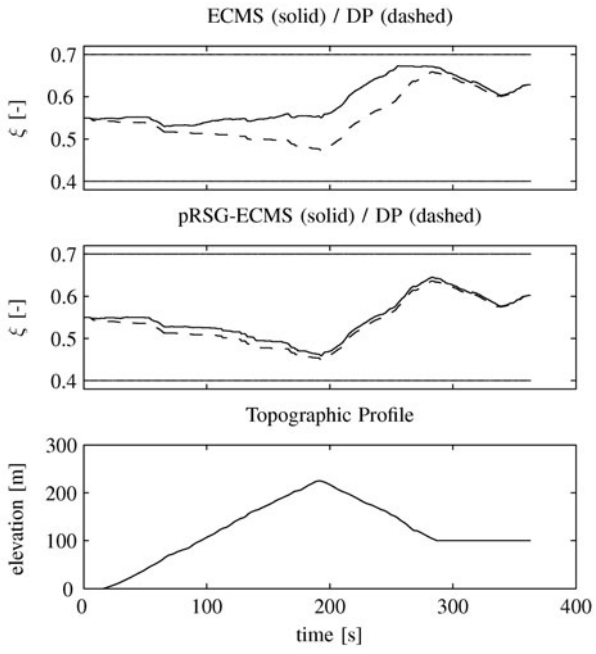


Bild 3: Resultierenden Ladestandstrajektorien mit zugehörigem Höhenprofil.

Mengen an Energie im Verhältnis zur Speicherkapazität der Batterie rekuperiert werden. Die Rekuperationsenergie setzt sich aus kinetischer und potenzieller Energie zusammen. Aufgrund der guten Vorhersehbarkeit der zukünftigen Änderungen der potenziellen Energie mittels topographischer Karten und GPS wurde die bestehende Strategie so erweitert, dass zukünftige Rekuperationsphasen aufgrund Höhenänderungen berücksichtigt werden. Dazu werden aus dem geplanten zukünftigen topographischen Profil die Rekuperationsphasen identifiziert und im Äquivalenzfaktor berücksichtigt. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die erweiterte, prädiktive Strategie im Gegensatz zur bisherigen Strategie auch in unebenem Gelände Verbrauchswerte nahe dem Optimum erreichen kann. Bild 3 zeigt die resultierenden Ladestandstrajektorien mit zugehörigem Höhenprofil. Es ist gut zu erkennen, dass die prädiktive Strategie den Ladestand absenkt, so dass dieser sein Minimum am Kulminationspunkt des Höhenprofils erreicht.

Im Projekt *Clever* [4] hat sich das Projektteam bestehend aus Empa (Abteilung Verbrennungsmotoren) und ETH Zürich (Institut für Mess- und Regeltechnik sowie Labor für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme) zum Ziel gesetzt, ein Antriebssystem für einen Personenwagen zu entwickeln, welcher 40 % weniger CO_2 ausstösst als ein konventionelles, vergleichbares Benzinfahrzeug. Gleichzeitig sollen die strengsten europäischen Emissionsgrenzwerte erfüllt werden. Das Projekt wird von der Volkswagen-Forschung sowie der Robert Bosch GmbH technisch, personell und mit Lieferung von Prototypenbauteilen unterstützt. Finanzielle Unterstützung erfährt das Projekt von den Bundesämtern BAFU und BFE, sowie von Novatlantis, SVGW und DVGW.

Aufbauend auf Arbeiten am Basis-Saugmotor im Benzin- sowie Methanbetrieb aus dem Jahr 2007 wurde ein Ladekonzept unter Zuhilfenahme numerischer Simulationen erarbeitet. Es hat sich gezeigt, dass der ursprünglich verwendete Basismotor (Saugmotor 1,6 Liter Hubraum) im aufgeladenen Betrieb für die Projektziele unnötig viel Leistung bereitstellen würde, und dass das anvisierte Brennverfahren zu Spitzendrücken führen würde, welche für den Motorblock kritisch sein könnten. Das Projektteam hat sich im Frühjahr 2008 darum entschieden, den Basismotor für den weiteren Verlauf des Projektes zu wechseln. Volkswagen hat neu einen 1,4-Liter-Motor mit verstärktem Motorblock zur Verfügung gestellt, welcher im Verlauf des Jahres aufgebaut und für das Projekt modifiziert worden ist. Neben dem Motorwechsel wurde ausserdem entschieden, neuartige Einblasventile für das Projekt zu entwickeln, welche bis jetzt in ähnlicher Form nur

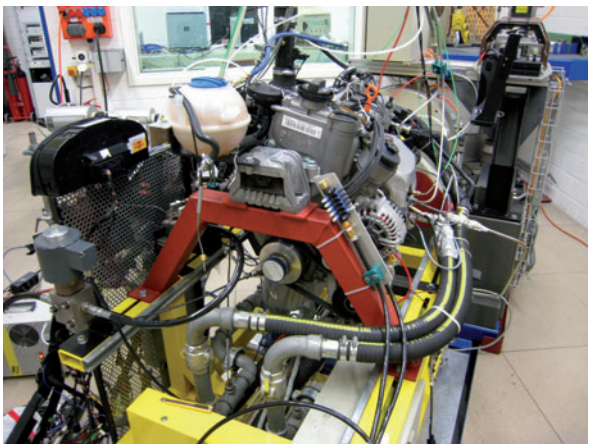


Bild 4: Der Clever Hybridantrieb: Riemenseite.

für Motoren mit Wasserstoffeinblasung[1] erprobt wurden.

Seitens Bosch wurde für das Hybrid-Demonstrationsfahrzeug eine elektrische Maschine samt Leistungselektronik gefertigt, die im ersten Quartal 2009 in das Fahrzeug eingebaut wird. Parallel dazu wird eine geeignete Batterie evaluiert und beschafft. Ziel ist es, das Forschungsprojekt bis Ende 2009 erfolgreich abzuschliessen und dann das Fahrzeug als funktionierendes Demoobjekt zur Verfügung zu haben.

Der *Hybrid SAM II* [5] der HTI Bern/Biel basiert auf dem dreirädrigen, zweisitzigen Leichtelektromobil von der Firma Cree, welches in einer Kleinserie mit Bleibatterien für den Agglomerationsverkehr gebaut worden ist. Im Rahmen des Projektes wurde ein innovativer hybrider Antriebsstrang mit einem PEM-Brennstoffzellensystem in Kombination mit einem elektrischen Energiespeicher aus Li-Polymerbatterien entwickelt und in das Fahrzeug integriert.

In 2 zylindrischen Metallhydridspeichern können rund 300 g Wasserstoff auf dem Fahrzeug mitgeführt werden, wodurch sich die Reichweite auf bis 100 km erweitert. Der Brennstoffzellenstapel besteht aus 96 in Serie geschalteten Einzelzellen, welche auf eine maximale Leistung von insgesamt 6 kW dimensioniert sind.

Der neu entwickelte Batteriestapel mit 48 20-Ah-Zellen ist demgegenüber in der Lage, den maximalen Leistungsbedarf des Antriebsmotors von 15 kW über einen längeren Zeitraum, wie beispielsweise eine Bergfahrt, bereit zu stellen.

Für die Anpassung der belastungsabhängigen Ausgangsspannung des Brennstoffzellenstapels an das Niveau des Batteriezwischenkreises ist an der BFH ein modulartig aufgebauter, hoch effizienter DC/DC-Wandler in Resonanztechnik entwickelt worden. Der stromgeregelte Wandler steuert den Einsatz der Brennstoffzelle. In seinem Algorithmus sind sowohl Sicherheitsaspekte bezüglich der Restkapazität im Batteriestack, als auch die Forderung nach einer möglichst guten Gesamteffizienz eingeflossen.

Durch das on-board-Ladegerät kann die Batterie aber auch im Betrieb als Plug-in-Hybrid an jeder standardmässig abgesicherten Steckdose nachgeladen werden, was einen begrenzten Weiterbetrieb ermöglicht.

Ausführliche Feldtests mit dem Fahrzeug im Sommer 2005 hatten die Notwendigkeit gewisser Optimierungen bzw. Neuentwicklungen, wie beispielsweise den Batteriestack aufgezeigt. Im Energielabor der BFH wurden im Sommer 2008 die einzelnen Teilsysteme ausgetestet und anschliessend durch Simulation von verschiedenartigen Lastzyklen das gesamte Fahrzeug in Betrieb genommen. Im Zeitraum September bis November 2008 wurden 3 Testserien, ein System-Grenztest, ein Reichweitentest und ein Verbrauchstest mit dem Hybrid SAM in der Umgebung von Biel durchgeführt. Der ermittelte Testverbrauch lag sowohl bei dem Reichweitentest wie auch beim genormten Stadtzyklus ECE15 bei umgerechnet weniger als 2 Liter Benzinäquivalent auf 100 km. Der Hybrid SAM II wurde Ende Oktober der Öffentlichkeit vorgestellt und steht zukünftig für Demonstrationsfahrten zur Verfügung.

In *HyCarPRO* [6] der Esoro Ag, Fällanden, wird ein optimiertes Brennstoffzellensystem entwickelt und im Alltag erprobt. Als Basis dient das von *Esoro* eigenfinanzierte Konzeptfahrzeug HyCar, ein plug-in-fähiger Technologieträger mit Schweizer Zebra-Batterie. Eckwerte des optimierten Systems sind eine Effizienz im Teillastbereich von über 50 % und daraus resultierende Reichweiten von 250 km auf Autobahnen und 400 km im Pendelbetrieb, sowie ein Verbrauch ab Tank von we-

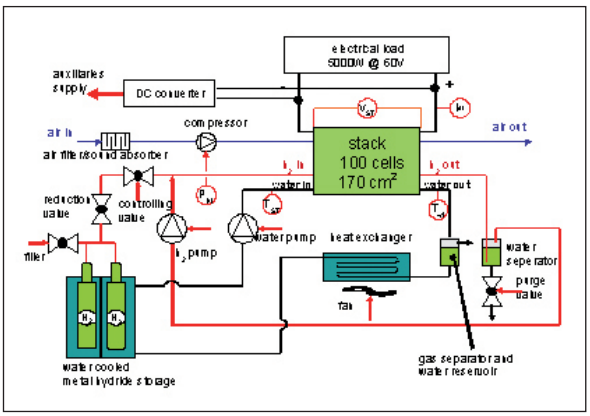


Bild 5: Systemübersicht Brennstoffzellensystem.

[1] Die Einblasung von Wasserstoff zum Treibstoff verbessert aller Voraussicht den Wirkungsgrad der Verbrennung und senkt die Schadstoffemissionen.

niger als 30 kWh/100 km. Hauptziele des Projektes sind eine Optimierung des Systems und eine transparente Erprobung des Fahrzeugs im Alltag. Die Optimierung umfasst dabei neben Leistung und Effizienz auch die Robustheit und die Kosten. Als Nebeneffekt kann und soll das Fahrzeug auch zur Information und Demonstration der Technologie verwendet werden.

Die ersten fünf Monate des Projektes standen im Zeichen des Engineerings und der Realisierung des optimierten Brennstoffzellensystems. Dabei wurde eine zur Erreichung der Projektziele geeignete Brennstoffzelle evaluiert und bei der niederländischen Firma *NedStack* beschafft. Für den Betrieb der Brennstoffzelle wurde ein entsprechendes Peripheriesystem entwickelt. Dieses besteht im Wesentlichen aus dem Wasserstoffsystem, der Luftversorgung und dem Kühlsystem. Schwerpunkte lagen bei der Entwicklung auf der Effizienz, Robustheit und Kosten des Gesamtsystems. Computersimulationen, virtuelles Prototyping und Messungen unterstützten die Evaluation und Integration der Komponenten. Niedrige Betriebsdrücke und geringe Druckverluste machen den Einsatz von einfachen Gebläsen und Pumpen möglich, dadurch konnte der Energieverbrauch des Luft- und Kühlsystems minimiert werden, was zu einer hohen Gesamteffizienz des Systems führt. Das Kühlsystem macht die Rückgewinnung des Befeuchtungswassers möglich und sorgt somit für einen wasserneutralen Betrieb über den gesamten Leistungsbereich des Brennstoffzellensystems. Mit Ausnahme von wenigen Teilen in der Verrohrung des Systems konnten ausschliesslich Standard-Komponenten verwendet werden, was zu geringeren Systemkosten und zu einer erhöhten Robustheit des Systems führt. Hinsichtlich der Robustheit wurde ebenfalls das Steuerungs- und Überwachungssystem überarbeitet und anhand von Simulationen getestet.

Messungen der einzelnen Komponenten wie z.B. der Abnahmetest der Brennstoffzelle zeigen, dass die Leistungs- und Effizienzziele erreicht werden können. Die evaluierten Komponenten wurden allesamt beschafft und zusammen mit den verzögert gelieferten Brennstoffzellen in den HyCar eingebaut. Das Fahrzeug konnte anlässlich von «Zürich Multimobil» der Öffentlichkeit mit neuem System präsentiert werden.

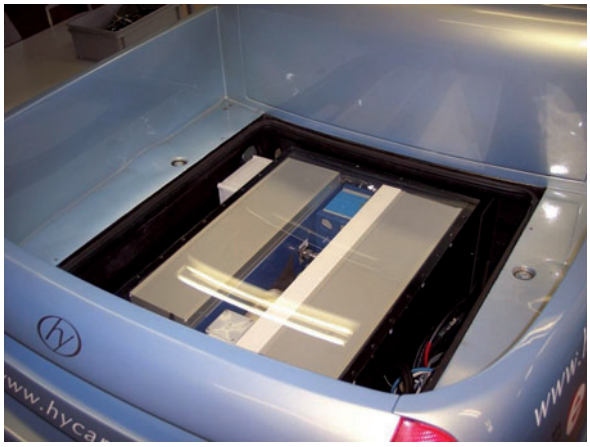


Bild 6: Das eingebaute Brennstoffzellensystem.

Fahrzeuge

Der *TwinTrak* [6] ist ein Hybrid-Antrieb, der von Esoro im Rahmen eines BFE-Projektes vor über 10 Jahren entwickelt wurde und sich seit dann im Einsatz befindet. Der Antrieb ist in den Esoro H301 Family integriert, ein leichtes, vierplätziges Fahrzeug, das von einem Kunden als Erstfahrzeug fast täglich genutzt wird. Mit bereits über 75'000 gefahrenen Kilometern ist es wohl weltweit das Plug-In-Hybridfahrzeug mit der höchsten Kilometerleistung. Zudem ist es mit einem über das Jahr gemessenem Verbrauch von ca. 1,2 l/100 km und 10,7 kWh/km noch immer eines der sparsamsten, alltagstauglichen Fahrzeuge überhaupt. Nach ca. 70'000 km und sechsjährigem Betrieb war auch der zweite Satz NiCd-Batterien am Ende seiner Lebensdauer und musste ersetzt werden. Dies wurde genutzt, um eine neue Batterie-Technologie zu evaluieren und das Fahrzeug damit auszurüsten. Damit sollen die Fortschritte der Technologieentwicklung in Realität «erfahren» werden. Verschiedene Technologien wurden evaluiert, und die Wahl fiel schliesslich auf LiMn-Zellen. Gründe waren die breite industrielle Verwendung der Zellen, ihre hohe Robustheit und schliesslich auch die gute Erhältlichkeit – was bei Li-Zellen nicht immer selbstverständlich ist. Aus diesen Zellen wurde ein Batteriepack konfektioniert, das eine nutzbare Kapazität von 10 kWh aufweist, wobei die sicherheitsrelevanten Betriebslimiten, sowie eine tatsächliche Entladerate bereits eingerechnet sind. Mit einem Gewicht von ca. 110 kg kommt man auf eine System-Energiedichte von doch beachtlichen 90 Wh/kg. Die neue Batterie ist im Vergleich zur NiCd-Batterie rund 40 % leichter bei einer um 30 % höheren Kapazität. Dabei ist schon berücksichtigt, dass für die Li-Zellen ein neues Ladesystems eingebaut werden musste. Das Fahrzeug wurde somit rund 100 kg leichter, was Anpassungen am Fahrwerk notwendig machte – die Hinterachse befand sich im Zuganschlag. Für den H301 Family stellt die Batterie einen grossen Gewinn dar. Die höhere Kapazität erhöht die elektrische Reichweite nun auch im Alltagsbetrieb auf deutlich über 100 km – zumindest im Sommer. Das geringere Gewicht und die höhere, steifere Spannung führen zu einem agileren und sportlicherem Fahrverhalten. Der erwartete noch geringere Verbrauch konnte bisher noch nicht gemessen werden – teilweise wird er wohl durch die sportlichere Fahrweise kompensiert.

Diese Weiterentwicklung wurde ohne Unterstützung der öffentlichen Hand realisiert.

E-Bikes

Eine internationale Arbeitsgruppe untersuchte im Rahmen des Implementing Agreement *Hybrid & Electric Vehicles* (HEV) der Internationalen Energieagentur (IEA) die weltweite Entwicklung auf dem Gebiet der Elektro-Zweiräder [7].

Neben diversen Misserfolgen gibt es auch einige erfolgreiche Markteinführungen. An den Beispielen von China und Sparta (NL) lässt sich aufzeigen, dass neben einem attraktiven und zuverlässigen Produkt eine bekannte Marke sowie günstige äussere Rahmenbedingungen die Markteinführung von Elektro-Zweirädern erleichtern. Der wichtigste Erfolgsfaktor ist jedoch wohl ein gut etabliertes Vertriebskonzept mit motivierten Händlern.

Die beiden beschriebenen Erfolgsgeschichten täuschen nicht darüber hinweg, dass in Ländern mit weniger günstigen Rahmenbedingungen die Behörden gerade auf diesem Gebiet mit geringem Aufwand wertvolle Unterstützung leisten können.

2006 wurde das Projekt *Reichweite von E-Bikes* [8] gestartet und Anfang 2009 abgeschlossen. Ziel waren keine Daten vom Prüfstandarbeiten, sondern realitätsnahe Daten, die dem Alltagseinsatz entsprechen und wie sich Unterstützungsleistung und Reichweite in Abhängigkeit von der menschlichen Tretleistung verhalten. Zuerst wurde die Leistungsfähigkeit der Testpersonen auf dem Rennrad bestimmt (Conconi-Test). Auf dieser Basis konnte der Nettonutzen der Tretunterstützung



Bild 7: E-Bike Test verbunden mit einem NewRide-Händler-Anlass.

der E-Bikes quantifizieret werden. Im den letzten 2 Jahren werden E-Bikes aber zunehmend von Akkus auf Basis von Lithium statt NiMH gespeist. Dadurch hat sich deren Kapazität praktisch verdoppelt. Deshalb spielt die Reichweite bei allen getesteten E-Bikes nur noch für längere Radtouren eine Rolle. Bei Fahrerinnen und Fahrern mit geringerer Tretleistung, welche die Batterie ebenfalls stark beanspruchen, übersteigt die Reichweite den realen Bedarf bei Weitem. Deshalb stand die Leistungscharakteristik der Fahrzeuge im Fokus. Dabei wurde festgestellt, dass Qualität und Preise durchwegs in einem vernünftigen Verhältnis zueinander stehen: Die Modelle in einem tieferen Preissegment leisten weniger, die Fahrzeuge, welche die besten Resultate gezeitigt haben, sind entsprechend teurer. Die Topmodelle weisen über den gesamten Leistungsbereich ausgezeichnete Leistungsdaten auf.

Internationale Zusammenarbeit

Die EU fördert in vielen Fachgebieten mit Finanzbeiträgen die Zusammenarbeit nationaler Forschungsförderstellen und den Erfahrungsaustausch. Die entsprechenden Projekte tragen den Namen Era-Net (**E**uropean **R**esearch **A**rea **Net**work). Ihr wichtigstes Ziel ist die Koordination und die gegenseitige Öffnung der nationalen Forschungsförderprogramme.

Era-Net **Transport** (ENT) [9] gehört zu diesem Era-Net-System und ist ein zeitlich befristetes Konsortium zur Förderung der Zusammenarbeit zwischen staatlichen Forschungsförderstellen im Bereich **Verkehr.** Mitglieder von ENT sind meistens Verkehrs- oder Forschungsministerien europäischer Länder, z. B. von Frankreich, Deutschland, Grossbritannien, Spanien, Österreich, Polen, Schweden, Norwegen, Dänemark, Finnland. Seit Anfang 2007 arbeitet das eidgenössische Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK in dieser Organisation mit. Die Bundesämter des UVEK mit eigenen Programmen zur Förderung von Forschung und technologischer Entwicklung sind Partner in Era-Net Transport:

- das ASTRA: Forschung im Strassen-, Brücken- und Tunnelwesen;
- das BFE: Energieforschung, Schwerpunkt «Effiziente Energienutzung» – Bereiche «Verkehr» sowie «Batterien, Supercaps».

Era-Net Transport wird ähnlich wie ein Forschungsprojekt eines internationalen Konsortiums aus Mitteln der Rahmenprogramme der Europäischen Gemeinschaft für Forschung, technologische Entwicklung und Demonstration finanziell unterstützt. Aus diesem Beitrag der EU werden unter anderem die Reisekosten der Mitarbeitenden des UVEK im Zusammenhang mit Era-Net Transport übernommen. Zurzeit läuft Era-Net Transport II (ENT II); es ist bis Ende 2010 befristet.

ENT Action Groups

Eine der Massnahmen zur Förderung der Zusammenarbeit der nationalen Forschungsförderstellen sind die *Action Groups*. Diese bestehen aus den Forschungsförderstellen mehrerer Länder, die eine Ausschreibung für Forschungsprojekte in einem definierten Bereich durchführen. Die Projekte müssen gemeinsam von Forschungsstellen aus mindestens zwei Partnerländern des Era-Net Transport eingereicht werden. Die Auswahl der zu unterstützenden Projekte erfolgt gemeinsam durch die Vertreter dieser Länder. Jedes Land finanziert den Konsortialpartner aus seinem Land.

Die Schweiz ist an der Action Group 16 *Intermodal Freight Transport* beteiligt. Aufgrund einer Ausschreibung wurden mehrere Projekte mit Schweizer Partnern eingereicht. Das Evaluationsgremium der Action Group 16 hat am 11. März 2008 alle eingereichten Gesuche geprüft und die Projekte bestimmt, die realisiert werden sollen. Folgende Projekte mit Partnern aus der Schweiz gehören dazu:

- *Intermodal Solutions for Trans-European Temperature Sensitive Shipments* (TESS), Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme der ETH-Zürich;
- *Model and decision support system for evaluation of Intermodal Terminal networks* (MINT), Rapp Trans AG, Verkehrs- und Transportberatung.

Das BFE hat mit den beiden schweizerischen Partnern Verträge für eine Mitfinanzierung abgeschlossen. An die Finanzierung des Projektes MINT leisten auch das ASTRA, das BAFU und das ARE Beiträge. Weitere Informationen unter www.transport-era.net.

Zudem wurde das von der Förderagentur für Technologie und Innovation (KTI) und dem ASTRA unterstützte Projekt Spin-Alp (Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors) nachträglich in die Action Group ENT 2b *Intelligent Logistics* einbezogen.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Durch die Fokussierung der knappen Mittel auf Vorhaben im Gebäudebereich konnte 2008 kein P+D-Vorhaben im Verkehr bearbeitet werden.

Bewertung 2008 und Ausblick 2009

Die Erfindung und Entwicklung des pneumatischen Hybridantriebs durch die ETH Zürich ist mit Sicherheit das herausragendste Resultat der Energieforschung im Bereich Verkehr im vergangenen Jahr, dies sowohl bezüglich Einsparpotenzial als auch bezüglich der Kosten. Das Antriebskonzept verspricht, künftig wesentlich kostengünstiger als die bis anhin bekannten Hybridkonzepte produziert werden zu können.

2009 sollen das System weiter erprobt und die bisherigen ermutigenden Resultate validiert werden.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2008 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden
(siehe www.recherche-energetique.ch unter der angegebenen Projektnummer). Unter der angegebenen Internet-Adresse sind die Berichte sowie weitere Informationen verfügbar.

[1] L. Guzzella guzzella@imrt.mavt.ethz.ch, R. Siegwart, ETH-Zürich, Y. Leterrier EPF-Lausanne: Mobility through Communication, Computation and Control (MC3), http://www.ethz.ch.

[2] O. Carnal (Oliver.Carnals@georgfischer.com), Georg Fischer, Schaffhausen: Leichtbau im Automobil mit Hilfe von Bionik-Simulation und Verbundwerkstoffen (JB), http://www.automotive.georgfischer.com. (JB).

[3] [L. Guzzella, C. Onder, (guzzella@imrt.mavt.ethz.ch), ETH-Zürich:, Hybrides Antriebskonzept, Kraftstoffsparende Antriebssysteme (JB) http://www.ethz.ch.

[4] Ch. Bach, (christian.bach@empa.ch), P. Soltic, (patrick.soltic@empa.ch), EMPA Dübendorf: Clever (JB), http://www.empa.ch/abt137.

[5] M. Höckel, (hkm1@bfh.ch, Berner Fachhochschule: Hybrid SAM II, (SB), http://www.hti.bfh.ch.

[6] S. Camenzind (stefan.camenzind@esoro.ch), Esoro, Fällanden: HyCarPRO (JB), TwinTrak; http://www.esoro.ch.

[7] U. Schwegler, (ursschwegler@bluewin.ch), e'mobile, Fischingen: Electric Two Wheeler (SB), http://www.e-mobile.ch; www.newride.ch.

[8] B. Schneider (info@schneidercom.ch), Schneider Communikations, Ottenbach: E-Bike-Reichweitentest (SB), http://www.schneidercom.ch/.

[9] K. Hausmann (karl.hausmann@tcnet.ch), ERA-NET Trans (JB).

[10] R. Horbaty (robert.horbaty@enco-ag.ch), ENCO, Bubendorf: Plug in Hybrid (JB), www.enco-ag.ch.

Referenzen

[11] M. Pulfer (martin.pulfer@bfe.admin.ch) ; BFE, *Bern*: *Forschungskonzept Verkehr 2008–2011.*

Impressum

Juni 2009
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
Druck: Ackermanndruck AG, Bern-Liebefeld
Bezug der Publikation: www.energieforschung.ch

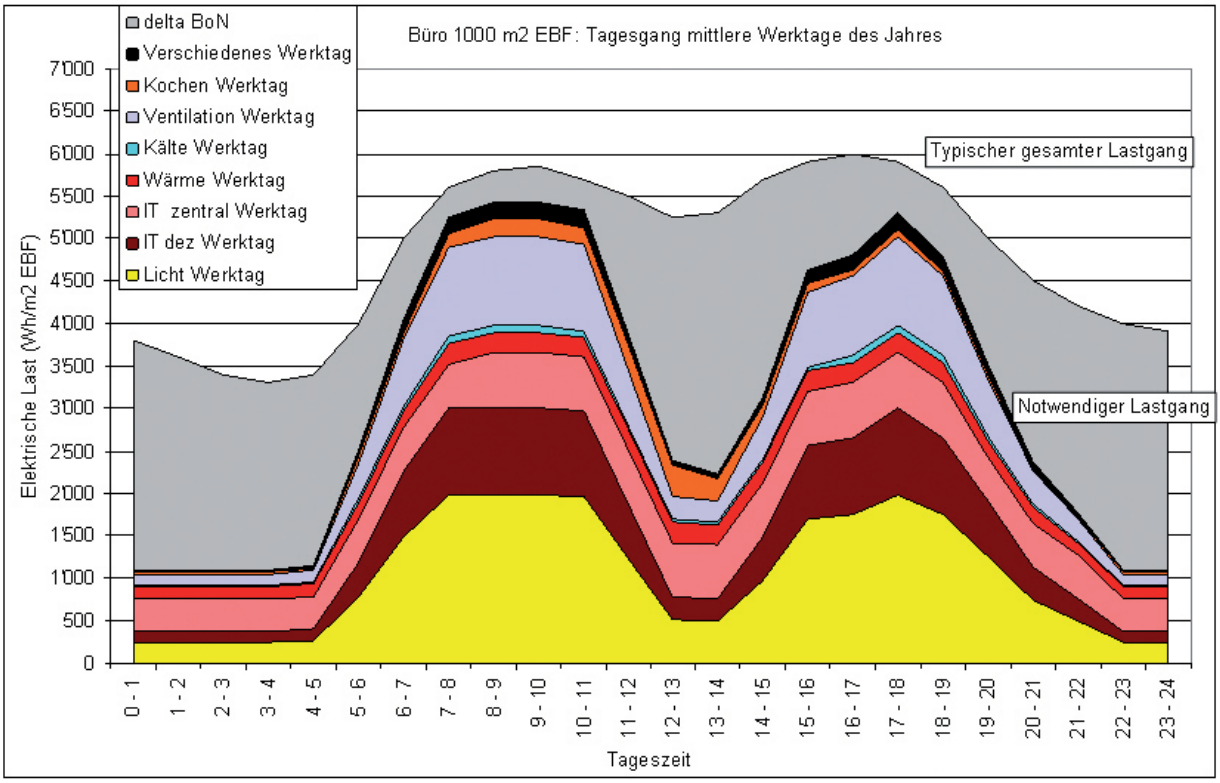
Programm- und Bereichsleiter
Martin Pulfer
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
martin.pulfer@bfe.admin.ch

Rapport de synthèse 2008 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2008 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien und -anwendungen

Roland Brüniger

roland.brueniger@r-brueniger-ag.ch



Schematischer Lastgang eines Werktags in einem typischen Bürogebäude

Die Graphik zeigt den vermuteten Stromanteil (graue Fläche) von Anlagen, die ohne Nutzen laufen. Im Projekt *Betrieb ohne Nutzen* wurde das Thema analysiert und ein Einsparpotenzial im Dienstleistungsbereich in der Grössenordnung von mehr als 2'000 GWh/Jahr abgeschätzt. (Quelle: SAFE)

Programmschwerpunkte

In vielen Anwendungsbereichen ist ein erhebliches unausgeschöpftes Energiesparpotenzial vorhanden. Das Forschungsprogramm **Elektrizitätstechnologien und -anwendungen** hat zum Ziel, Grundlagen und Voraussetzungen für eine effiziente Elektrizitätsnutzung zu schaffen. Das Programm gliedert sich in die zwei Hauptbereiche **Technologien** und **Effiziente Anwendungen**.

Im Bereich **Technologie** bestand die Zielsetzung für das Jahr 2008 darin, einerseits die Effizienz von *thermoelektrischen Materialien* durch eine Erhöhung der *Figure of Merit* zu verbessern und anderseits mögliche Anwendungen sowohl im Hoch- als auch im Niedertemperaturbereich zur direkten Energiekonversion Wärme−Elektrizität zu prüfen. Nachdem 2007 eine Grundlagenstudie gezeigt hat, dass eine Erfolg versprechende Nutzungsmöglichkeit des *magnetokalorischen Effektes* im Bereich der zentralen Kühlung liegt, ging es 2008 darum, Folgeaktivitäten zu initiieren. In der *Hochtemperatursupraleitung* gibt es immer wieder Fortschritte im Materialbereich; die Schweizer Industrie hält sich aber mit eigenen Aktivitäten noch zurück. Umso wichtiger ist die Sicherstellung einer minimalen Kontinuität im Projekt- und Informationsbereich. Diese umfasst einerseits die Teilnahme am entsprechenden IEA-Programm (Implementing Agreement High-Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector) und anderseits eine Interaktion mit der Industrie. Schliesslich wurde 2008 angestrebt, Industriepartner für die Fortführung der Forschungsarbeiten in der *Druckluftspeichertechnologie* zu finden.

Der Bereich **Effiziente Anwendungen** ist sehr vielfältig. Ein bedeutendes Thema ist dabei die *Informations- und Kommunikationstechnik*. In diesem Thema bestand die Zielsetzung 2008 darin, vertiefte Erkenntnisse bezüglich des Energieverbrauchs im Bereich *Home Automation* zu schaffen. Eine weitere Zielsetzung lag darin, zum Thema *Betrieb ohne Nutzen* Grundlagen für eine substanzielle Verminderung der entsprechenden «Verluste» zu schaffen. Unverändert bestand ein Hauptfokus bei *elektrischen Antrieben* in der Aufarbeitung von fachtechnischen Grundlagen für den geplanten Wissenstransfer durch Energie-Schweiz. Daneben galt es, technische Grundlagen zur Effizienzsteigerung von Antriebssystemen zu entwickeln, wobei eine spezifische Zielsetzung in der Effizienzverbesserung des Traktionsbereichs der SBB lag. Ergänzend galt es, die Vorbereitungsarbeiten für ein neues IEA Implementing Agreement zur Schaffung einer internationalen Forschungs- und Wissensplattform für *elektrische Geräte* voranzutreiben. Ergänzt durch punktuelle nationale Projekte soll damit international die Effizienzsteigerung erhöht werden.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2008

Technologien

Hochtemperatursupraleitung (HTSL)

Mit der Teilnahme am *IEA Programme for Assessing the Impact of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector* [1] wird ein umfassender Überblick über die weltweiten Aktivitäten auf dem HTSL-Gebiet erreicht. 2008 verzeichnete die Materialindustrie grosse Fortschritte. So wurden Y-123-Bänder in Längen von über 1'300 m mit einer Stromdichte von 150 A/cm hergestellt (normiert auf eine Bandbreite von 10 mm). Diese Bänder werden in Prototypen im Bereich der Strombegrenzer, Energiekabel und Motoren eingesetzt.

Energiekonversion

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie *Anwendung der magnetischen Kältetechnik und ihre Bewertung* [2a] wurde aufgezeigt, dass vor allem zwei Anwendungen für einen energieeffizienten Einsatz der magnetischen Kältetechnik Erfolg versprechend sind, nämlich der Haushalts-Kühlschrank ohne Gefrierfach und die zentralen Kühlgeräte (siehe Fig. 1). Die Forscher der Fachhochschule Heig-VD in Yverdon-les-Bains konnten in Folge bereits ein Industrieprojekt mit einem namhaften Kühlschrankhersteller starten, um die magnetische Haushalts-Kühlschrank-Technologie weiter zu untersuchen. Im Folgeprojekt *Zentrale magnetische Kühl- und Kältemaschinen und ihre*

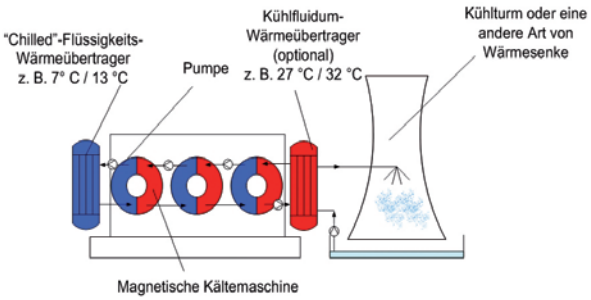
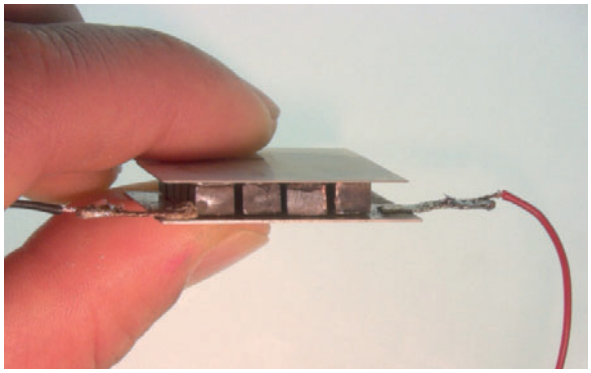


Fig. 1: Schematisches Beispiel einer dreistufigen magnetischen Kältemaschine. Die Temperaturen des Kühlwassers betragen im Vor- und Rücklauf 27 °C / 32 °C. Die Temperaturen des gekühlten Wassers betragen 7 °C / 13 °C. (Quelle: Heig-VD)

Bewertung [2b] soll mit numerischen Simulationen durch eine vertiefte Untersuchung beurteilt werden, welche konventionellen Kühlanlagen sich am besten eignen, um durch magnetische Kältemaschinen ersetzt zu werden.

Das wichtigste Ergebnis des Projekts *Anwendungen der magnetischen «Power Production» und ihre Bewertung* [2c] lag darin, dass die magnetische Energiekonversion den konventionellen Technologien in mehreren Aspekten in verschiedenen Bereichen überlegen sein kann. Dies ist speziell der Fall, wenn Wärmequellen mit tiefer Exergie auftreten. In solchen Fällen sind die konventionellen Systeme nicht wirksam genug, um ökonomisch arbeiten zu können, wogegen die magnetische Energiekonversions-Technologie zu einer höheren Exergie-Effizienz führen kann. Dem Nachteil eines eher geringen Carnot-Wirkungsgrades steht der Vorteil gegenüber, dass die magnetische Energiekonversion mit der Temperaturdifferenz unabhängig von den beiden Temperaturniveaus der Quelle und der Senke arbeiten kann. Eine erste geeignete Umsetzung in die Praxis wäre ein System mit Permanentmagneten und einer Wärmequelle der Temperatur von etwa 120 °C.

Mit dem thermoelektrischen Effekt kann Wärme direkt in Elektrizität gewandelt werden. Mit den Projekten *Das thermoelektrische Kraftwerk* [3a] und *Anwendungspotenzial der thermoelektrischen Stromerzeugung im Hochtemperaturbereich* [3b] wurde untersucht, welche Anwendungen für eine thermoelektrische Stromerzeugung zweckmässig sind, und welche Anforderungen dabei an das Konversionsmaterial gestellt werden. Mit den heute verfügbaren Materialien stellt die thermoelektrische Energieerzeugung wegen des zu geringen Wirkungsgrades keine konkurrenzfähige Alternative zu konventionellen Technologien dar. Auch im Bereich der Abwärmenutzung, wo es kaum oder keine technologischen Alternativen gibt, ist die thermoelektrische Energiegewinnung in grossen Leistungsklassen aufgrund enormer spezifischer Investitionskosten noch nicht vorstellbar. Mit den verstärkten Anstrengungen der Materialwissenschaft und den daraus resultierenden effizienteren und evtl. gleichzeitig auch billigeren Materialien mit einem ZT von 2−3 (ZT ist die energierelevante thermoelektrische Gütezahl eines thermoelektrischen Materials) würde sich das Anwendungspotenzial und der Markt für thermoelektrische Generatoren stark vergrössern. Ein ZT > 5 könnte die gesamte Stromerzeugung aus thermischer Energie «revolutionieren».



Figur 2: Thermoelektrisches Baumodul mit neusten Materialien. (Quelle: Empa)

Die verfügbaren thermoelektrischen Materialen weisen einen schlechten Wirkungsgrad auf, so dass deren Anwendungen deshalb bis anhin eher in Nischenbereichen liegen. Mit dem Projekt *Geo-Thermopower (Geo-TEP) Material* [4a] wurden umweltfreundliche, robuste oxidische Keramiken für Anwendungen im Niedertemperaturbereich untersucht (siehe Fig. 2). Die bereits erwähnte energierelevante thermoelektrische Gütezahl ZT konnte durch das verbesserte Verständnis der Struktur-Eigenschaften-Beziehungen von ursprünglich 0,021 auf 0,3 über einen weiten Temperaturbereich erhöht werden. Im Projekt *Materialentwicklung für solarthermische Stromerzeugung (Solar-TEP)* [4b] wurden polykristalline Kobaltate mit Perowskit-ähnlicher oder geschichteter Struktur analysiert, wobei als Anwendung hohe Temperaturen im Fokus standen. Mit den Projekten *Erstellen und Modellierung eines thermoelektrischen oxidischen Moduls (TOM) als Demonstrator* [4c] und *Layered Thermoelectric Converters (LTEC)* [4d] werden die bisherigen Anstrengungen zur Effizienzsteigerung von thermoelektrischen Materialien mit geschichteten Strukturen fortgesetzt.

Speicherung

Durch die Förderung erneuerbarer Energien und der damit verbundenen Zunahme stochastischer Einspeisung ins Netz nimmt die Energiespeicherung eine wichtige Stellung bei der elektrischen Versorgungssicherheit ein. Nach diversen abgeschlossenen Projekten im *Druckluftbereich* wurden Industriepartner gesucht, die bei der weiteren Forschung mitarbeiten und Unterstützung geben. Trotz verschiedener Gespräche mit namhaften Industrievertretern konnten 2008 keine konkreten verbindlichen Zusagen der Industrie bewirkt werden. Die Abklärungen mit der Industrie werden deshalb 2009 fortgesetzt.

Effiziente Anwendungen

Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)

Der Anteil der Informationstechnik am Stromverbrauch in der Schweiz liegt bei etwa 10 %, wo-

bei hohe Zuwachsraten erwartet werden. National und international laufen viele Aktivitäten für einen rationelleren Elektrizitätseinsatz bei Büro- und Unterhaltungselektronikgeräten, und Massnahmen werden ergriffen, um diese Einsparpotenziale auszuschöpfen. Das *Kompetenzzentrum Energie und Informationstechnik* [5] leistet dazu als Informationsdrehscheibe der Schweiz einen massgeblichen Beitrag. So werden relevante Informationen im In- und Ausland gesammelt, aufbereitet und verbreitet. Daneben lag 2008 ein Schwergewicht auf der Weiterführung der Arbeiten im Bereich von effizienten Rechenzentren und der Analyse der Energienachfrage der mobilen Telekommunikation.

Im Projekt *Energieverbrauch der mobilen Kommunikation* [6] erfolgte eine detaillierte Analyse des Energiebedarfs der Infrastruktur eines Mobilfunknetzes. Ein Ergebnis dieser Arbeit zeigt auf, dass nur eine sehr geringe Korrelation zwischen dem Leistungsbedarf und der Netzauslastung von GSM- und UMTS-Basisstationen besteht. Ergänzend dazu wurden Daten zum Energieverbrauch der Mobilfunknetzelemente und der Klimaanlagen messtechnisch ermittelt. Zu den erwähnten Punkten wurden Optimierungsvorschläge und Handlungsalternativen für Mobilfunkbetreiber formuliert. Abschliessend wurden zukünftige Szenarien bezüglich UMTS900, Einsatz von Femtozellen und Open-Wireless bezüglich der energetischen Auswirkungen theoretisch analysiert.

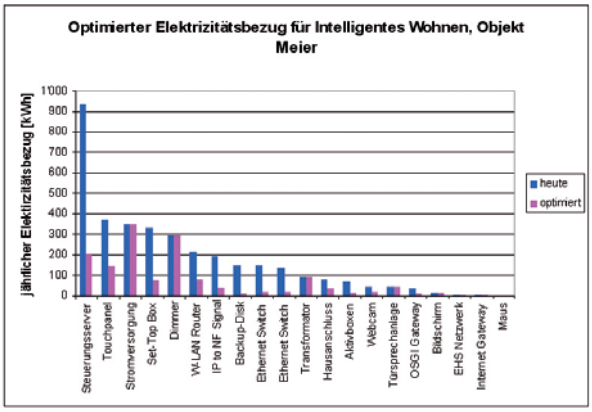
IT-Server weisen laufend höhere Integrationsdichten auf, was mit einem zunehmenden Energiebedarf verbunden ist. Die Nachfrager der IT-Dienstleistungen (IT-Abteilungen) sind sich den durch die IT-Beschaffung verursachten Stromverbräuchen und Stromkosten oft nicht bewusst. Im Projekt *Stromeffiziente Rechenzentren durch Sensibilisierung über eine transparente Kostenrechnung* [7a] wurde ein Excel-basiertes Kostenmodell entwickelt, das transparent darstellt, welche Rolle der Stromverbrauch und die Energieeffizienz beim Betrieb eines Rechenzentrums spielen. Das Modell zeigt zudem auf, wie die Entwicklung in Zukunft aussieht, wenn von steigenden Integrationsdichten, höheren spezifischen Strombezügen und höherer Versorgungssicherheit von Rechenzentren ausgegangen wird. Anhand zweier ausgewählter Rechenzentren wurde erfolgreich eine Verifizierung durchgeführt.

Das im EU-Programm *Intelligent Energy Europe* eingebettete Projekt *Development of the Market for Energy Efficient Servers* [7b] will die beträchtlichen Potenziale für Energieeinsparungen und Kostensenkungen bei Servern in der Praxis demonstrieren und den Markt für energieeffiziente Server vorbereiten. Im aktuellen Berichtsjahr wurden mehrere Demonstrationsprojekte in der EU durchgeführt. In diesen Projekten konnten durch Virtualisierung und Konsolidierung der Server Energieeinsparungen zwischen 60 % und 90 % nachgewiesen werden. KMU sind in den Projekten leider kaum vertreten. Die Schweiz hat daher die Aspekte der KMU in das Projekt eingebracht: In einem typischen Betrieb wurde dazu mittels Virtualisierung die Anzahl Server von 4 auf 2 reduziert. Dabei wurde eine Stromverbrauchsreduktion von 24 % erzielt.

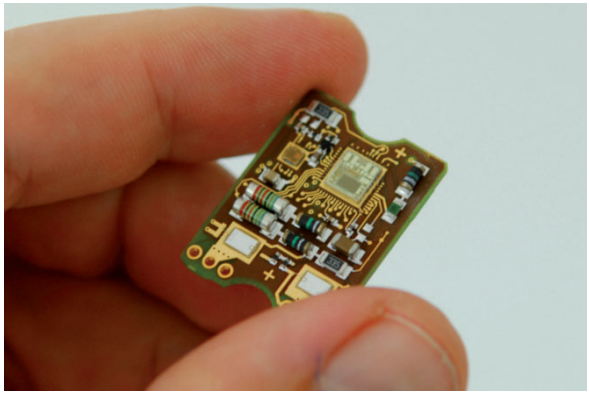
Der Vernetzung im Haushalt (Home Automation) wird eine grosse Zukunft vorausgesagt und es ist wichtig, frühzeitig den dadurch generierten Strommehrverbrauch zu kennen und einzudämmen. Mit dem Projekt *Neuste Entwicklung im Bereich Home Automation und des damit verbundenen Stromverbrauchs* [7c] wurde aufgezeigt, dass eine einfache Haussteuerung mit heute verfügbaren Komponenten nur etwa 1–3 % mehr Strom verbraucht. Messungen in zwei neuen Einfamilienhäusern haben gezeigt, haben, dass der Stromverbrauch wegen der Vernetzung um 37–54 % zunimmt (siehe Tabelle 1), da oftmals komfortable Steuerungen mit Touch Screen und Audio-/Video-Systemen installiert werden. Zwar ist dies wesentlich geringer als beim ersten vollständig

Objekt	jährlicher Strombezug ohne Vernetzung	jährlicher Strombezug durch Vernetzung	Mehrverbrauch durch Vernetzung	Jahr	Bemerkung
FutureLife-Haus	6'140	6'830	111%	2002	komfortable Haussteuerung, IT- und Multimedia-Vernetzung
Smarthome	6'370	2'381	37%	2005	
EFH Meier	6'500	3'516	54%	2007	
EFH Savia	5'000	1'864	37%	2007	
Musterwohnung mit Feller Zeptrion	4'500	83	2%	2007	nur einfache Haussteuerung, keine komplexen Steuerungsfunktionen, keine Touchpanel
Musterwohnung mit Legrand Powerline	4'500	137	3%	2007	
Musterwohnung mit KNX	4'500	63	1%	2007	
Musterwohnung mit Theben Luxor	4'500	137	3%	2007	

Tabelle 1: Zusätzlicher Strombezug für intelligentes Wohnen; untersuchte Wohnobjekte und Labormessungen. (Quelle: Encontrol GmbH)



Figur 3: Elektrizitätsbezug für intelligentes Wohnen, Messobjekt «Meier», Vergleich heute und optimiert. (Quelle: Encontrol GmbH)



Figur 4: Chip von Digitalstrom. (Quelle: Digitalstrom)



Figur 5: Technische Konzepte/Varianten der Visualisierung des Energieverbrauchs. (Quelle: iHomeLab)

ausgemessenen FutureLife-Haus. Dennoch bestehen noch erhebliche Einsparpotenziale, die es zu nutzen gilt. Primär verfügen die Komponenten über keine Stand-by-Funktionen, was dazu führt, dass diverse Anlagen ständig laufen, obwohl diese nicht genutzt werden (siehe Figur 3).

Im Projekt *Effizienzsteigerung im Haushalt durch Digitalstrom* [7d] wird untersucht, welches Potenzial digitalSTROM-Komponenten in Bezug auf die Reduktion des Stromverbrauchs bieten, insbesondere unter Berücksichtigung des Eigenverbrauchs. Nachdem erste Messkonzepte und die auszurüstenden Gebäude 2008 weitgehend definiert worden sind, ist 2009 vorgesehen, die Chips (siehe Fig. 4) in mehreren Gebäuden zu installieren und eine einjährigen Messkampagne zu starten.

Mit dem kürzlich gestarteten Projekt *MEGA: Mehr Energieeffizienz durch gezielte Anwenderinformation* [8] soll die Energieeffizienz in privaten Haushalten gesteigert werden, indem die Bewohner durch ein besseres Bewusstsein für ihren Energiebedarf zum Sparen motiviert werden. Erste Recherchen zeigten, dass in internationalen Projekten durch ein Feedback an die Bewohner im Durchschnitt 5–12 %, im besten Fall gar bis zu 25 % elektrische Energie eingespart werden konnte. Ziel des Projekts ist es, ein Konzept inkl. Prototypen mit gängigen, modernsten Kommunikationsmitteln zur Informationsvermittlung zu nutzen (siehe Fig. 5). Im Jahr 2009 werden dazu Konzepte entworfen. Dieses Projekt soll mit einer Arbeit zum Thema Smart Metering ergänzt werden, wozu bereits entsprechende Vorbereitungsarbeiten laufen.

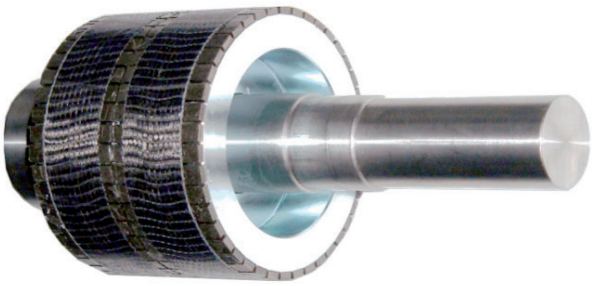
Im Rahmen der *Unterstützung bei der Entwicklung eines effizienten DSL-Modems* [9] war zu untersuchen, wo Einsparpotenziale bestehen, um den Stromverbrauch soweit abzusenken, dass die ehrgeizigen Zielwerte des «Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Equipment» erreicht werden können. Die Arbeit konzentrierte sich auf die aktuelle Marktentwicklung bei externen Netzteilen, die anstehende EU-Direktive EuP (Energy using Products), den aktuellen Stand der Effizienz bei der Spannungswandlung auf der Platine (DC/DC-Wandler) und auf mögliche Ansätze des durch die TCP/IP-Ports bedingten Stromverbrauchs. Insbesondere aufgrund der TCP/IP-Technologie konnte die Zielsetzung nicht ganz erreicht werden, doch wurden umfangreiche Erkenntnisse gewonnen, die aufgrund der Mitarbeit der Industrie in zukünftige Produktentwicklungen von DSL-Modems einfliessen werden.

Motoren/elektrische Antriebe

Der Anteil der motorischen Antriebe und Antriebssysteme am gesamtschweizerischen Stromverbrauch wird auf etwa 45 % geschätzt, was etwa 26 000 GWh/Jahr entspricht. Aufgrund des geschätzten Einsparpotenzials von über 20 %, was etwa 5 000 GWh/Jahr entspricht, unternimmt das Programm grosse Anstrengungen, dieses Potenzial zu erschliessen.

Im Projekt *Effizienter Lineargenerator/Linearmotor für Kolbenmaschinen* [10a] wurde einerseits ein effizienter Lineargenerator für eine Stirling-Freikolbenanlage gebaut und anderseits theoretische Untersuchungen zur Effizienz von Linearmotoren für den Antrieb von Kompressoren durchgeführt. Ein Prototyp des Lineargenerators konnte gebaut werden und die durchgeführten Messungen sind derart Erfolg versprechend, dass die Arbeiten durch die Industrie weitergeführt werden. Die Berechnungen zeigten zudem, dass ein Linearmotor zwar eine hohe Energieeffizienz erreichen kann, nicht jedoch mit einem hoch effizienten rotierenden Permanentmagnetmotor konkurrenzieren kann.

Ein *Effizienter Permanentmagnetmotor im Bereich 3 kW* [10b] wurde in einem IEC-Normgehäuse als Prototyp gebaut und ausgemessen und es wurde eine effiziente Ansteuerung entwickelt. Messungen haben einen hohen Wirkungsgrad von knapp 90 % ergeben, was höher ist als die heute gängigen effizienten Asynchronmotoren

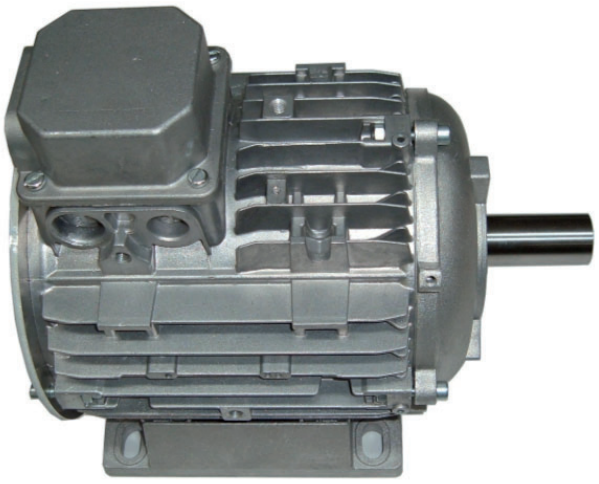


Figur 6: Rotor des IEC 3-kW-Permanentmagnetmotors. (Quelle: Circle Motor AG)

der eff1-Klasse in diesem Leistungsbereich. Mit einer *Effizienzsteigerung eines hoch effizienten IEC 3-kW-Permanentmagnetmotors inklusiv energetischer Messung als Pumpenanwendung* [10c], soll die Effizienz von über 90 % mit einem Prototypen nachgewiesen und als Anwendung an einem Pumpenstand ausgemessen werden. Nachdem die Komponenten 2008 ausgelegt worden sind (siehe Fig. 6 und 7), erfolgt 2009 der Bau und die Ausmessung.

Mit einer Effizienzsteigerung eines hoch effizienten IEC 3-kW-Permanentmagnetmotors inklusiv energetischer Messung als Pumpenanwendung [10c], soll die Effizienz von über 90 % mit einem Prototypen nachgewiesen und als Anwendung an einem Pumpenstand ausgemessen werden. Nachdem die Komponenten 2008 ausgelegt worden sind (siehe Fig. 6 und 7), erfolgt 2009 der Bau und die Ausmessung.

Mit dem Projekt *Verbesserung der Energieeffizienz von Aufzügen und Förderanlagen durch Entwicklung eines neuartigen Frequenzumrichters* [11] wurde anstelle eines klassischen U-Umrichters ein neuartiger I-Umrichter entwickelt. Dank diesem konnte nicht nur eine Rückspeisung der Energie beim Bremsen realisiert werden, sondern der I-Umrichter kann beim Stillstand des Aufzugs



Figur 7: 3-kW-IEC-Permanentmagnetmotor. (Quelle: Circle Motor AG)

vom Netz getrennt werden und hat damit keinen Stand-by-Verlust.

Dies ist sehr bedeutend, haben doch frühere Arbeiten aufgezeigt, dass Personenlifte – insbesondere im Wohnbereich – einen Stand-by-Anteil von teilweise über 70 % am Gesamtstromverbrauch aufweisen.

Ein wesentlicher Aspekt für den effizienten Einsatz von elektrischen Antrieben stellt deren korrekte Dimensionierung und das rasche Erkennen von Einsparpotenzialen dar. Mehrere Projekte sollen EnergieSchweiz entsprechende Tools dazu zur Verfügung stellen. Mit dem Projekt *OPAL-Erweiterung für Permanentmagnetmotoren* [12] wurde das bestehende Tool für die energieoptimale Auslegung von Pumpen und Lüftern um ein Modul für Permanentmagnetmotoren ergänzt. Zudem wurde eine Web-fähige Oberfläche in den Sprachen Deutsch, Französisch und Englisch programmiert sowie eine umfassende Motorendatenbank mit etwa 10'000 Motoren eingepflegt.

Mit *Sotea – ein Software Tool zur Ermittlung des Effizienzpotenzials bei elektrischen Antrieben* [13a], soll eine rasche Analyse eine Potenzialabschätzung eines Maschinenparks ermöglichen. Schliesslich wird mit dem Projekt *Analyse und Vorgehen zur energetischen Optimierung von Pumpen bei Wasserversorgungsanlagen* [14] gemeinsam mit der Industrie Fachwissen erarbeitet, um bei bestehenden Wasserversorgungen rasch das Effizienzpotenzial zu eruieren. Die auszuarbeitende Methodik wird anschliessend anhand mehrerer Fälle geprüft und optimiert.

Geräte

Um der Energieeffizienz bereits im Beschaffungsprozess die entsprechende Bedeutung zukommen zu lassen, wurden im Projekt *Produktedeklaration Kleinkühlschränke* [15a] gemeinsam mit einem internationalen Industrievertreter Grundlagen für ein Deklarationsformular entwickelt, damit sich der Käufer über die Effizienz und den damit verbundenen Kosten (Life-Cycle-Cost-Betrachtung) bewusst werden kann. Da bei diesen Arbeiten festgestellt wurde, dass bei der Selbstdeklaration nicht alle Anbieter vergleichbare Angaben machen, werden im Projekt *Messreihe Kleinkühlschränke* [15b] verschiedene Produkte nach den gleichen Messgrundlagen ausgemessen und miteinander verglichen. Die Ergebnisse werden 2009 erwartet und sollen anschliessend durch EnergieSchweiz umgesetzt werden.

Obwohl bereits Kühlschränke der Effizienzklasse A++ auf dem Markt verfügbar sind, besteht nach wie vor ein erhebliches Einsparpotenzial. Mit der Unterstützung eines namhaften schweizerischen

Herstellers sollen im Projekt *Energieverbrauchsminimierung von Kühlschränken durch thermische Optimierung* [16] die thermischen Verluste unter Verwendung neuartiger Wärmedämmungen substantiell vermindert werden. Nach ersten Analysen werden die untersuchten Optimierungsmöglichkeiten 2009 gebaut und geprüft.

Viele Anlagen und Geräte laufen oft während 24 Stunden, obwohl dies nicht erforderlich wäre. Im Projekt *Betrieb ohne Nutzen – BoN* [13b] wurde diesen Verbrauchern im Dienstleistungssektor nachgespürt. Die Analysen verschiedener Tagesgänge konnten dazu nützliche Informationen liefern. Obwohl es sich erst um eine Grobschätzung handelt, kann dennoch ausgesagt werden, dass sich der Verbrauch dieser Anlagen im Dienstleistungsbereich in der Grössenordnung von mehr als 2'000 GWh/Jahr bewegt. Folgearbeiten werden aber notwendig sein, um diese Abschätzung zu vertiefen und um entsprechende Effizienzmassnahmen aufzuzeigen.

Als Alternative zu statischen USV-Anlagen können ab Leistungen von etwa 500 kVA rotierende USV-Anlagen eingesetzt werden. Die Einsatzbereiche und die Technologien weichen von denjenigen für statische USV-Anlagen ab. Dies hat insbesondere auch Auswirkungen auf deren Effizienz und Stromverbrauch. Im neu gestarteten Projekt *Rotierende USV-Anlagen und dynamische Energiespeicherung* [17] erfolgt ein Vergleich der rotierenden mit den statischen USV-Anlagen inklusiv Vergleich der dynamischen Energiespeicherung mit Batterieanlagen.

Im Bereich der Elektroheizungen ist das geschätzte Energiesparpotenzial erheblich. Dazugehörende Massnahmen reichen von der Optimierung der Steuerungen über Ergänzungsheizungen, sehr guter Wärmedämmung (z.B. Minergie-P) bis zum Ersatz der Wärmeerzeugung (z.B. Wärmepumpe) durch den Einbau einer Zentralheizung. Für die Betreiber von Objekten mit Elektroheizungen besteht das Hauptproblem beim meist sehr grossen Finanzierungsbedarf. Mit dem Projekt *Elektroheizungen – Massnahmen und Vorgehensoptionen zur Reduktion des Stromverbrauchs* [18] werden alle technischen Möglichkeiten analysiert und einerseits Grundlagen für umfassende Massnahmenpakete bereitgestellt und anderseits technische Erkenntnislücken identifiziert.

Licht/Leuchten

Durch die anstehenden regulatorischen Vorgaben werden vermehrt Energiesparlampen mit elektronischen Vorschaltgeräten zum Einsatz kommen. Aufgrund verschiedentlich geäusserter Bedenken wird im Projekt *Netzrückwirkungen von Energiesparlampen* [19] untersucht, in welchem Ausmass sich aufgrund einer vermehrten Verwendung von Sparlampen Rückwirkungen aufs Netz ergeben. Dazu sind verschiedene Lampen bezüglich Oberwellen gemessen worden und im Jahr 2009 werden auf dieser Basis mittels Hochrechnungen und theoretischer Überlegungen die gesamthaften Auswirkungen abgeschätzt.

Mit der Entwicklung der weissen LED (Licht emittierende Diode) steht eine neue Technologie zur effizienten Raumbeleuchtung zur Verfügung. Doch Markt und Entwicklung sind sehr unübersichtlich und verbindliche Qualitätsstandards, welche eine LED abschliessend und vergleichend beschreiben, sind kaum vorhanden. Konsumenten sind beim Kauf oft überfordert und das Risiko eines Fehlkaufes ist – auch angesichts der rasanten Entwicklung – sehr gross. Mit dem eben gestarteten Projekt *Qualitätsmerkmale der LED-Beleuchtung* [20] erfolgt eine systematische Aufarbeitung der offenen Fragen im Zusammenhang mit LED-Anwendungen für Raumbeleuchtung. Dabei soll eine ganzheitliche Beschreibung der Qualitätsmerkmale der LED-Beleuchtung erstellt werden.

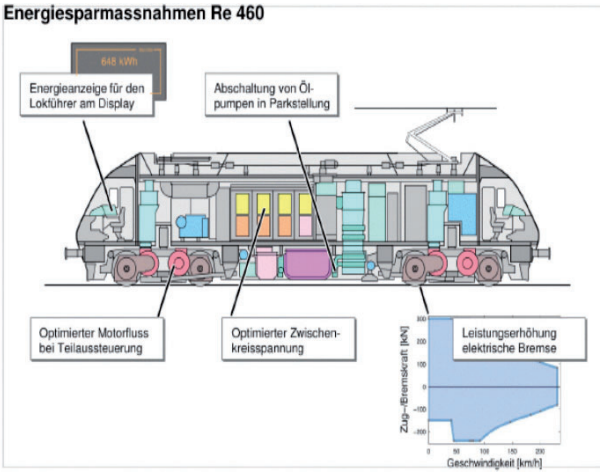
Diverses

Nachdem ein erstes Projekt bei den SBB substantielle Einsparungen in der Grösse von mehreren 100 GWh/Jahr aufgezeigt hat, ist es erfreulich, dass die SBB durch gezielte Massnahmen die Umsetzung zügig angeht. So werden Lokomotivführer zum energieeffizienten Fahren ausgebildet und technische Optimierungen am Rollmaterial werden sukzessive umgesetzt (siehe Fig. 8 und 9). Mit dem neuen Projekt *Verifizierung der Stromeinsparung durch energieeffizientes Zugsmanagement* [21] wird der Energiespareffekt des bei den SBB in Entwicklung stehenden intelligenten Zugmanagements konkretisiert. Der Spareffekt entsteht durch Vermeidung von Signalhalten und vorausschauende Fahrweise durch Vorgabe eines optimierten Fahrprofils.



Figur 8: Effizientes Fahren spart bis 100 GWh/Jahr. (Quelle: SBB)

Zur Quantifizierung der heutigen Situation wurden im Jahr 2008 Konzepte und Methoden entwickelt, welche die Zahl der Konflikte (Signalhalte) und den Fahrstil aus Betriebsdaten (Zeitstempel von Zugsdurchfahrten an Hauptsignalen) extrahieren. Weiter wurden erste Auswertungen und Hochrechnungen auf das Gesamtnetz durchgeführt. Die Analyse soll auf die Bözberg-Linie und die Strecke Zürich – Chur ausgedehnt werden, um auch Einflüsse von Güterverkehr und Fernverkehr zu berücksichtigen. Für das langfristige Monitoring des Energieverbrauchs im Traktionsbereich der SBB wurde schliesslich ein Konzept zur betrieblichen Erfassung wichtiger Einflussgrössen direkt auf den Triebfahrzeugen entwickelt, welches 2009 implementiert und auf einigen Fahrzeugen zum Einsatz kommen wird.



Figur 9: Technische Optimierung der Lok RE 460. (Quelle: SBB)

Nationale Zusammenarbeit

Die Vertreter der etablierten BFE-Trendwatching-Gruppen in den Bereichen Informations- und Kommunikationstechnik, elektrische Antriebe, unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) und Hochtemperatursupraleitung aus Industrie, Hochschule und Forschungsstätten treffen sich periodisch. Damit steht eine bewährte, nationale Informations- und Diskussionsplattform für interessierte Fachleute zur Verfügung.

Die zunehmende Vernetzung im Haushalt dürfte einen substantiellen Stromanstieg mit sich bringen. Mit dem Kompetenzzentrum iHomeLab an der Hochschule Luzern steht neu eine Infrastruktur mit entsprechender Fachkompetenz zur Verfügung.

Das Projekt *Materials with Novel Electronic Properties (Manep)* des Schweizerischen Nationalfonds umfasst 19 nationale Institute sowie 6 Industriepartner. 8 Institute beschäftigen sich theoretisch oder experimentell mit Hochtemperatursupraleitern.

Die Zusammenarbeit mit der Industrie konnte in verschiedenen Bereichen (z.B. Eisenbahn, Motorenindustrie, Telecom-Unternehmungen, Beleuchtungs- und Haushaltsgeräteindustrie) weitergeführt resp. ausgeweitet werden. Bei neuen Projekten wird soweit möglich darauf geachtet, dass ein Industriepartner im Projekt eingeschlossen ist. Damit wird angestrebt, dass bei einem Projekterfolg die anschliessende Umsetzung angegangen wird.

Generell wird ein enger Kontakt mit dem Programm EnergieSchweiz [27] gepflegt, was wesentlich zur Umsetzung der Forschungsresultate beiträgt. Für das nationale Motoren-Programm *Topmotors* wurden z.B. punktuell fehlende, technische Grundlagen aufgearbeitet.

Beide Eidgenössischen Technischen Hochschulen (Zürich, Lausanne) werden – soweit zweckmässig – in die Forschungsaktivitäten miteinbezogen und auch der Einbindung von Fachhochschulen wird grosse Bedeutung beigemessen.

So haben die Fachhochschulen Westschweiz (Sion), Nordwestschweiz (Brugg-Windisch), Ostschweiz (Chur) und Zentralschweiz (Horw/Luzern) im Motoren-/Leistungselektronikbereich und die Fachhochschule Westschweiz (Yverdon) im Bereich der magnetokalorischen Energiekonversion Projektarbeiten geleistet. Ferner bestehen Kontakte zur Fachhochschule Zürich–Winterthur. Das *Kompetenzzentrum Energie- und Informationstechnik* an der ETH Zürich leistet weiterhin einen wichtigen Beitrag zur nationalen und internationalen Zusammenarbeit.

Durch die gemeinsame Finanzierung von Forschungsprojekten konnten bestehende Kontakte zu weiteren Förderinstitutionen wie dem *Energiesparfonds des EWZ*, dem *Stromsparfonds Basel* und der *KTI* gepflegt werden.

Ein enger Kontakt zu den schweizerischen Energieagenturen *EnAW*, *eae* und *S.A.F.E* [28] wird mittels diverser Projekte und über die etablierten Trendwatching-Gruppen gepflegt. In diversen Projekten sind auch Branchenverbände wie z.B. *swissT.net, Swissmem, Swico* eingebunden. So wurden die Arbeiten *am Code of Conduct im Set-top-Boxen-Bereich* in Zusammenarbeit mit dem Branchenverband *Swico* und der *Energie Agentur Elektrogeräte (eae)* durchgeführt.

Internationale Zusammenarbeit

Mit der Teilnahme an internationalen Konferenzen und Workshops sowie durch die Teilnahme an internationalen Projekten werden weltweit Kontakte gepflegt und internationale Forschungsergebnisse ausgetauscht.

Eine internationale Zusammenarbeit im Rahmen des 6. EU-Rahmenprogramms (Projekt STRP-505724-1 Hipermag) ist im Laufe des Jahres 2008 abgeschlossen worden. Es wurden supraleitende MgB_2-Bänder und -Drähte für Anwendungen bei Temperaturen von 20 K entwickelt. Diesem Programm gehörten 13 Gruppen an.

Durch die Teilnahme am IEA-Programm *Assessing the Impact of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector* werden die weltweiten Aktivitäten auf diesem Gebiet verfolgt. Schliesslich sei erwähnt, dass die Universität Genf aufgrund ihrer einmaligen Messapparaturen ein HTSL-Messprogramm zur Charakterisierung elektrischer Leiter aus den USA, Japan und Deutschland durchführen kann.

Durch die engagierte Mitarbeit an den Vorbereitungsarbeiten für das neue IEA-Programm *4E (Efficient Electrical End-Use Equipment)* konnten neue, internationale Kontakte geknüpft werden. Dieses IEA-Programm beschäftigt sich mit Settop-Boxen, Beleuchtung und elektrischen Antrieben/Motoren. Ergänzend wird das Thema Standby aus grundsätzlicher Sicht bearbeitet, und in einem separaten Projekt *Mapping and Benchmarking* werden internationale Erfahrungen bei der Markteinführung effizienter Geräte analysiert. Die Schweiz hat die Federführung beim Motoren-Annex dieses Programms übernommen und die Vorarbeiten erfolgreich abgeschlossen.

Die Programmleitung hat sich auch im Rahmen des EU-Programms *Intelligent Energy Europe IEE* stark engagiert. So arbeitet die Schweiz seit Projektbeginn am Projekt *Development of the Market for Energy Efficient Servers* [29] mit, bringt Fachwissen ein, und kann am erarbeiteten Wissen partizipieren.

Die EU hat in der schnelllebigen Welt der Kommunikations- und Informationstechnologie im Rahmen der europäischen Stand-by-Initiative freiwillige Vereinbarungen, sogenannte Code *of Conducts (CoC)* [30] in den Bereichen *Settop-Boxen*, *Broadband Devices* und *External Power Supply* abgeschlossen. Sowohl bei der Entstehung als auch in der kontinuierlichen Verbesserung dieser CoC wird die Schweiz einbezogen und kann ihre entsprechenden Erfahrungen einbringen. Ferner werden die Arbeiten im Rahmen der *EuP-Direktive* verfolgt.

Persönliche Kontakte zu verschiedenen Energieagenturen (insb. Dänemark, Deutschland, Österreich, Frankreich) sowie zu Schlüsselpersonen von internationalen Programmen wie z.B. dem UK Market Transformation Programme, verhelfen immer wieder zu interessanten Anregungen. Ferner werden die Kontakte mit der Europäischen Kommission, der IEA (International Energy Agency), der EPA (Environmental Protection Agency, USA) und dem LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory, USA) weiter gepflegt.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten sind mit geeigneten Massnahmen möglichst effizient umzusetzen. Dazu sind oftmals vorbereitende, marktnahe Forschungsarbeiten erforderlich. Die folgenden Arbeiten haben diese Zielsetzung.

Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)

Die EU hat mit dem *Code of Conduct (CoC)* ein Instrument geschaffen, mit dem sich engagierte Industrien freiwillig verpflichten können, Geräte mit minimalen Verbrauchswerten zu produzieren oder zu beschaffen. Die Schweiz und insbesondere die Vertreter der Swisscom haben wesentlich dazu beigetragen, dass der CoC für *Broadband Devices* mit ambitiösen Zielwerten in Kraft gesetzt werden konnte. Beim CoC für *Settop-Boxen* hat sich die Schweiz zwar ebenfalls mit ehrgeizigen Werten eingebracht, doch hat sich leider die Industrie dagegen erfolgreich gewehrt, so dass nun davon ausgegangen werden muss, dass einerseits der CoC mit einer wesentlich kleineren Industriegruppe weiter verfolgt wird und anderseits die Industrie eine eigene Branchenvereinbarung ausarbeitet, welche etwa 90 % des Marktes abdeckt. Damit sollen allfällige regulatorische Massnahmen der EU im Rahmen der EuP-Direktive verhindert werden.

Motoren / elektrische Antriebe

Die Umsetzung erarbeiteter Forschungsergebnisse ist ein grosses Anliegen und diesbezügliche, vorbereitende Arbeiten werden – wo notwendig – durch das Programm unterstützt. Mit dem Projekt *Certificate of Advanced Studies: Effizienz und Energie in Technik und Industrie* [22] werden Grundlagen geschaffen, damit sich Berufstätige im Rahmen einer Weiterbildungsveranstaltung

über effiziente Motoren/Antriebe informieren können. Nachdem ein Pilotkurs aufgrund mangelnder Anmeldungen nicht durchgeführt werden konnte, wird 2009 ein erneuter Anlauf genommen. Dazu wurde die Ausrichtung den erhobenen Bedürfnissen der Teilnehmenden angepasst.

Das Projekt *Promotion und Koordination EU Motor Challenge Programme der EU* [23] hatte zum Ziel, den Betreibern von elektrischen Antrieben Informationen zum europäischen Motor Challenge Programm (MCP) zu vermitteln und sie zu eigenen Aktivitäten im Bereich Motoren-Effizienz zu bewegen. Das Projekt fungierte als National Contact Point des europäischen Motor Challenge Programms und koordinierte den Informationsfluss zwischen den nationalen Aktionen im Bereich Antriebseffizienz. Das Motor-Challenge-Projektteam beteiligte sich an der Vorbereitung eines eigentlichen Umsetzungsprogramms zur Antriebseffizienz. Ende 2007 startete dieses Programm unter dem Namen Topmotors und die bisherigen «Motor Challenge»-Promotions-Aktivitäten wurden 2008 sukzessive in Topmotors übergeführt [31].

Die Schweiz engagierte sich stark am Aufbau des neuen IEA-Projekts 4E (Efficient Electrical End-Use Equipment). Mit der *IEA-Exco-Vertretung des Implementing Agreements 4E* [24] nimmt sie nun auch an den anlaufenden Arbeiten aktiv teil. Im Moment stehen die Themen *Stand-by*, *Settop-Boxen*, *Lighting*, *Mapping & Benchmarking* und *Antriebssysteme* im Vordergrund. Aufgrund diverser Vorarbeiten im vorliegenden Forschungsprogramm und des internationalen Harmonisierungsprogramms Seeems (Standards for Energy Efficient Electric Motors Systems) hat die Schweiz nach den Vorbereitungsarbeiten für den *Motor Systems Annex for 4E* [25] die Rolle des Operating Agent eingenommen. Diese Arbeiten wurden im Herbst 2008, nach der Genehmigung durch das Executive Committee, gestartet. Mit der Vorbereitung und der Durchführung der internationalen Motoren-Konferenz *Motor Summit* erfolgte der formelle Auftakt. Als nächstes werden die verschiedenen Arbeitspakete inhaltlich konkretisiert.

Geräte

Nachdem die freiwillige Vereinbarung *Code of Conduct für USV-Anlagen* [26] Anfang 2008 verabschiedet wurde, und mehrere internationale Unternehmungen diese im Laufe des Jahres unterzeichnet haben, erfolgten abgesehen von den Aktualisierungen einzelner Merkblätter und Dokumente keine nennenswerten Aktivitäten.

Bewertung 2008 und Ausblick 2009

Im Rahmen der Neuorganisation des Bundesamts für Energie ergaben sich 2008 für das vorliegende Forschungsprogramm personelle Veränderungen bei der Bereichsleitung. Nachdem diese Position Anfang 2008 neu besetzt wurde, erfolgte nach einer Einarbeitungszeit eine erneute personelle Veränderung. Erst im Oktober 2008 konnte die Stelle der Bereichsleitung wieder neu besetzt werden. Neben diesen personellen Veränderungen erfolgte auch eine technische Migration der Website [32] in die IT-Umgebung des BFE. Diese konnte ebenfalls im Herbst abgeschlossen werden und die aktuelle Homepage verfügt nun über ein BFE-konformes Erscheinungsbild.

Im Bereich der **Technologie** wurden bei der *thermoelektrischen Energiekonversion* Fortschritte in der Materialforschung gemacht. So konnte die massgebende *Figure of Merit* substantiell erhöht werden. Aufgrund des bevorstehenden Abgangs des noch arbeitenden Doktoranden an der ETHZ ist es wichtig, dass das applikatorische Fachwissen zur thermoelektrischen Energiekonversion nicht verloren geht. Aufgrund diverser Bemühungen konnte eine Lösung gefunden werden, die das erarbeitete Fachwissen sichert. Es ist ferner erfreulich, dass in einem Folgeprojekt eine der identifizierten, erfolgversprechenden Nutzungsmöglichkeiten des *magnetokalorischen Effekts* weiter vertieft wird. Im Bereich der *Hochtemperatursupraleitung* wurden zwar die internationalen Arbeiten im Rahmen des entsprechenden IEA Implementing Agreements fortgesetzt. Trotz diverser konkreter Gespräche mit der Industrie konnte hingegen kein Industrieprojekt gestartet werden. Auch führten mehrere Industriegespräche beim Thema *Druckluftspeichertechnologie* nicht zum gewünschten Folgeprojekt. Die entsprechenden Anstrengungen werden 2009 fortgesetzt.

Bei den **effizienten Anwendungen** konnten bei den Settop-Boxen im Rahmen der europäischen EuP-Direktive und im Rahmen der Erarbeitung einer verschärften freiwilligen Vereinbarung diverse Anregungen und Erkenntnisse eingebracht werden. Diese Bestrebungen sollen fortgesetzt werden. Ebenfalls im Bereich der *Informations- und Kommunikationstechnik* konnte zum Thema *Home Automation* der damit verbundene hohe Strommehrverbrauch nachgewiesen und anlässlich mehrerer öffentlicher Auftritte thematisiert werden. Dank grossen Engagements der Schweiz konnte das IEA Implementing Agreement 4E erfolgreich gestartet und – nach intensiven Vorarbeiten unter Schweizer Führung – ein erster Annex zum Thema Motoren genehmigt werden.

Ebenfalls ist sehr erfreulich, dass die SBB die erarbeiteten Ergebnisse zur Energieeffizienz umsetzt und eine grosse Erkenntnislücke im Bereich des effizienten Zugmanagements mit einem Folgeprojekt angeht. Ferner ist erwähnenswert, dass das Thema der *neuen Lichttechnologie* LED in einem Forschungsprojekt aufgearbeitet wird.

Liste der F+E-Projekte

[1] R. Flükiger (rene.flukiger@physics.unige.ch), Université de Genève, Genève: Implementing Agreement for a Cooperative Programme for Assessing the Impact of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector (JB Projekt 101533).

[2] P. Egolf, A. Kitanovski, O. Sari (peter.egolf@heig-vd.ch), HEIG-VD, Yverdon: a) Anwendung der magnetischen Kältetechnik und ihre Bewertung (SB Projekt 101776) ● b) Zentrale magnetische Kühl- und Kältemaschinen und ihre Bewertung (JB Projekt 102873) ● c) Anwendungen der magnetischen «Power Production» und ihre Bewertung (SB Projekt 101776).

[3] K. Fröhlich, A. Bitsch, C. Eisenhut (froehlich@eeh.ee.ethz.ch), ETH Zürich: a) Das thermoelektrische Kraftwerk (SB Projekt 101356) ● b) Anwendungspotenzial der thermoelektrischen Stromerzeugung im Hochtemperaturbereich (SB Projekt 101706).

[4] A. Weidenkaff (anke.weidenkaff@empa.ch), EMPA, Dübendorf: a) Geo-Thermopower (Geo-TEP)- Material (SB Projekt 101356) ● b) Materialentwicklung für solarthermische Stromerzeugung (Solar-TEP) (SB Projekt 101706) ● c) Erstellen und Modellierung eines thermoelektrischen oxidischen Moduls (TOM) als Demonstrator (JB Projekt 101356) ● d) Layered Thermoelectric Converters (LTEC) (JB Projekt 101356).

[5] B. Aebischer (baebischer@ethz.ch), CEPE, ETH, Zürich: Kompetenzzentrum Energie und Informationstechnik (JB Projekt 30963) www.biblioite.ethz.ch.

[6] M. Hufschmid, A. Corliano (markus.hufschmid@fhnw.ch), Fachhochschule Nordwestschweiz, Muttenz: Energieverbrauch der mobilen Kommunikation (SB Projekt 102013).

[7] A. Huser, T. Grieder (alois.huser@encontrol.ch), Encontrol GmbH, Niederrohrdorf: ● a) Stromeffiziente Rechenzentren durch Sensibilisierung über eine transparente Kostenrechnung (SB Projekt 102259) ● b) Development of the Market for energy efficient Servers (JB Projekt 101967) www.efficient-server.eu ● c) Neuste Entwicklung im Bereich Home Automation und des damit verbundenen Stromverbrauchs (SB Projekt 102344) ● d) Effizienzsteigerung im Haushalt durch Digitalstrom (JB Projekt 102468) www.digitalstrom.org.

[8] R. Kistler, M. Fercu, A. Egli (alexander.klapproth@hslu.ch), Hochschule Luzern, Technik + Architektur, Horw: MEGA, Mehr Energieeffizienz durch gezielte Anwenderinformation (JB Projekt 102668).

[9] C. Jehle (cj@digitalstrom.org), Digitalstrom Association, Zürich: Unterstützung bei der Entwicklung eines effizienten DSL-Modems (SB Projekt 102543).

[10] J. Lindegger (info@circlemotor.ch), Circle Motor AG, Gümligen: a) Effizienter Lineargenerator/Linearmotor für Kolbenmaschinen (SB Projekt 100915) ● b) Effizienter Permanentmagnetmotor im Bereich 3kW (SB Projekt 100915) ● c) Effizienzsteigerung eines hocheffizienten IEC 3kW Permanentmagnetmotor inklusiv energetischer Messung als Pumpenanwendung (JB Projekt 100915).

[11] P. Kanyio, M. Bolla (mario.bolla@telma.ch), Econodrives GmbH, Seftigen: Verbesserung der Energieeffizienz von Aufzügen und Förderanlagen durch Entwicklung eines neuartigen Frequenzumrichters (SB Projekt 101691).

[12] R. Tanner (tanner@semafor.ch), Semafor Informatik & Energie AG, Basel: OPAL-Erweiterung für Permanentmagnet-motoren (SB Projekt 102128).

[13] C. U. Brunner (cub@cub.ch), S.A.F.E., Zürich: a) Software-Tool zur Ermittlung des Effizienzpotenzials bei elektrischen Antrieben (JB Projekt 102545) ● b) Betrieb ohne Nutzen BoN (SB Projekt 102345).

[14] B. Kobel, Y. Roth (yann.roth@rysering.ch), Ryser Ingenieure AG, Bern: Analyse und Vorgehen zur energetischen Optimierung von Pumpen bei Wasserversorgungsanlagen (JB Projekt 102686).

[15] A. Burri (adrian.burri@awtec.ch), Awtec AG für Technologie und Innovation, Zürich: a) Produktedeklaration Kleinkühlschränke (SB Projekt 101953) ● b) Messreihe Kleinkühlschränke (JB Projekt 102672).

[16] M. Koebel (matthias.koebel@empa.ch), EMPA, Dübendorf: Energieverbrauchsminimierung von Kühlschränken durch thermische Optimierung (JB Projekt 102855).

[17] P. Mauchle, (peter.mauchle@sing.ch), Schnyder Ingenieure AG, Hünenberg: Rotierende USV-Anlagen und dynamische Energiespeicherung (JB Projekt 102828).

[18] J. Nipkow (juerg.nipkow@arena-energie.ch), ARENA, Arbeitsgemeinschaft energie-alternativen, Zürich: Elektroheizungen – Massnahmen und Vorgehensoptionen zur Reduktion des Stromverbrauchs (JB Projekt 102648).

[19] G. Dürrenberger (gregor@mobile-research.ethz.ch), ETH, Zürich und G. Klaus (klaus@maxwave.ch), Maxwave, Zürich: Netzrückwirkungen von Energiesparlampen (JB Projekt 102644).

[20] S. Gasser (stefan.gasser@eteam.ch) eTeam, Zürich: Qualitätsmerkmale der LED-Beleuchtung (Projekt 102901).

[21] M. Meyer, S. Menth (markus.meyer@emkamatik.com), Emkamatic GmbH, Wettingen: Verifizierung der Stromeinsparung durch energieeffizientes Zugsmanagement (JB Projekt 102645).

Liste der P+D-Projekte

[22] V. Härri (vinzenz.haerri@hslu.ch), Hochschule Luzern, Horw: Certificate of Advanced Studies: Effizienz und Energie in Technik und Industrie (JB Projekt 101796).

[23] J. Nipkow (juerg.nipkow@arena-energie.ch), ARENA, Arbeitsgemeinschaft energie-alternativen, Zürich: Promotion und Koordination EU Motor Challenge Programme (SB Programme 100403) www.motorchallenge.ch und www.topmotors.ch.

[24] R. Brüniger (roland.brueniger@r-brueniger-ag.ch) R. Brüniger AG, Ottenbach: IEA-EXCO-Vertretung des Implementing Agreements 4E (JB Projekt 102435).

[25] C. U. Brunner (cub@cub.ch), A+B International, Zürich: Motor Systems Annex for 4E (JB Projekt 102221).

[26] G. Schnyder (gilbert.schnyder@sing.ch), Schnyder Ingenieure AG, Hünenberg; Code of Conduct für USV-Anlagen (JB Projekt 101109).

Referenzen

[27] Internetseite von EnergieSchweiz und dem BFE www.energie-schweiz.ch.

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

[29] Internetseite für IEE-Projekt www.efficient-server.eu.

[30] Internetzugriff der EU bezüglich den CoC-Aktivitäten http://re.jrc.ec.europa.eu/energyefficiency/.

[31] Internetseite des Motor Challenge Programms www.top motors.ch.

[32] Internetseite des Forschungsprogramms www.electricity-research.ch. Download von Zusammenfassungen, Jahres- und Schlussberichten durchgeführter Forschungsarbeiten.

Impressum

Juni 2009
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
Druck: Ackermanndruck AG, Bern-Liebefeld
Bezug der Publikation: www.energieforschung.ch

Programmleiter
Roland Brüniger
R. Brüniger AG
Zwillikerstrasse 8
CH-8913 Ottenbach
roland.brueniger@r-brueniger-ag.ch

Bereichsleiter
Dr. Michael Moser
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
michael.moser@bfe.admin.ch

Rapport de synthèse 2008 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2008 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Netze

Rainer Bacher

Rainer.Bacher@BacherEnergie.ch



Schweizer Stromversorgungsgesetz (StromVG) in Kraft getreten

Das StromVG bezweckt, die Voraussetzungen für eine sichere Elektrizitätsversorgung zu schaffen und soll den wettbewerbsorientierten Elektrizitätsmarkt national wie international stärken. Das StromVG soll auch zu mehr Innovationen in Netzen und Systemen führen.

Programmschwerpunkte

Elektrische Netze werden benötigt, um die Versorgung der Kunden mit elektrischer Energie sicherzustellen. Übertragungsnetze mit sehr hoher Spannung ermöglichen den Transport von grossen Energiemengen von den Grosskraftwerken über weite Distanzen und mit geringen Verlusten zu den Verbraucherzentren. Verteilnetze mit tieferer Spannung erlauben es, den Strom zum einzelnen Endverbraucher zu verteilen. Die effiziente und sichere Übertragung und Verteilung von Strom ist eine fundamentale Voraussetzung für das Funktionieren unserer heutigen Gesellschaft. Die Netze in der Schweiz müssen dem wachsenden Elektrizitätsbedarf folgen, gleichzeitig den transeuropäischen Strommarkt ermöglichen und die grossteils nicht steuerbaren erneuerbaren Energien wie etwa Wind sicher integrieren. Netzforschung spielt bei dieser Entwicklung eine wichtige Rolle.

Die folgenden drei Programmschwerpunkte wurden im Forschungskonzept 2008–2011 festgelegt:

Forschungsschwerpunkt «Elektrizitätsnetze»

Modellierung und Evaluation von Wechselwirkungen hinsichtlich Netzbetrieb und -design, Versorgungszuverlässigkeit und Organisation des Elektrizitätsmarktes; praxisnahe Bewertung von ökonomischen und technischen Wechselwirkungen bei marktbasierten Engpassmanagementsystemen und beim Netzausbau; Analyse der Versorgungszuverlässigkeit mit Berücksichtigung liberalisierter Marktarchitekturen; Systemkonzeption für effizientes und sicheres Netzmanagement (auch für gestörte/gefährdete Betriebszustände).

Forschungsschwerpunkt «Gekoppelte Energienetze (Elektrizität, Gas, Wärme)»

Entwurf und Analyse von zukunftsweisenden Energienetzarchitekturen unter Ausnutzung von Synergieeffekten (Verteilung, Übertragung, Konversion, Speicherung); Bewertung der Versorgungssicherheit bei Multi-Energieinfrastrukturen; Abschätzung der sozialen, ökonomischen und ökologischen Auswirkungen.

Forschungsschwerpunkt «Technologien für Energienetze»

Flexible Energieflusssteuerungen (FACTS); Effizienzsteigernde Verteil- und Übertragungsnetzelemente.

Mit diesen drei Forschungsschwerpunkten soll mittel- und langfristig zu den folgenden Zielen beigetragen werden:

- Gewährleistung der jederzeitigen Versorgungssicherheit von allen am Netz angeschlossenen Netznutzern (Erzeuger, Verbraucher, Speicher);
- Vertieftes Verständnis der Zusammenhänge zwischen Art, Zeitpunkt und Ort der Stromerzeugung und des Stromverbrauchs und deren Auswirkungen auf die Netze bzw. den Netzbetrieb;
- Erhöhung der ins Netz eingespeisten CO_2-freien bzw. erneuerbaren Energien ohne Gefährdung der technischen Versorgungssicherheit;
- Sensibilisierung der Endverbraucher bezüglich des effizienten, kosten-, preis- und umweltbewussten Endverbrauchs von Strom und Energie, welche über Energienetze bezogen wird.

Das Forschungsprogramm Netze wurde 2006 initiiert und befindet sich seither im Aufbau. Ziel im Jahr 2008 war es, diesen Aufbau voranzutreiben, die für das Programm nötigen Koordinationsstrukturen weiter auszubauen, den Kontakt mit den Forschern auf dem Gebiet zu intensivieren sowie relevante Forschungsprojekte für die kommenden Jahre zu initiieren und zu finanzieren.

Diese kurzfristigen Programmziele sollen kompatibel sein mit dem langfristigen Ziel eines sicheren, nachhaltigen und effizienten Elektrizitätssystems. Die Schweiz mit ihren Forschungsinstitutionen (ETH, Fachhochschulen, Industrie und KMU) kann dafür national wie auch international wesentliche Beiträge leisten. Aufgrund der heterogenen Struktur der und der individuellen Ziele und Strategien der Stakeholders[1], der schweizerischen und europäischen gesetzlichen Rahmenbedingungen und der aktuell statt findenden politischen Diskussion um die zukünftige Stromversorgung der Schweiz und Europas sind Systemziele festlegbar, die sich aus gewichteten Teilzielen (Versorgungssicherheit, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit) zusammensetzen. Das Programm Netze will dazu beitragen, dass in den technisch, ökonomisch und ökologisch relevanten Zeiträumen[2] innovative Beiträge der Schweizer Forschenden auf dem Netze und Systeme geleistet werden. Dabei wird vermehrt auch die tendenzielle Verschiebung der CO_2-ungünstigen Energieträger und -konversion im Bereich Verkehr und im Wärmesektor eine wichtige Rolle spielen.

[1] Swissgrid als Übertragungsnetzbetreiber, ca. 900 Verteilnetzbetreiber in der Schweiz, wenige Grosserzeuger und viele kleine Erzeuger; Industrien, KMU und Haushalte als Verbraucher, Händler, Gemeinden und Kantone als Besitzer der Netze und der Erzeugung.

[2] Von Millisekunden über Minuten (technische Stabilität), Viertelstunden (Bilanzgruppen und Intraday-Handel), Stunden des nächsten Tages und zukünftige Wochen, Monate (internationaler Stromhandel), Halbjahre (Energieimporte und -exporte) bis hin zu Jahrzehnten (Lebensdauer von Stromleitungen, Kraftwerken und Verbraucherorten (Häuser).

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2008

Nachfolgend werden die vom BFE im Jahr 2008 direkt unterstützten Arbeiten auf dem Gebiet der Netze zusammengefasst. Sie verteilen sich auf die beiden Forschungsschwerpunkte «Elektrizitätsnetze» und «Multienergieträgernetze (inkl. Gas-, Wärme- und weitere Energieträgernetze)». Darin enthalten sind auch Anstrengungen zum erfolgreichen Aufbau von internationalen Forschungsprojekten, die internationale Forschungskoordination sowie Aktivitäten in der Lehre.

Forschungsschwerpunkt «Elektrizitätsnetze»

Towards Future Electricity Networks

Im Rahmen des ETHZ-Projekts «Towards Future Electricity Networks» ist ein Analyse- und Planungswerkzeug entwickelt worden, welches wirtschaftliche, umwelttechnische und soziale Aspekte gleichzeitig berücksichtigt. Damit ist es möglich, Konzepte für den Übergang von heutigen zu künftigen Elektrizitätssystemen und Netzstrukturen zu simulieren und zu testen. Das Werkzeug erlaubt neben der Simulation von zukünftigen Übertragungssystemen (inkl. Kraftwerken) auch die Erfassung indirekt verursachter Kosten, die Berücksichtigung von umwelttechnischen Standards sowie von Kriterien der Versorgungssicherheit.

Aus Schweizer Sicht ist das Projekt interessant, da es auf die knappen Engpasskapazitäten an den Grenzen und die Folgen für die Stromlücke eingeht. Das Werkzeug erlaubt ausserdem die Simulation von Pumpspeicherkraftwerken, die in Zukunft eine grosse Rolle für den ständig nötigen Bilanzausgleich und als Regelleistung spielen werden, sowie die Berücksichtigung unregelmässig anfallender Energieproduktion aus erneuerbaren Quellen.

Grundlage des Werkzeugs ist ein so genannter «Sustainability Based Optimal Power Flow (SOPF)». Er ermöglicht die gleichzeitige Berücksichtigung von mehreren, gewichteten Zielen. Zentral war die Entwicklung eines SOPF-Algorithmus, der als Input die Kraftwerks-Grenzkosten, die maximalen Kraftwerks-Erzeugungskapazitäten, sowie die Kapazitäten und die Konnektivität des Übertragungsnetzes gemeinsam mit den Verbrauchszahlen verwendet.

Hauptresultate im Jahr 2008: Die Internalisierung der externen Kosten führt zur erhöhten Nutzung erneuerbarer Erzeugungstechnologien im Vergleich mit den konventionellen. Zudem kann durch die vermehrte Einspeisung erneuerbarer Energien mit den Simulationen gezeigt werden, dass Engpässe an neuen Örtlichkeiten in Europa auftreten werden, und welche europäischen Übertragungsleitungen verstärkt werden müssten. Die Simulationen zeigen jedoch auch, dass der zusätzliche Bau von neuen Leitungen nicht unbedingt Netzengpässe reduziert oder die Versorgungssicherheit verbessert.

Verteilte Einspeisung in Niederspannungsnetzen (Vorprojekt VEiN)

Zukünftig werden vermehrt erneuerbare Energiequellen wie Sonne, Wind, Biomasse und Wasser dezentral genutzt werden, sowie in einer Umgebung mit Wärmebezug Brennstoffzellen und Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen zur Anwendung gelangen. Die Verteilnetzbetreiber haben daher ein Interesse, die Auswirkungen vermehrter verteilter Einspeisungen auf den Netzbetrieb, die Planung und Dimensionierung der Netzanlagen sowie auf allfällig notwendige Anpassungen in den Normen zu untersuchen. Mittels eines Pilotprojektes wird angestrebt, die notwendigen Kenntnisse aufzubereiten und die entsprechenden Erfahrungen zu sammeln.

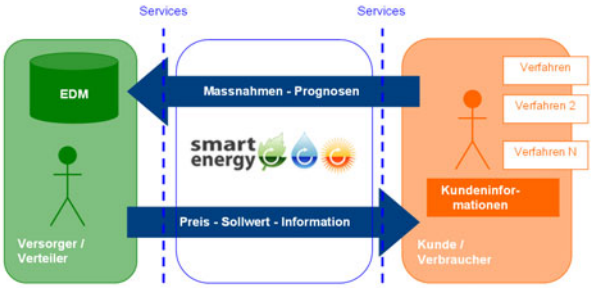
Die Energieversorgungsunternehmen AEW Energie AG, BKW FMB Energie AG, Centralschweizerische Kraftwerke AG (CKW), Elektrizitätswerk des Kantons Zürich (EKZ), Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (EWZ), Wasserwerke Zug AG (WWZ), Industrielle Werke Basel (IWB) und das Bundesamt für Energie (BFE) haben sich im Rahmen eines Vorprojekts zur Prüfung der Durchführung und der Finanzierung eines Pilotprojektes entschieden. Die Aktivitäten Im Jahre 2008 umfassten die Schwerpunkte:

- Akquisition der Finanzen für die Umsetzung des Pilotprojektes;
- Klären der Zusammenarbeitspotenziale mit ausgewählten Fachhochschulen und der ETHZ;
- Konkretisierung des Vorgehens für die Projektphase;
- Vorbereitungsaktivitäten für die Umsetzung des Pilotprojektes.

Das Vorprojekt VEiN wurde per Ende November 2008 abgeschlossen. Die nachfolgende Projektphase ist geplant.

SmartEnergy

Die Liberalisierung des Strommarktes erfordert die kontinuierliche Erhebung von Produktions- und Verbrauchsdaten sowie einen automatisierten Austausch zwischen den Marktpartnern. Die für die Erfassung und die Weiterleitung dieser Daten erforderliche Infrastruktur kann durch zusätzliche Servicedienstleistungen aufgewertet werden.



Figur 1: SmartEnergy als Projekt bzw. zukünftige Dienstleistung zwischen Energielieferanten und Konsumenten.

Ziel von SmartEnergy ist die Konzipierung solcher Dienste und die Entwicklung von Prototypen dafür. Das Projekt SmartEnergy will diejenigen Informationen besser nutzen, die den Verbrauch und eventuell auch die verteilte Erzeugung von Energie beim Endverbraucher positiv beeinflussen. Mit diesen, beim Endverbraucher in Zukunft verfügbaren Informationen sollen zwei Ziele erreicht werden:

- Beeinflussung des zeitlichen Verbrauchs der Energie mit dem Ziel einer optimalen Auslastung des Netzes;
- Der einzelne Energiekonsument soll die richtigen Informationen erhalten: Diese sollen es ihm erlauben, ökonomische (z.B. über Einkaufspreis), ökologische (über CO_2-Emissionen bzw. Intensität von nicht erneuerbarer Energieumwandlung) und betriebliche (über Kompatibilität des eigenen Energiekonsums hinsichtlich Netzzustand) Aspekte des eigenen Energiekonsums in das tägliche Verhalten einzubeziehen.

Die im Jahr 2008 erreichten Ziele des Projekts sind:

- Aufbau eines professionellen Dialogs der Branche (Netzbetreiber, Energiewirtschaft, Gemeinden) und der Hochschulen;
- Konzeption, Prototypisierung und Testen möglicher Dienstleistungen oder neuer Produkte.



Figur 2: Einflussfaktoren auf Lastprognose.

Kriterien	Modelle zur Lastprognose im BelVis					
	Fuzzy und Neurofuzzy	KNN	ALN	ARIMAX	Vergleichs-verfahren	Kalman-Filter
Aufwand	mittel	mittel	niedrig	hoch	niedrig	hoch
Parametrierbarkeit (Gewichtung)	mittel	mittel	mittel	Hoch	keine	mittel
Lernfähigkeit	nein/ja	ja	ja	nein	nein	nein
Anpassungsfähigkeit (Reaktionszeit)	mittel	hoch	hoch	klein	mittel	kein
Transparenz und Nachvollziehbarkeit	mittel	schwer	schwer	leicht	leicht	mittel
Flexibilität (neue Inputs einbinden etc.)	mittel	hoch	hoch	niedrig	mittel	niedrig

Figur 3: Methoden, bzw. Modell zur Lastprognose (KNN: Künstlich neuronale Netze; ALN: Adaptive Logische Netze).

Im Jahr 2008 wurde insbesondere ein Workshop unter reger Beteiligung der Stakeholders durchgeführt. Figur 1 – als Output des Workshops – zeigt die Rolle des Projekts SmartEnergy zwischen den Energielieferanten und dem Energiekonsumenten.

Elbe – Validierung und Verbesserung von Lastprognosen (Projektphase 1)

In Zusammenarbeit zwischen der Berner Fachhochschule (BFH) und dem Elektrizitätsversorgungsunternehmen BKW FMB Energie AG sollen bestehende auf dem Markt verfügbare Lastprognosemethoden analysiert und neue Methoden entwickelt werden.

Im Projektjahr 2008 konnten neue Erkenntnisse und Schlussfolgerungen zur Validierung und Verbesserung von Lastprognosen erarbeitet werden. Die wichtigsten Einflüsse die zur Elektrizitätsnachfrage beitragen, wurden beschrieben und gewichtet. Figur 2 zeigt die zentralen Einflussfaktoren für eine qualitativ hoch stehende Lastprognose.

Die Bewertung der Meteoserver[3] hatte zum Ziel, einen Überblick über die Vor- und Nachteile der verfügbaren Parameter zu geben. In Versuchen wurde statistisch verifiziert, dass die Temperatur einer der wichtigsten Einflussfaktoren auf die Stromnachfrage ist. Ferner wurden Überlegungen zur Anwendung und zu Einsatzgebieten der Methoden und Modelle angestellt (Figur 3).

Bei den Methoden zur Lastprognose (Figur 4) haben sich gemäss den Autoren die künstlichen neuronalen Netze (KNN) durchgesetzt und erzielen gute Ergebnisse.

AlpEnergy – Virtual Power Systems as an Instrument to Promote Transnational Co-operation and Sustainable Energy Supply

Ziele des AlpEnergy-Projekts sind die Entwicklung und die Pilotimplementation des neuartigen Kon-

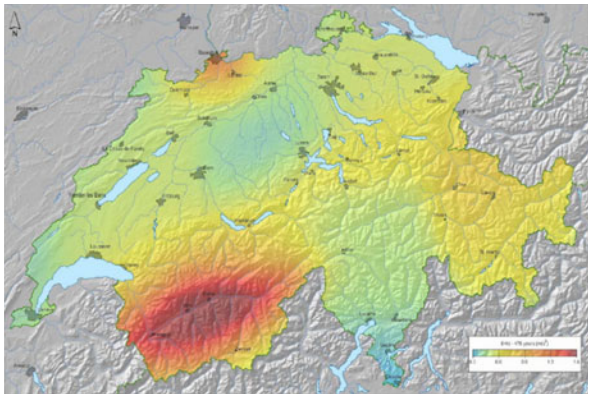
[3] Online-Dienst zur Bereitstellung von Wetterdaten verschiedenster Art und Qualität.

Kriterien	Modelle zur Lastprognose aus Internetrecherchen						
	Fuzzy	KNN	ALN	ARX	ARMA	ARIMA	AR(I)X AR(I)MAX
Qualität der Versuche (Resultate)	gut bis sehr gut	gut bis sehr gut	gut	gut	mittel	mittel	mittel
Marktdurchdringung (Wieviel eingesetzt)	mittel-häufig	häufig	häufig	mittel	schwach	mittel	schwach
Systemanbieter	-Kisters AG -EnDaNet -ProCom -DACHS	-Kisters AG -EnDaNet -ProCom -Girsberger -SAE-IT -GIGA Energy -DACHS	-Kisters AG		-Kisters AG	-Kisters AG	-Kisters AG

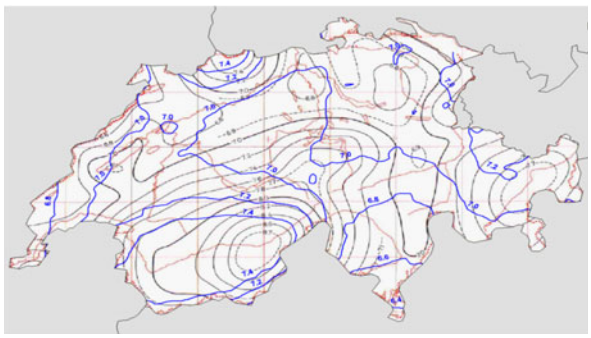
Figur 4: Modell zur Lastprognose.

zepts von «Virtuellen Energieproduktionssystemen» (Virtual Power Systems, VPS) im Alpenraum. Dazu gehören Analysen der Technologien, diverse Arten der Zusammenarbeit und insbesondere Geschäftsmodelle. Das VPS-Konzept soll schliesslich an einem System vollständig erneuerbarer Erzeugungsanlagen einer Gemeinde getestet werden. Dabei sollen Netzbetreiber, unabhängige Stromerzeuger (Landwirtschaft) und Stromkonsumenten, Agenturen für Umwelt und Energie sowie Politiker einbezogen werden.

In der Initialphase im Jahr 2008 wurden der State-of-the-art von «Virtual Power Plants» (VPP) und VPS in Europa untersucht. Als Resultat wurde ein VPS White Paper formuliert und anschliessend die



Figur 5: Angepasstes Häufigkeitsmodell des Schweizerischen Erdbebendienstes (SED).



Figur 6: Gefährdungskarte für Wiederkehrperiode von 1000 Jahren nach adaptierten Modell und Sägesser et al. (1978).

Fragestellung unter verschiedenen Gesichtspunkten definiert. Dabei wurden Systemakteure und deren Verbindungen und Interaktionen bezüglich ICT (Information and Communications Technology) untersucht. Parallel dazu wurden verschiedene Werkzeuge und -methoden für die Modellierung des Informationsflusses untersucht.

Interaktion von Kommunikations- und Stromnetz in der Schweiz bei grossflächigen Schadensereignissen

Das Ziel dieses Projektes ist die Analyse der Interaktion des Stromnetzes der Schweiz mit dem Kommunikationssystem betreffend Sicherheit und Verletzbarkeit beim Auftreten von grossräumigen Schadensereignissen wie Gewittersturm und Erdbeben unter Anwendung probabilistischer Methoden. Der dabei verwendete Ansatz geht über konventionelle Empfindlichkeitsuntersuchungen mittels definierter Szenarien hinaus.

Im Jahr 2008 wurde das Risiko des Stromnetzes quantifiziert, das Gefährdungsmodell für Erdbeben adaptiert und Schadensfunktionen für Erdbeben sowie Methoden zu ihrer Schätzung entwickelt und angepasst (Figuren 5 und 6).

Die Modellierung eines Kommunikationsnetzes unter Berücksichtigung des Erdbebenrisikos konnte weit gehend durchgeführt werden. Dabei wurde das Versagen von Knoten und Verbindungen des Switch-Kommunikationsnetzes aufgrund von Erdbebeneinwirkungen simuliert.

Die grundlegenden Ansätze für die Interaktion der Netze wurden recherchiert, theoretische Untersuchungen zur Interaktion werden zurzeit noch durchgeführt. Erste wissenschaftliche Ergebnisse bilden neue Ansätze zur statistischen Modellierung von Schadensfunktionen und die erste Schätzung des Erdbebenrisikos des Switch-Netzes (Figur 7).



Figur 7: Erste Ergebnisse Erdbebenanalyse – ICT: Relative Versagenshäufigkeit (Dunkelblau: Sehr hoch; Hellblau: Weniger hoch).

Forschungskooperation International

Vertretung im IEA Implementing Agreement Electricity Networks Analysis, Research and Development (Enard)

Die Internationale Energie Agentur (IEA) hat die wichtige Rolle der Elektrizitätsnetze bei der Erarbeitung von energiepolitischen Grundsätzen erkannt und das Implementing Agreement (IA) Enard (Electricity Networks Analysis, Research and Development) im July 2006 initiiert. Die Schweiz ist Mitglied der IEA und des IA Enard.

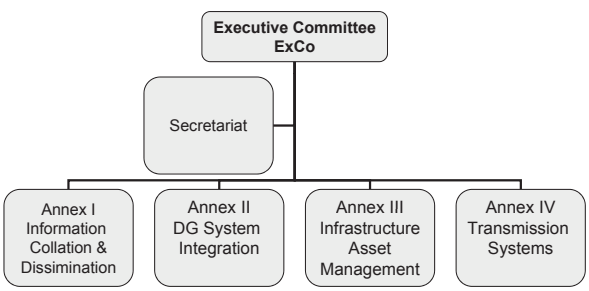
Das Ziel von Enard ist, Netze in diverser Hinsicht effizienter zu gestalten: Im Vordergrund stehen die Netzerneuerung, die Integration von erneuerbaren Energien sowie die Versorgungssicherheit. Diese Gesichtspunkte haben wegen der voranschreitenden Marktöffnung und den verstärkten Anforderungen an die Nachhaltigkeit – ohne Verlust einer hohen Versorgungssicherheit – weltweit eine grosse Bedeutung. Enard fördert im Rahmen eines internationalen Forums den Informationsaustausch zwischen Energiepolitik und Wissenschaft.

Enard wird von einem Executive Committee (ExCo) geleitet und wurde so aufgesetzt, dass Annexes geschaffen werden können (Figur 8).

Annex I dient als zentrale Informationsdrehscheibe. Auch im Jahr 2008 wurden wieder wichtige Informationen im Themengebiet von Enard gesammelt, in diversen Workshops diskutiert und in Form einer Serie von «Briefing sheets» publiziert. Sechs Workshops wurden bis 2008 organisiert: Distribution systems and end-user issues; Distributed Generation (DG) System Integration; Management of Ageing Infrastructures (gemeinsam mit Cired, 2007); Economic and Regulatory Issues; Transmission System Issues; Intelligent Distribution Networks, Micro-grids and Active Network Management.

Distributed Generation – System Integration in Distribution Networks (IEA IA Enard Annex II)

Das hier beschriebene Projekt ist einer von drei Annexes von Enard: Annex II will eine internationale Analyse der Herausforderungen, die mit der Einbindung von grossen Mengen von verteilten Stromerzeugungsanlagen verbunden sind, durchführen. Dabei interessiert speziell, wie das heutige «passive» Netz in ein «aktives» Netz der Zukunft (Smart Grid) überführt werden kann.



Figur 8: Organisation IEA IA ENARD Annex I.

Der IEA IA Enard II Annex hat die folgenden Ziele:

- Aufbau und Austausch des Wissen bezogen auf verteilte Erzeugung und deren Integration in aktive Stromnetze;
- Entwicklung von Richtlinien für Netzbetreiber und Politiker, wie das Management des Übergangs von einem passiven auf ein aktives Netz durchgeführt werden kann.

Im Jahr 2008 wurde insbesondere ein Workshop mit dem Ziel durchgeführt, die Besonderheiten des Annex zu analysieren und eine Vorgehensweise zu definieren. Aus dem Workshop hat insbesondere eine Annex-Struktur resultiert, die seit November 2008 operativ ist.

Europäische Technologieplattform (ETP) *SmartGrids*, Mirror Group Vertretung

Die von der Europäischen Union (EU) aufgesetzte «European Technology Platform (ETP) *SmartGrids*» hat das Ziel, fundamentale Veränderungen im traditionellen Elektrizitätsnetz Europas anzudenken, Forschung voranzutreiben und Prototypen zu testen, damit diese schliesslich systemweit eingeführt werden können. Das *SmartGrid*-Konzept ist die Antwort auf die steigenden europäischen Herausforderungen im Gebiet der Netze. Die ETP *SmartGrids* wurde im Jahr 2005 gegründet. Sie setzt sich zusammen aus Vertretern der Systeme herstellenden Industrie, den Übertragungs- und Verteilnetzbetreibern, sowie Forschungsvertretern und Regulatoren aus der EU und assoziierten Ländern wie der Schweiz. Das zukünftige transeuropäische Elektrizitätsnetz muss allen Konsumenten eine hohe Versorgungssicherheit bieten bei gleichzeitig anspruchsvollen Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit eines Systems, welche sowohl die Grosserzeugung wie auch die verteilte Erzeugung in allen Regionen Europas voll nutzen soll (Figur 9).

Im Jahr 2008, unmittelbar nach Abschluss der sogenannten «Strategic Research Agenda» (SRA), hat die ETP *SmartGrids* die Ausarbeitung eines «Strategic Deployment Document» (SDD) für Europas Netze der Zukunft begonnen. Im Rahmen dieses SDD wurde der Begriff «Smart Grids» definiert (Figur 10) und es wurden «Deployment Priorities» (DP) festgelegt (Figur 11).



Figur 9: SmartGrids Visionen gemäss der Europäischen Technologie Plattform (ETP).

Bei den Prioritäten 1 und 2 stehen neue Entwicklungen im Übertragungsnetz im Vordergrund. Bei den Prioritäten 3 und 4 sind sowohl das Übertragungs- wie auch das Verteilnetz involviert. Die Prioritäten 5 und 6 beziehen sich auf das Verteilnetz bzw. die dort angeschlossenen Netznutzer.

Forschungsschwerpunkt «Multi-Energieträgernetze und -systeme»

Vision of Future Energy Networks (Vofen)

Im Rahmen des Projektes «Vision of Future Energy Networks» (Phase 1), welches seit 2004 vom BFE co-finanziert wird, wurden Modelle und Methoden entwickelt, die einen Grüne-Wiese-Ansatz für Energiesysteme mit mehreren Energieträgern ermöglichen. Dieser Ansatz setzt voraus, dass beim Entwurf des Energiesystems keine existierende Infrastruktur berücksichtigt wird. Die entwickelten Modelle beziehen sich auf den Einfluss von Energiespeichern auf Stromnetze mit stochastischer Erzeugung, auf die integrierte Modellierung und Optimierung von Multi-Energieträgersystemen, auf Zuverlässigkeitsbetrachtungen für zukünftige Energiesysteme sowie auf Möglichkeiten der kombinierten Übertragung von mehreren Energieträgern. Schlüsselkonzepte, die im Rahmen des Projektes erarbeitet wurden, sind der Energy Hub (für die Energieumwandlung und -speicherung) und der Energy Interconnector (für die Energieübertragung). Mit Hilfe dieser Konzepte ist es möglich, Strukturen für zukünftige Energiesysteme (Figur 12) zu entwerfen, die den steigenden Anforderungen an die Energieversorgung gerecht werden.

Im Rahmen der Phase 2 des Vofen-Projekts (seit Oktober 2008) werden konkrete Szenarien entwickelt, wie Übertragungs- und Verteilnetzsysteme in ca. 30 bis 50 Jahren aussehen könnten. Die in Phase 1 entwickelten Modelleigenschaften werden um Systemdynamik- und Steuerungseigenschaften erweitert. Von zentraler Bedeutung sind für die Entwicklung der zukünftigen Infrastruktur von Städten, Gemeinden und geographischen Regionen auch die «Plug-in Hybrid Electric Vehicles» (PHEV), die dafür notwendige Portfolio- und Investitionstheorie wie auch der Einfluss

What is a SmartGrid?

A SmartGrid is an electricity network that can intelligently integrate the actions of all users connected to it - generators, consumers and those that do both – in order to efficiently deliver sustainable, economic and secure electricity supplies.

A SmartGrid employs innovative products and services together with intelligent monitoring, control, communication, and self-healing technologies to:

- better facilitate the connection and operation of generators of all sizes and technologies;
- allow consumers to play a part in optimizing the operation of the system;
- provide consumers with greater information and choice of supply;
- significantly reduce the environmental impact of the whole electricity supply system;
- deliver enhanced levels of reliability and security of supply.

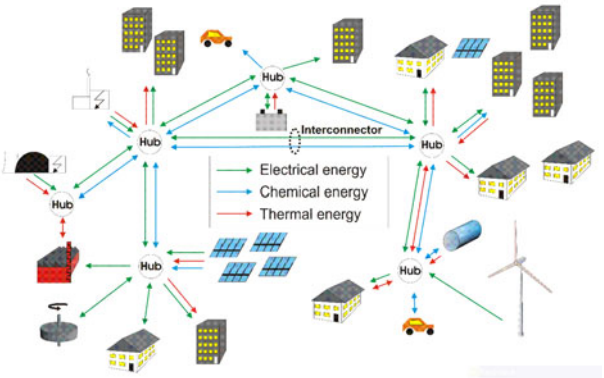
SmartGrids deployment must include not only technology, market and commercial considerations, environmental impact, regulatory framework, standardization usage, ICT (Information & Communication Technology) and migration strategy but also societal requirements and governmental edicts.

Fugur 10: Definition von Smart Grids nach der ETP SmartGrids.

SmartGrids Deployment Priorities

- Deployment Priority #1: **Optimizing Grid Operation and Use**
- Deployment Priority #2: **Optimizing Grid Infrastructure**
- Deployment Priority #3: **Integrating Large Scale Intermittent Generation**
- Deployment Priority #4: **Information & Communication Technology**
- Deployment Priority #5: **Active Distribution Networks**
- Deployment Priority #6: **New Market Places, Users & Energy Efficiency**

Figur 11: EU ETP SmartGrids Umsetzungsprioritäten.



Figur 12: Vofen-Struktur eines Energienetzes.

von verschiedenen Technologiepfaden. Ziel ist, die Vorteile der Multi-Energieträgermodelle (inkl. Wärmenetze, Strom, Gas, Wasser usw.) zu erkennen und schliesslich zu nutzen. Der Modellansatz soll an den Schweizer Städten Bern und Baden getestet werden.

Management der Trendwatching Group: Einfluss von Plug-In Hybrid Vehicles auf intelligente Verteilnetze (Smart Grids)

Mithilfe einer Multistakeholderanalyse des Marktes wurden Anfang 2008 Schlüsselakteure der Marktentwicklung von Regelenergiedienstleistungen an der Schnittstelle Smart Grid / Plug-In-Fahrzeuge identifiziert. Mit dem ersten Treffen im Juni 2008 hat sich die Gruppe als Trend Watching Group mit den wichtigsten Repräsentanten des Marktes in der Schweiz (Forschung, Energieversorger, NGOs, Autoindustrie und Technologieträger) konstituiert. Per Ende 2008 gehörten 29 Personen zum engeren Kreis der Mitwirkenden. Regelmässig informiert werden mehr als 50 Personen, ausserdem sind auch Experten aus dem Ausland aktiv eingebunden.

Die Mitwirkenden der Trendwatching Group teilen die Vision, dass bis etwa ins Jahr 2011 Fahrzeuginhaber von Plug-In-Fahrzeugen und Energieversorger neue Geschäftsbeziehungen eingehen können bzw. werden. Sie vertreten die Meinung, dass mit dem so genannten «Vehicle to Grid»-Konzept (V2G) eine wesentlich effizientere sowie ökologischere Mobilität und Energieversorgung entstehen kann, wenn der allfällige zusätzliche Energiebedarf für den Betrieb der Fahrzeuge aus erneuerbaren Energien stammt. Sie wollen den dafür notwendigen Innovationsprozess im Schweizer Markt begleiten und mit eigenen Aktivitäten (Forschung, Geschäftsmodelle, Technikentwicklung, Politik) stärken.

Seit Mitte 2008 hat sich die Gruppe intensiv mit der Umsetzung des Markteintritts von Regelenergiedienstleistungen beschäftigt. Anlässlich des zweiten Treffens im November 2008 wurden Geschäftsmodelle entworfen und Schlüsselfaktoren wie die weitere Entwicklung des Netzes, der Infrastruktur, der Fahrzeuge sowie deren Marktfähigkeit bewertet.

Auswirkung der Markteinführung von Elektrofahrzeugen und Plug-In Hybrids auf die Energieträger und das Elektrizitätsnetz

In diesem Projekt werden die für den Erfolg von Elektrofahrzeugen und PHEV wesentlichen energetischen Auswirkungen des V2G-Konzepts analysiert und bewertet. Damit soll eine konstruktive und objektivierte Grundlage für zukünftige Strategieentwicklungen für Energieversorger, politische Behörden sowie NGOs bereitgestellt gestellt werden.

Die Untersuchung erfolgt anhand von Szenarien, die sich nach Kriterien wie Fahrzeugmenge, Art der Nutzung der Fahrzeuge (EV oder PHEV), Quellen für Strom und Regelenergie, einfachen und machbaren Geschäftsmodellen der EVU und zeitlichen Horizonten (heute, 2015, 2035) unterscheiden.

Die geplanten Arbeitsschritte umfassen die Modellierung des Energiepotenzials aus den Fahrzeugen, Geschäfts- und Dienstleistungsmodelle, Energie- und CO_2-Bilanzen sowie Bewertung und Empfehlungen.

Die technische, ökonomische und ökologische Wertigkeit der Interaktion zwischen Fahrzeug und Netz ist eine der dringendsten Fragestellungen für die zukünftige weitere Entwicklung von Smart-Grids-basierten Energiesystemen, der damit verbundenen Märkte und die Akzeptanz bei den verschiedenen Stakeholders.

Im Jahr 2008 konnte die Datenbasis für die Berechnung der Substitutionseffekte in Richtung Strom als Energieträger, die Auswirkungen auf den Energiemix und die CO_2-Bilanzen mithilfe einer Marktanalyse bearbeitet werden.

Nationale Zusammenarbeit

Das Programm Netze versucht, die Forscher der verschiedenen Schweizer Forschungsinstitutionen auf dem Gebiet der Netze zur intensiven Zusammenarbeit zu motivieren. Es besteht steigendes Interesse an Projekten, bei denen eine aktive Zusammenarbeit zwischen den Fachhochschulen und den Unternehmen der Elektrizitätswirtschaft (z.B. Swisselectric Research) stattfindet.

Internationale Zusammenarbeit

Die Schweiz hat relativ zu ihrer Grösse (Stromerzeugung und Landesverbrauch) und im Vergleich mit dem europäischen Ausland grosse grenzüberschreitende Übertragungskapazitäten. Die Schweizer Elektrizitätswirtschaft ist im Bereich von Energieproduktion und -handel ebenfalls stark im Ausland aktiv.

Um diese starken Verknüpfungen mit dem europäischen Ausland auch in der Netz- und Systemforschung abzubilden, wurden die internationalen Forschungskoordinationsaktivitäten intensiviert. Sie finden dabei sowohl auf Projekt- als auch auf Programmebene statt.

Auf Projektebene wird die europäische Vernetzung nationaler Forschungsvorhaben angestrebt, d.h. die Schaffung von Projektkonsortien bzw. Begleitgruppen, in denen neben Schweizer Forschungsinstitutionen auch internationale Partner vertreten sind. So arbeiten insbesondere die Netzforscher an der ETH Zürich und der EPF Lausanne wie auch des Forschungszentrums der ABB im Rahmen von EU-Projekten intensiv zusammen mit Areva T&D, TU Delft, ECN (Energy Center of the Netherlands), Imperial College London, National Technical University of Athens, RWTH Aachen und Siemens Power Transmission and Distribution.

Auf Programmebene steht weiterhin die Mitarbeit in den Forschungsgremien der EU und der Internationalen Energieagentur im Mittelpunkt: Das Forschungsprogramm Netze ist in der ETP *SmartGrids* vertreten. Diese Plattform ist ein wichtiger Baustein im 7. Forschungsrahmenprogramm der EU und hat sich zum Ziel gesetzt, einen Beitrag zu einer zuverlässigen, wirtschaftlichen und nachhaltigen Energiezukunft in Europa zu leisten. Die Programmleitung versucht auf europäischer Ebene, Beiträge zur Entwicklung eines nachhaltigen Stromnetzes bzw. -marktes aus Sicht der Schweiz zu leisten. Im Berichtszeitraum wurde die Arbeit am so genannten «Strategic Deployment Document» (SDD) fortgesetzt, das mittel- und langfristige Optionen zur Umsetzung der zukünftigen europäischen Netze beschreibt. Im Mittelpunkt stehen «Deployment Priorities», die schliesslich Ausführungen zu den wichtigsten Technologien, ihren Kosten und Nutzen in Bezug auf eine zukünftige Implementierung enthalten sollen.

Innerhalb des IEA IA Electricity Networks Analysis Research and Development (Enard) sind diverse Annexes vorgesehen, die sich mit Fragen der Integration dezentraler Einspeisungen, mit Asset Management sowie mit aktuellen Herausforderungen für Übertragungsnetze beschäftigen werden. Ziel ist, eine Schweizer Beteiligung in den einzelnen Annexes zu erreichen. Die Schweiz nimmt aktuell, neben dem Haupt-Annex I auch am Annex II (Integration dezentraler Erzeugung) teil.

Bewertung 2008 und Ausblick 2009

Im Berichtjahr wurde wiederum intensiv an der Vernetzung des Forschungsprogramms und der Projektnehmer sowohl auf nationaler wie auch auf internationaler Ebene gearbeitet. Genauso wie das in der Schweiz erarbeitete Wissen in europäische Gremien eingebracht wird, soll auch das Wissen der europäischen Partner speziell auf den Gebieten Smart Grids, Integration Erneuerbarer Energie sowie Strommärkte in die Schweiz gebracht werden.

Netzforscher mit Sitz in der Schweiz konnten sich 2008 wieder erfolgreich an neuen, grossen Projektvergaben im 7. Rahmenprogramm der EU mit entsprechender Finanzierung beteiligen.

International wurde das Programm wie folgt vertreten:

- «Smart Grids ERA-Net»: Work Package Leader «Strategic Activities»;
- «IEA IA Electricity Networks Analysis Research and Development» (Enard): Dr. Rainer Bacher als Vice-Chairman;
- «European Technology Platform SmartGrids»: Dr. Rainer Bacher als Vize-Chairman.

National wurde eine Begleitgruppe bestehend aus Vertretern diverser Stakeholders in der Schweiz gegründet.

Im Berichtsjahr konnten diverse Projekte neu begonnen werden. Diese Projektaufbauarbeit der Programmleitung hängt stark von energiepolitischen Leitlinien, von der verfügbaren Anzahl und Qualität der Forschungsleiter und der von diesen betreuten Forschern, von Anreizen für das Durchführen von exzellenten Forschungsarbeiten sowie der finanzielle Lage der Forschenden ab. Die aktuellen Herausforderungen beim Aufsetzen und Durchführen von Projekten im Rahmen des Forschungsprogramms Netze liegen aktuell wie folgt:

- Die Schweizer Energiepolitik hat mit dem StromVG, der Förderung von erneuerbaren Energien und einer erhöhten Energieeffizienz im Energiegesetz neue Rahmenbedingungen geschaffen, die Innovationen insbesondere auf dem Gebiet der Netze und Systeme erfordern. Diese müssen von den diversen Stakeholders aber erst identifiziert, initiiert und schliesslich durchgeführt werden.

- Nur die ETHZ und teilweise auch die EPFL weisen im universitären Sektor genügend grosse Forschergruppen mit hoher technischer bzw. technologischer Kompetenz auf.
- Die (angewandte) Forschung an den Schweizer Fachhochschulen auf dem Gebiet der Netze wird nur von wenigen Professuren durchgeführt.
- Die Schweiz weist seit dem Inkrafttreten des StromVG einen einzigen Übertragungsnetzbetreiber mit zentraler Stellung in Europa, mehrere Übertragungsnetzeigentümer und etwa 900 Verteilnetzbetreiber – meist mit Gemeinden und Städten als Eigentümer – auf. Die Netzbetreiber und deren Eigentümer waren 2008 mit der Einführung des StromVG stark absorbiert. Aufgrund der hohen Anforderungen des StromVG ist absehbar, dass dies so auch in den kommenden Jahren noch so bleiben wird. Personelle Ressourcen, welche sich in Forschungsprojekten auch tatsächlich aktiv für innovative Forschungsprojekte engagieren können, sind somit aktuell in der Schweiz bei diesen Unternehmen nur in beschränktem Umfang vorhanden.

Liste der F+E-Projekte

[1] S. Lukovic, M. Mura, Università della Svizzera italiana: AlpEnergy – Virtual Power System (VPS) as an Instrument to Promote Transnational Cooperation and Sustainable Energy Supply in the Alpine Space (JB Projekt 102848).

[2] R. Bacher, Bacher Energie: Europäische Technologieplattform (ETP) SmartGrids (JB Projekt 102474).

[3] R. Bacher, Bacher Energie: Implementing Agreement of the International Energy Agency (IEA): Electricity Networks Analysis Research & Development (Enard Annex I) (JB Projekt 102474).

[4] R. Bacher, Bacher Energie: Lehrauftrag ETHZ: Vorlesung «Optimierung liberalisierter elektrischer Energiesysteme» (OLEES) (Frühjahr 2008; Departement ETHZ-ITET) (SB Projekt 102474).

[5] D. Gabioud, HES-SO Valais: Projet HES-SO SmartEnergy (SB Projekt 102612).

[6] R. Horbaty, P. Strub, Enco Energie-Consulting AG: Auswirkung der Markteinführung von Elektrofahrzeugen und Plug-In Hybrids auf die Energieträger und das Elektrizitätsnetz; Energetische Substitutionseffekte und Auswirkungen auf den Energiemix und CO2-Bilanzen (SB Projekt 102774).

[7] A. Papaemmanouil, ETH Zürich: Towards Future Electricity Networks (SB Projekt 102292).

[8] K. Fröhlich, G. Andersson, ETH Zürich: Vision of Future Energy Networks (SB Projekt 100669).

[9] M. Raschke, ETH Zürich: Interaktion von Kommunikations- und Stromnetz der Schweiz bei grossflächigen Schadensereignissen (JB Projekt 102556).

[10] P. Kronig, M. Höckel, Berner Fachhochschule HTI Biel: Elbe – Validierung und Verbesserung von Lastprognosen (Projektphase 1) (ZB Projekt 102771).

[11] P. Bühler, G. Schnyder, AEW Energie AG: Vorprojekt VEiN – Verteilte Einspeisungen in Niederspannungsnetze (SB Projekt 101411).

[12] R. Horbaty, R. Rigassi, Enco Energie-Consulting AG: Integration von Plug-in Hybrid Cars zur Förderung intelligenter Verteilnetzstrukturen (Vorstudie) (JB Projekt 102205).

Referenzen

[13] BFE-Forschungsprogramm Netze:http://www.bfe.admin.ch/forschung/netze/.

[14] Europäische Union: 7. Forschungsrahmenprogramm Gebiet Energie: http://cordis.europa.eu/fp7/energy/.

[15] SmartGrids Konsortium: Europäische Technologieplattform SmartGrids: http://www.smartgrids.eu/.

[16] International Energy Agency: IEA Implementing Agreement Enard: http://www.iea-enard.org/.

Impressum
Juni 2009
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
Druck: Ackermanndruck AG, Bern-Liebefeld
Bezug der Publikation: www.energieforschung.ch

Programmleiter
Dr. Rainer Bacher
Bacher Energie
Hochstrasse 3c
CH-5405 Baden
rainer.bacher@bacherenergie.ch

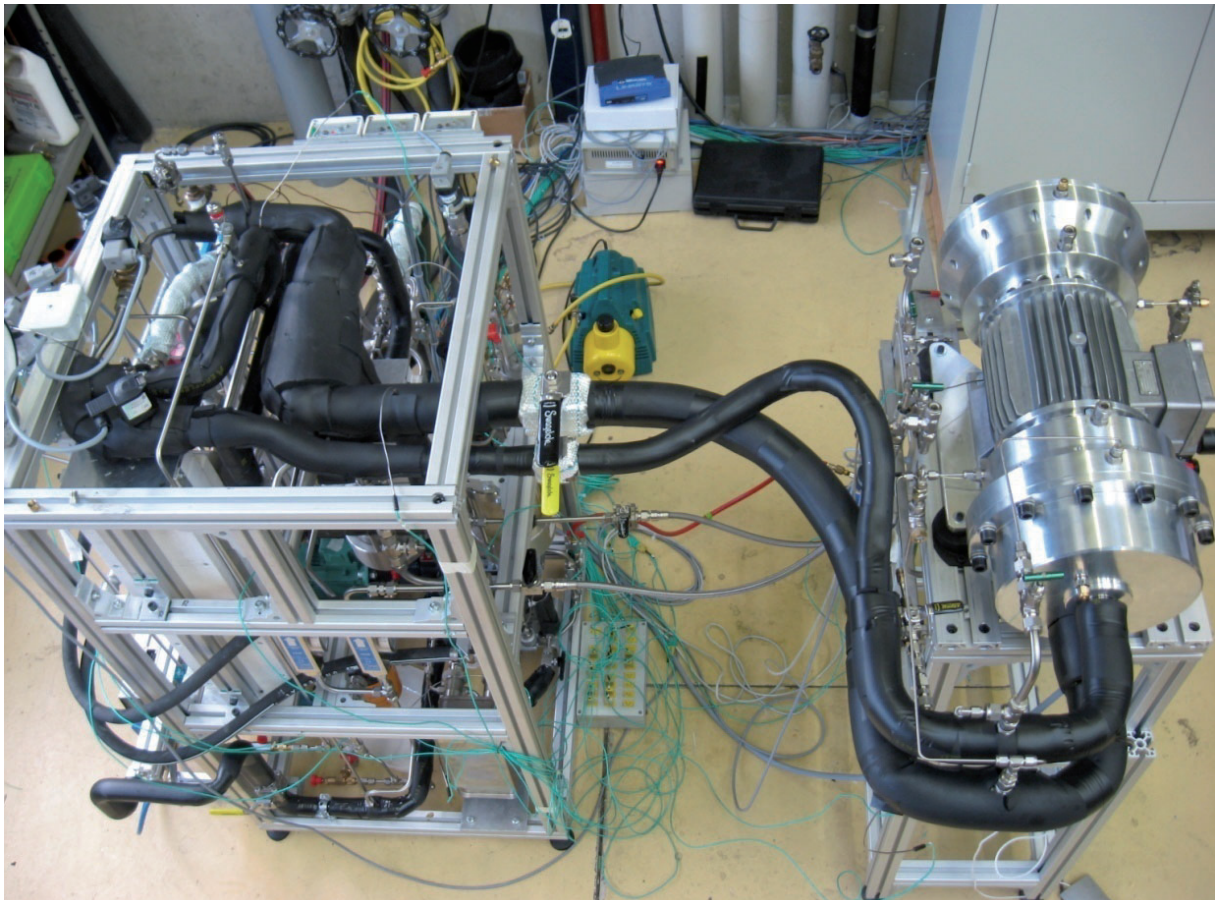
Bereichsleiter
Dr. Michael Moser
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
michael.moser@bfe.admin.ch

Rapport de synthèse 2008 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2008 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Wärmepumpen, WKK, Kälte

Thomas Kopp

tkopp@hsr.ch



Prototyp einer WKK-Anlage mit zweistufiger Expansion auf dem Prüfstand

Die WKK-Anlage der Arbeitsgemeinschaft Eneftech SA und EPF Lausanne [1] soll aus Abfallwärme von 250 °C Elektrizität und Abwärme von 60 °C erzeugen. Mit der gewonnenen elektrischen Energie könnten wiederum Wärmepumpen angetrieben werden. (Foto aus [1])

Programmschwerpunkte

Das Forschungsprogramm Wärmepumpen, WKK, Kälte fördert die energieeffiziente Bereitstellung von Nutzwärme für Gebäudebeheizung und Wassererwärmung und von Kälte mittels Klima- und Kühlanlagen. Das Ziel ist die **Reduktion des Energieverbrauchs und des CO_2-Ausstosses durch Anwendung verbesserter Technologien und den Einsatz erneuerbarer Energie**. Heizsysteme, die fossile Energie direkt verbrennen, sollten sukzessive durch Wärmepumpen ersetzt werden. Die für deren Antrieb benötigte Energie stammt aus erneuerbarer Wasserkraft, aus WKK-Anlagen und aus dem Ersatz von Elektroheizungen.

Gemäss Gesamtenergiestatistik [25] haben der Gesamtenergieverbrauch der Schweiz 2007 um 2,6 %, der Verbrauch der fossilen Brennstoffe Heizöl extra-leicht um 12,3 % und von Gas um 1,8 % abgenommen, vor allem begründbar durch die Verminderung der Heizgradtage um 4,5 %. Der Heizenergieverbrauch beträgt aber immer noch etwa einen Drittel des Gesamtenergieverbrauchs. Die Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien [26] zeigt, dass der Anteil erneuerbarer Energie bei der Wärmeerzeugung erst 13,2 % beträgt. Davon stammt 18,3 % aus Umweltwärme. Es besteht also noch ein beträchtliches Substitutionspotenzial bei Heizanwendungen, obwohl 2007 in der Schweiz 17'011 Elektromotor-Wärmepumpen in Betrieb genommen wurden und gesamthaft 126'263 Anlagen in Betrieb waren. **Bis 2020 sollten gemäss BFE 400'000 Anlagen in Betrieb sein [27]**.

Die energetischen Verbesserungen bei **Wärmepumpen** und **Kältemaschinen** liegen in **gesteigerter Effizienz**, ganzheitlicher **Systemoptimierung** und **Senkung der Kosten**. Die umweltrelevanten Verbesserungen liegen beim Einsatz von Arbeitsstoffen mit geringem Schadenspotenzial bezüglich Ozonschicht und Treibhauseffekt. CO_2 und Propan sowie Ammoniak in Grossanlagen werden heute oft eingesetzt, die **geeignetste Variante, die magnetische Wärmepumpe, würde allerdings gar kein fluides und damit potenziell flüchtiges Arbeitsmedium mehr benötigen**.

Wärme-Kraft-Kopplungs (WKK)-Anlagen setzen dezentral chemisch gespeicherte Energie (fossile oder erneuerbare) in nutzbare Wärme und mechanische Wellenenergie (ab Kurbelwelle oder Rotorwelle) um. Die mechanische Energie wird meistens durch einen Generator direkt in elektrische Energie umgewandelt. WKK-Anlagen erhöhen also die exergetische Ausbeute der chemischen Energieträger und können deshalb, insbesondere in Kombination mit Wärmepumpen, den **fossilen Heizenergieverbrauch um 30 bis 50 % reduzieren [27]**.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2008

Wärmepumpen

Steigerung der Effizienz

Der Wirkungsgrad oder COP (Coefficient of Performance) hängt bei Wärmepumpen von den Temperaturen der Wärmequelle und der Wärmesenke (abgegebene Wärme) ab. Alle realen Effekte wie Reibung oder notwendige Temperaturdifferenz für den Wärmestrom senken den theoretischen Wirkungsgrad. Ein Mass für die Auswirkung dieser realen Effekte ist der Gütegrad. Er vergleicht den effektiven Wirkungsgrad mit dem bei den herrschenden Temperaturen theoretisch möglichen Wirkungsgrad. Die Gütegrade bewegen sich zwischen 35 und 50 %, wobei sie bei kleinen Temperaturhüben eher kleiner sind als bei grossen Temperaturhüben. Dies ist aber logisch, da sich die treibenden Temperaturgefälle in den Wärmetauschern bei kleinen Temperaturhüben stärker auswirken als bei grossen Temperaturhüben.

In den vergangenen Jahren wurde an der Hochschule Luzern die Exergieanalyse im Bereich der Wärmepumpenanwendung eingesetzt, um die verschiedenen Verluste zu identifizieren und zu quantifizieren. Das Projekt *WEXA: Exergie-Analyse zur Effizienzsteigerung von Luft/Wasser-Wärmepumpen* [2] zeigte klar, dass die grössten Exergieverluste im Kompressor anfallen. Eine Steigerung des exergetischen Wirkungsgrades gelingt durch Drehzahlvariation von Kompressor und Ventilator. Die Arbeit wurde in die englische Sprache übersetzt und wird auch im Newsletter des Heat Pump Centre des Heat Pump Programme der IEA [28] publiziert werden.

Es ist folglich logisch, dass nun in einem weiteren Projekt diese Erkenntnisse systematisch vertieft werden. Das neu gestartete Projekt *Effiziente Luft/Wasser-Wärmepumpen durch kontinuierliche Leistungsregelung* [3] hat das Ziel, eine Wärmepumpe mit drehzahlgeregeltem Kompressor und Ventilator zu entwickeln und auszumessen. Die erwartete Leistungssteigerung gegenüber einer Wärmepumpe mit Ein/Aus-Regelung liegt im Bereich einer Verdoppelung der Jahresarbeitszahl. Dabei ist es gelungen, den führenden Kompressorhersteller Emerson Climate Technologies und

den Ventilatorhersteller Ziehl-Abegg Schweiz AG in eine aktive Zusammenarbeit einzubinden. Die Konzeptionierung der neuen Wärmepumpe stützt sich auch auf die Resultate des Projektes *LO-REF: Luftkühler-Optimierung mit Reduktion von Eis- und Frostbildung* [4, 5], das die komplexen Wärme- und Stoffaustausch-Vorgänge bei der Verfrostung und Vereisung von Luftkühlern als Wärmequelle für Wärmepumpen theoretisch und experimentell untersuchte.

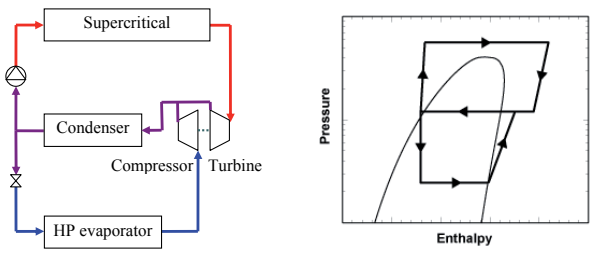
Durch die enorme Verbreitung der Wärmepumpen für Einfamilienhäuser und kleinere Gebäude, wo standardisierte und in Grossserien produzierte Wärmepumpen eingesetzt werden, zeigen diese Produkte eben auch die typischen Eigenschaften von Serienprodukten: Die Hersteller müssen ein marktfähiges Gleichgewicht zwischen technisch hoch stehenden Produkten und den damit einhergehenden Kosten anstreben. Nicht alle Hersteller haben sich für die Lösungen mit den heute erreichbaren Bestwerten entschieden und bieten technisch weniger hoch stehende Produkte zu tieferen Preisen an. Die im Projekt *Qualitätsprüfung von Kleinwärmepumpen mittels Norm- und Feldmessungen – Teilprojekt Effizienzsteigerung (Bestanlagen) und Langzeitverhalten* [6] gemessenen Wirkungsgrade der Standardprodukte zeigen eine beträchtliche Bandbreite. Im Gegensatz zu den Standardprodukten werden Grosswärmepumpen für jeden Einsatzfall speziell konzipiert und sind als Anlagebau-Produkte zu verstehen. Dadurch muss das Know-how von Projekt zu Projekt verbessert werden; eigentliche Testaufbauten sind aus Kostengründen nicht möglich. Gesamtenergetisch tragen aber die Grosswärmepumpen mit Leistungen von 200 kW bis 2,5 MW beträchtlich zur Gesamtenergiesituation bei. Deshalb verfolgt das Projekt *Feldmonitoring und Analysen an Grosswärmepumpen – Phase 2* [7a] die Leistungszahlen an 20 ausgewählten Grosswärmepumpen und versucht die ermittelten Unterschiede mit der vorhandenen, vom Anlageplaner gewählten Konzeption zu erklären. Hier muss man aber ebenfalls erwähnen, dass die Planer zum Teil durch andere Einflüsse, wie zum Beispiel das Architektur-Konzept, eingeschränkt werden und deshalb nicht immer die bestmögliche Lösung anwenden können. Eine andere Problematik ist das Bereitstellen und Verteilen von grösseren Wärmemengen auf mehrere Gebäude oder in Siedlungen. Je grösser die Wärmeströme sind, desto grösser müssen die Austauschflächen sein, oder das System reagiert mit nicht erwünschten grösseren treibenden Temperaturgefällen. Es gibt also eine optimale Grösse, insbesondere auf der Quellenseite. Der Wert des vernünftigen Maximums ist allerdings noch unklar und auf jeden Fall auch abhängig von der individuellen Situation.

Grosswärmepumpen werden auch häufig von Contracting-Firmen und öffentlichen Grundeigentümern betrieben. Natürlich interessieren sich die künftigen Betreiber sehr für die Beurteilung von Projekten in der Planungsphase. Die Erfahrungen aus den Untersuchungen an Grosswärmepumpen werden im auch von verschiedenen Städte-Organisationen unterstützen Projekt *Beurteilungstool für Grosswärmepumpen – Phase 2* [7b] eingearbeitet. Nachdem das Excel-Tool in Phase 1 ohne Unterstützung des BFE in Zusammenarbeit mit dem EWZ (Elektrizitätswerk der Stadt Zürich) entwickelt wurde, wird das Tool nun in Phase 2 mit Unterstützung des BFE an konkreten Anlagen validiert.

Die meisten Wärmepumpen in der Schweiz weisen elektrisch angetriebene Verdichter auf. Es gibt jedoch auch thermisch angetriebene Wärmepumpen nach dem Absorptionsprinzip oder Wärmepumpen mit einem Verbrennungsmotor als Antrieb. Im Projekt *Pompe à chaleur thermique à double cycle de rankine* [8] soll eine gasbetriebene Wärmepumpe entwickelt werden, die aber nicht auf dem Absorptionsprinzip beruht. Die zugeführte Antriebswärme wird hier mittels eines ORC-Prozesses (Organic Rankine Cycle) in mechanische Wellenenergie und nutzbare Abwärme umgewandelt. Die mechanische Wellenenergie treibt dann den Verdichter der Wärmepumpe an. Die Expansion und die Kompression werden mit hoch drehenden Turbomaschinen ausgeführt. Das Know-how zur Auslegung und Fertigung dieser Maschinen wurde in früheren Projekten mit Unterstützung des BFE erarbeitet [29]. Der erwartete Wirkungsgrad liegt über 1,6 und ist deutlich besser als bei einer Absorptions-Wärmepumpe.

Umweltfreundliche Kältemittel

Wärmepumpen funktionieren mittels eines thermodynamischen Kreisprozesses, in welchem ein Arbeitsmedium mit geeigneten Eigenschaften eingesetzt werden muss. Viele verschiedene Stoffarten erfüllen die verlangten Anforderungen, jedoch besitzen sie zusätzlich auch noch negative Eigenschaften, die mit dem technischen



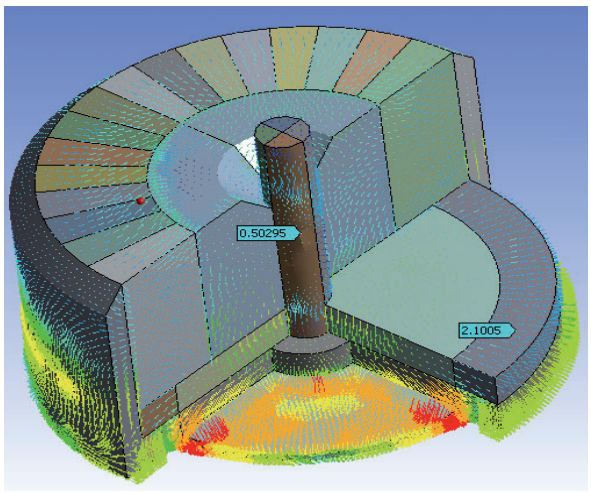
Figur 1: Der Antrieb des Wärmepumpenkompressors erfolgt mit der Turbine aus dem ORC-Prozess [8].

Verwendungszweck keinen Zusammenhang aufweisen. Die sogenannten «Sicherheitskältemittel», die Chlor- und Fluor-Verbindungen enthalten, schädigen die Ozonschicht (ODP = Ozon Depletion Potential) und tragen zum Treibhauseffekt bei (GWP = Global Warming Potential). Diese Arbeitsmedien sind heute in der Schweiz in Neuanlagen verboten. Auch die heute noch verbreitet eingesetzten H-FKW weisen wegen dem Fluor immer noch ein GWP auf. Natürliche Kältemittel, mit denen die Entwicklung der Kältetechnik vor Jahrzehnten begonnen hat, wie Propan, Kohlendioxyd und Ammoniak haben keine negativen Auswirkungen auf die Umwelt, jedoch haben sie alle einen bestimmten Nachteil wie zum Beispiel hohes Druckniveau bei Kohlendioxyd, Brennbarkeit bei Propan und Giftigkeit bei hohen Konzentrationen von Ammoniak. Es zeigt sich aber, dass die Entwicklung (zurück) zu den natürlichen Arbeitsmedien unaufhaltsam fortschreitet. Auch das BFE unterstützt diese Tendenz mit der Förderung verschiedener Projekte.

Das Projekt *CO_2-Erdwärmesonde – Phase 2* [9] vereint zwei Ziele. Das natürliche Arbeitsmedium CO_2 soll in einer Erdwärmesonde eingesetzt werden, die aufgrund der wärmetechnischen Randbedingungen in freier Konvektion, also ohne Förderpumpe funktioniert. Schon alleine durch den Wegfall der Umlauf-Förderpumpe kann der Anlagenwirkungsgrad um 5–8 % gesteigert werden. Als zusätzlicher Nutzen kann in einer weiteren Phase auch die Wärmepumpe selbst mit dem Arbeitsmedium CO_2 betrieben werden. Die Sonde und die Wärmepumpe könnten sogar direkt gekoppelt werden, allerdings nur, falls ein ölfreier Verdichter eingesetzt würde. Das BFE plant deshalb, 2009 ein neues Projekt für einen ölfreien Verdichter zu lancieren. Die Modellierung der Vorgänge in einer pumpenlosen Sonde – auch als Thermo-Syphon-Prinzip bekannt – mit Länge von 100 bis 300 m sind kompliziert, es müssen 2-Phasen-Phänomene modelliert werden. Der Sondendurchmesser und die Sondenlänge bestimmen die notwendige Füllmenge. Bei zu grosser Füllmenge staut sich der Rieselfilm auf. Modellierungen mit Matlab zeigen aber, dass sich ein zuverlässiger Betrieb einstellt, wenn die Füllmenge stimmt. Als weitere Schritte müssen nun die physikalischen Modellergebnisse und die fertigungstechnischen Aspekte optimiert werden.

Das Hochbauamt der Stadt Zürich konnte 2006 eine einzigartige Wärmepumpe für das Schulhaus Limmat in Zürich in Betrieb nehmen. Die Propan-Wärmepumpe erzeugt 90 % des Heiz- und Warmwasserbedarfs und bezieht die Quellenwärme aus einem Hauptkanal der städtischen Kanalisation, der eine konstante Temperatur von ca. 14 °C aufweist. Die Vorlauftemperaturen des Altbaus, dessen Hydraulikschaltung nicht verändert wurde, müssen bis 65 °C erreichen. In diversen Artikeln wurde die Anlage schon vorgestellt [30, 31] und auch die ermittelten COP-Werte wurden als sehr positiv dargestellt. Aus der aufgeschalteten Webseite www.schulhauslimmat.ch können die Messwerte online verfolgt werden. Verschiedenen Fachleuten erschienen die Werte allerdings etwas zu euphorisch, sodass zur Erlangung der Gewissheit das Projekt *Exergieanalyse der Wärmepumpe im Schulhaus Limmat* [10] als Gemeinschaftsprojekt des BFE und mehrerer interessierter Ämter und Firmen gestartet wurde. Es soll neben den korrekten COP-Werten auch Eignung und Wirkung des Propans als Arbeitsmedium untersucht werden, und das noch bestehende Verbesserungspotenzial soll eruiert werden. Nach einer akribischen Überprüfung der Messgeräte und der Auswertungsroutine konnte schliesslich der Fehler gefunden und behoben werden. Allerdings sind die realen Werte um einen Faktor 1,6 tiefer und mit einem absoluten COP von 2,7 bei Quelltemperatur 14 °C, Vorlauftemperatur 64 °C und Rücklauftemperatur 56 °C leider nicht mehr besonders bemerkenswert. Der Gütegrad beträgt nur 37 %. Im weiteren Projektverlauf wird das Anlagenkonzept durchleuchtet und Verbesserungsmöglichkeiten werden aufgezeigt. Auch soll im Schlussbericht klar unterschieden werden bezüglich der vorliegenden anlagespezifischen Aspekte und dem Aspekt des Einsatzes von Propan als Arbeitsmedium.

Die Problematik der umweltkritischen Arbeitsmedien kann durch das im Moment in einer interessanten Entwicklungsphase stehende Prinzip der magnetischen Wärmepumpe umgangen werden. Es wäre äusserst interessant, wenn das physikalische Grundphänomen des magneto-kalorischen Effektes in einer kompetitiven Variante als Wärmepumpe eingesetzt werden könnte. Nachdem das theoretische BFE-Projekt *Machbarkeitsstudie für magnetische Wärmepumpen: Anwendungen in der Schweiz* [32] gezeigt hat, dass das Prinzip der magnetischen Wärmepumpe für den Einsatz mit Erdwärmesonde und Fussbodenheizung eine reelle Umsetzungschance hat, unterstützt das BFE nun die Entwicklung eines Prototyps im Projekt *Magnetische Wärmepumpe mit Erdwärmequelle – Optimierter Prototyp* [11]. Der Prototyp soll eine Leistung von 8 kW aufweisen und zwischen 5 und 35 °C arbeiten. Bisher wurden zwei Varianten der Anordnung der Magnete konzipiert und es wird im Moment die optimale Variante ermittelt. Hier ist das Ziel, möglichst hohe magnetische Effekte zu erzielen mit möglichst wenig Magnetmasse. Neben der Bewältigung der klassischen physikalischen Probleme in den Bereichen Magnetismus, Thermo- und Fluiddynamik



Figur 2: 3D-Simulation der magnetischen Feldlinien in einer magnetischen Wärmepumpe [11].

sind auch konstruktive Probleme zu lösen. Es hat sich auch gezeigt, dass die gewünschten magnetischen Materialien weltweit nicht so leicht erhältlich sind. Die Weiterbearbeitung des Gebietes der magnetischen Heiz- und Kühltechnik wird auch vom Kanton Waadt massgeblich unterstützt.

Systemintegration

Der Wirkungsgrad COP der Wärmepumpe ist direkt abhängig von der Temperatur der zugeführten Wärme und der Temperatur der abgeführten Nutzwärme. Die Gebäude sollten auf eine Innentemperatur von 20 bis 22 °C beheizt werden. Nimmt man eine Temperatur von 20 °C an und eine Anlage mit einer Erdsonde und einer Erdtemperatur von 5 °C, ergibt sich ein theoretischer Wirkungsgrad COP von 19,5. Dies bedeutet, dass bei Zufuhr von 1 Energieeinheit hochwertiger Antriebsenergie in Form von mechanischer Wellenenergie die Wärmepumpe 19,5 Energieeinheiten Wärme von 20 °C abgeben kann. Nun muss aber die Energie zuerst vom Quellmedium an die Wärmepumpe und dann auch von der Wärmepumpe in das zu beheizende Gebäude strömen. Dazu werden «treibende Gefälle», hier treibende Temperaturgefälle, benötigt. In heutigen Gebäuden ist die Heizung in Nebenräumen, meist im Keller angeordnet und die produzierte Heizwärme muss zuerst an die zu beheizenden Orte transportiert werden. Frühere Gebäude platzierten die Heizelemente im Zentrum des Gebäudes, z.B. offene Feuer oder Kachelöfen. Nimmt man in der Erdsonde ein Temperaturgefälle von 5 °C, im Verdampfer der Wärmepumpe von 5 °C, im Kondensator der Wärmepumpe von 5 °C und in der Wärmeverteilung von 15 °C an, reduziert sich der zu erwartende Wirkungsgrad schon auf 7,0, obwohl noch keine internen Verluste in Kompressor, Expansionsventil, Hilfsantrieben und Steuerung berücksichtigt wurden. Es ist also extrem wichtig, dass die Temperaturdifferenzen zwischen Wärmequelle und Wärmepumpe und zwischen Wärmepumpe und zu beheizendem Raum möglichst gering sind. Das kann nur erreicht werden, wenn die Wärmepumpe sowohl im Wärmeverteilsystem als auch architektonisch besser in das Gesamtsystem integriert wird. Heute ist die Praxis betreffend dieser Systemintegration noch sehr weit vom Optimum entfernt.

Im Projekt *Verbesserung der Jahresarbeitszahl durch witterungsgeführten Ladekreis* [7c] konnte eine Verbesserung der Jahresarbeitszahl von 11 % erreicht werden. Das Konzept besteht darin, dass der Wasserstrom, der im Kondensator die Nutzwärme abnimmt, entsprechend der Heizkurve und damit entsprechend der Aussentemperatur variiert wird. Dadurch kann die Temperaturdifferenz zwischen Kondensation und Wassertemperatur verringert werden, was sich positiv auf den Wirkungsgrad der Wärmepumpe auswirkt. Die Realisierung dieses Konzeptes in bestehenden Anlagen bedarf aber gewisser Voraussetzungen. Der Speicher muss einwandfrei schichten und das Regulierventil muss schnell sein bzw. es muss eine modulierende Umwälzpumpe vorhanden sein. Der wasserseitige Druckverlust des Kondensators darf auch bei grossen Massenströmen nicht zu gross werden. Im Projekt wurden zwei Anlagen umgebaut und ausgemessen. Das Konzept weist grössere Verbesserungspotenziale bei Luft/Wasser-Wärmepumpen auf als bei Sole/Wasser-Wärmepumpen.

Wärmepumpen können auch für die Bereitstellung von Warmwasser eingesetzt werden. Kleinere Wärmepumpen sind für den kombinierten Betrieb konzipiert, sie heizen und bereiten das Warmwasser meistens zeitlich separiert. Es sind aber auch kleinere Wärmepumpenboiler auf dem Markt, die nur Warmwasser erzeugen. Häufig beziehen sie die Quellwärme direkt aus den Kellerräumen, sind also Luft/Wasser-Wärmepumpen. Der Kondensator der Wärmepumpe ist gleichzeitig der Heizwärmetauscher im Boiler. Grössere Gebäude weisen separate Warmwasser-Wärmepumpen auf, die grössere Warmwasserspeicher versorgen. Hier stellt sich die Frage der optimalen Konzeption der Wärmetauscher und des Regelungskonzeptes. Das Projekt *Warmwasserbereitung mit Wärmepumpe und sekundärseitiger Laderegelung – Messungen an einer Wärmepumpenanlage in Uttwil TG* [12], das die Fortsetzung einer früheren Phase [33] darstellt, hat das Ziel, die sekundärseitige Laderegelung zu untersuchen, die vor allem für den Anti-Legionellen-Ladebetrieb benötigt wird. Dazu werden die optimale Kombination von Stufen- und Schichtladung mit den jeweiligen Arbeitszahlen und das Regelkonzept variiert und unter-

sucht. Das Projekt wird auch zu Empfehlungen für die Praxis führen, die den Planern erklären, wie man in Einfamilien-, Mehrfamilien- und Schulhäusern einwandfreie Ladevorgänge mit handelsüblichen Wärmepumpen für Stufen- und Anti-Legionellen-Betrieb konzipiert, ohne dabei elektrische Zusatzheizungen einsetzen zu müssen.

Die Klimaveränderung und architektonische Trends führen dazu, dass der Heizbedarf in modernen, gut gedämmten Gebäuden eher sinkt und der Kühlbedarf, vor allem im Sommer, steigt. Kälte bzw. tiefere Temperaturen lassen sich mit Kältemaschinen herstellen, die apparativ gleich aufgebaut sind wie Wärmepumpen. Es bietet sich also an, die in vielen Gebäuden schon vorhandenen Wärmepumpen auch zum Kühlen einzusetzen oder bei neuen Gebäuden von Planungsbeginn an Heizen und Kühlen vorzusehen. Obwohl Kühlen im Sommer eher ein verzichtbarer Luxus ist, zeigt sich, dass die Eigentümer nicht mehr auf diesen Komfort verzichten wollen. Das BFE versucht deshalb, die Umsetzung dieses Bedürfnisses durch die Bereitstellung von Empfehlungen auf eine energieeffiziente Weise zu ermöglichen. Das Projekt *SEK – Standardlösungen zum energieeffizienten Heizen und Kühlen mit Wärmepumpen* [13] sucht praxisgerechte Standardlösungen zum Heizen und Kühlen mit Wärmepumpen für unterschiedliche Anwendungsfälle wie Minergie- und Minergie-P-Gebäude. Die Arbeiten sollen schliesslich Auslegungsrichtlinien für die Praxis generieren. Nach Markt- und Literaturrecherchen wurde das schon früher für Simulationen entwickelte Gebäudemodell an eine neu zu untersuchende Feldanlage angepasst. Die Feldanlage wird instrumentiert und nun während zwei Jahren ausgemessen. Die im früheren BFE-Projekt «Rechenmethode für den Jahresnutzungsgrad von Wärmepumpen-Kompaktgeräten und Validierung» [34] entwickelte Rechenmethode, die von der europäischen Normenorganisation CEN übernommen und publiziert wurde (EN 15316-4-2) soll zusätzlich für den Kühlbetrieb ergänzt werden. Dieses Projekt ist auch der Schweizer Beitrag zum Annex 32 des Implementing Agreements *Heat Pumping Technologies* der IEA mit dem Titel *Economical Heating and Cooling Systems for Low Energy Houses* [14]. Dieser Annex wird von der Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie geleitet.

Im Projekt *IWB-Kundenzentrum Neubau Steinen – Erfolgskontrolle der erdgekoppelten Diffusions-Absorptions-Wärmepumpe zum Heizen und Kühlen* [15], das auch vom FOGA (Forschungsfonds der schweizerischen Gasindustrie) und von den IWB (Industrielle Werke Basel) unterstützt wird, wird das Zusammenspiel von Grundwassersonde, gasbetriebener Diffusions-Absorptions-Wärmepumpe (DAWP) und Energieverteilsystem in einem grossen, 5-stöckigen Minergie-P-Gebäude messtechnisch untersucht. Für ein angenehmes Betriebsklima sorgen TABS (thermoaktive Bauteilsysteme) und Komfortlüftung. Aus den Resultaten sollen dann Verbesserungen abgeleitet werden. Auch kann das Verhalten der gasbetriebenen DAWP mit einer Leistung von 3,6 kW aus dem Gaswärmepumpen-Effekt und einer maximalen Leistung von 19 kW aus dem integrierten Gas-Brennwertkessel untersucht werden. Das BFE hat in früheren Jahren die Entwicklung des DAWP-Prinzips ebenfalls unterstützt.

Umgebungswärme aus Luft, Erdreich und Wasser wird in der Schweiz als erneuerbare Energie betrachtet. Sie kann aber wegen der zu tiefen Temperaturen nicht direkt genutzt werden. Wärmepumpen benötigen hochwertige Antriebsenergie, die nur dann als erneuerbar betrachtet werden kann, wenn sie ohne Verbrauch von fossilen Energieträgern produziert wird. Die gegenwärtig im Netz angebotene elektrische Energie ist auch in der Schweiz mit einem hohen Wasserkraftanteil der Elektrizitätsproduktion teilweise als erneuerbar zu betrachten. Wasserkraft, Wind und Solarenergie sind erneuerbar, wie auch biogene Energieträger. Es muss deshalb untersucht werden, wie der Anteil erneuerbarer Energie beim Betrieb von Wärmepumpen erhöht werden kann. Ein diesbezüglicher Aspekt ist die Kombination von Wärmepumpenbetrieb und Solarenergie.

Das Projekt *SOL-PAC – Analyse des performances du couplage d'une pompe à chaleur avec une installation solaire thermique pour la rénovation* [16] untersuchte die energetische Verbesserung des Wirkungsgrades und die ökonomischen Konsequenzen bei einer Systemintegration von thermischen Sonnenkollektoren in verschiedenen Varianten und für je ein Einfamilienhaus und ein kleineres Verwaltungsgebäude. Die mit TRNSYS durchgeführten Simulationen zeigten, dass heute aus ökonomischer Sicht der Betrieb ohne Solarunterstützung am günstigsten ist, jedoch eine energetische Verbesserung in Abhängigkeit des Klimas zwischen 15 und 36 % möglich wäre. Die Simulationen wurden jedoch ohne Berücksichtigung der Vereisungs- und Verfrostungseffekte durchgeführt. Die Verbesserungen sind am höchsten, wenn im Primärkreislauf der Sonnenkollektoren ein Zwischenspeicher vorgesehen wird. Das Projektresultat zeigt ferner, dass die saisonale Wärmespeicherung das richtige Vorgehen wäre, was aber heute aus Kostengründen leider noch nicht marktkonform ist. Weitere Untersuchungen müssen in dieser Richtung unternommen werden.

Planer verwenden schon seit längerer Zeit Simulations-Tools für die Auslegung von Anlagen, dies in

vermehrtem Mass auch für kleinere Objekte. Das Simulationsprogramm Polysun wurde speziell für die Auslegung von solarthermischen Anlagen konzipiert und dann in mehreren Schritten zu einem kostengünstigen aber sehr flexiblen Simulationswerkzeug erweitert. In diesem Tool können heizungstechnische Anlagen aus vorkonfigurierten Bausteinen von im Handel befindlichen Komponenten frei zusammengesetzt werden, was eine hohe Flexibilität und Individualität erlaubt. Im Projekt *Simulation von Wärmepumpensystemen in Polysun 4* [17] wurden Module von Luft/Wasser- und Sole/Wasser-Wärmepumpen entwickelt und integriert. Handelsübliche Wärmepumpen wurden ebenfalls in die Bauteilebibliothek eingebaut. Damit wurde eine weitere Grundlage zur Verbreitung von Wärmepumpen geschaffen. Bei dieser Integration wurden aber auch grundsätzliche Fragestellungen bearbeitet, denn es sollte das richtige Verhalten der Wärmepumpen im Betrieb simuliert werden, wobei für die Charakterisierung der Leistungen der einzelnen Wärmepumpen nur 3 bis 4 Einzelmessresultate aus den offiziellen Prüfresultaten verwendet wurden. Zwischenwerte mussten dann vom Programm physikalisch richtig interpoliert werden.

Standardisierung und Testverfahren

Wärmepumpen arbeiten heute noch meistens im Ein/Aus-Betrieb, um die verlangte Leistung regulieren zu können. Dabei treten Ineffizienzen durch das Anfahren und Abstellen auf. Früher hatte man die Absicht, diese Verluste, die 5 bis 30 % betragen können, durch Messungen auf dem Prüfstand zu eruieren. Durch die vermehrte Prüftätigkeit sind heute jedoch die Prüfstände zu stark ausgelastet, um diese aufwendigen Messungen auch noch durchführen zu können. Das Projekt *Dynamischer Wärmepumpentest Phase 3 und 4* [18] hat das Ziel, die im Betrieb zu erwartenden Verluste aus stationären Messungen berechnen zu können und die Leistungsfähigkeit im ON/OFF-Betrieb durch optimierte Bedingungen (Steuerung, Komponenten, etc.) zu verbessern. Phase 3 konzentriert sich auf Luft/Wasser-Wärmepumpen und Phase 4 auf Sole/Wasser-Wärmepumpen.

Auch die Leistungsfähigkeit von Wärmepumpen muss durch offizielle Prüfungen gesichert werden. Kunden sollten bei der Produkt-Auswahl neben dem Preis auch vermehrt die Leistungsdaten berücksichtigen. Das Projekt *QS-WP/QP: Qualitätsprüfung von Kleinwärmepumpen mittels Norm und Feldmessungen – Teilprojekt Langzeitverhalten 2007–2008* [19] ist eine Fortsetzung des FAWA-Projektes [35] und konzentrierte sich auf das Langzeitverhalten der Arbeitszahl (Alterung) und die Wartungs- und Reparaturkosten in Abhängigkeit des Alters der Wärmepumpe. Es konnte in den bisher 13 Beobachtungsjahren kein Abfallen der Leistungszahl festgestellt werden. In mehr als 1,6 Mill. Betriebsstunden war die Ausfallquote nur 0,25 %. Aus einem Sample von 61 Anlagen konnten mittlere Wartungskosten von 18,5 CHF/Jahr und mittlere Reparaturkosten von 74,5 CHF/Jahr ermittelt werden.

Die Typenprüfungen von Wärmepumpen müssen nach international festgelegten Norm-Verfahren durchgeführt werden. Diese müssen durch die sich verändernden Anforderungen und durch neue Produkte periodisch überprüft und angepasst werden. Das Wärmepumpen-Testzentrum in Buchs SG hat den Vorsitz der Arbeitsgruppe CEN TC 113/WG10 übernommen, die die Prüfung von Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zur Erwärmung von Brauchwasser bearbeitet. Das BFE unterstützt diese Arbeiten im Projekt *Vertretung BFE im CEN und Vorsitz WG10* [20]. Der definitive Normenentwurf wurde 2008 fertiggestellt und der TC 113 zur Freigabe zum CEN Enquiry vorgelegt, der Mitte September 2008 gestartet wurde.

Wärme-Kraft-Kopplungs (WKK)-Anlagen

Wie schon in der Einführung und beim Projekt *Pompe à chaleur à double cycle rankine* [8] ausgeführt, bringt die Kombination von WKK und Wärmepumpen ein CO_2-Reduktionspotenzial von 30 bis 50 %. Beide Prozessschritte sollen dabei natürlich höchste Wirkungsgrade erreichen. In jüngster Zeit wird zudem vermehrt versucht, Abwärme mittlerer Temperatur oder Wärme aus der Verbrennung von minderwertigen oder biogenen Brennstoffen auszunutzen, und elektrische Energie zu produzieren.

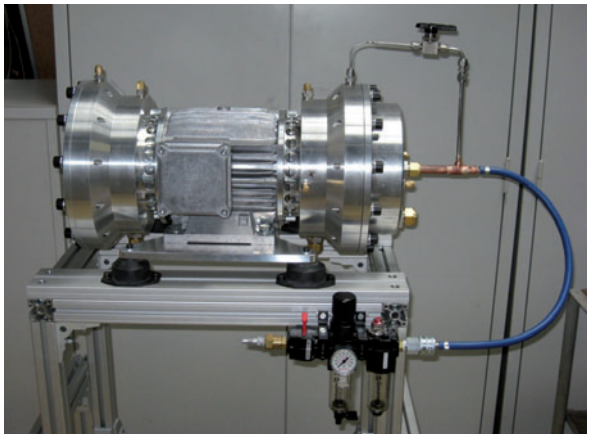
Steigerung der Effizienz

Im Projekt *Energetische Optimierung von Biogas-BHKW's* [21] wurden verschiedene Möglichkeiten gesucht, den Wirkungsgrad von mit unaufbereitetem Biogas betriebenen WKK-Anlagen zu erhöhen und die Verbesserungen zu quantifizieren. Durch die Einspeisevergütung können apparative Zusatzkosten von bis zu 20'000 CHF/kW zusätzlich gewonnener elektrischen Leistung wirtschaftlich getragen werden. Die Untersuchungen konzentrierten sich auf die Steigerung des verbrennungsmotorischen Wirkungsgrades und die Umwandlung der ungenutzten Abwärme in elektrische Energie durch zusätzliche technische Systeme wie ORC, Stirlingmotoren und thermo-elektrische Wandler. Obwohl grosse Forschungsaktivitäten bei der Erforschung von neuartigen, ungiftigen und Hochtemperatur-unempfindlichen Materialien zu beobachten sind, dürfte die Nutzung der

thermoelektrischen Wandlung im WKK-Leistungsbereich noch einige Jahre an Forschungsaufwand bedingen.

Das Projekt *Projet HT Scroll – Nouveau système de cogénération à turbine spirale haute température* [1], das auch vom Axpo Naturstromfonds und verschiedenen Firmen unterstützt wird, möchte eine marktfähige Lösung im kleineren Leistungsbereich von etwa 5 kW_{el} anbieten zur Umwandlung von Abfallwärme mit einer Temperatur von um oder unter 250 °C in elektrische Energie und nutzbarer Abwärme von etwa 60 °C. Eine solche Apparatur könnte auch aus Biomasse-Verbrennung, Solarthermik oder Geothermie einfach elektrische Energie gewinnen. Das Grundkonzept sieht vor, dass ein ORC-Arbeitsmedium durch eine zweistufige Scroll-Turbine entspannt wird. Scroll-Turbinen wurden als einfach käufliche Elemente vorausgesetzt, weil diese Apparate in Grossserien als Verdichter in Wärmepumpen angeboten werden. Die im Vergleich zum Wärmepumpen-Betrieb höheren Betriebstemperaturen und die gegenseitige Beeinflussung von Arbeits- und Schmiermedien verursachten aber verschiedene technische Probleme, die auch dazu führten, dass die Scroll-Turbinen ganz neu ausgelegt und gebaut werden mussten. Im vorliegenden Projekt soll die Expansionsmaschine gegenüber der Umgebung hermetisch sein und keine Wellendurchführung nach aussen enthalten. Deshalb muss das Drehmoment zwischen Rotor und Stator magnetisch durch ein Trennrohr nach aussen übertragen werden. Obwohl inzwischen ein instrumentierter Teststand aufgebaut werden konnte (vgl. Titelbild) und verschiedene zielgerichtete Vorversuche mit Ersatzmedien durchgeführt wurden, ist das Projekt zeitlich im Rückstand und kann erst 2009 abgeschlossen werden.

Das BFE unterstützt das Projekt *Aactor !GT – Entwicklung einer inversen Gasturbine Aactor zur Nutzung erneuerbarer Energie und industrieller Abwärme, Phase 2* [22], nachdem die Vorphase 1 ohne öffentliche Unterstützung beendet wurde. Es soll eine Mikro-Gasturbine mit 2,4 kW elektrischer Leistung ausgelegt werden, die mit Schwachgas aus Deponien und später auch durch Pellets befeuert werden soll. Die Spezialität gegenüber den konventionellen Gasturbinen liegt darin, dass die Brennkammer bei Atmosphärendruck betrieben wird. Dies vereinfacht die Konstruktion erheblich. Im gewählten Konzept können beliebige Brennstoffe eingesetzt werden, also auch feste Brennstoffe biogenen Ursprungs oder Abfälle. Bei Brennstoffen mit stark verschmutzendem Rauchgas muss die Wärme über einen Wärmetauscher an das Kreislaufmedium übertragen werden, was wegen der limitierten Wandtemperaturen potenziell zu einer Wirkungsgradeinbusse führt im Vergleich zu heutigen grosstechnischen Gasturbinen. Die schnell laufenden Räder für Turbine und Verdichter sollen möglichst aus im Markt angebotenen kostengünstigen Turboladern gewählt werden.



Figur 3: Zweistufige Scroll-Turbine auf dem Prüfstand mit dem Prüfmedium Luft [1]

Systemintegration

Das Projekt *MEU – Instruments innovants de planification et de management de systèmes énergétiques en zones urbaines* [23] untersucht die Systemintegration und -optimierung von Energiesystemen in grösseren Massstäben von Quartieren, Stadtteilen und Städten. Das Ziel ist, den Städteplanern ein Hilfsmittel für die Urbanisierung zur Verfügung zu stellen, das energetische, ökonomische und ökologische Kriterien einschliesst. Das Tool soll auch das Verhalten der verschiedenen Markt-Teilnehmer wie Verbraucher, Energieversorger und Verteiler modellieren und so auch Auswirkung von Lenkungseingriffen abschätzen können. Das Ende 2008 gestartete Projekt wird vom Foga mitfinanziert und konnte sich die substantielle Unterstützung der Städte La Chaux-de-Fonds, Lausanne, Martigny und Neuchâtel sichern. Es wird interessant sein, zu verfolgen, ob sich ein generalisiertes Konzept in grösseren urbanen Systemen effektiv durchsetzen lässt und wie das Konzept und dessen Auswirkungen mathematisch beschreibbar sind.

Kälte

Unser Lebensstandard verlangt neben Nutzwärme auch Nutzkälte. Insbesondere unsere heutige Lebensmittelversorgung wäre ohne Kälteanwendung nicht funktionsfähig. Kältemaschinen weisen die gleichen apparativen Komponenten auf wie Wärmepumpen. Neben den Kleingeräten wie Kühlschränken und Tiefkühltruhen, die in Grossserien hergestellt werden, werden die meisten Kälteanlagen jeweils speziell auf die vorliegenden Bedürfnisse abgestimmt und individuell

geplant und gebaut. In der Kälteversorgung wird die Zuverlässigkeit der Anlagen meistens höher gewichtet als die Energieeffizienz. Deshalb setzen sich energetische Vorteile nur sehr langsam durch, insbesondere dann, wenn dadurch die Anlagen komplizierter werden oder Einschränkungen für die Benutzer mit den Einsparungen verknüpft sind. Eine Frage, die seit langem kontrovers diskutiert wird, wird im Projekt *Wärmerückgewinnung (WRG) in der gewerblichen Kälte* [24] untersucht. An zwei konkreten Kälteanlagen mit Normal- und Tiefkühlung (Plus- und Minus-Kälte) wird ein Betrieb mit WRG dem Betrieb ohne WRG in einer längeren Messperiode gegenüber gestellt. Die Inbetriebnahme der Messgeräte verlief nicht ohne Probleme, sodass endgültige Aussagen noch nicht gemacht werden können.

Nationale Zusammenarbeit

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

Interessierte Fachkreise werden durch Publikationen der Projektleiter und der laufenden Publikation der Ergebnisse auf den Internetseiten

- www.waermepumpe.ch und
- www.energieforschung.ch

orientiert.

Bei der Auflistung der Projekte wurde schon erwähnt, dass die vom BFE im Bereich Wärmepumpen, WKK und Kälte geförderten Projekte häufig auch von anderen Organisationen unterstützt werden. So engagiert sich der Foga (Energieforschungsfonds der schweizerischen Gasindustrie, www.erdgas.ch), der Axpo Naturstromfonds (www.axpo.ch), der Kanton Waadt, das Awel (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft) des Kantons Zürich, das Hochbauamt der Stadt Zürich und das Amt für Umwelt und Energie des Kantons Basel-Stadt an verschiedenen Forschungsprojekten.

Mit den Branchenverbänden besteht ein institutionalisierter Informationsfluss, denn alle wesentlichen Verbände haben ein Mitglied in der Begleitgruppe unseres Programmes. Vertreten sind die FWS (Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz), der WKK-Fachverband und der SVK (Schweizerischer Verein für Kältetechnik).

Internationale Zusammenarbeit

Die Internationale Zusammenarbeit erfolgt vor allem durch eine aktive Mitarbeit im internationalen Normenwesen und im *Heat Pump Programme* der Internationalen Energieagentur (IEA). In einem Gemeinschaftsprojekt (IEA-HPP Annex 32) mit 10 Ländern stellt die Fachhochschule Nordwest-Schweiz (FHNW) den Operating Agent [14]. Vom 20.–22. Mai 2008 fand in Zürich die *9th International IEA Heat Pump Conference* [36] erstmals in der Schweiz statt, die logistisch vom NOC (National Organizing Committee, Chair Dr.Th.Kopp (HSR/BFE), St.Peterhans (FWS) und F.Rognon (BFE)) organisiert wurde und die mit 450 Teilnehmern aus 32 Ländern ein grosser Erfolg war. Neben der Konferenz mit 9 Sessions mit 72 Vorträgen und 106 Posters wurden noch 7 Workshops zu aktuellen Themen der Wärmepumpenforschung angeboten. Die wissenschaftliche Programmgestaltung lag in den Händen des IOC (International Organizing Committee) mit seinem Chair, Dr. Rune Aarlien aus Norwegen und den Regional Coordinators Dr. Monica Axell (Schweden), Gerry Groff (USA) und Makoto Tono (Japan). Die Schweiz konnte ihre Aktivitäten im Bereich Wärmepumpen prominent dem internationalen Publikum vorstellen: 10 Vorträge und 19 Posters stammten von Autoren aus der Schweiz. Die schweizerische Energiepolitik und der Stellenwert der Wärmepumpe wurden vom Direktor des BFE, Herrn Dr. W. Steinmann in der Eröffnungssession präsentiert. Der frühere Programmleiter unseres Programms, Herr Dr. M. Zogg stellte die Entwick-

lungsgeschichte der Wärmepumpe [37] vor. Die Industrie beteiligte sich namhaft in der Ausstellung und bei den technischen Exkursionen zu verschiedenen interessanten Anlagen im Grossraum Zürich und engagierte sich auch im Sponsoring. Die EHPA (European Heat Pump Association), die IIR (International Institut of Refrigeration) und die ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) agierten als Co-Sponsors. Die meisten Länder des *IEA Heat Pump Programme* beteiligten sich als Country-Sponsors. Die nächste, 10. Konferenz wird im Jahr 2011 in Japan stattfinden.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Im Berichtsjahr wurden keine reinen P&D-Projekte in diesem Bereich unterstützt, da die Programmschwerpunkte nicht im Fokusbereich der P+D-Förderung des BFE lagen. Einige Projekte mit Forschungscharakter konnten im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsprojekten unterstützt werden.

Bewertung 2008 und Ausblick 2009

Die 2008 abgeschlossenen Projekte zeigen alle interessante Resultate. Die Erwartungen wurden weit gehend erfüllt. Einige Projekt wurden verzögert, einerseits aufgrund von technischen und messtechnischen Schwierigkeiten, andererseits auch wegen des enormen Booms in der Wärmepumpen-Branche, der zur Folge hat, dass bei den industrienahen Personen die Abwicklung der laufenden Projekte Vorrang geniesst gegenüber den längerfristigen Forschungsprojekten. Die Ziele im CORE-Konzept werden beharrlich verfolgt. Das 4-Jahreskonzept 2008–2011 verfolgt weiter die wichtigen Ziele Steigerung der Effizienz und Systemintegration. Die Verbreitung der Wärmepumpe hat weiter zugenommen, sie ist v.a. bei neuen Wohnbauten zu einem Massengut geworden. Das wird u.a. durch die Tatsache verdeutlicht, dass ein Käufer heute die Möglichkeit hat, zwischen Preis und Effizienz selbst zu gewichten. Bessere Wärmepumpen sind teurer als einfache mit tieferen Leistungszahlen. Die Energieberater sind allerdings noch nicht überall so weit, dass sie diese Unterschiede den Käufern in der Beratung aufzeigen können, und viele Installateure sind durch Rabattsysteme an Produkte gebunden, was die Verbreitung energieeffizienter Systeme bremst.

Seitens der Programmleitung war die erfolgreiche 9. Internationale Wärmepumpen-Konferenz das Highlight im letzten Jahr. Mit einem kleinen, aber sehr effizienten NOC (National Organizing Committee) konnten wir erfolgreich eine grosse internationale Konferenz organisieren. Im NOC waren die Bereiche Forschung (Th. Kopp als Chairman), Markt und Industrie (St. Peterhans, Geschäftsführer der FWS) und BFE (Bereichsleiter F. Rognon) vertreten. Rückblickend war es essentiell, dass im NOC alle relevanten Kräfte (Forschung, Markt und BFE) vereint waren und dass die Zusammenarbeit sehr erfolgreich war. An dieser Stelle sei mit Anerkennung und Dank erwähnt, dass sich die Industrie und die Energiedienstleister aus dem In- und Ausland aktiv als Sponsoren an der Konferenz-Organisation beteiligt haben.

2008 haben verschiedene Vorgespräche stattgefunden für Projekte, die 2009 gestartet werden sollen. Erwähnenswert sind sicher ein grosses Projekt mit einem Grossserien-Hersteller zur Entwicklung eines neuartigen Kompressors sowie ein Projekt mit Firmen aus der Kältebranche zur Nutzung der Expansionsenergie bei den Kälteprozessen. Auch wird die Kombination Solarthermie und Wärmepumpen nicht immer optimal umgesetzt: hier müssen rasch verbesserte Planungsunterlagen erarbeitet werden, was im Rahmen eines neuen *IEA-SHC* Task geplant ist.

Am 24. Juni 2009 wird wiederum die nationale WP-Tagung in Burgdorf stattfinden, welche im Rahmen des Forschungsprogramms Wärmepumpen, WKK, Kälte organisiert wird.

Liste der F+E-Projekte

Unter www.bfe.admin.ch/forschung/waermepumpe (Rubrik Projekte) sind die Jahres- und Schlussberichte sowie weitere Informationen verfügbar.

[1] M. Kane[1], D. Cretegny[1], D. Favrat[2] (malick.kane@epfl.ch), [1]Eneftech Innovations SA, 1015 Lausanne und [2]EPFL, LENI Laboratoire d'énergétique industrielle, 1015 Lausanne: Projet HT Scroll – Nouveau système de cogénération à turbine spirale haute température (Jahresbericht Projekt 101'609).

[2] L. Gasser, B. Wellig, K. Hilfiker (beat.wellig@hslu.ch), Hochschule Luzern, CC Thermische Energiesysteme &

Verfahrenstechnik, 6048 Horw: a) WEXA: Exergieanalyse zur Effizienzsteigerung von Luft/Wasser-Wärmepumpen (Schlussbericht April 2008, Projekt 101'543) b) WEXA: Exergy analysis for increasing the efficiency of air/water heat pumps (final report April 2008, project 101'543).

[3] M. Albert, L. Gasser, B. Wellig (beat.wellig@hslu.ch), Hochschule Luzern, CC Thermische Energiesysteme & Verfahrenstechnik, 6048 Horw: Effiziente Luft/Wasser-Wärmepumpen durch kontinierliche Leistungssteigerung (Jahresbericht Projekt 102'713).

[4] L. Berlinger, M. Imholz, M. Albert, B. Wellig, K. Hilfiker (beat.wellig@hslu.ch), Hochschule Luzern, CC Thermische Energiesysteme & Verfahrenstechnik, 6048 Horw: LOREF: Luftkühler-Optimierung mit Reduktion von Eis- und Frostbildung – Optimierung des Lamellenluftkühlers/Verdampfers von Luft/Wasser-Wärmepumpen – Teil 1: Theoretische und experimentelle Untersuchungen (Schlussbericht April 2008, Projekt 100'059).

[5] R. Sahinagic, L. Gasser, B. Wellig, K. Hilfiker (beat.wellig@hslu.ch), Hochschule Luzern, CC Thermische Energiesysteme & Verfahrenstechnik, 6048 Horw: LOREF: Luftkühler-Optimierung mit Reduktion von Eis- und Frostbildung – Optimierung des Lamellenluftkühlers/Verdampfers von Luft/Wasser-Wärmepumpen – Teil 2: Mathematisch-physikalische Simulation des Lamellenluftkühlers mit Kondensat- und Frostbildung (Schlussbericht April 2008, Projekt 100'059).

[6] M. Nani[1], P. Hubacher[2] (marco.nani@ntb.ch), [1]Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs NTB, 9470 Buchs und [2]Hubacher Engineering, 9232 Engelburg: Qualitätsprüfung von Kleinwärmepumpen mittels Norm und ausgewählten Feldmessungen – Effizienzsteigerung (Bestanlagen) und Langzeitverhalten (Schlussbericht Dezember 2007, Projekt 100'991).

[7] P. Hubacher[1], M. Ehrbar[2] (he-ko@bluewin.ch), [1]Hubacher Engineering, 9232 Engelburg und [2]Enertec AG, 7306 Sargans: a) Feldmonitoring und Analysen an Grosswärmepumpen – Phase 2 (Jahresbericht Projekt 100'917), b) Beurteilungstool für Grosswärmepumpen – Phase 2 (Jahresbericht Projekt 102'366) und c) Verbesserung der Jahresarbeitszahl durch witterungsgeführten Ladekreis (Schlussbericht Nov 2008, Projekt 101'705).

[8] J. Demierre, D. Favrat, J. Jakubovski (jonathan.demierre@epfl.ch), EPFL, LENI Laboratoire d'énergétique industrielle, 1015 Lausanne: Pompe à chaleur thermique à double cycle rankine (Jahresbericht Projekt 102'846).

[9] A. Grüniger, B. Wellig (beat.wellig@hslu.ch), Hochschule Luzern, CC Thermische Energiesysteme & Verfahrenstechnik, 6048 Horw: CO_2-Erdwärmesonde – Phase 2 (Jahresbericht Projekt 102'247).

[10] M. Friedl (Markus.Friedl@awtec.ch), awtec AG für Technologie und Innovation, 8050 Zürich: Exergieanalyse der Wärmepumpe im Schulhaus Limmat (Jahresbericht Projekt 102'624).

[11] P. W. Egolf, A. Kitanovski, D. Vuarnoz, C. Gonin, T. Swinnen, P. Repetti, A. Orita, J.-L. Beney (Peter.egolf@heig-vd.ch), Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, 1401 Yverdon-les-Bains: Magnetische Wärmepumpe mit Erdwärme-Quelle – Optimierter Prototyp (Jahresbericht Projekt 100'873).

[12] H. Mayer[1], H.R. Gabathuler[1], Th. Baumgartner[2] (gabathuler.ag@bluewin.ch), [1]Gabathuler AG, 8253 Diessenhofen und [2]Baumgartner & Partner AG, 8600 Dübendorf: Warmwasserbereitung mit Wärmepumpe und sekundärseitiger Laderegelung – Messungen an einer Wärmepumpenanlage in Uttwil TG (Jahresbericht Projekt 101'494).

[13] R. Dott, C. Wemhöner, Th. Afjei (thomas.afjei@fhnw.ch), Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie am Bau, 4132 Muttenz: SEK – Standardlösungen zum energie-effizienten Heizen und Kühlen mit Wärmepumpen (Jahresbericht Projekt 101'579).

[14] C. Wemhöner, Th. Afjei (carsten.wemhöner@fhnw.ch), Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie am Bau, 4132 Muttenz: Operating Agent IEA HPP Annex 32 – Economical Heating and Cooling Systems for Low Energy Houses (Jahresbericht Projekt 101'579).

[15] D. Mollet, R. Dott, Th. Afjei (thomas.afjei@fhnw.ch), Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie am Bau, 4132 Muttenz: IWB-Kundenzentrum Neubau Steinen – Erfolgskontrolle der erdgekoppelten Diffusions-Absorptions-Wärmepumpe zum Heizen und Kühlen (Jahresbericht Projekt 101'527).

[16] S. Citherlet, J. Bony, B. Nguyen (stephane.citherlet@heig-vd.ch), HEIG-VD Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Laboratoire d'Energétique Solaire et de Physique du Bâtiment (LESBAT), 1401 Yverdon-les-Bains: SOL-PAC – Analyse des performances du couplage d'une pompe à chaleur avec une installation solaire thermique pour la rénovation (Schlussbericht Dez 2008, Projekt 102'321).

[17] J. Marti[1], A. Witzig[1], A. Huber[2], M. Ochs[2] (joerg.marti@velasolaris.com), [1]Vela Solaris AG, 8400 Winterthur, [2]Huber Energietechnik AG, 8032 Zürich: Simulation von Wärmepumpensystemen in Polysun 4 (Schlussbericht Okt 2008, Projekt 102'248).

[18] St. Bertsch, M. Uhlmann (stefan.bertsch@ntb.ch), Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs NTB, 9470 Buchs: Dynamischer Wärmepumpentest – Phase 3 und 4 (Jahresbericht Projekt 102'073).

[19] P. Hubacher[1], C. Bernal[1], M.Ehrbar[2] (he-ko@bluewin.ch), [1]Hubacher Engineering, 9032 Engelburg, [2]Enertec AG, 7306 Sargans: QS-WP/QP: Qualitätsprüfung von Kleinwärmepumpen mittels Norm- und Feldmessungen (Schlussbericht September 2008, Projekt 100'454).

[20] M. Nani (marco.nani@ntb.ch), Wärmepumpen-Testzentrum WPZ der Interstaatlichen Hochschule für Technik Buchs NTB, 9470 Buchs: Vertretung BFE im CEN und Vorsitz WG10 (Jahresbericht Projekt 101'510).

[21] P. Soltic, D. Edenhauser, A. Winkler (patrik.soltic@empa.ch), EMPA, 8600 Dübendorf: Energetische Optimierung von Biogas-BHKW's (Schlussbericht Juli 2008, Projekt 102'322).

[22] M. Schmid[1], J. Schiffmann[2], J. Borth[3] (schmid@oekozentrum.ch), [1]Oekozentrum Langenbruck, 4438 Langenbruck, [2]Fischer Engineering Solutions AG, 3360 Herzogenbuchsee und [3]ZHAW Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften, 8400 Winterthur: Aactor !GT – Entwicklung einer inversen Gasturbine Aactor zur Nutzung erneuerbarer Energie und industrieller Abwärme, Phase 2 (Jahresbericht Projekt 102'820).

[23] G. Cherix[1], M. Capezzali[2], (massimiliano.capezzali@epfl.ch), [1]CREM Centre de recherche énergétique et municipale, 1920 Martigny, [2]EPFL Energy Center, 1015 Lausanne: MEU – Instruments innovants de planification et de management de systèmes énergétiques en zones urbaines (Jahresbericht Projekt 102'775).

[24] M. Erb, St. Gutzwiller (markus.erb@eicher-pauli.ch), Dr. Eicher+Pauli AG, 4410 Liestal: Wärmerückgewinnung (WRG) in der gewerblichen Kälte (Jahresbericht Projekt 101'544).

Referenzen

[25] Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2007, Bundesamt für Energie, Bern, 2008.

[26] Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien Ausgabe 2007, Bundesamt für Energie, Bern, Oktober 2008.

[27] F. Rognon: Rund um Wärmepumpen in 10 Fragen – Antworten für Laien und Interessierte über Wärmepumpen und deren Anwendungen, Bundesamt für Energie, Bern, August 2007.

[28] Newsletter IEA Heat Pump Centre, (hpc@heatpumpcentre.org), S-501 15 Boras, Sweden.

[29] J. Schiffmann: Integrated design, optimization and experimental investigation of a direct driven turbocompressor for domestic heat pumps, PhD thesis, EPFL, 2008.

[30] E. Ochsner: Abwasserwärmepumpe mit Propan, aus Die Kälte und Klimatechnik 6, Verlag Alfons W. Gentner GmbH&Co. KG, D-70015 Stuttgart, 2006.

[31] P. Renold: Sewage as an energy source, International Energy Agency (IEA) Heat Pump Conference 2008, Paper and Presentation 8.6, Zürich, May 20-22 2008.

[32] P. W. Egolf, F. Gendre, A. Kitanovski, O. Sari, HEIG-VD Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud: Machbarkeitsstudie für magnetische Wärmepumpen: Anwendungen in der Schweiz, Bundesamt für Energie, Bern, Schlussbericht Projekt 100'873, 2006.

[33] H. Mayer, H.R. Gabathuler, Th. Baumgartner, Gabathuler AG und Baumgartner & Partner AG: Warmwasserbereitung mit Wärmepumpe, Bundesamt für Energie, Bern, Schlussbericht Projekt 101'494, Juli 2007.

[34] C. Wemhöner, R. Dott, Th. Afjei, D. Helfenfinger, P. Keller, R. Furter, Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie am Bau, 4132 Muttenz: Calculation method for the seasonal performance of heat pump compact units and validation, Bundesamt für Energie, Bern, Schlussbericht Projekt 100'238, 2006.

[35] M. Erb, P. Hubacher, M. Ehrbar, Dr. Eicher+Pauli AG, 4410 Liestal: Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen FAWA 1996 – 2003, Bundesamt für Energie, Bern, Schlussbericht Projekt 100'064.

[36] Conference Proceedings of the 9th International IEA Heat Pump Conference in Zürich (20-22 May 2008). Order from publication section at www.heatpumpcentre.org.

[37] M. Zogg (mazo@zogg-engineering.ch), Verfahrens- und Energietechnik, 3414 Oberburg: Geschichte der Wärmepumpe – Schweizer Beiträge und internationale Meilensteine, Bundesamt für Energie, Bern, Schlussbericht Projekt 102'311, 2008.

Impressum

Juni 2009
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
Druck: Ackermanndruck AG, Bern-Liebefeld
Bezug der Publikation: www.energieforschung.ch

Programmleiter
Prof. Dr. Thomas Kopp
HSR Hochschule Rapperswil
Oberseestrasse 10
CH-8640 Rapperswil
tkopp@hsr.ch

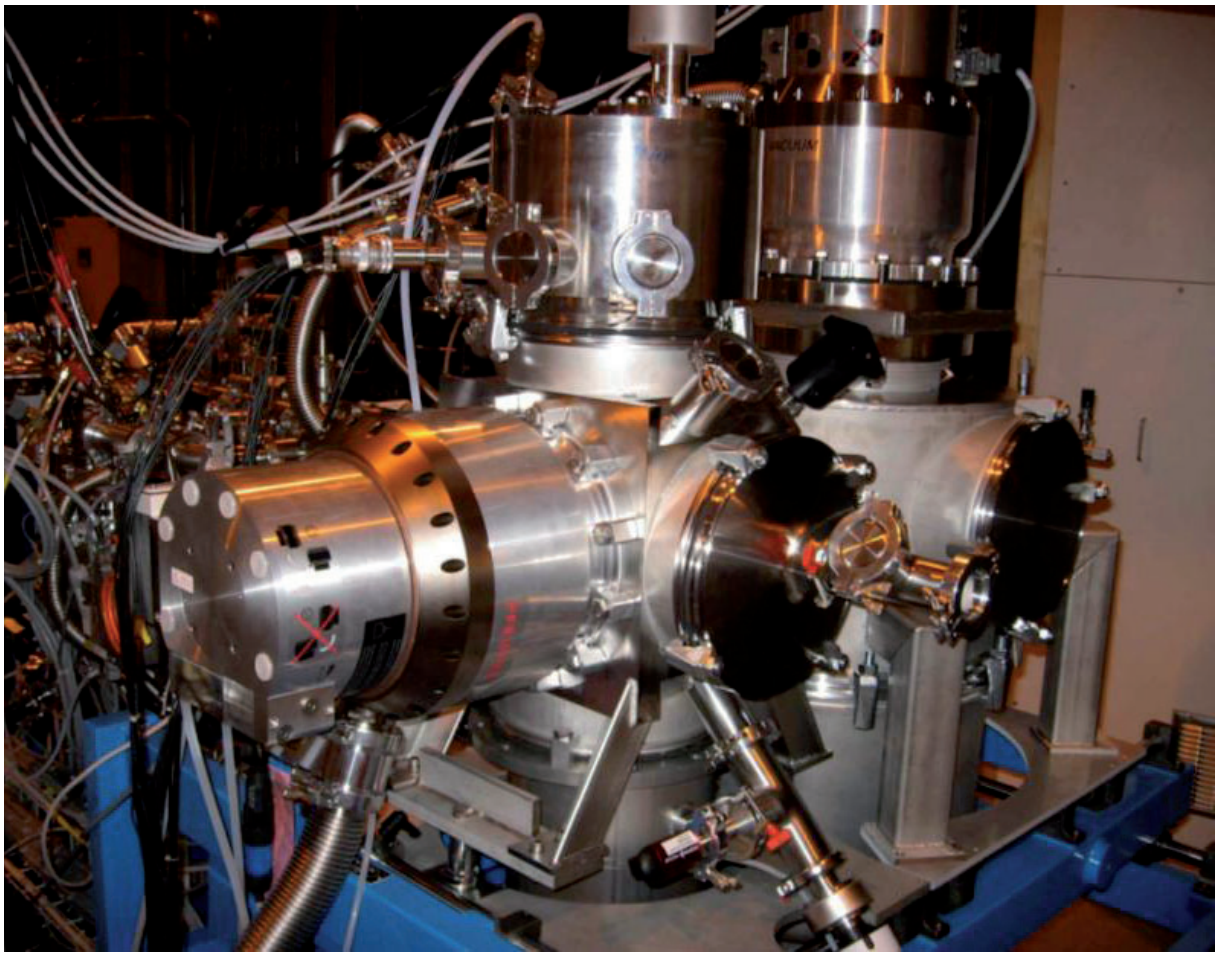
Bereichsleiter
Andreas Eckmanns
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
andreas.eckmanns@bfe.admin.ch

Rapport de synthèse 2008 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2008 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Verbrennung

Stephan Renz

renz.btr@swissonline.ch



Versuchsaufbau an der «Chemical Dynamic»-Strahllinie an der Swiss Light Source (SLS) am Paul-Scherrer-Institut (PSI)

Der Aufbau ermöglicht massen- und elektronenspektrometrische Messungen an Molekülen und Radikalen in der Gasphase. Dank aufwändiger Pumptechnik können Absorptionsmessungen in Gasmedien >10 mbar durchgeführt werden.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Die Verbrennung ist nach wie vor der wichtigste Prozess zur Umwandlung verschiedener Energieträger in die nutzbaren Energieformen Kraft und Wärme. Sowohl in der Schweiz (75 %) wie auch weltweit (85 %) wird weitaus der grösste Anteil am Gesamtenergieverbrauch durch die Verbrennung abgedeckt. Dafür werden vorwiegend die fossilen Energieträger Erdöl, Erdgas und Kohle genutzt. Der Anteil der erneuerbaren Energieträger wie Holz, Ethanol, Biogas oder Biodiesel, die durch Verbrennung in nutzbare Energieformen umgewandelt werden, ist zunehmend.

Durch die Verbrennung von fossilen Energieträgern wird jedoch auch ein wertvoller und endlicher Rohstoff verzehrt. Nachteilig sind zudem der CO_2-Ausstoss sowie die Emission verschiedener für Menschen und Natur schädlicher Stoffe (z.B. Feinstaub, NO_x, CO). Die Verbesserung der Effizienz und die Reduktion der Schadstoffemissionen von Verbrennungssystemen haben deshalb hohe Priorität.

Die Schweizer Verbrennungsforschung ist international anerkannt und hat eine langjährige Tradition. Entwicklungszentren weltweit tätiger Unternehmen sind in der Schweiz domiziliert aber auch Motorenhersteller und zahlreiche Zulieferer der Verbrennungsindustrie tragen zu einem Umsatz von rund CHF 2 Mrd. bei. Der Bund setzt für die Verbrennungsforschung jährlich rund CHF 11 Mio. ein. Um im weltweiten Forschungsumfeld einen Beitrag leisten zu können, sind eine Konzentration und die Kontinuität in ausgewählten Themen erforderlich.

Die Zielsetzungen des Programms Verbrennung richtet sich nach den Vorgaben des *Konzepts der Energieforschung des Bundes* [1] für die Periode 2008–2011:

Verbesserte Forschungsmethoden und -instrumente

Um die bestehenden Systemen gezielt zu verbessern, sind die Instrumente der Forschung wie physikalische Grundlagen, numerische Simulation, Messmethoden und Vesuchsträger zu entwickeln und an die gestellten Anforderungen anzupassen.

Erhöhung des Systemwirkungsgrads

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

Reduktion der Schadstoffemissionen

Die erheblich verschärften Emissionsvorschriften (Euro 6, USA 2010/14) erfordern die Reduktion der emittierten Stickoxide, Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxide sowie der festen Stoffe (Russ, Feinstaub). Hinzu kommt die Verminderung der Kohlendioxide.

Nutzung verschiedener Energieträger

Die Verbesserung des Wirkungsgrads und die Reduktion der Schadstoffe stellen auch neue Anforderungen an die Zusammensetzung der Brennstoffe. Die Palette der nutzbaren Brennstoffe wird zudem erweitert und die Verbrennungssysteme müssen auch für biogene Brennstoffe optimiert werden.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2008

Verbesserung der Forschungsgrundlagen und -methoden

(Physikalische Grundlagen, numerische Simulation, Messmethoden und Versuchsträger)

Entsprechend dem hohen Stand der Technik und den laufend geforderten Verbesserungen, sei dies in den Bereichen der atmosphärischen Verbrennung (Brenner, offene Feuer), der nicht stationären Verbrennung (Motoren) oder der stationären Hochdruckverbrennung (Gasturbinen), sind die Anforderungen an die Instrumente und die Vorgehensweisen in der Verbrennungsforschung gross. Die Grundlagen und Methoden der Forschung sind deshalb stetig anzupassen und zu verbessern. Um die unterschiedlichen Funktionsweisen und Einflussfaktoren der chemischen, thermodynamischen und kinetischen Prozesse in der Verbrennung zu verstehen und entsprechende Veränderungen zu bestimmen, genügen rein empirische Vorgehensweisen nicht mehr. Damit werden eher zufällige Resultate erzielt und ein enormer Aufwand ist dafür notwendig. Hilfreich sind hingegen Instrumente wie die numerische Modellierung der Prozesse, Versuchsträger – um beispielsweise Teilbereich der motorischen Verbrennung zu untersuchen – und geeignete Messmethoden. Mit der numerischen Modellierung können erhebliche Kosten für Versuche gespart werden. Die Versuchstände und die Messmethoden dienen der Validierung der theoretischen Modelle sowie dem Testen und dem Verbessern von einzelnen Komponenten des Gesamtsystems. Idealerweise werden verschiedene Methoden und Instrumen-

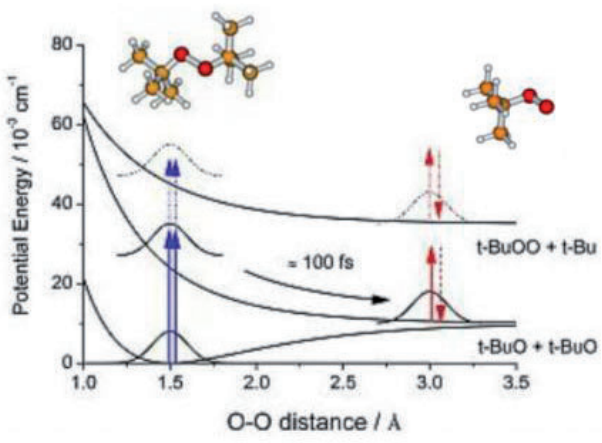
te der Forschung konzertiert eingesetzt und die Ergebnisse auch am realen Modell überprüft. In verschiedenen vom Bundesamt für Energie (BFE) unterstützten Projekten ist dies der Fall, wobei in der Regel mehrere Forschungsinstutionen und Industrieunternehmen in einem internationalen Rahmen zusammenarbeiten.

Die Verbesserung der Forschungsmethoden und -instrumente hat auch immer einen Bezug zu den wirkungsorientierten Zielen der Verbrennungsforschung: Erhöhung des Systemwirkungsgrads, Reduktion der Schadstoffemissionen sowie Nutzung verschiedener Energieträger.

Zündverhalten der Peroxy-Radikale

Der Zündvorgang hat einen grundlegenden Einfluss auf den Verlauf der Verbrennung und damit die Entwicklung von Schadstoffen, insbesondere von Russ. Das Zündverhalten wird weitgehend durch Peroxy-Radikale bestimmt. Sie bestimmen die Art und die Zusammensetzung der anfänglich vorhandenen Zwischenprodukte und somit die Entwicklung der nachfolgenden Reaktionen. Trotz intensiven Studien ist die quantitative Beschreibung der Prozesse im Zündvorgang noch nicht gesichert. Vielmehr beruht die Beschreibung auf zwar glaubwürdigen, aber letztlich nicht validierten Modellen. Als Folge davon ist die numerische Simulation des Verbrennungsprozesses durch diese Ungenauigkeit fehlerhaft oder wird durch die Ungewissheit belastet. Dies umso mehr, als sich bereits kleine Fehler in der Simulation der Spezifikation des Zündprozesses in der Berechnung der folgenden Reaktionen potenzieren. Diese Situation kann nur geändert werden, indem die Peroxy-Radikale auf molekularer Ebene genau beschrieben werden.

Für die Darstellung von Peroxy-Radikalen wurden im Projekt *Investigation of reactions and species dominating low temperature combustion* [2] der Gruppe «Molekulare Dynamik» des Paul Scherrer Instituts (PSI) eine neue Molekularstrahl-Apparatur konstruiert und in Betrieb genommen. Neuartige Radikalen-Quellen werden fortlaufend modifiziert und im Hinblick auf die effiziente Darstellung von bestimmten Radikalen optimiert. Mit Hilfe einer elektrischen Gasentladung können unter günstigen Umständen spezielle Radikale gezielt erzeugt werden. Nach der Entladung kann dem aus der Entladungskammer strömenden Gas ein weiteres Gasgemisch beigefügt werden. Damit ist es möglich, kurz vorher erzeugte Radikale mit neutralen Molekülen reagieren zu lassen. Die Versuchseinrichtung erlaubt es, gleichzeitig lineare und nichtlineare spektroskopische Messungen an Molekülen in einem Molekularstrahl durchzuführen. Dafür stehen im PSI-Labor ein Nanosekunden- und ein Femtosekunden-Laser zur Verfügung (siehe Figur 1). Hinzu kommt die *Chemical Dynamics Beamline* am «Swiss Light Source»(SLS)-Synchrotron am PSI, die eine gute spektroskopische Basis zur Erfassung der Alkyl-Peroxyl-Radikalen darstellt.



Figur 1: Femtosekunden-«Four Wave Mixing» (fs-FWM): Zerfallsschema von Di-Ter-Butyl-Peroxid.

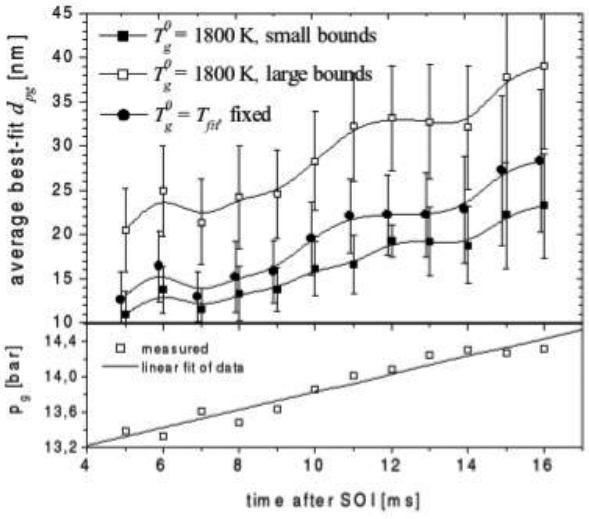
Im Berichtsjahr konnten in zwei Dissertationen weiterführende Erkenntnisse über Rydbergzustände von Formaldehyd sowie über die Dynamik von Zuständen im Bereich der Dissoziationsschwelle gewonnen werden. Ein Teil der Arbeit wurden in einer synergetischen Zusammenarbeit mit der Gruppe von Prof. F. Merkt an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETHZ) erarbeitet. Die jetzt im Betrieb stehende «*VacuumUltraViolet» (VUV) Strahllinie* an der SLS [3] wird wesentliche Daten von komplizierteren Molekülen liefern, ohne die die laserspektroskopischen Messungen nicht angegangen werden könnten. Laserspektroskopische Messungen können dann mit massenspektrometrischen Messmethoden kombiniert eingesetzt werden, um die Reaktionsmechanismen und die Dynamik von Alkyl-Peroxy-Radikalen aufzuzeigen. Aus den Messungen können thermochemische Daten dieser für die Zündung von Flammen wichtigen Radikale mit grösserer Genauigkeit bestimmt werden.

Erste Versuche zur Bestimmung des Dissoziationsverhaltens von Peroxy-Radikalen mit einem fs-Pump–Probe-Verfahren wurden durchgeführt. Dazu wurde *ter-Butyl-Peroxid* verwendet. Ter-Butyl-Peroxid ist eines der wenigen stabilen Peroxide und eignet sich deshalb als Ausgangstoff für Testversuche. Darüber hinaus ist ter-Butyl-Peroxid als Brennstoffzusatz von einigem Interesse. Für den Fortgang der Arbeit auch mit anderen Peroxy-Radikalen erweisen sich die Absorptionsmessungen, die an der VUV-Strahllinie registriert werden können, als grosser Fortschritt. Weitere wertvolle Daten werden die Messungen von Ionisations- und Dissoziationsschwellen liefern.

Methoden zur Erfassung der Russpartikelgrössen

Die Beobachtung und Erfassung der innermotorischen Entwicklung der Russpartikelgrösse bei verschiedenen Betriebszuständen dient einem besseren Verständnis der Russbildung und Russoxidation bei der Dieselverbrennung. Dafür ist die Entwicklung von in-situ-Messungen, die bei verschieden Betriebsparamertern wie Einspritzdruck, Brennraumtemperatur und -druck online möglich sind, notwendig.

Zur Bestimmung der mittleren Partikelgrösse von Russ während der Diesel-Verbrennung wurde im Projekt *Two dimensional quantification of soot and flame-soot interaction in spray combustion at elevated pressures* [4] die Methode der zeitaufgelösten *Laser-induzierten Inkandeszenz (LII)* an der am PSI betriebenen Hochdruck-Einspritzkammer eingesetzt. Das «2-Farben LII»-Experiment zur Bestimmung der Russpartikelgrösse und zur simultanen Registrierung räumlich aufgelöster Russemissionsspektren wurde weiter verbessert. Transiente LII-Signale wurden zu verschiedenen Zeitpunkten nach Einspritzbeginn bei Gegendrücken zwischen 1 MPa und 3,5 MPa und bei Einspritzdrücken von 50–130 MPa aufgezeichnet. Das Abkühlverhalten der durch Laser aufgeheizten Partikel wurde durch Lösung der Transportgleichungen für Masse und Energie berechnet. Ein thermo-physikalisches Modell wurde verwendet, um theoretisch berechnete Kurven an die experimentell bestimmten LII-Abklingkurven unter Variierung verschiedener Parameter anzupassen. Die Auswertungen ergaben mittlere Partikeldurchmesser der Russteilchen zwischen 10–20 nm, je nach Gasdruck, Einspritzdruck sowie dem Zeitpunkt nach Einspritzbeginn, (5–16 ms). Insbesondere zeigte sich, dass bei einer eingestellten Gastemperatur von 773 K, einem Gasdruck von ca. 1,4 MPa und einem Einspritzdruck von 50 MPa der mittlere Partikeldurchmesser mit der Brenndauer kontinuierlich von ca. 10 nm auf 20 nm zunimmt. Unter den gegebenen Bedingungen wachsen demnach die Russteilchen noch 16 ms nach Einspritzbeginn (siehe Figur 2).



Figur 2: Die Russteilchen wachsen proportional zu der seit der Einspritzung vergangenen Zeit.

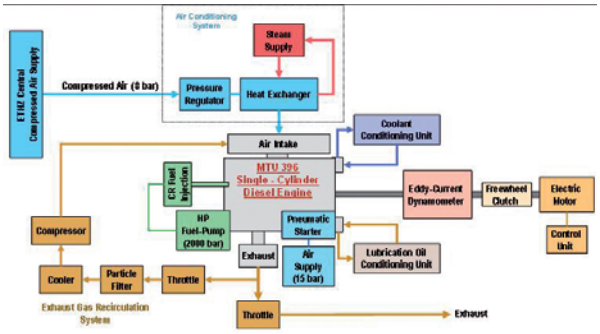
Die Ergebnisse waren weit gehend unabhängig von der Annahme einer konkreten Teilchenverteilung und der Umgebungstemperatur, was auf eine hohe Robustheit der Auswertmethode hinweist. In dem zwischenzeitlich abgeschlossenen Projekt wurde das Ziel, die Russverteilung in Sprayflammen zweidimensional zu erfassen, erreicht. Zudem wurde die Methodik im Experiment realisiert, und die Vorgehensweise zur Auswertung der gemessenen Daten wurde etabliert.

Das Ziel, vollständige Messserien zu den Eigenschaften einzelner Dieselbrennstoffmischungen zu erstellen, wurde hingegen nicht erreicht. Dafür werden weitere Arbeiten notwendig sein.

Numerische Simualtionsmethoden

Die numerischen Simulationsmethoden wie beispielsweise die *Computational Reactive Fluid Dynamics* (CRFD) sind heute wichtige Instrumente für die Entwicklung und Verbesserung technischer Produkte. Das Ziel ist, aufwändige Messreihen und Versuchsinstallationen durch kostengünstige und zeiteinsparende Simulationsberechnungen zu ersetzen. Am Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV) der ETHZ wurden erfolgreich Rechen-Codes für die Simulierungen von Verbrennungsprozessen entwickelt und Erfahrungen damit gesammelt.

Ziel des Projekts *Erweiterung und Validierung der CRFD-Simulation für neue motorische Brennverfahren und Kraftstoffe* [5] ist die Erweiterung bestehender Simulationswerkzeuge, um neuartigen Brennverfahren und unterschiedlichen Kraftstoffeigenschaften Rechnung tragen zu können und präzise Vorhersagen zu ermöglichen. Zu diesem Zweck werden in Zusammenarbeit mit anderen



Figur 3: Schematische Darstellung des Einzylinder-Dieselmotors MTU 396.

nationalen und internationalen Forschungsvorhaben wertvolle Synergien genutzt. Die Problematik wird dabei von vier Seiten angegangen: Jeweils paarweise ein experimenteller Teil zur Bereitstellung der Validierungdaten und parallel dazu die Simulations-Code-Entwicklungsarbeit. Die zweite «Achse» besteht in der gezielten Ausnutzung der jeweiligen Vorteile von motorischen Versuchsträgern (welche die Validierung an technisch relevanten Verbrennungvorgängen anhand globaler Grössen wie beispielsweise dem Zylinderdruck erlaubt) und von «generischen» Experimenten an optisch zugänglichen Verbrennungskammern und Einhubtriebwerken (welche zusätzlich wertvolle, örtlich aufgelöste Informationen für die Submodellvalidierung und -kalibrierung liefern).

Im Jahr 2008 konnte am LAV ein «MTU 396»-Einzylinder-Heavy-duty-Forschungsmotor erfolgreich in Betrieb genommen werden, welcher einen flexiblen Austausch der Instrumentierung zulässt (schnelle Entnahmesonde, Mehrwellenpyrometrie, Ionenstrom-Sonden etc., siehe Figuren 3 und 4). Der bestehende *Conditional Moment Closure Code* wurde mittels Daten eines vorher ausgemessenen Heavy-duty-Motors für einen weiten Bereich von Betriebsbedingungen anhand von Druckverläufen, Brennraten und NO_x-Emissionen erfolgreich weiter validiert. Die Validierung erfolgte für einen konventionellen Dieselkraftstoff. Eine letzte Untersuchung wurde zur Publikation am *SAE World Congress* im April 2009 eingereicht. Erste Modifikationen für die Inbetriebnahme des Einhubtriebwerks im «dual-fuel»-Betrieb, d.h. mit homogener Grundladung und Zündung mittels Dieselpilot, sind erfolgt und eine umfangreiche Literaturstudie zu diesem Brennverfahren weitgehend abgeschlossen. Aufgrund von Schwierigkeiten bei der Stellenbesetzung konnten auf der Seite der Kraftstoffvariationen noch keine Messungen durchgeführt werden. Alle vorbereitenden Arbeiten sind im Wesentlichen abgeschlossen



Figur 4: Modifizierter Zylinderkopf mit der Commonrail-Einspritzdüse.

und Infrastruktur und Messausrüstung stehen ebenfalls bereit; Evaluationen und Interviews mit potenziellen Kandidaten erfolgen laufend.

2009 wird der Schwerpunkt der Arbeit auf der Generierung experimenteller Daten mit den verschiedenen Versuchsträgern liegen, wobei die Simulation begleitend ausgebaut wird.

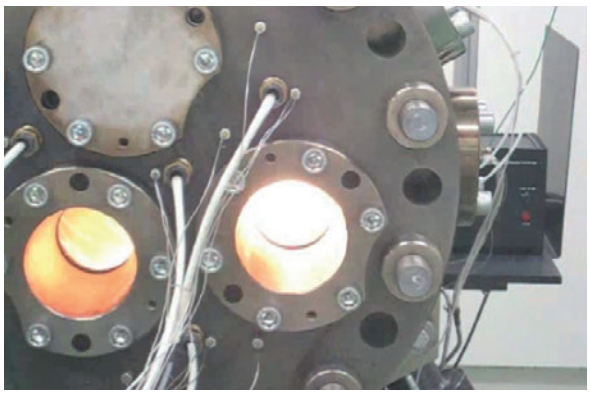
Erhöhung des Systemwirkungsgrads und Reduktion der Schadstoffemissionen

Massnahmen zur Verbesserung des Wirkungsgrads der Verbrennung bewirken in zahlreichen Fällen eine Erhöhung der Schadstoffemissionen und umgekehrt. So sind beispielsweise hoher Druck und hohe Verbrennungstemperaturen Voraussetzungen für einen hohen Wirkungsgrad, bewirken jedoch eine Zunahme der Bildung von NO_x. In Projekten zur Verbesserung des Verbrennungssystems müssen somit immer beide Bereiche betrachtet und die Auswirkungen der Veränderungen umfassend abgeklärt werden. Diese Voraussetzungen sind in den vom BFE unterstützten Projekten gegeben. Verstärkt wird auch das Gesamtsystem, d.h von der Brennstoffzusammensetzung, Brennstoffaufbereitung über die Verbrennung bis zur Abgasnachbehandlung, in die Betrachtungen miteinbezogen. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, die Nachteile eines Teilsystems mit einem anderen Teilsystem zu korrigieren. Ein Beispiel ist die Abgasnachbehandlung, die wirkungsvoll zu hohe Stickoxid-Werte reduzieren kann.

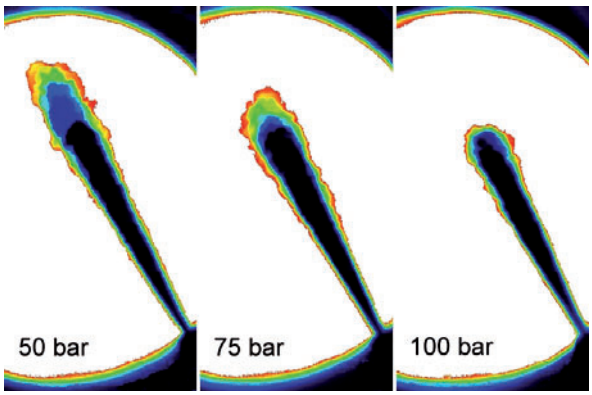
Grossvolumige Dieselmotoren

Im EU-Projekt *HERCULES (High Efficiency R&D on Combustion with Ultra Low Emissions for Ships)* [6] werden neue Technologien in Bezug auf grosse Schiffsdieselmotoren entwickelt. Schweizer Partner sind Wärtsilä Schweiz AG, ABB Turbosystems AG, das LAV der ETHZ, das PSI und die Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa). Ein Teilprojekt befasst sich mit der Anwendung und Erweiterung von Verbrennungsprozess-Simulationsmodellen, für dessen Entwicklung und Validierung experimentelle Daten benötigt werden. Im vom BFE unterstützen Projektteil wurde ein experimenteller Versuchsträger entwickelt, der das Verbrennungssystem grosser 2-Takt-Schiffsdieselmotoren unter Berücksichtigung der charakteristischen Bedingungen weitestgehend repräsentieren soll, um die benötigten Referenzdaten zu generieren.

Die Inbetriebnahme der sogenannten «Spray Combustion Chamber»– inklusive aller peripheren Systeme des neuen komplexen Versuchsstandes – konnte im Berichtsjahr abgeschlossen werden (Figur 5). Dabei wurde insbesondere auch die komplexe Steuerung der Anlage in Be-



Figur 5: «Spray Combustion Chamber» in Betrieb.



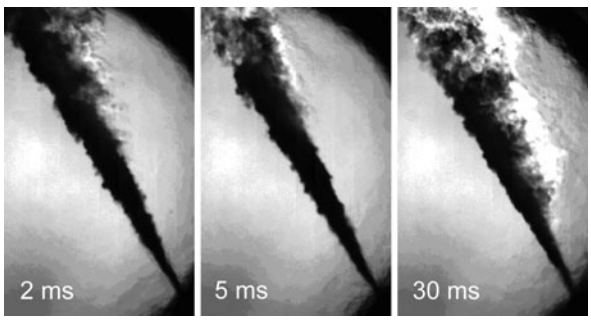
Figur 7: Analyse Einspritzstrahlausbreitung.

zug auf die Ansteuerung (Trigger) externer messtechnischer Geräte (Laser, Kamera) sowie die Datenerfassung bzw. -verarbeitung um wesentliche Optionen ergänzt. Ausserdem konnte das hinsichtlich schiffsdieselmotorischer Verbrennung realistische Einspritzsystem in Bezug auf die Erfassung aller hydraulischen Drücke (Rail, Düse), der Brennstoffmasse sowie des Nadelhubs weiter entwickelt werden, woraus das Einspitzverhalten ersichtlich ist.

Schliesslich bestätigten umfangreiche Untersuchungen (Kennfeldmessungen) und Tests (Limiten) die gemäss Auslegung zu erwartenden Spezifikationen (Druck, Temperatur, Drall).

Die ersten Messkampagnen zur Untersuchung des Verbrennungssystems (Einspritzung, Zündung und Verbrennung) unter Variation diverser Betriebsparameter erfolgten mit Hilfe der Schattenbildtechnik. Durch die Anwendung eines high-speed-Systems (Kamera, Beleuchtung) im kHz-Bereich sowie des Einsatzes entsprechender optischer Filter (Eigenleuchten) konnte die Entflammungsphase (Zündverzug) sowie der Verbrennungsfortschritt erfasst werden (Figur 6).

Die statistische Analyse aus Messungen bei konstanten Bedingungen unter Variation eines Parameters (z.B. Kammerdruck) ergeben die mittlere Einspritzstrahlausbreitung bzw. zeigen auch deren Fluktuation (Figur 7).



Figur 6: Visualisierung Zündung und Verbrennung.

Mit der definitiven Inbetriebnahme dieses novitären Prüfstandes steht den Schweizer Forschungspartnern aus Industrie und Hochschule nun ein langfristig einsetzbares F&E-Instrument zur Erhöhung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit auf diesem Gebiet zur Verfügung. Die Entwicklungsziele sind weitgehend erreicht worden, und auch die ersten messtechnischen Versuche sind bisher relativ vielversprechend verlaufen.

Eine weitere Bestätigung der bisherigen Anstrengungen bzw. des grossen Interesses an diesem Projekt zeigt sicher auch die Weiterführung in einem von den Verantwortlichen der EU gutgeheissenen Nachfolgeprojekt (HERCULES ß) innerhalb des 7. EU-Forschungsrahmenprogrammes.

Optimierung von Brennverfahren und Abgasnachbehandlung

Die Forderung, die Funktionsweise und die Einflussfaktoren des gesamten Verbrennungssystems − d.h. von der Brennstoffaufbereitung bis zur Abgasnachbehandlung − in die Betrachtungen mit einzubeziehen, wird im Ende 2008 gestarteten Projekt *Entwicklung schneller Mess- und Rechenverfahren für die Charakterisierung energieeffizienter Dieselbrennverfahren an der Nahtstelle zur Abgasnachbehandlung* [7] erfüllt. Projektgegenstand ist die Entwicklung von sehr schnellen messtechnischen und Modellierungs-Methoden für die Optimierung des Zusammenspiels zwischen motorischem Brennverfahren und Abgasnachbehandlung, insbesondere der SCR-basierten Entstickung. Von Interesse sind insbesondere «Medium»- und «Heavy-duty»-Dieselmotoren, für welche die Erfüllung zukünftiger, noch strengerer Emissionsvorschriften (z.B. EURO 6) möglichst mit einer Erhöhung des Gesamtwirkungsgrads (CO_2-Reduktion) einhergehen muss. Die zu entwickelnden Werkzeuge werden an einem eigens dazu aufzubauenden leistungsstarken, transienten Prüfstand evaluiert und kontinuierlich verbessert.

Die Problematik der durch die Verbrennung erzeugten Partikel war an der *12. ETH-Konferenz Combustion Generated Nanoparticles* [8] ein Thema, das interdisziplinär behandelt wurde. Unter den 350 Teilnehmenden war das Ausland mit 24 Nationen in der Teilnehmerzahl sogar etwas stärker vertreten als die Schweiz. Eine vernetzte Diskussion der Problematik und der Lösungsvorschläge wurde durch die Vertreter aus Wissenschaft, Behörden und Industrie ermöglicht. Neben den technischen Sessions, in denen versucht wurde, den Bogen von der Partikelentstehung in der Verbrennung, über die atmosphärischen Vorgänge, zur Abgasnachbehandlung und zur Messtechnik zu spannen, haben vor allem die beiden Sessions zu biologisch-medizinischen Wirkungsaspekten und der Fokus-Event, diesmal zu den europäischen Low-Emission-Zonen, an Bedeutung gewonnen.

Das Spektrum an Forschungs- und Entwicklungsthemen wird naturgemäss immer breiter. Während anfänglich die Fragen zu Partikelcharakterisierung, Probenentnahmetechnik und Messtechnik im Vordergrund standen, die inzwischen den Sprung in die EU-Direktiven geschafft haben, ist jetzt eine Vielzahl von Schwerpunkten zu verfolgen. Dabei ist die Weiterentwicklung der motorischen Verbrennungstechnik, die Vielfalt in der Weiterentwicklung von Brennstoffen und die Akzeptanz der Abgasnachbehandlung für neue Motorengenerationen deutlich zu erkennen.

Deutlich wurde auch, dass die Nachrüstung von Dieselmotoren mit Partikelfiltern – vor 2000 ein kleines Segment im Arbeitsschutz im Bergbau – nun als einziges Mittel zur Verbesserung der Luftqualität breite Akzeptanz gefunden hat. Die Tatsache aber, dass sich hier ein grosser neuer Markt auftut, ruft nun auch grosse Industrien auf den Plan. Damit wird Geld für Forschung frei und mit der intensiven Weiterentwicklung von Materialen und katalytischen Prozessen ist mittelfristig sehr viel Wertschöpfung zu erwarten.

Das BFE unterstützte diese für die Teilnehmenden unentgeltliche jährliche Konferenz mit einem Beitrag. Das grosse internationale Netzwerk von Fachleuten und der nach wie vor grosse Handlungsbedarf sind das Fundament für die Wirkung der Veranstaltung.

Nutzung verschiedener Energieträger

Um die grossen Anforderungen an hoch effiziente und schadstoffarme Verbrennungssyteme erfüllen zu können, müssen auch die Eigenschaften der Brennstoffe in die Betrachtungen mit einbezogen werden. Im motorischen Bereich sind die Möglichkeiten für den Ersatz oder die Verbesserung der traditionellen Treibstoffe Benzin und Diesel zu prüfen. Das Zündverhalten, der Abbrand, die Russbildung, die Bildung von Stickoxiden aber auch die Gemischbildung und die Energiedichte werden durch den Treibstoff beeinflusst. Neue Rezepturen der Treibstoffe oder Gemische, wie beispielsweise mit Wasserstoff oder biogenen Energieträgern, stehen zur Diskussion. Hinzu kommen Treibstoffe aus ausschliesslich biogenem Material, die in Form von Biogas, Biodiesel oder Ethanol in motorischen Verbrennungssystemen eingesetzt werden. Ähnliche Themen und Aufgaben stehen auch für die atmosphärische Verbrennung, d.h. in Heizkesseln, zur Diskussion.

Brennstoffe für homogene Brennverfahren

Die Entwicklung von *homogenen Brennverfahren für Dieselmotoren (HCCI, Homogeneous Charge Compression Ignition)* ist seit einigen Jahren ein Schwerpunkt in der Forschung im Gebiet der dieselmotorischen Brennverfahrensentwicklung. Dem Potenzial der selbstgezündeten, homogenen Verbrennung (massive Reduktion der Stickoxid- und Russemissionen) stehen grosse Schwierigkeiten bei der Kontrolle dieses Brennverfahrens gegenüber. Da in einem Dieselmotor keine externe Zündung vorhanden ist, muss der Zeitpunkt des Verbrennungsbeginns im homogenen Betrieb alleine über den Gemischzustand im Zylinder gesteuert werden. Besonders bei hohen Lasten und tiefen Drehzahlen erfolgt die Selbstzündung des homogenen Gemischs aber oft zu früh, was zu hohen Druckspitzen (Lärm, mechanische Belastung) und einem schlechten thermodynamischen Wirkungsgrad führt. Der heute in Dieselmotoren eingesetzte Kraftstoff eignet sich schlecht für das HCCI-Brennverfahren, da seine bei der dieselmotorischen Diffusionsverbrennung notwendige kurze Zündverzugszeit im homogenen Betrieb (also bei langen Vormischzeiten) zu einer zu frühen Zündung des Gemischs führt. Von grosser Bedeutung ist daher für die zukünftige Gestaltung von effizienten, emissionsarmen HCCI- Systemen die gezielte Abstimmung der Zusammensetzung der eingesetzten Kraftstoffe auf diese neuen Anforderungen. Das Schwergewicht liegt dabei auf realisierbaren Mehrkomponentenkraftstoffen, wobei sowohl herkömmliche wie auch speziell entwickelte «Designer-fuels» eingesetzt werden können.

Das Projekt *Brennstoffe für homogene selbstgezündete Verbrennungsprozesse* [9] befasst sich mit der experimentellen und theoretischen Untersuchung der Selbstzündung und Verbrennung von Brennstoff-Luft-Gemischen, wie sie in HCCI-Motoren im homogenen Betrieb vorhanden sind. Es ist eng verknüpft mit dem Forschungsvorhaben «Kraftstoffkennzahlen für homogene Verbrennung» der deutschen Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) [10]. Das vorliegende Projekt ist ergänzend zum FVV-Projekt

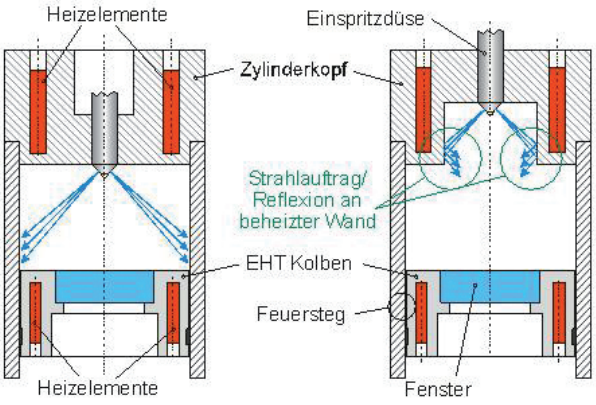
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	CEC-RF	n-Heptan	Naphtha 1	Naphtha 2	Kero 1	Kero 3	CCS-Fuel	Diesel 1	Diesel 2	Diesel 3
SM-Nr.			VW	Shell	07-S-001830	07-S-001906	VW	07-S-001935	07-S-001907	07-S-001908
Aromat %					25					
Naphten %			11		30	40	60			
Paraffin %		100	70	80	45	50	40	100	100	100
Olefin %			19	20		10				
Distillation										
IBP °C	220	98	80	40	153	149	157	192	199	224
5%	240		91	81	166	162	165	198	213	240
10%	245		95	90	166	163	167	202	221	246
50%	≥ 245		112	120	177	168	176	246	273	276
90%	325		139	150	247	292	192	306	310	312
95%	345-350		146	156	267	313	200	319	323	324
FBP	<370	98	165	180	283	317	215	327	330	333
CN			35	55	38	52,3	47,1	50	57	67

Figur 8: Kraftstoffmischungen im FVV Projekt «Kraftstoffkennzahlen für homogene Verbrennung».

«Kraftstoffkennzahlen» (siehe Figur 8) das Bindeglied auf der numerischen und experimentellen Seite zwischen Stosswellenrohrmessungen (Uni Duisburg–Essen) und motorischem Experiment (RWTH Aachen, Uni Stuttgart). Mehr als 10 europäische Industriefirmen sind im Rahmen der FVV an diesem Vorhaben beteiligt.

Die 2008 geleisteten Arbeiten umfassen in erster Linie eine systematische Suche nach der besten Einspritzstrategie und Zylinderkopfgestaltung für eine optimale Homogenisierung des Brennstoff-Luft-Gemischs zum Zeitpunkt der Selbstzündung. Dies ist in dieser Arbeit besonders wichtig, da die zu untersuchenden Kraftstoffe grosse Variationen bezüglich ihrer Verdampfungseigenschaften besitzen. Dazu wurden in der Berichtsperiode deutlich über 100 sehr aufwendige CFD-Berechnungen durchgeführt, jeweils mit mehr als einem Tag Rechen- und Auswertezeit.

Auf der experimentellen Seite wurde im Verlauf des Jahres 2008 das Einhubtriebwerk des LAV grundlegend revidiert; einzelne Anlagenkomponenten mussten ganz ausgetauscht werden. Inzwischen ist es wieder in Betrieb und bereit für die experimentellen Untersuchungen des laufenden Projektes.

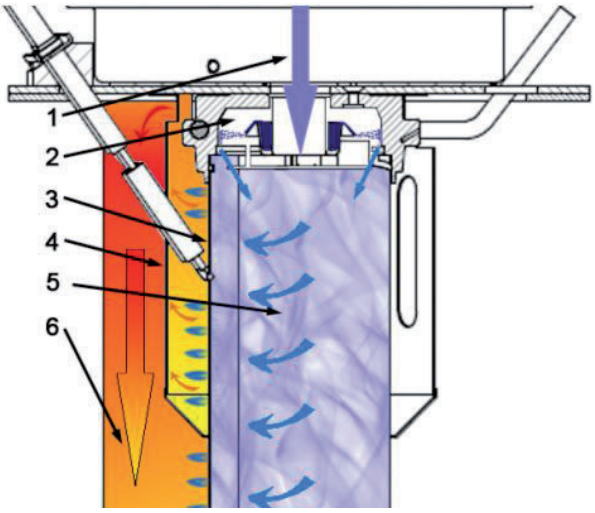


Figur 9: Links bestehender Zylinderkopf des EHT, rechts Variante mit einer Mulde. Der Einspritzstrahl trifft auf die vorgewärmte Muldenwand und verdampft schneller.

Um den Anteil des im realen Zylinders an der heissen Wand verdampften Brennstoffs besser nachbilden zu können, wurde im Einhubtriebwerk eine Mulde im Zylinderkopf vorgesehen. Diese kann einfacher als die Zylinderwand vorgewärmt werden. Durch die Reflexion des Einspritzstrahls an der Muldenwand wird zudem verhindert, dass viel flüssiger Brennstoff auf die kalte Zylinderwand aufgetragen wird. (siehe Figur 9).

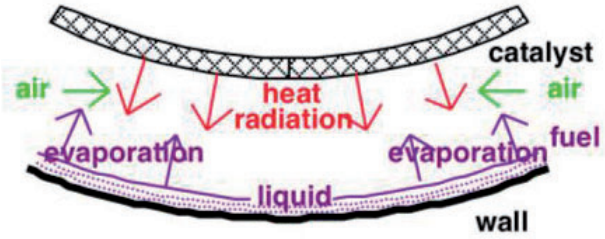
Biogene Brennstoffe in der atmosphärischen Verbrennung

Die heute vom Markt geforderte Flexibilität von *Heizölsystemen* wird immer grösser. Diese Flexibilität betrifft sowohl den Leistungsbereich als auch die tolerierten Brennstoffeigenschaften. Der Trend geht zu kleineren und besser modulierbaren Systemen. Moderne Einfamilienhäuser weisen heute auf Grund der guten Wärmeisolation einen Wärmeleistungsbedarf von deutlich weniger als 12 kW aus.



Figur 10: Schematische Darstellung des Plutobrenners 1 Zuluft, 2 Schleuderbecher mit Öl-Spray, 3 Flammhalter mit Flamme, 4 Umlenkkragen, 5 Mischzone von Luft und Öl, 6 Abgasstrom.

Wenn Heizsysteme zusätzlich zur Ölheizung noch mit Alternativenergie, zum Beispiel Sonnenkollektoren, ausgerüstet sind, so variiert die durch Verbrennung erzeugte Wärmemenge je nach Jahreszeit und Wetterverhältnissen für Heizung und Warmwasser stark. Ähnlich wie bei grösseren Anlagen wird heute auch im Kleinleistungsbereich eine gleitende Fahrweise verlangt, um die Leistung des Brenners dem effektiv erforderlichen Wärmebedarf anzupassen.



Figur 11: Funktionsdarstellung der katalytisch beheizten Verdampfung (Catvap-Brenner).

Lösungsmöglichkeiten für Ölbrenner kleiner Leistung werden im Ende 2008 gestarteten Projekt *Grundlagen zur Erweiterung des Leistungsbereichs und der Brennstoff-Flexibilitäten von Ölbrennern mit Vorverdampfertechnik (VVT)* [11] untersucht. Dabei werden der Verdampfungsprozess und das Phänomen der Verkokung in zwei verschiedenen VVT-Brennern durch Simulationsversuche charakterisiert und die Betriebsgrenzen für rückstandsfreie Verdampfung bestimmt. Durch Anwendung von Parameterstudien und einem numerischen Modell sollen Design-Lösungen für verschiedene Leistungsbereiche vorgeschlagen werden. Die folgenden Brennstoffe werden im Projekt untersucht: Heizöl EL (Euro-Qualität), Ökoheizöl schwefelarm, Bio-Diesel und zwei Heizöl-Biodiesel-Blends. Es werden zwei unterschiedliche Ölbrenner mit Vorverdampfertechnik eingesetzt. Beim Plutobrenner der Schweizer Firma Toby AG wird das Öl nach der Zentrifugalzerstäubung auf einer durch Rauchgasrückführung beheizten Wand verdampft. Verdampfer und Brenner bilden bei diesem Verfahren eine fest verkoppelte Einheit (siehe Figur 10).

Der vom Ingenieur L. Griesser entwickelten Catvap-Brenner nutzt die Strahlungswärme der katalytischen Oxidation eines Teilstroms des zugeführten Brennstoffs (Figur 11). Der Brennstoff kommt für die Verdampfung somit nicht mit einer heissen Fläche in Berührung und das System ist unabhängig vom nachfolgenden Prozess.

Nationale Zusammenarbeit

Die Forscherteams der Schweizer Verbrennungsforschung pflegen oft über gemeinsame Projekte gute Kontakte und kennen ihre Aufgabengebiete. Darüber hinaus gehende Kontakte werden beispielsweise durch die Hochschulkompetenzgruppe für Verbrennungsmotoren (HKV) [12] gepflegt. Sie trifft sich jährlich zu einem Informationsaustausch über die Aktivitäten der verschiedenen Fachhochschulen. Auch Forschende aus dem ETH-Bereich sowie einzelne Akteure der Industrie sind darin vertreten. Die Schweizerische Vereinigung für Verbrennungsforschung (SVV) [13] koordiniert die Aktivitäten im ETH-Bereich mit Beteiligung der Industrie. Die Interessengruppe «Combustion and Pollutant Formation (Measurement & Modeling Techniques)» des Leonhard Euler Centers der European Research Community On Flow, Turbulence And Combustion (ERCOFTAC) [14] beschäftigt sich in internationalem Kontext mit Fragen der numerischen Simulation von Strömungen. Dazu gehören auch Themen der Verbrennungsforschung. Im Berichtsjahr wurde keine Tagung über die Verbrennungsforschung in der Schweiz durchgeführt. Diese vom BFE mitorganisierte Veranstaltung findet alle zwei Jahre statt und wird wiederum 2009 durchgeführt werden. Für die Verbrennungsforschung interessante, in der Schweiz durchgeführte Veranstaltungen waren die *ETH-Konferenz über Combustion generated Nanoparticles* [8] und der vom PSI organisierte *7. International Workshop on Catalytic Combustion* [15]. Ein Informationsaustausch der Schweizer Industrie findet in der Fachgruppe Verbrennungsmaschinen des Verbands der Schweizer Maschinen-, Elektro- und Metall-Industrie (Swissmem) statt. Die Programmleitung des BFE nahm an diversen Veranstaltungen der vorgenannten Gruppen teil und informierte über die Ziele der Forschung und die Möglichkeiten der Förderung.

In zahlreichen Forschungsprojekten erfolgt eine gute Zusammenarbeit zwischen den Hochschulen und der Industrie. Dazu gehören auch verschiedene vom BFE mit finanzierte Projekte. Zu nennen sind das Projekt HERCULES [6], in dem die ETHZ und das PSI sowie Wärtsilä Schweiz AG Partner sind. Zahlreiche Industriepartner werden im Ende 2008 gestarteten Projekt *Entwicklung schneller Mess- und Rechenverfahren für die Charakterisierung energieeffizienter Dieselbrennverfahren an der Nahtstelle zur Abgasnachbehandlung* [7] involviert sein. Dazu werden Duap AG, Kistler Instrumente AG, Iveco Motorenforschungs AG, Liebherr Machines Bulle SA und Hug Engineering AG gehören. Das Projekt *Erwei-*

terung und Validierung der CRFD-Simulation für neue motorische Brennverfahren und Kraftstoffe [5] ist Teil des vom Swiss Competence Centre Energy und Mobility (CCEM) geführten Projekts Clean Efficient Large Diesel Engine (CELaDE) [16] in dem eine Zusammenarbeit zwischen der ETHZ, dem PSI und der Empa erfolgt. Das an der Fachhochschule Nordwestschweiz bearbeitete Projekt *Grundlagen zur Erweiterung des Leistungsbereichs und der Brennstoff-Flexibilitäten von Ölbrennern mit Vorverdampfertechnik (VVT)* [11] stützt sich auf die Zusammenarbeit mit der Firma Toby AG als Lieferant der Brenner und dem Verein Bio-Fuel als Lieferant der Bio-Brennstoffe. Das Projekt wird von der Erdölvereinigung mit finanziert.

Internationale Zusammenarbeit

Aufgrund des hohen Niveaus der Verbrennungsforschung in den wichtigen Industrienationen ist die Orientierung an den internationalen Zielen und Ergebnissen sowie die Zusammenarbeit mit Forschungsinstitutionen und Industriepartnern aus anderen Ländern notwendig. In vielen vom BFE unterstützten Projekten erfolgt eine intensive Vernetzung von europäischen Hochschulen und Industriepartnern. Dazu gehört das von der EU mit finanzierte Projekt HERCULES [6]: Neben den bereits erwähnten Schweizer Forschungsinstitutionen und Industriepartner sind auch die Abo Akademi University, die Helsinki University of Technology, die National Technical University of Athens sowie die Wärtsilä Corporation Finnland beteiligt. Erfreulich ist, dass die Arbeiten im 7. EU-Forschungsrahmenprogramm fortgesetzt werden können.

Das Projekt *Brennstoffe für homogene selbstgezündete Verbrennungsprozesse* [9] war Teil einer internationalen Ausschreibung der deutschen Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) [10]. Das LAV der ETHZ erhielt den Zuschlag, was seine Kompetenz und die internationale Konkurrenzfähigkeit bestätigt. Eine Zusammenarbeit erfolgt mit den Universitäten Duisburg und Stuttgart sowie der Technischen Hochschule Aachen. Auch das Projekt *Erweiterung und Validierung der CRFD-Simulation für neue motorische Brennverfahren und Kraftstoffe* [5] wird parallel zu Projekten der FVV bearbeitet, mit entsprechender Zusammenarbeit mit anderen Forschungsstellen in Deutschland. Im Projekt *Investigation of reactions and species dominating low temperature combustion* [2] erfolgt eine enge Zusammenarbeit mit der University of North Carolina aber auch mit der Universität Würzburg und der University of Birmingham in England.

Ein wichtiger Informationsaustausch und die Gelegenheit, die Schwerpunkte der Verbrennungsforschung international mitzugestalten, erfolgt in der Mitarbeit in Arbeitsgruppen der Internationalen Energieagentur (IEA) [17]. Für die Verbrennung relevant sind das Implementing Agreement (IA) *Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion* (IEA Combustion) [18] und die *Working Party for Fossile Fuels* (WPFF) [19], in denen das BFE vertreten ist. Auch das Implementing Agreement *Advanced Motor Fuels* [20] hat eine wichtige Bedeutung für die Verbrennungsforschung. Ein Schweizer Vertreter ist auch hier im Auftrag des BFE in diesem Agreement engagiert. Es findet ein regelmässiger Informationsaustausch statt.

Ziel des IEA IA Combustion ist es, die Entwicklung von Verbrennungstechnologien, die einen verminderten Treibstoffverbrauch und geringere Partikelemissionen aufweisen, für industrielle Anwendungen voranzutreiben. Die Forschungsschwerpunkte umfassen: (1) Die Verbesserung der Effizienz und der Treibstoffflexibiliät von Verbrennungsmotoren für Autos und Lastwagen; (2) Die Reduktion des Luftüberschusses in Feuerungen zur Erhöhung des Wirkungrads bei minimalen Emissionen; (3) Kontrollmechanismen der Treibstoffeinspritzung und Gemischbildung sowie der Entstehung der Emissionen in Brennkammern von Gasturbinen und (4) Untersuchungen von grundlegenden physikalischen Phenomenen im Verbrennungsprozess. Als eine der Haupterfolge ist die Entwicklung von robusten diagnostischen Fähigkeiten zu werten, wie z.B. Laser induced fluorescence, verbesserte Computational fluid dynamics und Chemical kinetics codes. Die Forschungsthemen werden in sogenannten Collaborative tasks bearbeitet. Aktuell werden in vier Tasks die Themen Hydrogen Internal Combustion Engines, Homogeneous Charge Compression Ignition, Gas Turbines und Nanoparticle Diagnostics bearbeitet. Weitere Collaborative Tasks wie Particulate Diagnostics und Soot Formation sollen 2009 hinzu kommen. Des weitern soll ein Task mit dem Titel «Synthetic and Renewable Fuels in Combustion» eventuell in Zusammenarbeit mit dem Advanced Motor Fuels Agreement der IEA initiiert werden. Aktive Beteiligung der Schweiz im IA Combustion ist momentan lediglich bei den Gasturbinen vorhanden. Eine Mitgliedschaft beim neu zu implementierende Task Synthetic and Renewable Fuels wird geprüft. Die Mitarbeit der Schweiz sichert eine Vertretung der Interessen im Bereich Verbrennung, eine Mitwirkung bei der Festlegung zukünftiger Schwerpunkte, die Vermittlung schweizerischer

Forschungsresultate, die Bekanntmachung der Firmen aus der Schweiz sowie die Weitergabe der Informationen über internationale Aktivitäten an Interessierte in der Schweiz. Im Jahr 2008 verzeichnete das IA 13 Mitgliedsländer mit Südkorea als neuestes Mitglied.

Die WPFF der IEA [19] leitet unter anderem die Implementing Agreements *Greenhouse Gas R&D Programme*, *Enhanced Oil Recovery* und das *IEA Clean Coal Centre* und richtet ihre Berichte und Empfehlungen an das IEA Governing Board. Im Berichtsjahr wurde die Ausdehnung der Aktivitäten der WPFF fortgesetzt und mit den G8+5-Staaten Südafrika, Indien, China, Mexiko und Brasilien der Informationsaustausch verstärkt. Die im Vergleich zu den Vorjahren sehr hohen Preise für fossile Energieträger waren Teil der Diskussion über die wirtschaftliche Gewinnung von erheblichen zusätzlichen Vorkommen. Die Bedeutung der Reduktion der CO_2-Emissionen hat deshalb noch zugenommen. Als Massnahmen sollen Wirkungsgradverbesserungen in der Energieumwandlung und Eliminationsverfahren (Carbon Capture and Storage, CCS) an den Förderstellen und bei grossen Kraftwerken angegangen werden. Die Effizienz von Kohlekraftwerken wurde beispielsweise in China bereits an verschiedenen Anlagen verbessert und neue Kraftwerke sollen mit hohem technischem Standard gebaut werden. In Indien hat vor allem die Industrialisierung Priorität. Interessant sind die Ergebnisse eines Programms zur betrieblichen Optimierung von Kraftwerken im asiatischen Raum. Es wurde festgestellt, dass die Anlagen in der Regel mit einem deutlich tieferen Wirkungsgrad laufen, als bei der Inbetriebnahme. Beispiele zeigen, dass mit der Nachjustierung der Anlagen und der Durchführung der ordentlichen Wartungsarbeiten der Wirkungsgrad von 24 % wiederum auf den Nennwert von 32 % angehoben werden konnte.

Bewertung 2008 und Ausblick 2009

Rückblick

Erfreulich sind die Erfolge des in internationaler Zusammenarbeit in der Schweiz realisierten und im Berichtsjahr abgeschlossenen Teils des Projekts *HERCULES* [6]. Die Konzipierung und der Bau eines Versuchszylinders für grosse Dieselmotoren konnte erfolgreich umgesetzt werden. Es wurden bereits über 3000 Zündungen durchgeführt, womit die Praxistauglichkeit nachgewiesen wurde. Die Versuchsanlage wird einen substanziellen Beitrag an die Erreichung der Ziele des EU-Forschungsprojekts – die Erhöhung des Wirkungsgrads und die Reduktion der Schadstoffemissionen von Schiffdieselmotoren – leisten können. Diese Ziele decken sich mit den Vorgaben des BFE-Programms Verbrennung. Im ebenfalls abgeschlossenen Projekt *Two dimensional quantification of soot and flame-soot interaction in spray combustion at elevated pressures* [4] konnten neue Erkenntnisse über die Russbildung in Dieselmotoren in Abhängigkeit der Drücke gefunden werden. Weiterführende Arbeiten sind noch notwendig.

Im organisatorischen Bereich ist die Neugestaltung der Subsite Verbrennung auf der Website des BFE sowie die Erarbeitung des Detailkonzepts für das Forschungsprogramm Verbrennung zu nennen. Zudem wurden die Kontakte zur Industrie verstärkt.

Ausblick

Gegen Ende 2008 wurden drei neue, grössere Projekte gestartet, die zur Erreichung der Forschungsziele 2008–2011 beitragen werden. 2009 sollen weitere hinzu kommen, welche die Forschungsschwerpunkte biogene Treibstoffe sowie kleine Motoren für die dezentrale Energieversorgung und den Antrieb von Wärmepumpen abdecken. Ein Projekt, das die bisher in diversen vom BFE geförderten *Lattice Bolzmann Berechnungsmethoden* [21] weiter entwickeln soll, ist zudem in Vorbereitung. Der Schwerpunkt dieser Arbeiten wird die Berechung von Strömungen in Mikrokanälen sein. Eine Zusammenarbeit mit dem Forschungsprogramm Brennstoffzellen ist vorgesehen.

Die nationale Zusammenarbeit soll weiter gestärkt werden. Vorgesehen sind eine weitere Auflage der Tagung über die Verbrennungsforschung in der Schweiz sowie die Präsentation der Forschungsschwerpunkte des BFE im Rahmen der Hochschulkompetenzgruppe Verbrennung [12], an einzelnen Fachhochschulen und bei diversen Industrieunternehmen. Die Präsenz in den Medien soll erhöht werden. Die Verbesserung der Übersicht über die Akteure in der Schweizer Verbrennungsforschung soll zudem aktiv weiter entwickelt werden. Innerhalb der Forschungsprogramme des BFE soll die Verbrennung als Querschnittstechnologie stärker verankert werden. Dies wird durch Information und Kooperation mit den direkt betroffenen Programmen erfolgen.

Auf internationaler Ebene soll der Inhalt von Collaborative Tasks im Implementing Agreement Energy Conservation and Emissions Reduction

in Combustion der IEA [18] mitgestaltet und die Teilnahme von Schweizer Forschenden gefördert werden. Die Kontakte zu weiteren Forschungsgremien wie die FVV [10], die europäischen Sektionen des Combustion Institutes oder der Deutschen Vereinigung für Verbrennungsforschung sollen geknüpft oder verstärkt werden. Der Überblick über den internationalen Stand der Verbrennungsforschung soll erweitert werden.

Liste der F+E-Projekte + Referenzen

[1] Konzept der Energieforschung des Bundes 2008–2011, http://www.bfe.admin.ch/themen/00519/index.html?lang=de&dossier_id=00798.

[2] T. Gerber et al. (thomas.gerber@psi.ch), PSI-Villigen: Investigation of reactions and species dominating low temperature combustion (SB Projekt 100'708).

[3] SLS Swiss Light Source VUV; A beamline for Vacuum Ultraviolet Radiation; PSI Villingen http://sls.web.psi.ch/view.php/beamlines/vuv/index.html.

[4] T. Gerber (thomas.gerber@psi.ch) et al., PSI-Villigen: Two dimensional quantification of soot and flame-soot interaction in spray combustion at elevated pressure (SB Projekt 100863).

[5] Y.M. Wright, K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: Erweiterung und Validierung der CRFD-Simulation für neue motorische Brennverfahren und Kraftstoffe (JB Projekt 102688).

[6] K. Hermann (kai.hermann@wartsila.com), LAV/ETH-Zürich: HERCULES Advanced combustion concepts, Test facility: Spray/Combustion chamber (SB Projekt 100706).

[7] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: Entwicklung schneller Mess- und Rechenverfahren für die Charakterisierung energieeffizienter Dieselbrennverfahren an der Nahtstelle zur Abgasnachbehandlung (Projekt 102859).

[8] A. Mayer, TTM (ttm.a.mayer@bluewin.ch), Ed., Proc. 12th ETH-Conference on Combustion generated Nanoparticles.

[9] B. Schneider, K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: Brennstoffe für homogene selbstgezündete Verbrennungsprozesse (JB Projekt 101514).

[10] Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen FVV; http://www.fvv.de.

[11] T. Griffin (timothy.griffin@fhnw.ch), Fachhochschule Nordwestschweiz, Institute für Thermo und Fluid-Engineering: Grundlagen zur Erweiterung des Leistungsbereichs und der Brennstoff-Flexibilitäten von Ölbrennern mit Vorverdampfertechnik (VVT) (Projekt 102860).

[12] Hochschulkompetenzgruppe Verbrennungsmotoren c/o J. Czerwinski, Abgasprüfstelle und Motorenlabor (AFHB), Hochschule für Technik und Informatik HTI, Biel (Jan.Czerwinski@bfh.ch).

[13] SVV Schweizerischen Vereinigung für Verbrennungsforschung, LAV ETHZ http://www.lav.ethz.ch.

[14] ERCOCTAC European Research Community on Fluids, Turbulence and Combustion, Coordination Centre Fluid Mechanics Laboratory, EPF Lausanne http://www.ercoftac.org.

[15] PSI 7. International Workshop on Catalytic Combustion http://iwcc7.web.psi.ch/.

[16] Competence Center Energy and Mobility (http://ccem-ch.web.psi.ch/) Clean Efficient Large Diesel Engine http://ccem-ch.web.psi.ch/documents/CELaDE_webupdate.pdf.

[17] International Energy Agency (IEA) http://www.iea.org.

[18] International Energy Agency (IEA) Implementing Agreement Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion http://ieacombustion.com/default.aspx/.

[19] WPFF Working Party for Fossil Fuels der IEA http://www.iea.org.

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

[21] V. Karlin (karlin@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: Lattice Boltzmann Simulationsmethoden für chemisch reaktive Systeme im Microbereich (SB Projekt 100862).

Impressum

Juni 2009
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
Druck: Ackermanndruck AG, Bern-Liebefeld
Bezug der Publikation: www.energieforschung.ch

Programmleiter
Stephan Renz
Beratung Thoma & Renz
Elisabethenstrasse 44
Postfach
CH-4010 Basel
renz.btr@swissonline.ch

Bereichsleiterin
Dr. Sandra Hermle
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
sandra.hermle@bfe.admin.ch

Rapport de synthèse 2008 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2008 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Kraftwerk 2020/CCS

Peter Jansohn
peter.jansohn@psi.ch

Programmschwerpunkte

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

Um auch die klimapolitischen Zielsetzungen der Schweiz zu erfüllen, sind bei einem zusätzlichen Einsatz von Erdgas für die Stromerzeugung flankierende Massnahmen zu ergreifen, die es erlauben, zu einer **Netto-Reduktion der CO_2-Emissionen** aus dem gesamten schweizerischen Energiesystem zu kommen. Die Prozessführung des Kraftwerks ist z.B. so zu gestalten, dass alternative Brennstoffe eingesetzt werden können und CO_2 ganz oder teilweise abgeschieden werden kann. Die bisherige Strategie der Kombination von modernen, effizienten Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen mit Wärmepumpen muss ebenfalls weiterhin verfolgt und umgesetzt werden. Neu sind seit 2008 auch Prozesse ausserhalb des eigentlichen Kraftwerks, wie z.B. externe Brennstoffaufbereitung oder CO_2-Abtrennung und -Lagerung, integraler Bestandteil des Programms. Aufgrund des begrenzten finanziellen Rahmens kann das Programm aber nur einen signifikanten Beitrag leisten, wenn eine starke Fokussierung auf Schlüsselkomponenten erfolgt.

Um der zeitlichen Zielsetzung des Forschungsprogramms gerecht zu werden, im Jahre 2020 die notwendigen Technologien einsatzbereit entwickelt zu haben, müssen die dazu erforderlichen **Basis-Technologien spätestens im Jahr 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 Programmaktivitäten auf Schlüsselgebiete der Dampf- und Gasturbinentechnik inkl. Generatoren ist auch aus diesen zeitlichen Aspekten heraus erforderlich.

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

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

Weiteres Ziel ist die **Steigerung des Einsatzes von erneuerbaren, CO_2-neutralen Brennstoffen** (insbesondere Biomasse-basierenden Vergasungsprodukten) auf 15 % im produktiven Betrieb. Ferner sollen mit dem Einbezug von prozesstechnischen Varianten für die **erleichterte Abscheidung und Rückhaltung von Kohlendioxid (CO_2)** darüber hinausgehende CO_2-Emissionsminderungspotenziale ausgenützt werden.

Durch den zukünftig verstärkten Einsatz fluktuierender, erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien wie Wind und Photovoltaik werden Stromversorgungsnetzwerke stärkeren, kurzfristigeren Produktionsschwankungen unterworfen sein, die durch die anderen Stromerzeuger kompensiert werden müssen. Ein weiteres Ziel des Programms ist es deshalb, Gasturbinenkraftwerke 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 von der Netzfrequenz unabhängige Betriebsweise erlauben.

Nach dem offiziellen Start des Programms Anfang 2006 und der Initiierung einer ersten Welle von Projekten, die den Rahmenbedingungen des *Programmkonzeptes* [14] gerecht wurden, war die Programmentwicklung im Jahr 2008 geprägt durch die Erweiterung des Programmrahmens auf Themen im Bereich «Abscheidung und Rückhaltung von Kohlendioxid (CO_2)» (Carbon Capture and Storage, CCS). Dieser Programmentwicklung wird durch eine veränderte Gewichtung der

zukünftig einzusetzenden Programmmittel und einem insgesamt moderat erhöhten Gesamtbudget (dies bezieht sich auf die zur Verfügung gestellten BFE-Mittel) Rechnung getragen.

Die angepasste Programmausrichtung ist in einer Fortschreibung des Programmkonzepts dokumentiert [15] und war Bestandteil der Begutachtung des Programms durch die Forschungskommission CORE am 8. April 2008. Das Programm wurde zur Weiterführung im Rahmen der laufenden Konzeptperiode 2008–2011 empfohlen.

Aufgrund der mittlerweile 3-jährigen Programmlaufzeit (welche einer typischen Projektlaufdauer entspricht) sind im Jahr 2008 einige Projekte der Programmanfangsphase abgeschlossen worden, und das Programm tritt nun in eine Periode der kontinuierlichen Erneuerung des Projektportfolios ein. Der zur Verfügung gestellte Finanzrahmen aus BFE-Mitteln war 2008 durch noch laufende Projekte aus der Anfangsphase weiterhin weitgehend ausgeschöpft und erlaubte dementsprechend nur eine mässige Erweiterung des Projektumfangs. Zusätzliche Projekte werden insbesondere durch die 2008 beschlossene Erweiterung des Programmrahmens auf Themen im Bereich «Abscheidung und Rückhaltung von Kohlendioxid (CO_2)» (Carbon Capture and Storage, CCS) und einer damit verbundenen mässigen Erhöhung des Budgetrahmens ermöglicht.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2008

Im Jahresverlauf 2008 konnten entsprechend der erweiterten Ausrichtung des Programms auf Themen im Bereich CO_2-Minderung neue Projektvorschläge soweit vorbereitet werden, dass diese Arbeiten Anfang 2009 gestartet werden konnten. Mit Ablauf des Jahres 2008 sind dafür einige Projekte der Programmanfangsphase abgeschlossen worden, über die damit letztmalig in diesem Jahresbericht informiert wird. Die Zusammenarbeit/Koordination mit anderen öffentlichen Förderinstitutionen – vornehmlich der Kommission für Technologie und Innovation (KTI) – konnte weitergeführt werden, allerdings ist der Informationsaustausch durch das Ausscheiden wichtiger Verbindungspersonen stark zurückgegangen und erschwert worden. Um einen umfassenden Überblick über die Forschungsaktivitäten mit Bezug zum Themenbereich des Programms «Kraftwerk 2020» aufrecht zu erhalten, wird es eine wichtige Aufgabe sein, diese Kommunikationskanäle wieder herzustellen. Neben der Förderung durch das Bundesamt für Energie (BFE) wird ein erheblicher Teil der Projekte (7 Projekte) durch die Kommission für Technologie und Innovation (KTI) sowie (1 Projekt) durch den Forschungsfond der schweizerischen Elektrizitätswirtschaft (Swisselectric Research) finanziell unterstützt. Die Projektthemen sind nachfolgend aufgelistet und lassen sich den Hauptzielsetzungen wie folgt zuordnen:

Steigerung des elektrischen Wirkungsgrads

Turbogenerator mit höchstem elektrischen Wirkungsgrad (> 99 %)

Beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen: Alstom, Birr; von Roll Isola, Breitenbach; Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), Brugg-Windisch.

Projektlaufzeit: 1.4.2006 bis 31.12.2009.

Beschichtete Schaufeln und Ventile in Dampfturbinen

Beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen: Alstom, Baden; Sulzer Metco, Wohlen; Stellba Schweisstechnik, Dottikon; Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), Dübendorf/Thun.

Projektlaufzeit: 1.12.2006 bis 30.11.2009.

Werkstoffe für Bypass-Ventile in Dampfturbinen mit hoher Dampftemperatur (650 °C)

Beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen: CCI AG, Winterthur; Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW), Winterthur.

Projektlaufzeit: 1.12.2007 bis 30.11.2009.

Hoch-effiziente Dampfturbinenschaufeln («Schlanke Schaufel»)

Beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen: Alstom, Baden; Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW), Winterthur; Hochschule für Technik und Architektur (HTA), Luzern.

Projektlaufzeit: 1. 1.2007 bis 31.12.2008.

Mikrowellen-Sensor zur Spaltweiten-Messung in Turbomaschinen

Beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen: Vibro-Meter SA, Fribourg; Eidg. Technische Hochschule Lausanne (EPFL), Lausanne.

Projektlaufzeit: 1.11.2007 bis 31.10.2009.

New Generation thermal barrier coatings for operation at T=1400 °C (HAT-TBC)

Beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen: Alstom, Baden; ETH Zürich.

Projektlaufzeit: 1.3.2008 bis 28.2.2011.

CO_2-Emissionsminderung

Hoch-effiziente Verdichter für Brenngase aus Biomasse

Beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen: MAN Turbo, Zürich; Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), Brugg-Windisch; Hochschule Rapperswil (HSR), Rapperswil.

Projektlaufzeit: 1.6.2006 bis 31.12.2008 (31.12.2009).

Verbrennung von Syngasen

Beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen: Alstom, Birr; Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), Brugg-Windisch; Paul Scherrer Institut (PSI), Villigen.

Projektlaufzeit: 1.11.2005 bis 31.12.2008 (30.6.2009; Phase 2).

Gasturbinenprozess optimiert für CO_2-Minderung

Beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen: Alstom, Birr; Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), Brugg-Windisch; Paul Scherrer Institut (PSI), Villigen.

Projektlaufzeit: 1.1.2007 bis 31.12.2009/1.7.2008 bis 30.6.2010.

Verfügbarkeit von grasartiger Biomasse für Kombikraftwerke in der Schweiz

Beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen: Ingenieurbüro Hersener (IBH), Wiesendangen; Ernst Basler und Partner AG (EBP), Zollikon; Paul Scherrer Institut (PSI), Villigen.

Projektlaufzeit: 1.11.2007 bis 31.8.2008.

Grundlagenprojekte

Laser-Diagnostik in sehr mageren Flammen

Beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen: Paul Scherrer Institut (PSI), Villigen.

Projektlaufzeit: 1.8.2005 bis 31.12.2007 (31.12.2008).

Das Projekt wurde aus dem Forschungsprogramm Feuerung und Verbrennung übernommen.

Optimierter Giessprozess von Gasturbinen-Komponenten

Beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen: Alstom, Baden; Precicast, Novazzano; Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), Brugg-Windisch/Olten.

Projektlaufzeit: 1.8.2006 bis 31.01.2008.

Steigerung des elektrischen Wirkungsgrads

Im Projekt **Turbogenerator mit höchstem elektrischen Wirkungsgrad (> 99 %)** [1] wird angestrebt, den Wirkungsgrad von grossen, luftgekühlten Generatoren (bis zu 400 MVA) bis über 99 % zu steigern (derzeitige Stand der Technik: bis zu 98,7 %) und damit auch einen Beitrag zur Steigerung des Gesamtsystemwirkungsgrades von Gas-Dampf-Kraftwerken zu leisten.

Die Wirkungsgradsteigerung soll durch eine Minimierung der Ventilationsverluste (d.h. Verluste durch aktive Kühlung der elektrischen Leiterbahnen) erreicht werden, die gegenwärtig 40 % der gesamten Generatorverluste darstellen. Die Beiträge zur Steigerung des Wirkungsgrads sollen durch 3 Massnahmen bzw. Weiterentwicklungen erreicht werden:

- Verbesserter Wärmetransport zwischen elektrischem Leiter und Kühlmedium durch Entwicklung eines Isolationsmaterials mit günstigeren Eigenschaften (höhere Wärmeleitfähigkeit und/oder höhere Durchschlagfestigkeit);
- Reduzierung des Kühlluftbedarfs durch Entwicklung eines Isolationsmaterials mit verbesserter Temperaturbeständigkeit (zulässige Materialtemperatur: 180 °C; heutiger Stand der Technik: 155 °C);
- Verbesserung des aerodynamischen Wirkungsgrads (geringere Energieaufwand) des Kühlluftgebläses (Lüfterrad ist direkt mit dem Rotor des Generators verbunden) durch eine optimierte Geometrie des Einlasses und modifizierte Profilierung der Gebläse-Beschaufelung.

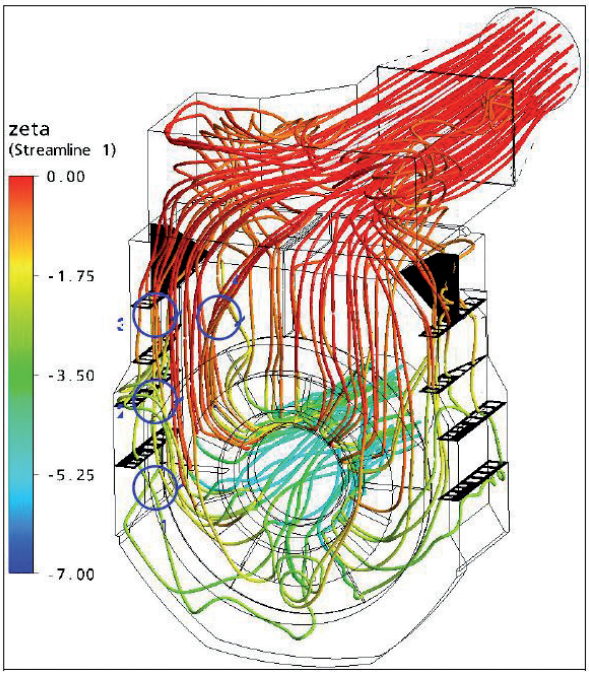
Zur Validierung der Effekte neu eingeführter, verbesserter Isolatormaterialien bzw. reduzierter Kühlluftmengen und aerodynamischer Verluste, wurde ein Referenz-Generatordesign definiert (verlängerte Version des luftgekühlten Generators Topair 300 MVA). Mit Modellrechnungen lässt sich damit prognostizieren, dass der Wirkungsgrad des vorgeschlagenen Generators durch die im Rahmen dieses Projekts zu erarbeitenden Verbesserungen tatsächlich auf 99 % erhöht werden könnte. Zum Erreichen einer besseren Wärmeübertragung vom Kupferleiter auf das Kühlmedium (Luft) wurden zwei Lösungsansätze verfolgt:

– Zum einen die Option des Einsatzes eines Isolationsmaterials mit höherer Wärmeleitfähigkeit (> 0,5 W/mK anstelle der heute üblichen 0,26 W/mK). Die Isolationsdicke kann in diesem Fall unverändert bleiben und trotzdem eine deutlich verbesserte Kühlwirkung erzielt werden.

– Der zweite Lösungsweg besteht aus dem Einsatz einer Isolation mit mässig verbesserter Wärmeleitfähigkeit (ca. 0,35 W/mK), aber gleichzeitig verbesserter Durchschlagsfestigkeit (3,5 kV/mm anstelle der heute üblichen 2,5–3 kV/mm). Die höhere Durchschlagsfestigkeit erlaubt eine verringerte Isolationsdicke und ermöglicht dadurch ebenfalls eine bessere Wärmeübertragung. Da sich bei der Herstellung von Probestäben mit Isolationsmaterial mit verbesserter Temperaturbeständigkeit (zulässige Materialtemperatur über 155 °C) Kompatibilitätsprobleme zwischen der HTC-Isolation und den Alstom-spezifischen Imprägnierprozessen zeigten, wurde dieser Lösungsweg nicht prioritär weiter verfolgt. Als erfolgreiches Zwischenergebnis konnte eine Materialkombination gefunden werden, die unter identischen Bedingungen eine dreimal längere Lebensdauer aufweist als das derzeit verwendete Material (Micadur). Das neue Isolationssystem konnte an verschiedenen Versuchsserien von industriell gefertigten Statorstäben erfolgreich validiert werden. Die Lebensdauer, geprüft mittels *Voltage Endurance Tests* (VET), übertrifft bei weitem diejenige der internationalen Standards (Kema-Norm S14). Das neue Isolationssystem und die dafür benötigten Produktionsprozesse konnten freigegeben werden, so dass dieses nun für die Herstellung von Statorstäben in Alstom-Generatoren eingesetzt werden kann. In einer neuen Evaluation der Generatoreigenschaften mit den jetzt definitiven Isolationseigenschaften soll im Jahr 2009 überprüft werden, ob der Wirkungsgrad des vorgeschlagenen Generators durch die im Rahmen dieses Projekts erarbeiteten Verbesserungen tatsächlich auf 99 % erhöht werden könnte.

Der Schwerpunkt der Arbeiten des Forschungspartners FHNW konzentriert sich auf die aerodynamische Optimierung des Ventilatorrades und der Luft-Einlassgeometrie für die Kühlluft des Generators. Dazu wurde ein Versuchsstand entworfen und die Modellierung der Strömungsverhältnisse (mittels CFD-Simulationen) im Einlassbereich der Kühlluft (Zuströmung zum Ringspalt zwischen Generatorwelle und den Statorelementen) durchgeführt. Die statischen Teile des Ventilator-Modellprüfstands (Massstab 1:3) wurden im November 2007 fertig gestellt und in Betrieb genommen. Mittels eines Hilfsventilators (Windkanal der FHNW) wird am Ringspalt der gewünschte Volumenstrom abgesaugt und damit die Zuströmung zum Ringspalt simuliert. 2008 wurde der statische Teil des Versuchstands vollständig instrumentiert (32 Drucksensoren) und zahlreiche Messreihen durchgeführt, die zur Validierung der CFD-Rechnungen herangezogen wurden. Die Wanddruckmessungen deckten eine ungenügende Übereinstimmung des Druckfeldes zwischen Simulation und Messung auf, welche sich auf Vereinfachungen in der CFD-Implementierung (Rechengitter) der Strukturbleche in den seitlichen Kanälen (siehe Figur 1) zurückführen lies. Schliesslich wurden auch die anfänglich vernachlässigten seitlichen Strukturwände im Rechengitter detailliert mitberücksichtigt, womit sich eine wesentlich verbesserte Berechnung der Wanddrücke ergab. Bis anhin wurden die Simulationen im Hinblick auf die Validierung ohne Ventilator durchgeführt, d.h. mit einer Druckrandbedingung am Strömungsaustritt. Neu muss nun noch der Einfluss des Ventilators stromaufwärts untersucht werden, da erwartet wird, dass sich die inhomogene Verteilung der Massenstromdichte direkt vor dem Ventilator durch die Saugwirkung des Ventilators verstärkt.

Der neu konstruierte rotierende Teil des Versuchsstands (Massstab 1:3, mit Läufer, 9 000 UpM) befand sich Ende 2008 noch im Aufbau. Der komplette Aufbau des Prüfstandes inkl. Splitterschutzverschalung soll Anfang 2009 abgeschlossen sein.

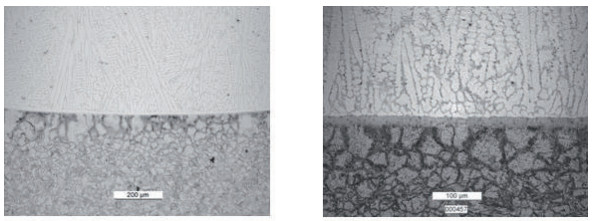


Figur 1: Stromlinienbild des Einlaufgehäuses (Farbkodierung: Totaldruckverlustkoeffizient Zeta) [1]. Blaue Kreise: Orte der pneumatischen Traversenmessungen; schwarz: definitive Implementierung der seitlichen Strukturbleche.

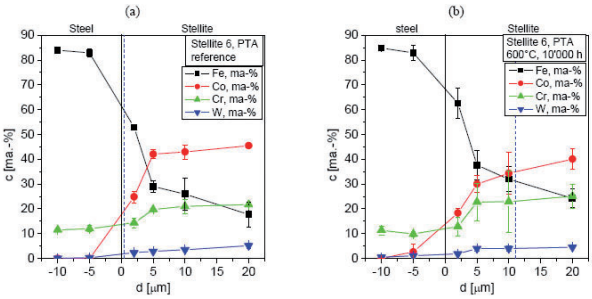
Die von der KTI geförderten Projekte *Beschichtete Schaufeln und Ventile in Dampfturbinen* [2], *Werkstoffe für Bypass-Ventile in Dampfturbinen mit hoher Dampftemperatur (650 °C)* [10] und *Hocheffiziente Dampfturbinenschaufeln («Schlanke Schaufel»)* [3] befassen sich mit Aufgabenstellungen, die zu einer höheren Effizienz des der Gasturbine nachgelagerten Dampfprozesses führen sollen.

Der aus der Abwärme des heissen Gasturbinen-Abgasstroms gewonnene Dampf soll zur Wirkungsgradsteigerung auf möglichst hohe Temperaturen gebracht werden. Für Hochtemperaturdampfturbinen (> 600 °C) sind dann allerdings entweder höherwertige metallische Werkstoffe oder aber gar (metallisch-keramische) Beschichtungen gegen Oxidation und Erosion für die hoch belasteten Bauteile zu entwickeln (insbesondere für die zurzeit noch unbeschichteten ersten Schaufelreihen bzw. für Bypass- und Schnellschlussventile, die zum An- uns Abfahren bzw. Lastregelung der Anlage benötigt werden). Durch Oxidation und Erosion rauen z.B. die Schaufeloberflächen ansonsten während des Betriebs recht schnell auf und erhöhen die Reibungsverluste. Dadurch gehen bei einem Kraftwerk mit 1000 MW Leistung im Laufe der ersten Jahre etwa 20 MW (2 % Leistungsverlust) verloren. Mit der Beschichtung von Dampfturbinenschaufeln wird grundsätzlich Neuland betreten, da diese Technologie bisher nur in Gasturbinen verwendet wird. Neben den Dampfturbinenschaufeln muss aufgrund steigender Betriebstemperaturen auch für die Panzerung von Dampfventilen (wichtig zur Steuerung des Dampfmassenstroms beim An- und Abfahren der Anlage bzw. zur Notabschaltung) neue Lösungen zum Aufschweissen von Hartstofflegierungen gefunden werden, da bei einem Ventilschaden sehr hohe Schadensummen (> 15 Mio. €) entstehen z.T. durch Sekundärschäden (Beschädigung der Turbinenschaufeln durch Ventil(-sitz)-Bruchstücke). Beide Massnahmen werden in den verschiedenen Projekten verfolgt und sind wichtig, um höhere Dampfparameter in den nächsten Dampfkraftwerk-Generationen realisieren zu können. Durch Untersuchungen der Schädigungsmechanismen mittels mikrostruktureller Charakterisierung (Figur 2), konnten Veränderungen im Bereich der Verbindungsgrenzschicht (Interface) zwischen Trägermaterial und Beschichtung detektiert werden, die auf eine Bildung von intermetallischen Phasen schliessen lassen, welche zu Versprödung führen.

Mögliche Kombinationen aus Grundwerkstoff und Beschichtungsmaterial wurden eruiert (mittels thermodynamischer Simulationen) und zur Prüfung der Proben unter realitätsnahen Beanspruchungsbedingungen ein neuartiger



Figur 2: Materialgrenzschicht (unten: Grundwerkstoff; oben: Schutzschicht) vor (linkes Bild) und nach (rechtes Bild) einer thermischen Behandlung (10 000 Std. bei 600 °C); deutlich ist (im rechten Bild) eine Umwandlungszone an der Materialgrenzschicht zu erkennen [2].



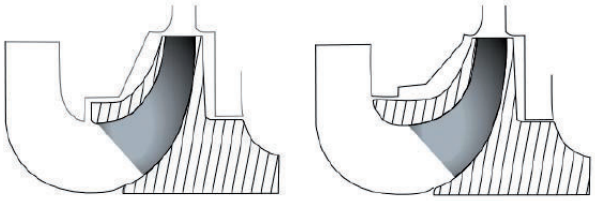
Figur 3: Elementverteilung senkrecht zur Phasengrenzschicht (a) vor und (b) nach einer Wärmebehandlung (600 °C, 10 000 h); die gestrichelte Linie kennzeichnet die maximale Dicke der Zwischenschicht [2].

Dampfoxidationsprüfstand an der EMPA aufgebaut, mit dem Oxidationsversuche in einer Wasserdampfatmosphäre bei bis zu 750 °C durchgeführt werden können.

Die unterschiedliche Verteilung der Elemente Fe, Co, Cr, W vor und nach der Wärmebehandlung zeigt deutlich die Migration dieser Elemente in der sich ausbildenden Zwischenschicht (Figur 3) und bestimmt im Wesentlichen die Materialeigenschaften dieser Verbindungsschicht und damit die Hafteigenschaften der Beschichtung.

CO_2-Emissionsminderung

Im Projekt *Hoch-effiziente Verdichter für Brenngase aus Biomasse* [4] werden Kompressoren weiter entwickelt, die für die Förderung der Produktgase aus Vergasungsprozessen von Biomasse (aber auch von fossilen, nicht gasförmigen Energieträgern und kohlenwasserstoffhaltigen Prozessrückständen) benötigt werden. Hoch effiziente Verdichter für solche Produktgase (auch Synthesegase genannt, da aus ihnen auch wieder «synthetische» Kohlenwasserstoffe erzeugt werden können) sind eine wesentliche Voraussetzung um den Gesamtanlagenwirkungsgrad von so genannten «Integrated Gasification Combined Cycle»-Prozessen (IGCC-Prozessen) zur Stromerzeugung weiter steigern zu können, da die Verdichtungsprozesse den höchsten Anteil der in neuen Kraftwerksprozessen zusätzlich aufzuwendenden Energie ausmachen. Zielset-

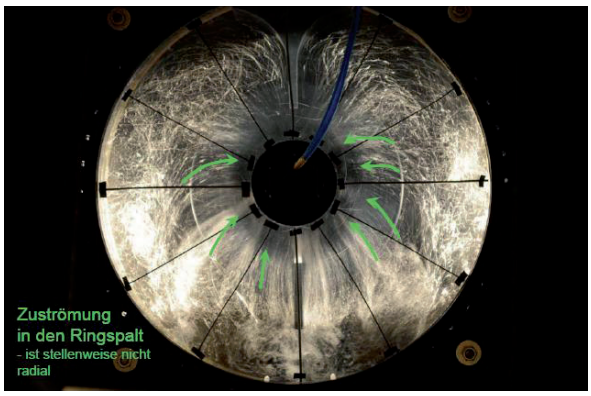


Figur 4: Deckscheibenseitige Leckage-Zuführung (links: ohne Nase; rechts: mit Nase) [4].

zung des Projektes ist es, eine Synthesegas-Verdichterbaureihe zu entwickeln, die das geforderte Druck- und Volumenstromspektrum möglichst effizient abdecken soll. Dazu braucht es speziell für Synthesegase (Gasgemische, die sich hauptsächlich aus Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H_2) zusammensetzen) ausgelegte Strömungskomponenten und Laufräder, die eine, der Verdichtung niedermolekularer Gase (verursacht durch den hohen Wasserstoffanteil) angepasste Betriebscharakteristik aufweisen.

Für die erste der im Rahmen dieses Projektes auszulegenden Verdichterstufe fand der «Design-Freeze» im Februar 2008 statt. Damit ist die Auslegung in aerodynamischer, mechanischer und fertigungstechnischer Hinsicht abgeschlossen. Das bedeutet, dass eine Stufengeometrie vorliegt, die gemäss Vorhersage mit den zur Verfügung stehenden Werkzeugen (CFD, FEM, CAD und CAM) hinsichtlich Aerodynamik, Festigkeit und Herstellbarkeit das Pflichtenheft erfüllt. Damit wird von dieser Stufe ein Prototyp hergestellt (Versuchsstufe), der in einem der vorhandenen Prüfstände ausgetestet wird. Seit dem «Design-Freeze» laufen die Konstruktionsarbeiten für die Versuchsstufe. Messungen haben Anfang 2009 begonnen.

Im Rahmen der Auslegungen wurden umfangreiche Studien über den Einfluss der Zuführung der deckscheibenseitigen Leckage gemacht. Es zeigten sich deutliche Unterschiede in der erreichbaren Stabilitätsgrenze je nach Ort und Orientierung der Leckagen-Zuführung. In Figur 4 sind zwei dieser Konfigurationen dargestellt.



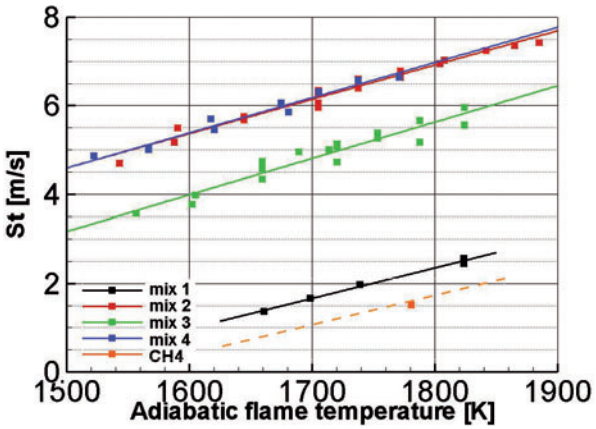
Figur 5: Strömungsvisualisierung mittels Luftblasen [4].

Die Arbeiten zur Optimierung der Einläufe und Austritte (Spiralen) des Verdichters, die an der FHNW (Institut für Thermo- und Fluid-Engineering, ITFE) durchgeführt werden, sind weit fortgeschritten. Für den vorliegenden – aber noch nicht optimierten – Einlauf wurden eine ganze Reihe von CFD-Rechnungen (mit verschiedenen Rechengittern, Turbulenzmodellen und Fluiden) durchgeführt, um eine konvergente und vertrauenswürdige Simulation zu erhalten. Die gewonnenen Ergebnisse wurden mittlerweile auch mit den im Labor durchgeführten Messungen an einem mit Wasser betriebenen Plexiglasmodell verglichen. Damit sind die Voraussetzungen gegeben, von der existierenden Geometrie ausgehend eine Optimierung durchzuführen.

Die Strömungsvisualisierung mit Luftblasen dient mehr der qualitativen Veranschaulichung. Figur 5 zeigt exemplarisch ein Bild einer Visualisierung mittels Luftblasen. Gewisse Ablösezonen und Sekundärströmungen, die auch die CFD-Simulationen ergeben haben, lassen sich hier am oberen und unteren Bildrand erkennen. Insbesondere wurde bei diesen Untersuchungen deutlich, dass die Zuströmung zum Laufrad (im Zentrum des Modells) nicht rein radial erfolgt (grüne Pfeile), was unbedingt vermieden werden sollte. Mit dieser Art der Strömungsvisualisierung kann auch der stark instationäre (zeitlich variierende) Charakter der Strömung verdeutlicht werden, welcher ebenfalls Einfluss auf das Betriebsverhalten der Verdichterstufe hat.

Die speziellen verbrennungstechnischen Besonderheiten beim Einsatz von Syngasen in Gasturbinenprozessen stehen im Mittelpunkt des Projektes *Verbrennung von Syngasen* [5]. Durch den hohen Anteil an Wasserstoff (H_2) weisen Syngase ganz spezielle verbrennungstechnische Eigenschaften (Flammengeschwindigkeit, Zündgrenzen, …) auf, die bei der Auslegung von Brenner- und Brennkammer-Systemen berücksichtigt werden müssen, um einen sicheren (d.h. stabilen, nicht fluktuierenden) und emissionsarmen Betrieb zu gewährleisten. Sollen solche Brenngase auch in Gasturbinen eingesetzt werden, ist insbesondere die Druckabhängigkeit der genannten verbrennungstechnischen Eigenschaften mit in Betracht zu ziehen; diesbezüglich ist die vorhandene, allgemein zugängliche Datenbasis sehr dünn und soll in diesem Projekt durch zielgerichtete Experimente ergänzt werden. Dies gilt auch für Methan/Syngas-Gemische (CH_4/CO/H_2), deren besseres Verständnis dann besonders von Interesse ist, wenn (biogene) Syngase in mit Erdgas betriebenen Gasturbinen zugemischt werden sollen. Dieser zusätzliche Aspekt wurde durch eine Projekterweiterung/-ergänzung 2008 in das Projektarbeitsprogramm aufgenommen.

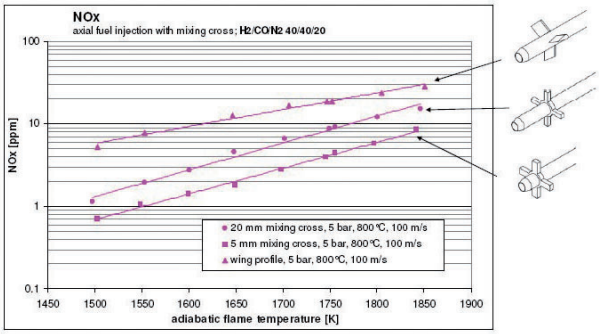
Von besonderem Interesse für die Gasturbinen-Anwendung sind Daten über das Löschverhalten von extrem mager (d.h. mit starkem Luftüberschuss) betriebenen Vormischflammen bei Drücken bis zu 20 bar (für bestimmte Prozesse: 30 bar). Gasturbinen werden im realen Betrieb sehr nahe an dieser mageren Löschgrenze betrieben und die Kenntnis des (gerade noch) zulässigen, maximalen Luftüberschusses für einen stabilen Betrieb der Brennkammer ist ausschlaggebend für das NO_x-Emissionsverhalten der Gasturbine. Ein weiterer wichtiger verbrennungstechnischer Parameter für die Auslegung einer mageren Vormischflamme ist die Reaktionsgeschwindigkeit der Brennstoffumsetzung – ausgedrückt als (flächen-) spezifischer Umsatz in Form einer so genannten Flammengeschwindigkeit). Durch Einsatz optischer (laserspektroskopischer) Messmethoden können Informationen zur Lage und Form der Flammenfronten gewonnen werden. Die mit laserinduzierter Fluoreszenz (LIF) von Flammenspezies (OH-Radikalen) gewonnenen Daten der Flammenfrontfläche werden auf Basis der im Vorgänger-Projekt *Struktur und Brenneigenschaften von turbulenten, vorgemischten Hochdruck-Flammen* [6] entwickelten Auswertemethode zur Bestimmung verbrennungstechnischer Eigenschaften (hier: turbulente Flammengeschwindigkeit) herangezogen. Die turbulente Flammengeschwindigkeit ist ein extrem wichtiger Parameter für die Auslegung realer Brennersysteme, da sie die Gesamtumsatzrate an Brennstoff beschreibt und für die Positionierung der Reaktionsfront (Flammenfront) im Zusammenspiel mit dem Strömungsfeld in einer Brenner/Brennkammer-Konfiguration ausschlaggebend ist. Die Herausforderung der sicheren Stabilisierung (hier: Positionierung) einer Vormischflamme beim Einsatz von Synthesegasen (CO/H_2) wird aus den Daten in Figur 6 dadurch deutlich, dass offensichtlich Synthesegas-Flammen wesentlich reaktionsfreudiger sind als Methan/Erdgas-Flammen (CH_4), die als Referenz mit enthalten sind. Die turbulenten Flammengeschwindigkeiten für Synthesegase sind für die untersuchten Bedingungen grundsätzlich um einen Faktor 3–8 höher und tendieren deshalb viel stärker zu so genannten Flammenrückschlag, d.h. einer Stabilisierung der Flamme nahe am/im Brenner (mit den damit verbundenen Problemen der Überhitzung dieser Komponente).



Figur 6: Turbulente Flammengeschwindigkeit in Abhängigkeit der adiabaten Flammentemperatur für verschiedene Brenngasmischungen (CO/H2/N2/CH4). Druck: 5 Bar, Vorheiztemperatur: 673 K [5].

Auf dem Minihochdruck-Verbrennungsteststand der FHNW wurde darüber hinaus eine grosse Zahl von Verbrennungsversuchen mit der Variation verschiedener Brenngaseigenschaften, insbesondere Brenngaszusammensetzung (H_2, CO, CH_4, N_2) und Brenngaseindüsung durchgeführt. Dabei wurden nicht nur die für einfache Gasturbinenprozesse typischen Verbrennungslufttemperaturen (400 °C–550 °C), Verbrennungsdrücke (5–16 bar) und Flammentemperaturen (1500–1850 K) realisiert, sondern auch die speziellen Reaktionsbedingungen (Eintrittstemperaturen bis 1000 °C) für sequentielle Gasturbinen-Brennkammeranordnungen untersucht. Die Messwerte der NO_x-Emissionen (Figur 7) ergaben einen starken Einfluss der Art der Brennstoffeindüsung d.h. Brenngas/Luft-Mischungsqualität: Varianten mit massiver Turbulenzerzeugung zur verbesserten Mischung zeigten besonders niedrige Emissionswerte, aber auch eine wesentlich erhöhte Gefahr für «Flashback» und damit für eine Überhitzung der Brennstoffdüse mit Brennrohr.

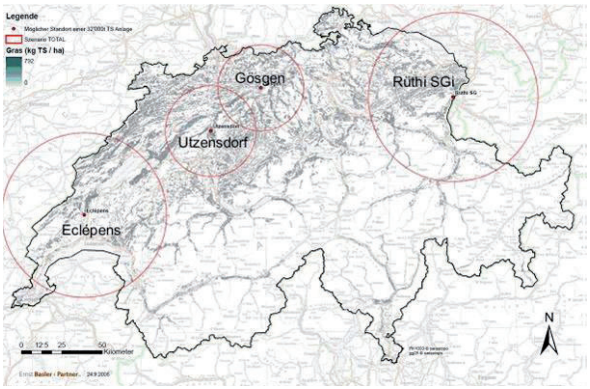
Die 2007 in Auftrag gegebene Studie *Verfügbarkeit von grasartiger Biomasse für Kombikraftwerke in der Schweiz* [12] ist eine Erweiterung des durch den Axpo-Naturstromfond geförderten Projektes «Graskraftwerk», welches die technischen und wirtschaftlichen Entscheidungsgrundlagen vorlegen soll für die Umsetzung eines mit Gras betriebenen Kombikraftwerkes. Mit Hilfe eines Geografischen Informationssystems (GIS) wurde abgeklärt, ob der benötigte Brennstoff für ein (Gras-)Kraftwerk in der Leistungsklasse 20 bis



Figur 7: Einfluss der Brennstoffdüsengeometrie (mit Turbulenzerzeugern) auf die NO_x-Emissionen [5].

100 MW_{th} (auf Basis grasartiger Biomasse) in einem sinnvollen Umkreis in der Schweiz vorhanden ist. Darüber hinaus wurden technisch favorisierte Standorte (bereits bestehende Standorte mit entsprechender Kraftwerksinfrastruktur) bezüglich ihres umliegenden Biomasseaufkommens geprüft. Für ein wirtschaftlich zu betreibendes Graskraftwerk wurde für die Auswertung der GIS-Daten ein jährlicher Brennstoffbedarf von 32 000 t Trockensubstanzgehalt (20 MW_{th}, 7000 h/a) angesetzt. Dieses Material muss «just-in-time» zur Verfügung stehen, da grosse Brennstofflager beim Kraftwerk nicht praktikabel sind. Deshalb wurden auch die Logistik/Transport-Infrastruktur und die lokale Akzeptanz auf Seiten der Biomasseproduzenten in die Beurteilung miteinbezogen. Da nur ein Teil des Grünlandes für eine energetische Nutzung in Frage kommen kann, wurden entsprechende Restriktionen für die Berechnungen angenommen. Folgende Hauptkriterien wurden als Filter eingesetzt: Maximal ein Drittel der Fläche darf für die energetische Nutzung in Frage kommen, da der Rest für die Nahrungs- und Futtermittelproduktion reserviert bleiben soll. Aus Akzeptanzgründen werden sich maximal ein Fünftel der Landwirtschaftsbetriebe beteiligen. Gute Ackerstandorte bleiben der Nahrungs- und Futtermittelproduktion vorbehalten. Flächen mit grosser Hangneigung (> 20 °) sowie Berggebiete über 1200 m.ü.M. fallen aus Bewirtschaftungsgründen ebenfalls weg. Die angenommenen Biomasseerträge wurden je nach Exposition und Niederschlagsmenge gewichtet.

Unter den getroffenen Annahmen fällt die in Frage kommende Biomasse vor allem im westlichen Mittelland und in den tiefer gelegenen Futterbauregionen der Ost- und Zentralschweiz an. Innerhalb der ausgewiesenen Gebiete, die über ein ausreichendes Potenzial an Gras verfügen, sind entweder mehrere Standorte im Mittelland sowie je ein Standort in der Ostschweiz realisierbar oder insgesamt nur ein Standort für ein grosses Kraftwerk mit einem Jahresverbrauch von 100 kt. Konzentriert man sich auf die Standorte mit den kleinsten Radien und damit mit den kürzesten Transportwegen, so kommen zwei Standorte zwischen Bern und Aarau in Frage. Beide Standorte mit den Zentren Utzensdorf oder Gösgen sind vom Einzugsgebiet ähnlich zu beurteilen: in einem Umkreis von knapp 30 km fällt die entsprechende Menge von 32 000 t TS an grasartiger Biomasse jährlich an. Da Gösgen bereits über ein Kraftwerk (AKW) verfügt, wurde dieser Standort bezüglich Logistik, Akzeptanz und Brennstoffkosten näher betrachtet. Die Auswertungen ergaben, dass eine kurzfristige Umsetzung eines (teilweise) grasbefeuerten Kombikraftwerks unter den aktuellen landwirtschaftlichen Bedingungen aufgrund der hohen Brennstoffkosten (Heupreis) kaum wahrscheinlich ist. Kurz- bzw. mittelfristig sind jedoch Szenarien (Anstieg der Nebenerwerbsbetriebe, Abbau des Grenzschutzes, Wegfall der Milchkontingentierung) denkbar. Bei den angenommenen Szenarien ist die Brennstoffproduktion, sowohl für die Landwirtschaft als auch für den Kraftwerksbetreiber möglich.

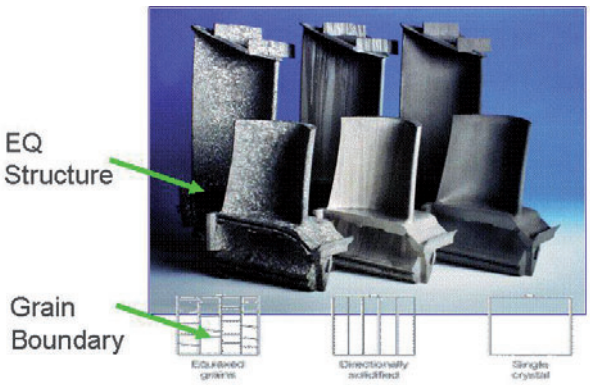


Figur 8: Einzugsgebiete für einen Jahresertrag von 32 000 t/TS grasartiger Biomasse an 4 möglichen Kraftwerksstandorten [12].

Grundlagenprojekte

Im Projekt *Laser-Diagnostik in sehr mageren Flammen* [8] wurden die laserspektroskopischen Messmethoden (weiter) entwickelt, die notwendig sind, um Lage und Stabilität von Vormischflammen unter gasturbinentypischen Bedingungen bestimmen zu können. Beim Einsatz von laseroptischen Messtechniken in sehr mageren Flammen ($\Phi < 0{,}5$ bzw. $\lambda > 2{,}0$) hat sich gezeigt, dass die direkte Übertragung der Methoden, die aus der Anwendung in Flammen im Bereich der stöchiometrischen Zusammensetzung bekannt sind, zu Schwierigkeiten führt. Einerseits sind die erzielten Signalintensitäten oft sehr gering, andererseits ergeben sich Probleme bezüglich der Interpretation der Messergebnisse, wie z.B. Form und Ausdehnung der Flammenzone basierend auf Fluoreszenzmessungen von Hydroxyl-Radikalen (OH) oder Formaldehyd (CH_2O). Auf Basis chemisch-kinetischer Modellrechnungen stellt sich das direkte Abbauprodukt von Formaldehyd (CH_2O), das Formyl-Radikal HCO, als bestgeeigneter Kandidat für die Detektion des Ortes maximaler Wärmefreisetzung in der Flammenfront einer mageren Vormischflamme dar. Über dieses (instabile) Reaktionszwischenprodukt fliessen über 80 % des Kohlenstoffumsatzes und es steht in der Mitte einer Elementarreaktionskette, die mit der höchsten Wärmefreisetzungrate sehr gut korreliert. Der experimentelle Nachweis (mittels laserinduzierter Fluoreszenz, LIF) dieser Radikal-Spezies ist unter den gegebenen turbulenten Flammenbedingungen mit den zur Verfügung stehenden Laserquellen jedoch nicht gelungen.

Die schnelle Herstellung massgenauer Einzelteile ist nicht nur für die kommerzielle Gasturbinen-Produktion sondern auch für begleitende Entwicklungs- und Forschungsprojekte von Bedeutung. Im Projekt *Optimierter Giessprozess von Gasturbinen-Komponenten* [9] wird ein Simulationssystem für Feingiessprozesse entwickelt, mit dem der Datenfluss im Entwicklungsprozess automatisiert und komplexe Simulationsmethoden in den Prozess integriert werden können. Das Simulationssystem wird auf die Herstellung eines Brennerbauteils und einer Turbinenschaufel angewandt (mit speziellem Schwerpunkt auf amorpher Kristallisation «equiaxed solidification») (Figur 9).



Figur 9: Gasturbinenschaufeln mit unterschiedlicher Kornstruktur (links: amorph, «equiaxed» EQ; Mitte: gerichtet erstarrt; rechts: Einkristall) [9].

Da sich die Fertigungsqualität derartiger komplexer Gussteile wie Gasturbinenschaufeln und -brenner ohne Simulation nicht mit ausreichender Genauigkeit voraussagen lässt, sollte der Giessprozess vollständig simuliert werden, um die teure und zeitaufwendige Entwicklung von Giessprototypen allein auf Validierungsabgüsse zu reduzieren. Der Erfolg des Systems sollte sich an verbesserten Qualitäten der Gussteile bei gleichzeitig verkürzter Entwicklungszeit zeigen, was zu einer entsprechenden Kostensenkung führen würde. Das bisher entwickelte Simulationswerkzeug ist bereits in der Lage, die hauptsächlichen Qualitätsmerkmale (Porosität, Korn-Mikrostruktur und Materialspannungen) mit ausreichender Genauigkeit vorherzusagen. Eine quantitative Validierung mit gemessenen Temperaturverläufen ist erfolgt. Damit kann die Giessprozesssimulation nun mit einem Auslegungs- und Optimierungsalgorithmus für die wichtigsten Giessparameter (Vorheiztemperatur der Gussform, Giesstemperatur, Kühlraten, Wärmeverluste) verknüpft werden, und damit zukünftig zur automatisierten Bestimmung der besten Giessbedingungen herangezogen werden.

Nationale Zusammenarbeit

Die Programmziele sind anwendungs- und umsetzungsorientiert ausgerichtet, weswegen eine starke Integration und Beteiligung der im angesprochenen Kraftwerksbereich tätigen Herstellerfirmen und Zulieferbetriebe unabdingbar notwendig ist. 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 Produktions-Zentren den Garant für die Umsetzung der Programmergebnisse bieten und zusammen mit den in der Schweiz angesiedelten Zulieferfirmen (u.a. *Sulzer, Precicast, Stellba, von Roll* usw.) 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 Forschungs-Institute, zusammen mit praxisnaher Unterstützung aus den Fachhochschulen, sind die Vorraussetzungen, einen signifikanten Beitrag zum Programmerfolg beizutragen, in nahezu idealer Weise gegeben.

Damit das Programm einen spürbaren Einfluss auf die Entwicklung der notwendigen Technologien bewirken kann, ist ein gesamtes Projektvolumen in Höhe von 15 Mio. CHF pro Jahr anvisiert (Stand Ende 2008: nahezu 6 Mio. CHF). Diese Kosten werden anteilmässig von der Privatwirtschaft (Firmen und Interessenverbände finanzieren knapp 2/3 der Gesamtkosten) und der öffentlichen Hand (*BFE, kantonale Wirtschaftsförderungsstellen, KTI, EU*) getragen.

Während der Programmjahrestagung am 26. Juni 2008 in Bern wurden die Kontakte zwischen den verschiedenen Programmteilnehmern wieder

aufgefrischt bzw. neue Verbindungen geknüpft. Die Jahrestagungen geben jeweils allen Interessierten die Möglichkeit, sich über die Zielsetzungen und den Stand des Programms im Detail zu informieren und mit potenziellen Projektpartnern in Kontakt zu kommen. Schwerpunktthemen der letzten Jahrestagung waren die Forschungsprojekte, die mit der Entwicklung neuer Materialen für Schlüsselkomponenten im Kraftwerksbereich befasst sind, und die Aktivitäten auf europäischer Ebene, die mit der Einführung von Technologien der Abscheidung und Rückhaltung von Kohlendioxid (CO_2) verbunden sind (EU Technology Platform Zero Emission Power Plants, ETP ZEP [19]).

Enge Verbindungen werden zum **Competence Center Energy & Mobility (CCEM-CH)** [16] des ETH-Bereichs unterhalten. Im Themenbereich «Elektrizität» im CCEM-CH besteht eine weit gehende Übereinstimmung der Zielsetzungen mit der Ausrichtung des Programms Karftwerk 2020. Zwei der Projekte im Programm Kraftwerk 2020 («Gasturbinenprozess optimiert für CO_2-Minderung» und «Verbrennung von Syngasen») sind direkt mit Projekten im CCEEM-CH verbunden. Es ist gewünscht und beabsichtigt diese Verknüpfungen noch weiter auszubauen. Ein weiteres Projekt wurde 2008 begutachtet und positiv bewertet. Das Projekt «Carbon dioxide management in Swiss power generation (CARMA)» [13], welches sich zum Ziel gesetzt hat, einen breiten Bereich von Fragestellungen im Bereich der CO_2-Problematik zu bearbeiten (Gesamtsystemanalysen, Pre-Combustion Decarbonization, CO_2-Abscheidungstechniken, CO_2-Sequestrierung, sozio-ökonomische Fragen/gesellschaftliche Akzeptanz), und Antworten und Lösungen für die Schweiz, aber auch von internationaler Bedeutung bereitzustellen, ist Anfang 2009 offiziell gestartet worden.

Internationale Zusammenarbeit

Das Programm vernetzt vornehmlich die massgeblichen Kompetenzträger aus Industrie und akademischen Institutionen in der Schweiz, ist aber in Einzelfällen auch offen für ausländische Partner, die exklusives Know-how in Projekte einbringen können.

Weltweit werden sehr grosse Anstrengungen unternommen, um den Wirkungsgrad von gasbefeuerten Kombi-Kraftwerken zu verbessern, und um auf Systemebene die CO_2-Emissionen zu senken resp. durch Abscheiden und Lagern ganz zu vermeiden. Deshalb existieren inzwischen in mehreren Ländern (Deutschland, England, Norwegen, USA, Australien, Japan) und Regionen (z.B. **Forschungsinitiative «Kraftwerke des 21. Jahrhunderts»** [17] der Länder Bayern und Baden-Württemberg) ähnliche (inter-)nationale/regionale Programme wie das Programm Kraftwerk 2020, mit deren Ausrichtung und aktuellem Fortschritt ein regelmässiger Abgleich stattfindet. Durch gegenseitige Berichterstattung bei jährlich stattfindenden Programmkonferenzen wird ein regelmässiger Informationsaustausch gepflegt. Gemeinsame Projekte sind aufgrund nationaler Finanzierungsregeln und komplizierter Konstellationen bezüglich Eigentumsrechten an Projektergebnissen bisher nicht konkret in Betracht gezogen worden.

Die europäische Integration wird durch die angestrebte Einbettung von Projekten des Programms Kraftwerk 2020 im derzeit anlaufenden 7. Rahmenprogramm der EU verfolgt (FP7). Da die bisherige Erfahrung mit bereits erfolgten FP7-Projektausschreibungen zeigt, dass i.d.R. nur grosse Projektkonsortien (10–20 Partner) mit Projektanträgen erfolgreich sind, ist es für Schweizer Partner essentiell, sich ein gut funktionierendes, weit gespanntes europäisches Netzwerk aufzubauen, um damit die Chance zu haben, schon im Frühstadium der Projektentwicklung mit einbezogen zu werden. Dies ist im Rahmen des ***European Turbine Network (ETN)*** [18] im Jahr 2008 durch aktive Beteiligung an einem erfolgreichen Projektantrag («H2-IGCC») gelungen.

Durch die Teilnahme am Gestaltungsprozess der ***EU Technology Platform «Zero Emission Fossil Fuel Power Plants»*** [19] erfolgt sowohl eine regelmässige Abstimmung der Aktivitäten mit anderen nationalen Programmen (der Programm- bzw. der Bereichsleiter haben Einsitz in der begleitenden Länderarbeitsgruppe «Government Group» genommen), als auch die Mitgestaltung von gemeinsamen Entwicklungszielen und EU-Arbeitsprogrammen (der Programmleiter ist Mitglied in 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 Demonstrationsmassstab erheblicher Finanzierungssummen bedarf, sind solche Entwicklungsschritte nur auf internationaler/europäischer Ebene denkbar (dies kann auch im Rahmen bi-/multilateraler Zusammenarbeit zweier oder mehrerer Länder erfolgen).

Über Kontakte zu themenrelevanten Initiativen der **Internationalen Energie Agentur (IEA)** [20] wie der *Working Party for Fossil Fuels (WPFF)*, des *Implementing Agreements for Energy Conservation and Emission Reduction in Combustion*, des *Greenhouse Gas R&D Programme* sowie des *Carbon Sequestration Leadership Forums (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 ansonsten grundsätzlich gar nicht zu realisieren wären.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Da die Programmziele anwendungs- und umsetzungsorientiert ausgerichtet sind, ist bei einigen Projekten des Programms Kraftwerk 2020 bereits ein teilweiser Pilot- und Demonstrationscharakter im Projektumfang integriert. Spezifische Pilot- und Demonstrationsprojekte sind derzeit nicht im Programm enthalten und werden auch zukünftig hauptsächlich über privatwirtschaftliche Initiativen abgedeckt werden müssen, da die für die interessierenden Kraftwerkstechnologien notwendigen Pilotanlagengrössen (i.d.R minimale Leistungsgrösse: 50 MW) und die damit verbundenen Finanzsummen kaum über öffentliche Mittel bereit gestellt werden können.

In diesem Zusammenhang bieten ebenfalls bilaterale/internationale Kooperationen im europäischen Rahmen eine gute Gelegenheit, in der Schweiz moderne Kraftwerkstechnologien zu demonstrieren, die eine Signalwirkung über die Schweiz hinaus (weltweit) ausüben. Entsprechende Möglichkeiten wären im Rahmen des so genannten **Flagship Program** der **EU Technology Platform «Zero Emission Fossil Fuel Power Plants»** [19] gegeben. Um hier im europäischen Umfeld erfolgreich zu sein, ist aber eine aktive Haltung der Schweizer Industrie und der politischen Institutionen notwendig, da die Auswahl für einige wenige (ca. 6 Einheiten) Pilot- und Demonstrationsanlagen von Null-Emissions-Kraftwerkskonzepten in Europa schon weit fortgeschritten ist und demnächst entschieden wird. Diese Anlagen sollen als Vorreiter-Projekte bis zum Zeitraum 2015–2020 realisiert werden und können mit einer finanziellen Unterstützung aus dem europäischen Handelsystem für CO_2-Emissionsrechte rechnen.

Bewertung 2008 und Ausblick 2009

Aufgrund der mittlerweile 3-jährigen Programmlaufzeit (welche einer typischen Projektlaufdauer entspricht) sind im Jahr 2008 einige Projekte der Programmanfangsphase abgeschlossen worden, und das Programm tritt nun in eine Periode der kontinuierlichen Erneuerung des Projekt-Portfolios ein. Die bisher abgeschlossenen Projekte können mehrheitlich als recht erfolgreich bezeichnet werden. Alle Projektteams waren in erfreulicher Weise in der Lage, ihre Fachkompetenzen in den Projektarbeiten eindrucksvoll zum Einsatz zu bringen, welches auch ein Verdienst der projektleitenden Partner ist, die ebenfalls sehr kompetent, professionell und umsichtig das Projektmanagement betreiben.

Die Zusammenarbeit/Koordination mit anderen öffentlichen Förderinstitutionen – vornehmlich der Kommission für Technologie und Innovation (KTI) – konnte zwar auf Basis bereits laufender Projekte weitergeführt werden, allerdings ist der Informationsaustausch durch das Ausscheiden wichtiger Verbindungspersonen stark zurückgegangen und erschwert worden. Um einen umfassenden Überblick über die Forschungsaktivitäten mit Bezug zum Themenbereich des Programms «Kraftwerk 2020» aufrecht zu erhalten, wird es eine wichtige Aufgabe sein, diese Kommunikationskanäle wieder herzustellen. Das derzeitige Projekt-Portfolio ist neben der Förderung durch das Bundesamt für Energie (BFE) zu grossen Teilen der (in ähnlichem Umfang geleisteten) finanziellen Unterstützung durch die KTI zu verdanken. Da die finanzielle Ausstattung des Programms über das BFE-Budget hinter den ursprünglichen Erwartungen zurückgeblieben ist und – trotz einer erfreulichen Budgeterweiterung 2008 – auch zukünftig höchstens mässig weiter wachsen wird, wird weiter versucht werden müssen, dies durch eine stärkere Einbindung anderer Förderinstitutionen auszugleichen. Vorrangige Zielsetzung ist es, zusätzliche Projekte auf nationaler Ebene über die Forschungsfonds der schweizerischen Elektrizitätswirtschaft (Swisselectric Research) und der Gas- und Ölwirtschaft zu lancieren. Auf internationaler Ebene werden die Projektbeteiligungen im 7. Rahmenprogramm der EU weiter sehr intensiv vorangetrieben werden müssen, um absehbar das Programmvolumen annähernd verdoppeln (auf ca. 10 Mio. CHF) zu können.

Trotz der Konzentration der Programmaktivitäten auf Schlüsselgebiete der Dampf- und Gasturbinentechnik inkl. Generatoren kann mit dem gegebenen finanziellen Spielrahmen nur durch eine weiterhin starke Fokussierung auf einzelne Fragestellungen ein signifikanter technologischer Fortschritt bei einigen wenigen Schlüsselkomponenten erwartet werden. Mit der Erweiterung des Programmrahmens auf Themen im Bereich «Abscheidung und Rückhaltung von Kohlendioxid (CO_2)» (Carbon Capture and Storage, CCS) ergeben sich zusätzliche Chancen, das Programm noch bedeutsamer für die Entwicklung klimarelevanter Techniken zu gestalten. Dieser Programmentwicklung wird durch eine veränderte Gewichtung der zukünftig einzusetzenden Programmmittel Rechnung getragen.

Das Engagement der industriellen Partner wird auch zukünftig stark davon abhängig sein, wie die politischen Randbedingungen und die gesellschaftspolitischen Stimmungen in der Schweiz sich in Bezug auf künftige (Gross-)Kraftwerkstechnologien entwickeln und wie die damit zusammenhängenden Fragen der Energieversorgungsbasis und der Emissionen an klimaschädlichen Gasen wie CO_2 in der Öffentlichkeit diskutiert werden.

Selbst beim Ausbau der Projektaktivitäten auf das geplante Gesamtvolumen von 15 Mio. CHF pro Jahr ist nicht davon auszugehen, dass alle relevanten Fragestellungen in ausreichendem Masse mit den in der Schweiz zur Verfügung stehenden Ressourcen und Kompetenzen bearbeitet werden können. Umso mehr Bedeutung kommt deshalb der Einbindung und Abstimmung mit entsprechenden Initiativen in anderen europäischen Ländern und weltweit zu. Neben der Aktivierung aller möglichen Ressourcen (Projektpartner, Finanzierungsquellen) in der Schweiz wird deshalb die Integration der Programmaktivitäten in die laufenden internationalen Anstrengungen, vor allem im europäischen Umfeld, ein wichtiger Schwerpunkt der Bemühungen zum weiteren Ausbau des Programms darstellen. In diesem Kontext kann u.a. weiter versucht werden, eines der derzeit in der Planungsphase befindlichen Gas- und Dampfkraftwerke in der Schweiz (z.B. am Standort Chavalon oder in Cornaux) als Pilot- und Demonstrationsanlage für eines der ersten «Null-Emissions»-Kraftwerke auf Erdgasbasis in Europa zu etablieren.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2008 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden

(siehe www.energieforschung.ch unter der angegebenen Projektnummer)
Unter den angegebenen Internet-Adressen sind die Berichte sowie weitere Informationen verfügbar.

[1] Stefan Keller, (stefan.sk.keller@power.alstom.com), alstom Power Turbo-Systems, Birr: Turbogenerator mit höchstem elektrischen Wirkungsgrad (> 99 %) (JB).

[2] Manfred Roth, (manfred.roth@empa.ch), Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübbendorf: Beschichtete Schaufeln und Ventile in Dampfturbinen (JB).

[3] Jürg Meier (mrj@zhwin.ch), Züricher Hochschule, Winterthur: Hoch-effiziente Dampfturbinenschaufeln («Schlanke Schaufel»).

[4] Beat Ribi, (beat.ribi@ch.manturbo.com), MAN Turbo, Zürich: Hoch-effiziente Verdichter für Brenngase aus Biomasse (JB).

[5] T. Griffin,(timothy.griffin@fhnw.ch), Fachhochschule Nordwestschweiz, Brugg-Windisch: Verbrennung von Syngasen (JB).

[6] Peter Griebel (peter.griebel@psi.ch), Paul Scherrer Institut, Villigen: Struktur und Brenneigenschaften von turbulenten, vorgemischten Hochdruck-Flammen (SB).

[7] T. Griffin (timothy.griffin@fhnw.ch), Fachhochschule Nordwestschweiz, Brugg-Windisch: Gasturbinenprozess optimiert für CO2-Minderung (KTI-Projektantrag).

[8] S. Schenker, W.Kreutner, W.Huschmid (sabine.schenker@psi.ch), Paul Scherrer Institut, Villigen: Laser-Diagnostik in sehr mageren Flammen (SB).

[9] Norbert Hofmann (norbert.hofmann@fhnw.ch), Fachhochschule Nordwestschweiz, Brugg-Windisch: Optimierter Giessprozess von Gasturbinen-Komponenten (JB).

[10] Arnd Jung (jung@zhaw.ch), Züricher Hochschule, Winterthur: Entwicklung von verschleissbeständigen Werkstoffsystemen für Bypassventile in Dampfturbinen bis 650 °C (KTI-Projektantrag).

[11] Anja Skrivervik (anja.skrivervik@epfl.ch), Ecole Polytechnique Federal de Lausanne, Lausanne: Small Microwave Antenna for Rotating Turbomachinery (KTI-Projektantrag).

[12] Jean-Louis Hersener (hersener@agrenum.ch), Ingenieurbüro Hersener, Wiesendangen: Verfügbarkeit von Gras für Kombikraftwerke in der Schweiz (BFE-Projektantrag).

[13] Marco Mazotti (marco.mazzotti@ipe.mavt.ethz.ch), Eidg. Technische Hochschule Zürich, Zürich: Carma – Carbon dioxide management in Swiss power generation (CCEM-Projektantrag).

Referenzen

[14] Konzept für das Forschungsprogramm «Kraftwerk 2020», BFE, Bundesamt für Energie BFE – Forschungsprogramm Kraftwerk 2020.

[15] Forschungsprogramm «Kraftwerk 2020»: Ergänzung und Aktualisierung des Programm-Konzepts für den Zeitraum 2008–2011, Bundesamt für Energie BFE – Forschungsprogramm Kraftwerk 2020.

[16] Competence Center Energy & Mobility (CCEM-CH), CCEM-CH.

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

[18] European Turbine Network (ETN), www.eu-gasturbine.org.

[19] Technology Platform «Zero Emission Fossil Fuel Power Plants», www.zero-emissionplatform.eu/website/Internationalen Energie Agentur (IEA), www.iea.org.

Impressum

Juni 2009
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
Druck: Ackermanndruck AG, Bern-Liebefeld
Bezug der Publikation: www.energieforschung.ch

Programmleiter
Dr. Peter Jansohn
Paul Scherrer Institut (PSI)
CH-5232 Villigen-PSI
peter.jansohn@psi.ch

Bereichsleiter
Dr. Gunter Siddiqi
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
gunter.siddiqi@bfe.admin.ch

Rapport de synthèse 2008 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2008 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Brennstoffzellen und Wasserstoff

Andreas Luzzi, Michael Spirig und Stefan Oberholzer

andreas@luzzi.ch; m.spirig@fomenta.ch; stefan.oberholzer@bfe.admin.ch



Bucher CityCat 2020: Kommunalfahrzeug mit Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb

Auch in der Schweiz werden demnächst erste praktische Erfahrungen mit wasserstoffbetriebenen (H_2) Fahrzeugen mit Brennstoffzellen (FC) im Alltagsbetrieb gesammelt. Solche Fahrzeuge eignen sich insbesondere für den Einsatz an sensiblen Orten (Fussgängerzonen, Indoor), wo die Null-Emission dieser Fahrzeuge direkt erlebbar ist. Das Projekt hy.muve (www.EMPA.ch/hy.muve) wird von der EMPA geleitet und umfasst ein Konsortium aus verschiedenen Industriebetrieben. Von öffentlicher Seite wird das Projekt vom CCEM, verschiedenen Kantonen sowie dem Bundesamt für Energie unterstützt (Quelle: EMPA [28]).

Programmschwerpunkte

Der Energieträger Wasserstoff, vor allem wenn aus erneuerbaren Energien produziert, birgt in Kombination mit Brennstoffzellen als effiziente Energieumwandler ein grosses Potenzial zur Verringerung des globalen CO_2-Ausstosses und für eine nachhaltige Energieversorgung. Weltweit wurden im vergangenen Jahr diverse grosse Förderungsprogramme gestartet, um die Entwicklung von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien voranzutreiben und die Einführung in erste Nischenmärkte vorzubereiten. Die damit verbundenen grossen Herausforderungen sind im Wesentlichen:

- die effiziente Produktion und Speicherung von Wasserstoff;
- die Erhöhung der Lebensdauer sowie die Kostenreduktion der Brennstoffzellen.

In der Schweiz liegen die Schwerpunkte des Forschungsprogramms Brennstoffzellen und Wasserstoff in der angewandten Grundlagenforschung, insbesondere im Bereich der Materialforschung [1]. Neue Pilot- und Demonstrationsprojekte befinden sich im Moment in der Planungsphase. Die diversen Aktivitäten beider Programme gliedern sich in verschiedene Teilgebiete, deren Zielsetzungen sich nach den Vorgaben des *Konzepts der Energieforschung des Bundes für die Periode 2008 bis 2011* [2] richten.

Brennstoffzellen

Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEM-FC oder PEFC) für portable und mobile Anwendungen

Bei den PEM-Brennstoffzellen steht die Reduzierung der Kosten sowie Robustheit (Start-Stop) und Verfügbarkeit der Komponenten – was letztlich auch zur Erhöhung der Lebensdauer beiträgt – im Vordergrund. Im Berichtsjahr wurde die Optimierung von Polymermembranen weiter vorangetrieben. Gleichzeitig starteten neue Projekte, in denen Verfahren für die künstliche Beschleunigung der Degradation entwickelt werden. Auf diese Weise können die Mechanismen, welche für die Degradation verantwortlich sind, besser und gezielter untersucht werden. Ein weiterer Schwerpunkt bildete die Systemintegration von PEM-Brennstoffzellen und die Anwendung in Nischenmärkten wie z.B. in portablen Systemen.

Feststoffoxid-Brennstoffzellen (SOFC) für stationäre Anwendungen

Im Bereich der SOFC ist die Erhöhung der Lebensdauer für die praktische Anwendung ein zentraler Forschungsschwerpunkt. Im Berichtsjahr wurden hierzu diverse grundlegende Forschungsarbeiten weitergeführt. Ähnlich wie im PEM-Brennstoffzellenbereich startete auch hier ein neues Projekt betreffend künstlicher Alterungsbeschleunigung von SOFC, um Degradationsphänomene kostengünstiger und systematischer untersuchen zu können.

Wasserstoff

Nachhaltige Wasserstoffproduktion

Die Arbeiten zur nachhaltigen Produktion von Wasserstoff konzentrierten sich im Berichtsjahr weiterhin auf die Forschung im Bereich der Materialien, welche für die photo-elektrochemische (PEC) Produktion von Wasserstoff durch Wasserspaltung in Frage kommen. Im Zentrum standen dabei die Weiterentwicklung von nanostrukturierten Photoanoden auf der Basis von Eisenoxid, inklusive deren Abscheidetechnik und die Auswahl der geeignetsten Trägermaterialien, sowie neue Herstellungstechniken für PEC-aktive komplexe Nanopartikel.

Effiziente Wasserstoffspeicherung

Der Schwerpunkt in diesem Teilbereich bildet nach wie vor die Forschung an komplexen Metallhydriden, welche als Feststoffkomplexe Wasserstoff effizient in ihrem Kristallgefüge speichern können. Im Mittelpunkt stehen dabei die Boronat-Verbindungen LiBH4, die sich durch eine besonders gute Wasserstoffspeicherdichte auszeichnen. Im Berichtsjahr wurden intensive Untersuchungen durchgeführt, um die De- und Adsorptionskinetik dieser Materialien besser zu verstehen. Weiter wurde an sicherheitsrelevanten Fragen im Zusammenhang mit den Desorptionsprodukten und der Oberflächenreaktivität von komplexen Hydriden geforscht.

Zusätzlich zu den wissenschaftlichen und technischen Fokusaktivitäten verfolgt das Programm Brennstoffzellen und Wasserstoff weiter folgende Langzeitziele:

- Kontinuität der wissenschaftlichen Forschung und damit Generationen übergreifender Erhalt sowie Ausbau des Know-how;
- Unterstützung des Technologietransfers anhand von mehrstufigen Road-maps in Zusammenarbeit mit Industriepartnern;
- Verstärkte Vernetzung von Schweizer Forschungs- und Entwicklungsprojekten durch gezielte Förderung der aktiven Zusammenarbeit in nationalen und internationalen Gremien.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2008

Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen (PEM-FC) für portable und mobile Anwendungen

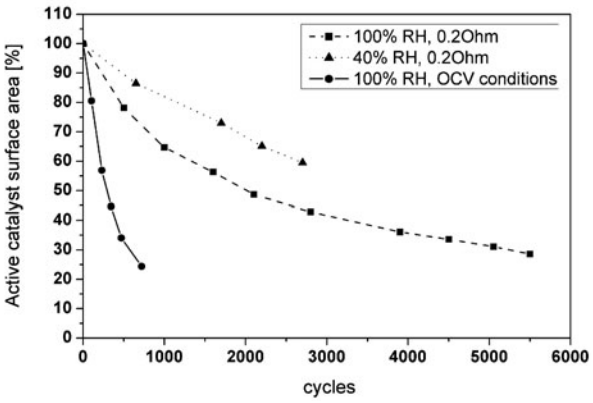
PEM-Brennstoffzellensysteme zeichnen sich durch eine kompakte Bauweise und durch eine hohe Leistungsdichte aus. Solche Systeme arbeiten bei relativ tiefen Temperaturen (~100 °C), lassen sich schnell ein- und ausschalten und besitzen hohe elektrische Wirkungsgrade von bis zu 50 %.

Momentan steht die Weiterentwicklung der PEM-Brennstoffzelle für diverse Anwendungen von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen bis zu Fahrzeugantrieben im Vordergrund. Der wirtschaftliche Einsatz und die erfolgreiche Markteinführung von PEM-Brennstoffzellensystemen in den kommenden Jahren hängen allerdings stark von der Steigerung der Leistungsdichte und der Lebensdauer ab. Weiter braucht es kostengünstigere Herstellungsverfahren für die verschiedenen Komponenten der Zellen, der Elektrodenmaterialien (Katalysatoren) sowie des Brennstoffes (vornehmlich Wasserstoff oder Methanol) und den konsequenten Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur.

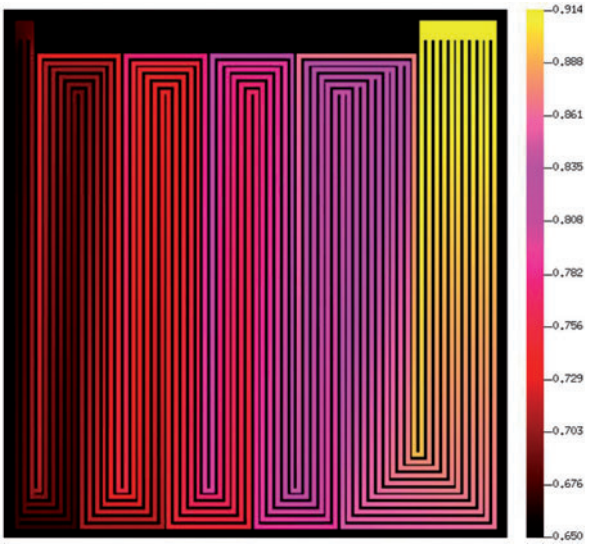
Federführende Grundlagen- und Entwicklungsarbeiten im Bereich PEM-Brennstoffzellen finden im Labor für Elektrochemie am Paul Scherrer Institut (PSI) statt. Im BFE-Projekt *Protonenleitende Polymermembranen für Brennstoff- und Elektrolysezellen* [3] wird an der Entwicklung verbesserter Protonen leitender Polymermembranen geforscht, welche in PEM-Brennstoffzellen und -Elektrolyseuren als kostengünstigere Alternative zu kommerziellen Produkten zum Einsatz kommen können. Speziell soll die Standzeit der Membran in Brennstoffzellen bei erhöhter Temperatur und unter zyklischen Bedingungen verbessert werden.

Durch die Methode der Strahlungspfropfung (radiation grafting) werden bestimmte Komponenten (funktionale Monomere) in einen Basis-Polymerfilm eingebaut, um damit der Membran eine Funktionalität wie z.B. Protonenleitfähigkeit zu verleihen. Im Projektteil *Herstellung* wurde im Berichtsjahr der Einfluss von Crosslinkern auf den Vernetzungsgrad der Membranen studiert. Um dabei die Kinetik des Pfropfungsprozesses besser zu verstehen, wurde ein physikalisches Modell weiterentwickelt, mit welchem der Einfluss verschiedener Reaktionsparameter quantitativ verglichen werden kann. Im Projektteil *Charakterisierung gepfropfter Filme* stand die Weiterentwicklung von spektroskopischen Methoden zur lokalen Strukturanalyse im Vordergrund. Es wurde gezeigt, dass der Pfropfungsgrad an der Oberfläche der Membranen deutlich höher ist als in deren Zentrum. Solche Informationen sind wichtig für das Verständnis sowohl der Funktion als auch der Degradation der Membranen. Weiter wurden verschiedene Eigenschaften (Leitfähigkeit, Ionenaustauschkapazität, Quellung) ex-situ untersucht und erste Langzeittests durchgeführt. Dadurch sollen mögliche Kandidaten für Langzeit-Brennstoffzellenversuche evaluiert werden.

Die Lebensdauer strahlungsgepfropfter PEM-Membranen wird in einer 2008 gestarteten Doktorarbeit am PSI im BFE-Projekt *Lebensdauer-Limitierungen von Brennstoffzellen-Membranen: Mechanismen, Methoden und Innovationen* [4] speziell untersucht. Zielsetzungen dieser Arbeit sind die Identifikation verschiedener Degradationsmechanismen sowie die Bestimmung der Schädi-



Figur 1: Einfluss der Betriebsparameter (Feuchtigkeit – RH; Last – Ohm) auf die Degradation von Polymer-Mebranen durch Start-Stop-Zyklen. (Quelle: PSI, [5])



Figur 2: Flussfeld einer Mikro-PEFC des PSI mit einer aktiven Fläche von 1cm x 1cm. Gemessen wurde der Verbrauch von Sauerstoff entlang des kathodischen Flussfeldes. (Quelle: PSI [6])

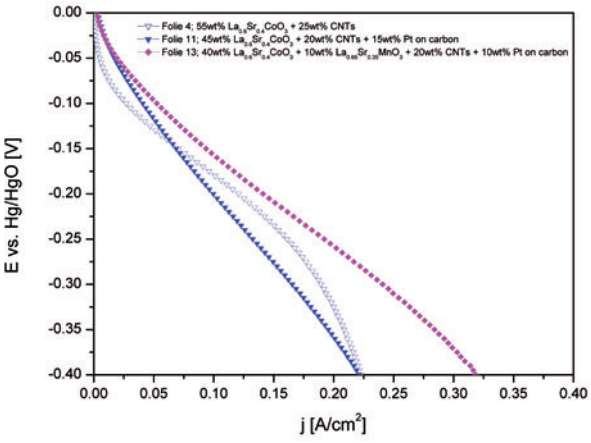
gungsrate in Abhängigkeit diverser Betriebsbedingungen und Membranzusammensetzungen. Die Quantifizierung solcher Degradationsprozesse erlaubt es, Alterungsversuche an Membranen beschleunigt durchzuführen und somit den Probendurchsatz zu erhöhen. Die Innovationszyklen werden dadurch wesentlich verkürzt. Im Berichtsjahr wurden in einer ersten Messreihe am PSI hergestellte Membranen in Einzelzellversuchen bei Leerlaufspannung künstlich gealtert. Die gemessene Degradation nach 500 Betriebsstunden bei Leerlaufspannung ist mit bis zu 97 % sehr stark im Vergleich zu einer Degradation von 3 % bei hoher Stromdichte. Weiter konnte gezeigt werden, dass die Degradation stark inhomogen und hauptsächlich während den ersten 150 Stunden abläuft.

Neben den Herstellungskosten sind Alterungsprozesse sowie frühzeitiges Versagen elektrochemischer Komponenten eine allgemeine Problematik bei der Markteinführung der PEM-Brennstoffzellentechnologie. Diese Thematik wird, in zwei weiteren vom BFE mitfinanzierten Doktorarbeiten am PSI, im BFE-Projekt *go.PEF-CH: Enhancing PEFC Durability and Reliability under Application-Relevant Conditions* [5] untersucht (siehe Figur 1). Die Arbeiten erfolgen innerhalb des PEF-CH-Netzwerks in enger Zusammenarbeit mit der Berner Fachhochschule BFH-TI und der Schweizer PEM-Industrie (Ceka AG, Mes-Dea SA). Wichtigste Faktoren im Zusammenhang mit der Lebenszeitbeschränkung sind schnelle Laständerungen sowie häufige Start-Stop-Zyklen. Der Einfluss dieser beiden Faktoren auf die Lebenszeit wird mit neu entwickelten Diagnosemethoden erforscht. Im Berichtsjahr wurden erste Start-Stop-Zyklen-Experimente an einer Einzelzelle ausgeführt, wobei eine beträchtliche Schädigung der Kathode bei unkontrollierter Laständerung aufgezeigt werden konnte. Auf Seite der Industriepartner wurden am IPHoS (Integrated Hydrogen Power System)-Stapel der Firma Ceka verschiedene Designmodifikationen vorgenommen, um die Leistung und die Zuverlässigkeit im Betrieb zu erhöhen. Die Firma Mes-Dea hat einen 500-Watt-Stapel mit lokalen Stromkollektoren ausgerüstet, damit durch das PSI an diesem örtlich besser aufgelöst Reaktionen bei Laständerungen gemessen werden können.

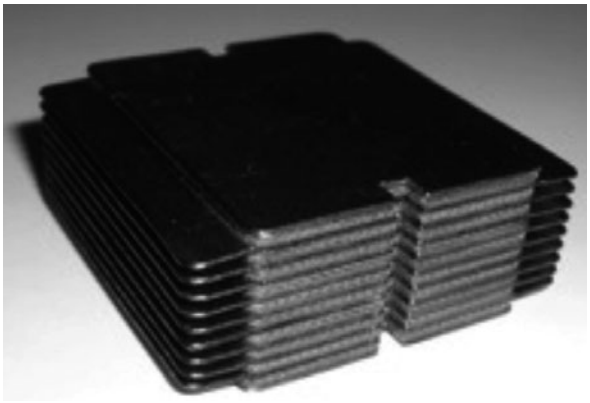
Direkte experimentelle Untersuchungen an Brennstoffzellen sind auf Grund der Abgeschlossenheit des Systems nur beschränkt möglich. Die Beschreibung mit mathematischen Modellen sowie deren Validierung mit experimentellen Daten ist daher für die Forschung und Entwicklung in diesem Bereich sehr bedeutsam, da damit sowohl Kosten als auch Entwicklungszeit eingespart werden können. Im BFE-Projekt *cal.PEF-CH: Model Based Investigation of PE-Fuel Cell Performance with Focus on Porous Layer Properties* [6] des PSI und der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) werden Transportprozesse in PEM-Brennstoffzellen modelliert, insbesondere der Einfluss von flüssigem Wasser innerhalb der porösen Gas-Diffusionsschicht. Experimentell wird die Wechselwirkung zwischen flüssigem Wasser und Wasserdampf in den GDL-Materialien mit Hilfe der Röntgen-Mikro-Tomographie untersucht, wozu die Schweizer Synchrotronquelle SLS am PSI in Villigen genutzt werden kann. Im Berichtsjahr konnten erstmals der Wasseranteil in den GDLs auf der Skala der porösen Struktur (1 µm) aufgelöst werden. Die Porosität und die lokale Wassersättigung wurden für verschiedene Dicken der GDL als Funktion des Wasserdrucks untersucht. Im theoretischen Teil dieses Projektes wurde ein numerisches Modell für die Membran-Elektroden-Einheit und die Gas-Diffusionsschicht weiterentwickelt, um insbesondere die Limitierung des Massentransports bei hoher Last zu studieren. In einem zweiten Modell konnte das Verhältnis zwischen Kanal- und Rippenbreite in den Flussfeldern der Brennstoffzellen simuliert werden, welches einen grossen Einfluss auf die Funktionalität der Brennstoffzelle hat. Beide Modelle wurden erfolgreich auf reale Flussfelder angewendet, um damit Informationen über die räumliche Gas-, Wasser- und Stromverteilung zu erhalten (siehe Figur 2).

Bereits Ende 2007 abgeschlossen wurde das BFE-Projekt *Local Gas Analysis in PEFC During Accelerated Membrane Degradation*, welches ebenfalls am PSI durchgeführt wurde. In diesem Projekt wurde eine neue Methode entwickelt, um die Gaszusammensetzung in einer Brennstoffzelle lokal und während des Betriebes mittels Massenspektrometrie zu analysieren. Aufbauend auf den bisherigen Arbeiten wird die bestehende Methodik 2009 in einem Nachfolgeprojekt ausgebaut und gezielt auf das Verständnis der lokalen Gaszusammensetzung eingesetzt. Die Resultate können in die technischen Entwicklungsarbeiten für die Optimierung von Betriebsbedingungen und Zellstrukturen der Projekte am PSI einfliessen. Die Methodik soll in Zukunft auch als Dienstleistung für den weltweiten Entwicklungsmarkt angeboten werden.

Im Berichtsjahr konnte das BFE-Projekt *New Highly Active Oxygen Reduction Electrode for PEM Fuel Cell and Zn/Air Battery Applications (Nora)* [7] an der EMPA abgeschlossen werden. Ziel dieses Projektes war die Steigerung der Effizienz der Sauerstoffreduktion an der Kathode, was entweder durch eine Erniedrigung der Aktivierungs- oder der Konzentrationspolarisation an der Elektrode erreicht werden kann. Hierzu wurden neue Elektrodenmaterialen, basierend



Figur 3: Strom-Spannungskennlinien von verschiedenen Elektroden, welche mit Carbon Nanotubes (CNTs) und Perovskiten verbessert werden konnten. (Quelle: EMPA [7])



Figur 4: Miniatur-PEM-Brennstoffzellenstapel (25 W) für portable Anwendungen. (Quelle: BFH-TI [10])

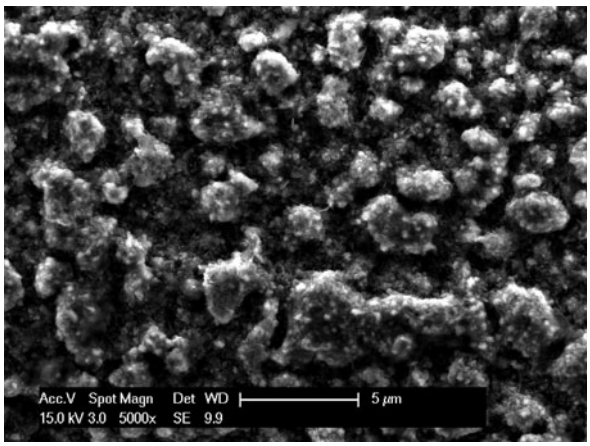
auf Carbon Nanotubes (CNTs) und Perovskiten entwickelt, bei denen die auftretenden Überspannungen bei der Sauerstoffreduktion im Vergleich zu herkömmlichen Elektrodenmaterialien, aus Platin auf aktiviertem Kohlenstoff gesenkt werden konnten (siehe Figur 3).

Insgesamt wurden vier verschiedene Elektroden hergestellt und elektrochemisch charakterisiert. Die Leistungsfähigkeit der Elektroden ist – im Vergleich zum direkten Wachstum von CNTs auf den Perovskiten – höher, wenn CNTs und Perovskite im Ultraschallbad gemischt werden. Um die Aktivierungspolarisation bei kleinen Stromstärken möglichst gering zu halten, ist die Zugabe von geringen Mengen von Platin (Pt) unerlässlich. Durch den kombinierten Einsatz von CNTs, Pt auf Kohlenstoff und Perovskiten mit optimierter Stöchiometrie wurde eine neue Elektrode entwickelt, welche im gesamten Lastbereich eine geringere Polarisation aufweist und ausserdem wesentlich weniger Platin bedarf als eine konventionelle Vergleichselektrode aus Pt auf Kohlenstoff.

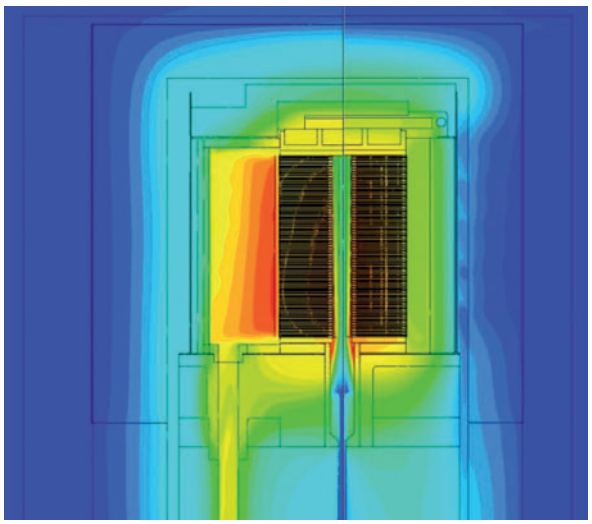
Die Brennstoffzellengruppe der Berner Fachhochschule BFH-TI in Biel konzentriert sich auf die Entwicklung und den Test von PEM-Brennstoffzellenstapeln und Brennstoffzellensystemen bis zu einer elektrischen Leistung von 1 kW. Im Hinblick auf die Weiterentwicklung des luftgekühlten IHPoS-Stapels der Firma Ceka AG wurde in Zusammenarbeit mit dem PSI im BFE-Projekt Erweiterung *des BFH Testlabors für PEM-Brennstoffzellen* [8, 9] ein Teststand für den Leistungsbereich zwischen 0,1 und 1 kW entwickelt und aufgebaut. Im Berichtsjahr wurde der Teststand mit IHPoS-Stacks in zwei Leistungsgrössen und von unterschiedlichem Entwicklungsstand erfolgreich in Betrieb genommen. Darüber hinaus wurden zwei Dauertests durchgeführt, in welchen ein stabiler Betrieb der IHPoS-Stacks über mehr als 3'000 Stunden nachgewiesen und der Einfluss von CO-haltigem Wasserstoff dargestellt werden konnte.

Ebenfalls in der Brennstoffzellengruppe der BFH-TI wurde im Berichtsjahr eine Machbarkeitsstudie *für ein PEFC-Ministapel im Leistungsbereich 100 W* [10] durchgeführt. Anwendungsbereiche für solche Systeme finden sich im Bereich der portablen Elektronik im zivilen wie im militärischen Sektor. In diesem BFE-Projekt wurde ein Brennstoffzellenstapel im Bereich von 25 Watt entwickelt und erfolgreich getestet (siehe Figur 4). Material- und Fertigungskosten konnten dabei optimiert und stark reduziert werden. Gleichzeitig wurde am Managementzentrum der BFH in Bern eine begleitende Marktstudie durchgeführt. Die Studie bestätigte, dass ein hohes Verlangen nach Mobilität allgemein zunehmend höhere Anforderungen an Energiespeicher stellt. Herkömmliche Batterien wie auch moderne LiPo-Batterien seien hier teilweise den Anforderungen nicht gewachsen. Brennstoffzellen oder hybride Brennstoffzellen-Batteriensysteme wären möglicherweise in der Lage, diesen Bedarf zu abzudecken.

In einem Ende 2008 bewilligten KTI-Projekt der Firma Ceka AG [9] soll der erwähnte IPHoS-Stapel zu einem modularen 500-Watt-Brennstoffzellensystem für verschiedene Anwendungen weiterentwickelt und zur Marktreife gebracht werden. In diesem Projekt soll die gesamte Wertschöpfungskette vom zertifizierten Brennstoffzellensystem über die Wasserstoffspeicherung und -logistik bis zum Einsatz in einer speziellen Anwendung realisiert werden. Am Projektkonsortium beteiligt sind die Berner Fachhochschule, das PSI, die EMPA sowie fünf industrielle Partner. Als Pilotanwendung ist der Einbau eines solchen Stapels in eine mobile Minibar der Elvetino AG vorgesehen, welche in einer Testphase im praktischen Betrieb in Zügen der SBB zum Einsatz kommen soll.



Figur 5: Elektronenmikroskopaufnahme einer unter H2/N2-Atmosphäre geglühten Cu-Schicht auf Crofer-Stahl zum Schutz von SOFC-Innterconnets. (Quelle EPFL [12])



Figur 6: Modellierte Temperaturverteilung im Brennstoffzellen-System Galileo 1000 N von Hexis. (Quelle: ZHAW [11])

Das PSI ist im vergangenen Jahr ein Joint-Venture-Abkommen mit der Belenos Clean Power Holding in Biel eingegangen. Ziel des Projektes *Swiss Fuel Cell* ist die Entwicklung eines neuen Wasserstoff/Sauerstoff-Brennstoffzellensystems für einen Fahrzeugantrieb. Das Projekt ist Teil eines Mobilitätskonzeptes der Belenos Clean Power Holding, welches auf eine private Energieversorgung für den Individualverkehr ausgelegt ist mit verschiedenen Projekten im Bereich Photovoltaik, Wasserstoffherstellung und -speicherung.

Feststoffoxid-Brennstoffzellen (SOFC) für stationäre Anwendungen

Alle Brennstoffzellen sind energetisch attraktive Energiewandler auf Grund ihres hohen Wirkungsgrades. Im Vergleich zu andern Brennstoffzellentypen zeichnen sich Feststoffoxid-Brennstoffzellen (SOFC) durch die höchsten elektrischen Wirkungsgrade, der Möglichkeit, neben reinem Wasserstoff auch Ergas direkt nutzen zu können, sowie der anfallenden Wärme auf hohem Temperaturniveau aus. SOFC haben ihr Potenzial vor allem im stationären WKK-Bereich. Weitere potenzielle Applikationen kommen im Bereich der dezentralen Energieumwandlung – z.B. Auxiliary Power Units – hinzu. Die Hauptherausforderung im Zusammenhang mit der Markteinführung dieser Technologie liegt neben den Kosten nach wie vor in der zurzeit noch zu geringen Lebensdauer. Für den kommerziellen Einsatz in Wärme-Kraft-Kopplungssytemen sollten SOFC-Stapel eine Mindestlebensdauer von 40'000 Stunden aufweisen. Die Materialdegradation als limitierender Faktor der Lebensdauer von SOFC wurde im Rahmen des EU-Projekts *REAL-SOFC* intensiv untersucht. Aus der Schweiz beteiligten sich hier die Firmen Hexis AG und HTceramix SA sowie deren Forschungspartner EMPA und EPFL. Es konnte gezeigt werden, dass mit verbesserten Kathodenmaterialien und Metallbeschichtungen sowie mit Anoden-gestützten Zellen Degradationsraten unter 1 % pro 1'000 Stunden bei einer Betriebsdauer von mehr als 5'000 Stunden reproduzierbar erreicht werden. Verschiedene Stapel wurden über mehr als 10'000 Studen getestet. Das Projekt Real-SOFC wurde im Herbst 2008 abgeschlossen. Die Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet werden im nationalen *Projekt Enhancing the Lifetime of SOFC Stacks for Combined Heat and Power Applications (SOFC-CH)* [11] sowie im europäischen Era-Net-Projekt *Accelerated Testing of SOFC-Components (AccelenT)* [12] weitergeführt.

Das Projekt *SOF-CH* [11], welches von Swisselectric Research und BFE gemeinsam unterstützt wird, vereint alle Schweizer Hauptakteure aus Forschung und Industrie im Bereich der SOFC (EPFL, EHTZ, ZHAW, Hexis AG und HTceramix SA). Angestrebt wird generell eine Erhöhung der Lebensdauer der SOFC-Zellenstapel. Das Projekt startete im Jahr 2007 und hat im Berichtsjahr zu ersten experimentellen Resultaten geführt. Ergänzt werden die experimentellen Arbeiten durch Modellierungen und Validationstests. Im Projektteil, der sich mit Degradationsphänomenen der Kathode beschäftigt, wurden auf keramischem Lanthan-Strontium-Manganoxid basierende Elektroden analysiert auf die chemische Wechselwirkung verschiedener Phasen, auf den Einfluss auf Prozessparameter wie die Sinter-Temperatur sowie auf physikalische Faktoren (Partikelgrösse, Schichtdicke). Ein weiterer Projektteil beschäftigt sich mit der Redox-Stabilität der Anode. Mikrostrukturelle Veränderungen in Nickel-basierten

Anoden sind hauptverantwortlich für deren Degradation, da u.a. das Netzwerk aus metallischen Körnern und Keramikmaterial thermodynamisch verhältnismässig unstabil ist. Ein weiterer Projektteil erforscht die Verminderung von Degradation des Interconnect Materials u.a. durch metallische Coatings (siehe Figur 5). Im Berichtsjahr startete die systematische Untersuchung der Vergröberung der Nickelpartikel als Funktion der Betriebsparameter. Im dritten Projektteil wurden Simulationstools entwickelt, um das elektrochemische Verhalten der Stapel sowie das thermische Gesamtmanagement studieren zu können. Das SOF-CH Konsortium ist ausserdem noch in das CCEM-Projekt *Wood-gas-SOFC* involviert. Bei diesem geht es unter anderem um die Untersuchung des Einflusses von Biogas auf die anodenseitige Degradation bei SOFC. Auch hier sind die Resultate viel versprechend.

Dasselbe Projektkonsortium arbeitet in dem im Jahr 2008 gestarteten Era-Net-Projekt *AccelenT* zusammen. Der Schweizer Anteil an diesem europäischen Projekt wird durch das BFE mitunterstützt. Die europäischen Partner sind das Forschungszentrum Jülich und das Europäische Zentrum für Energieforschung Eifer (DE), das finnische Forschungszentrum VTT sowie die Industriepartner Plansee AG (AT) und Kerafol GmbH (DE). Ziel dieses Projektes ist es, beschleunigte Testverfahren für SOFC zu entwickeln, um die Degradation im Zeitraffer studieren zu können. Auf diese Weise können kostspielige Langzeitstudien minimiert werden (siehe Figur 6).

Weiter wurde im Berichtsjahr ein kleineres dreimonatiges BFE-Projekt *Simulationsunterstützung für die Weiterentwicklung von Stacks mit geringer thermomechanischer Belastung* [13] der Firma Hexis AG abgeschlossen. Darin wurden numerische Modelle entwickelt, um die Einflüsse von Designmodifikationen an den metallischen Interkonnektoren der Zellen sowie von Fertigungstoleranzen auf die thermomechanischen Eigenschaften des Stapels zu simulieren. Erkenntnisse aus diesem Projekt fliessen direkt in die Weiterentwicklung des Brennstoffzellenstapels von Hexis ein.

Im BFE-Projekt *System Reliability of a Product-Near CHP System Operating with a SOFC HoT-box* [14] der Firma HTceramix SA, des zweiten Schweizer Unternehmens im SOFC-Bereich, wurde in einer Wärme-Kraft-Kopplungsanlage der dänischen Firma Dantherm Power das von HTceramix entwickelte SOFC-System HoTbox erfolgreich getestet. Das System von Dantherm mit dem Stapel von HTceramix hat eine Nominalleistung von 500–100 Watt DC und wird mit entschwefeltem Erdgas betrieben. Für die Firma HTceramix ist dies ein weiteres wichtiges Beispiel für die Integration ihres Produktes in Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen.

Ferner entwickelt HTceramix innerhalb des europäischen Projekts *Flame-SOFC* ein 2-kW-System für Wärme-Kraft-Kopplungsanwendungen und beteiligt sich am europäischen Projekt *SOFC600*, welches eine Senkung der SOFC-Betriebstemperatur auf 600 °C zum Ziel hat.

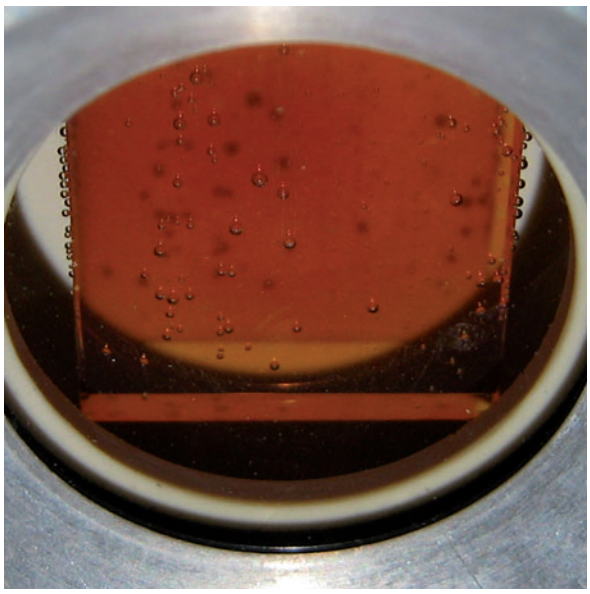
In dem von Swisselectric Research getragenen Projekt *Onebat* wird seid 2004 eine Miniatur-SOFC entwickelt. Ein solches Produkt könnte eine kostengünstige Alternative zu herkömmlichen Mini-Akkumulatoren für portable Anwendungen bieten. Das Projekt befindet sich momentan noch in einer grundlegenden Entwicklungsphase. Es ist geplant, einen ersten Demonstrator zu entwickeln, dessen Leistungsdaten danach kontinuierlich verbessert werden sollen.

Wasserstoff

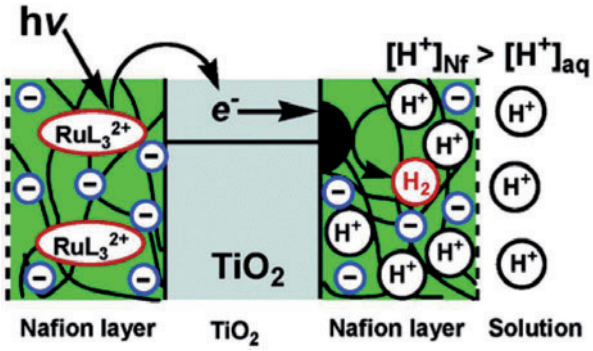
Nachhaltige Wasserstoff-Produktion

Im Rahmen des Projekts *PEChouse: A competence centre devoted to the photoelectochemical splitting of water and production of hydrogen* [15] wurde 2007 an der EPFL ein Schweizer Kompetenzzentrum für Photoelektrochemie (PEC) eingerichtet, welches von der EPFL und dem BFE getragen wird. Allgemeines Ziel ist die Weiterentwicklung der direkten photoelektrochemischen Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff (siehe Figur 7). Hierbei besteht eine enge nationale Zusammenarbeit mit Forschungsaktivitäten an der Universität Basel und an der EMPA. Speziell sollen in dem Projekt neue Halbleiter-basierte PEC-aktive Materialien entwickelt werden, um langfristig einen Systemwirkungsgrad von 10 % für die Umwandlung von solarer Energie zu Wasserstoff zu erreichen. Im Berichtsjahr wurde an der EPFL viel Aufbauarbeit geleistet in der Bereitstellung von Techniken, Materialien und Gerätschaften, um die Weiterentwicklung der nächsten Generation PEC-Zellen voranzutreiben. Es wurden erste, viel versprechende Resultate mit einer neuen Abscheideanlage erreicht sowie leistungsfähige Substrat-Materialien für Eisenoxid Photoanoden identifiziert.

Im Projekt *NanoPEC, Nanostructured Photoelectrodes for Energy Conversion*, des 7. EU-Rahmenprogramms werden diese Forschungsaktivitäten intensiviert und auf Nanotechnologie-basierte Konzepte und Methoden ausgeweitet. Ziel des durch die EPFL geleiteten internationalen Forschungskonsortiums ist es, neuartige Komposit-Nanostrukturen zu schaffen, welche einstellbare Funktionalitäten aufweisen. Als Schweizer Partner beteiligen sich auch die EMPA.



Figur 7: Eisenoxid Photoanode, die unter Lichteinfall durch Wasserspaltung Sauerstoff generiert. (Quelle: EPFL [15])



Figur 8: Zweielektrodensystem zur photosynthetischen Wasserstoffproduktion, basierend auf biomimetischen Protonenreduktionssystemen. (Quelle: Universität Basel [16])

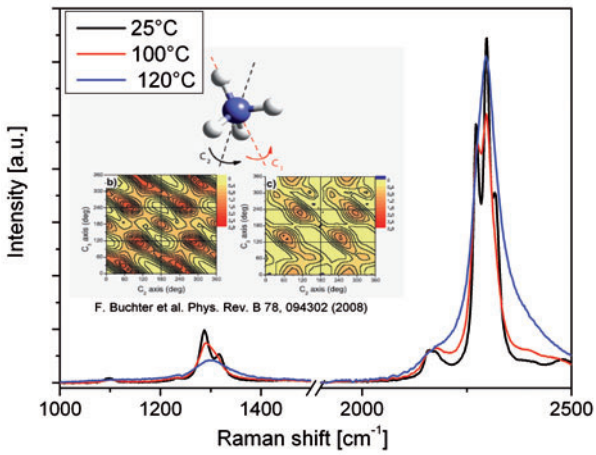
Im abgeschlossenen BFE-Projekt *NefiosHydro: Nanocrystalline Electrodes Functionalized with Light Sensitized [2Fe-2S]-Iron-Sulfur Clusters for Hydrogen Production* [16] wurde an der Universität Basel eine neuartige, biomimetische Produktion von Wasserstoff mit aus Solarstrahlung erzeugten Protonen untersucht (siehe Figur 8). Die Protonen werden an der Kathode durch eine nanokristalline Elektrodenoberfläche mit lichtsensitiven Eisen-Schwefel Clustern generiert. Auf der Anodenseite erfolgt die katalytische Reduktion der Protonen zum Wasserstoffmolekül. Die Arbeiten dieses innovativen Projektes waren auf folgende drei Ziele ausgerichtet: Die Erzeugung einer nanokristallinen Oberfläche mit Eisen-Schwefel-Clustern, die Synthese geeigneter Ruthenium(Ru)-Komplexen und die Überwachung der Reduktion der Protonen zu Wasserstoffmolekülen bezüglich der angelegten negativen Vorspannung. In einer ersten Phase wurde die Struktur einer Serie von Prototyp-Komponenten mit Eisen-Schwefel-Clustern und Chromophoren für die Lichtabsorption untersucht und dabei festgestellt, dass die Komponenten extrem kurzlebig sind. Zur Steuerung der H_2-Produktion wurde ein Zwei-Elektroden-System verwendet, wobei eine Elektrode mit Nafion- und Ru-Komplexen modifiziert wurde. Als eine der Hauptschwierigkeiten erwies sich die ungleiche Bedeckung mit Ru-Komplexen als Folge einer ungleichen Nafion-Schicht. Gegen Ende des Projekts konnten zwar die meisten Probleme bei der Herstellung der synthetischen Elektroden gelöst werden, die verwendeten Komponenten erwiesen sich jedoch nach wie vor als ungeeignet zur Herstellung von Wasserstoff ausserhalb von Laborbedingungen.

Die EMPA baut in Dübendorf in Ergänzung und Synergie zu PEChouse am Labor für High Performance Ceramics eine weitere PEC-Kompetenzgruppe im Bereich der Materialsynthese, Pulferherstellung und Charakterisierung auf. Basis bilden vom Schweizer Nationalfonds (SNF), dem BFE, der EU sowie der EMPA intern unterstützte Projekte. Das Projekt *Fundamental Aspects of Photocatalysis and Photoelectrochemistry / Basic Research Instrumentation for Functional Characterization* [17] ist das Aufbauprojekt, in welchem die erforderliche Instrumentierung und Grundlagen für photoelektrochemische Experimente erarbeitet wurden. Im neu gestarteten Projekt *Synthesis and assessment of mixed metal-oxide nanoparticles and films for solar photo-electrochemical hydrogen fuel production* [18], welches in Synergie mit dem EU-Projekt *NanoPEC* läuft, werden eisenhaltige Keramik-Nanopartikel der Universität Basel und der Fachhochschule Nord-Westschweiz sowie die synthetische Hydrogenasen der EPFL untersucht. Hierzu werden Synchrotron-Röntgenspektroskopie und Multiplett-Simulation eingesetzt, so dass sich in Abhängigkeit von der Molekularstruktur des Photokatalysators dessen photokatalytischen Effizienz-Eigenschaften bestimmen lassen.

Effiziente Wasserstoff-Speicherung

Komplexe Metallhydride wie Boronat- ($LiBH_4$) oder Alanat-Verbindungen ($NaAlH_4$) haben ein grosses Potenzial als effizientes Wasserstoffspeichermedium mit theoretisch bis zu 18-Massenprozenten. Bevor diese Materialien jedoch zur breiten Anwendung kommen können, müssen die Adsorptions- und Desorptionsmechanismen sowie die Rolle der Katalysatoren wie Titan genauer bekannt sein. An der EMPA werden im BFE-Projekt *Hydrogen Storage in New Complex Hydrides (CompHy)* [19] diese Fragestellungen mit experimentellen Methoden in nationaler und internationaler Zusammenarbeit untersucht. Endziel die-

ses Projekts ist die detaillierte Beschreibung der Wasserstoffsorptionsreaktion zusammen mit den physikalischen Eigenschaften der Hydridkomponenten als Funktion der Wasserstoffkonzentration. In diesem Projekt wurden fünf Arbeitspakete (WP) definiert. Im WP1 wird die Rolle von Titan als Katalysator für die thermische Wasserstoffdesorption am Beispiel von $NaAlH_4$ eingehend untersucht, unter anderem mit weltweit einzigartigen Messungen an der Swiss Synchrotron Light Source des PSI. In WP2 geht es darum, die langsame Kinetik des Wasserstoffs in den Boronat-Verbindungen ($LiBH_4$) zu optimieren und die Temperaturen für die Bildung sowie die Dekomposition von Boronat herunterzusetzen (Figur 9). Hierzu wurden eingehende Raman-spektroskopische Untersuchungen durchgeführt, um die Stabilität der Hydride, d.h. deren elektronische Struktur und die dynamischen Eigenschaften des Pseudoatoms $[BH_4]$ – inklusive Substitution von Wasserstoff mit Deuterium (D) – zu untersuchen. Es wurden sehr gute Übereinstimmungen zwischen experimentellen und berechneten Strukturen in der Tief- und Hochtemperaturphase von $LiBD_4$ gefunden, woraus insbesondere die energetischen Rotationszustände des Ions $[BH_4]^-$ bestimmt werden können. Die Wasserstoffdiffusion im Gitter wird im WP3 mit Hilfe inkohärenter quasielastischer Neutronstreuung untersucht und ergänzt mit theoretischen Modellen aus dem WP5. Die experimentellen Arbeiten erfolgen an der kontinuierlichen Schweizer Spallationsquelle am PSI. Es konnte gezeigt werden, dass $NaAlH_4$ sich durch Bildung von AlH_3 Fehlstellen zersetzt, und dass $LiBH_4$ sehr ähnliche Desorptionsmechanismen besitzt. Dies birgt das Potenzial, dass eine effiziente Dotierung gefunden werden könnte, was ein wichtiger Durchbruch für die Wasserstoff-Speicherung bedeuten würde. Untersuchungsgegenstand im WP4 sind ferner die elektronischen Vibrationseigenschaften und die angeregten Zustände der komplexen Hydride $NaAlH_4$ und $LiBH_4$. Hierzu wird international zusammen gearbeitet: Die notwendigen inelastischen Neutronenstreuexperimente (INS), welche ein interessantes dynamisches Verhalten des $[BH_4]$-Anions zeigen, werden an der Isis-Infrastruktur des Rutherford Appleton Laboratory (UK) durchgeführt, die Raman-Streuexperimente an der Technischen Universität Braunschweig. Um die kompletten optischen Eigenschaften von Infrarot bis Ultraviolett zu untersuchen, wurde zusammen mit der Universität Amsterdam ein Glasfaserspektrometer entwickelt und erste Resultate generiert. Diese Arbeiten bilden den anerkannten Schweizer Beitrag zum IEA-HIA Task-22, Projekt *Fundamental and Applied Hydrogen Storage Materials Development*. Offen ist zurzeit, ob und wie eine Vernetzung und Kollaboration mit den langjährig erarbeiteten Metallhydrid-Grundlagen-



Figur 9: Spektren von Lithium-Boronat-Verbindungen ($LiBH_4$) als Wasserstoffspeichermaterial für Temperaturen um den Phasenübergang von 110 °C. (Quelle: EMPA [19])

Kompetenzen an der Universität Genf zur Erreichung von maximaler Qualität und kritischer Masse realisiert werden kann.

Komplexe Metallhydride wie $LiBH_4$ sind hoch reaktive Materialien und daher eine potenzielle Gefahrenquelle. Sicherheitsrelevante Fragestellungen zur Desorptionsprodukte und zur Oberflächenreaktivität sind daher die Themen des BFE-Projekts *Relevant Physical Aspects of Hydrides for System Integration and Safety (Safesyst) [20],* welches an der EMPA durchgeführt wird. Im Berichtsjahr wurden nach längerem Um- und Ausbau die experimentellen Analysetechniken in Betrieb genommen und erste Messungen durchgeführt. Durch die Thermodesorptionsspektroskopie konnte der Einfluss der Exposition von Alkaliborohydriden mit O_2 und H_2O sowohl auf die Desorptionstemperatur als auch auf die Desorptionsprodukte untersucht werden. Dabei wurde festgestellt, dass die Dosierung mit O_2 sowohl zu einer leichten Herabsetzung der Desorptionstemperatur als auch zu einer Reduktion der ungewünschten Diboran-Emissionen führt.

Mit dem eigens dafür aufgebauten Esca-Oberflächenanalysensystem kann dieser Effekt nun eingehender auf die zugrunde liegenden Mechanismen auf der Oberfläche untersucht werden. Erste Untersuchungen ergaben, dass die Oberflächenreaktivität von $LiBH_4$ mit O_2 wesentlich weniger stark als vermutet ist. Hingegen war die Reaktivität mit H_2O wie erwartet stark. International werden die Ergebnisse in den IEA-HIA Task-19 *Hydrogen Safety* eingebracht.

Unter dem Titel *Hydrogen as a future energy carrier* wurde von Prof. A. Züttel und Prof. L. Schlapbach (EMPA) sowie Dr. A. Borgschulte (ETH) in Zusammenarbeit mit anderen Autoren ein umfassender Überblick über das Wasserstoff-

Basiswissen und die Ansichten bezüglich der potenziellen und künftigen Entwicklungen der Wasserstoffwissenschaften und -technologien in gebundener Buchform publiziert. Das Buch gibt u.a. einen historischen Überblick über die beinahe 200-jährige Geschichte des Wasserstoffs und dessen spezielle Eigenschaften. Der Fokus liegt beim Wasserstoffkreislauf, entsprechend werden Wasserstoffproduktion, die -speicherung und die Umwandlung von Wasserstoff in Strom, Kraft und Wärme detailliert behandelt. Zudem sind Kapitel über funktionalisierte Materialien und neuste Anwendungen enthalten [21].

Nationale Zusammenarbeit

Die nationale Zusammenarbeit von Projektnehmern konnte auch im Berichtsjahr 2008 innerhalb des Programms Brennstoffzellen und Wasserstoff weiter ausgedehnt und intensiviert werden. Nachfolgende Arbeitsnetzwerke bestehen bereits oder befinden sich momentan in Diskussion:

Wasserstoff-Produktion

- Photoelektrochemische Wasserspaltung mit Sonnenlicht: PEChouse;
- Hochtemperatur-Elektrolyse mittels Solarwärme, Geothermie oder Überschusswärme: HTE-CH (geplant).

Effiziente Umwandlung

- Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen: PEF-CH;
- Feststoff-Oxid-Brennstoffzellen: SOF-CH.

Verlustarme Speicherung

- Feststoffspeicher-Metallhydride: STOR-CH (geplant).

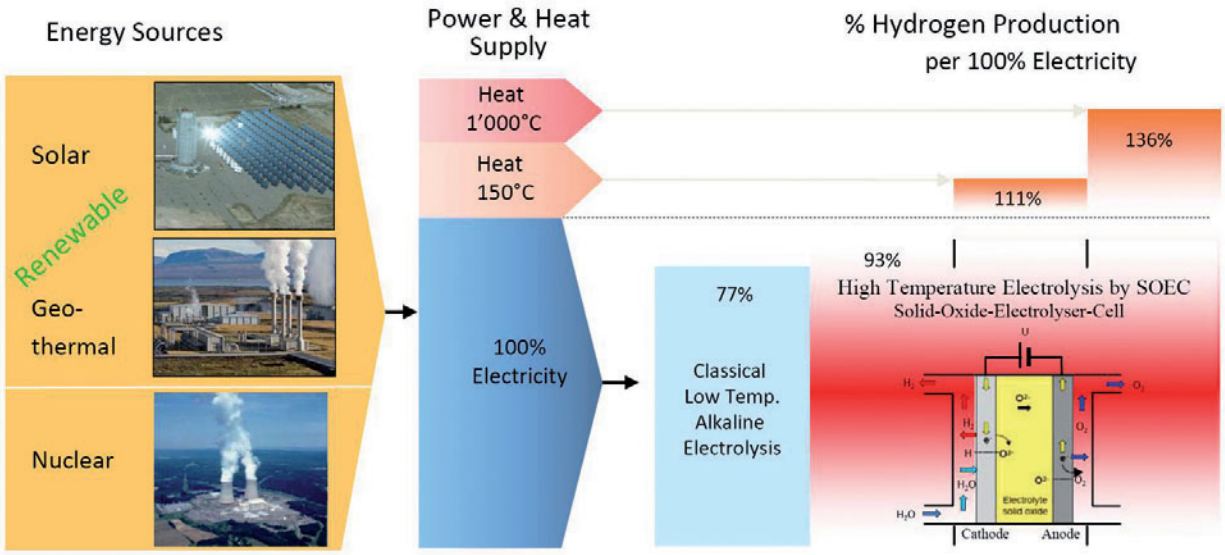
Hydropole www.hydropole.ch ist die nationale Wasserstoffvereinigung, in welcher die meisten Schweizer Akteure im Wasserstoff- wie auch im PEFC-Bereich aktiv beteiligt sind. Im Berichtsjahr erfolgten wieder diverse Vernetzungsaktivitäten von Hydropole. Dank der Initiative der EMPA wurde eine Neuauflage des *Hydrogen Reports Switzerland 08/09* lanciert, bei welchem die Wasserstoff-Forschungsaktivitäten der Schweiz speziell vorgestellt werden [22]. Hydropole war als Vertretung der Schweiz zudem bei internationalen Anlässen wie der Fuel Cell Expo in Tokyo (Februar 2008) sowie der World Hydrogen Energy Conference and Fair in Brisbane (Juni 2008) mit verschiedenen Exponaten präsent.

Ebenfalls unter der Leitung der EMPA fand im Januar 2008 in Braunwald das *2nd International Symposium Hydrogen & Energy* statt (www.empa.ch/h2e).

Im Bereich der PEC-Wasserspaltung verfügt die Schweiz dank der Initiative und der tatkräftigen Unterstützung des BFE und nicht zuletzt dank der Vorbereitungsarbeiten im abgeschlossenen Projekt *PECNet: Aufbau eines CH Kompetenznetzwerkes für die solare Wasserspaltung mittels hybrider PV-PEC Zellen* [23] über eine national und international gut vernetzte, koordinierte und aktive institutionelle Forschungslandschaft. *PECnet* erreichte, dass relevantes Wissen für die nationalen und internationalen Fortsetzungsaktivitäten erhalten, ein nationaler PEC-Forschungsplan entwickelt und ein Schweizer PEC Kompetenz- und Forschungszentrum namens *PEChouse* (http://pechouse.epfl.ch) an der EPFL etabliert werden konnte. Projektfinanzierung und Forschungszusammenarbeiten konnten durch zusätzliche nationale (SNF), europäische (EU-FP7, Marie Curie) und internationale Projekte des Hydrogen Implementing Agreements der Internationalen Energie Agentur (IEA-HIA, Annex 26) signifikant gesteigert werden.

Als weitere Ausbauarbeit wurde in der Folge von PEChouse ein nationales Meeting *SwissPEC* organisiert, aus dem letztlich die Kollaborationen mit der EMPA und der Universität Basel resultierten.

Unter dem Acronym *HTE-CH: High-Temperature Electrolysis* hatte sich ein Schweizer Konsortium, bestehend aus Forschern von EMPA, EPFL, ETHZ, Hexis AG, HTceramix SA, Insultech AG und PSI gebildet mit dem Ziel, die Technologie der Hochtemperatur-Dampfelektrolyse (HotElly) weiterzuentwickeln (Figur 10). Die auf dem Konzept der Solid-Oxide-Electrolyser-Cell (SOEC) basierte Hochtemperatur-Wasser-Elektrolyse kann zur effizienten Wasserstoffproduktion aus Strom unter gleichzeitiger Nutzung von Überschusswärme zwischen 150 °C und 1'000 °C genutzt werden. Kombiniert mit der Umkehrreaktion als SOFC liesse sich in flacheren Regionen, wo keine Pumpspeicherkraftwerke möglich sind, mit überschüssiger Wärme und Strom eine effiziente Energiespeicherung realisieren. Ein entsprechendes Projekt *Swiss initiative of high temperature electrolysis for hydrogen production* wurde im dritten Call des CCEM des PSI lanciert. Eine viel versprechende Basis hierzu waren die neusten Erkenntnisse aus dem EU-Projekt *Hi2H2* (www.hi2h2.com). Das Thema SOEC wird im IEA-HIA Task-25 *High temperature hydrogen production process* international bearbeitet und in den



Figur 10: Hochtemperatur-Elektrolyse: Effiziente Wasserstoffproduktion aus Strom unter künftiger Ausnutzung von erneuerbaren Wärmequellen zwischen 150 und 1'000 °C. Ein HTE-CH-Netzwerk mit verschiedenen Schweizer Akteuren ist geplant. (Quelle: EMPA)

am Task beteiligten Ländern DE, FR, US, JP und KR spezifisch gefördert. Gegen Ende 2008 wurde ein erster Antrag zur Ko-Finanzierung durch das CCEM zurückgewiesen.

Im Bereich der Wasserstoffspeicherung sind nach wie vor Konzept-Diskussionen im Gange um die Schweizer Kompetenzen in einem kleinen Netzwerk (STOR-CH) zusammenzubringen. Die Hauptakteure im Bereich Metallhydride arbeiten an der Universität Genf und der EMPA, unterstützt durch Messkompetenzen am PSI.

Eine wie bereits im Jahre 2007 erfolgreich durchgeführte, nationale BFE-Tagung der Programme Brennstoffzellen und Wasserstoff findet voraussichtlich Ende 2009 wieder statt.

Internationale Zusammenarbeit

Die Schweiz beteiligt sich seit 1990 aktiv am **Implementing Agreement (IA) Advanced Fuel Cells AFC** (www.ieafuelcell.com) der Internationalen Energie Agentur (IEA). Das Implementing Agreement beinhaltet sechs verschiedene Tasks, welche technologische und anwendungsspezifische Themen in den Bereichen Polymer Fuel Cells (PEFC), Solid Oxide Fuel Cells (SOFC) und Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC) abdecken. Momentan sind 19 Länder an diesem IA beteiligt.

Neben der Vertretung der Schweiz im Executive Committee des IEA-AFC durch das BFE beteiligt sich die Schweiz aktiv in Task-18 *Solid Oxide Fuel Cells* [24], vertreten durch die Firma HTceramix (Yverdon), sowie im Task-19 *Fuel Cells for Stationary Applications* [25], vertreten durch Thoma & Renz (Basel). In Task-19 leitet die Schweiz den Subtask-2 *Market Outlook*. Im Berichtsjahr ging die fünfjährige Phase des AFC-IA zu Ende; es soll für weitere fünf Jahre durch das Governing Board der IEA (CERT) bewilligt werden.

Der Task-18 wurde im Berichtsjahr abgeschlossen [24]. Im Juni 2008 wurde das Meeting von Task-18 in der Schweiz durchgeführt in Verbindung mit dem *European Full Cell Forum* in Luzern. Die Firma HTceramix SA hat in den letzten vier Jahren die Schweizer SOFC-Akteure in diesem Task vertreten. Der besondere Wert dieser Plattform liegt darin, dass sie die einzige Möglichkeit für einen wirklich globalen Informationsaustausch über technische Entwicklungen im SOFC-Bereich bietet. Solche Informationen sind insbesondere wichtig im Zusammenhang mit neuen koordinierten Forschungsprojekten im europäischen Raum wie die Joint Technology Initiative (JTI) für Wasserstoff und Brennstoffzellen. Im Vergleich zu Teilnahmen bei öffentlichen Konferenzen fällt es insbesondere am Task-18 teilnehmenden börsenkotierten Firmen leichter, innerhalb dieses eher abgeschlossenen Rahmens Informationen über Entwicklungsfortschritte auszutauschen. Der Task soll in der neuen Phase des IA fortgeführt werden.

Der Fokus im Task-19 *Fuel Cells for Stationary Applications* [25], betrifft die Entwicklung und Implementiereung von Brennstoffzellen für die stationäre Energieversorgung. Die in den möglichen Einsatzgebieten für Brennstoffzellen gestellten Anforderungen wie Kundenbedürfnisse, technische und

gesetzliche Rahmenbedingungen, Nachfrage- und Angebotssituation sowie die Konkurrenzsysteme werden in diesem Projekt untersucht. Daraus werden geeignete Märkte für Brennstoffzellen und dafür relevante Marktleistungen und Distributionsformen abgeleitet. Neben den technischen und wirtschaftlichen Herausforderungen, welche die Brennstoffzellen im Vergleich zu den Konkurrenzsystemen zu meistern haben, stellen die Energiemärkte grössere Hindernisse dar. Die Rahmenbedingungen in den Märkten für Strom- und für Wärmeerzeugung sind in den meisten Ländern grundlegend verschieden. Der Strommarkt wird in der Regel durch ein Oligopol weniger Anbieter mit grossen Produktionseinheiten dominiert, wogegen der Wärmemarkt stark diversifiziert ist und auch bei kleinsten Leistungen grosse Marktanteile vorliegen. Der Einsatz von Brennstoffzellen als Systeme, die Strom und Wärme produzieren, erfolgt im Spannungsfeld dieser sehr unterschiedlichen Marktvoraussetzungen. Der grosse Ersatz- und Zusatzbedarf an Produktionseinheiten im Strommarkt wird zudem vorwiegend durch Anlagen im Gigawatt-Bereich abgedeckt.

Die internationalen Brennstoffzellenexperten des Task-19 führten 2008 eine SWOT-Analyse durch und leiteten entsprechende und durch Markttrends bestätigte Strategien für die Implementierung stationärer Brennstoffzellen ab. Nur in Japan werden dank staatlich geförderten Projekten in grossen Stückzahlen ergasbetriebene Brennstoffzellen (PEFC) im Leistungsbereich von 1–5 kW eingesetzt. In Europa wird dagegen im untersten Leistungsbereich verstärkt auf die SOFC gesetzt. Bei den grösseren Anlagen (200–1'000 kW) dominieren die MCFC, die immer häufiger mit biogenen Brennstoffen (Klärgas, Biogas) betrieben werden. Ein «Revival» erlebt die Phosphorsäure-Brennstoffzelle PAFC vom US-Hersteller UTC. Von der für 2009 angekündigten neuen Version mit 400 kW elektrischer Leistung wurden bereits über 20 Stück bestellt. Wie in früheren Berichten dargestellt, wurde eine 200-kW-PAFC in einem Nahwärmeverbund in der Schweiz zwischen 2000 bis 2005 bereits erfolgreich pilotiert. Die Entwicklung von SOFC für höhere Leistungen wird weitere Zeit beanspruchen.

Im Berichtsjahr wurden ferner von der Programmleitung Kontakte mit Projektnehmern am PSI aufgenommen, um diese für eine Teilnahme am PEFC Task-16 des IA-AFC zu motivieren. Zur Abklärung der Teilnahme wird ein PSI-Vertreter als Observer am ersten Task-Meeting im Juni 2009 teilnehmen. Danach wird über eine Teilnahme zusammen mit dem BFE entschieden.

Das **Hydrogen Implementing Agreement** der IEA (www.ieahia.org) hat sich als Hauptplattform der internationalen, vorkommerziellen Forschungszusammenarbeit im Bereich Wasserstoff fest etabliert. Die Schweiz beteiligt sich seit 1977 in diesem Implementing Agreement und ist mit entsprechenden Projekten in diversen Tasks aktiv. Neben der Vertretung im Executive Committee durch das BFE forschen Schweizer Akteure in den folgenden Tasks: Task-22 *Fundamental and Applied Hydrogen Storage Materials Development*, vertreten durch die EMPA Dübendorf und die Universität Genf; Task-24 *Wind Energy and Hydrogen Integration*, vertreten durch die Firma IHT; Task-25 *High Temperature Processes for Hydrogen Production*, vertreten durch das PSI; sowie Task-26 (Nachfolge des Task-20) *Advanced Materials for Hydrogen Waterphotolysis*, vertreten durch die EPFL. Das Berichtsjahr zecihnete sich durch den erfolgreichen Abschluss von Task-20 [26] unter der Leitung von Andreas Luzzi (HSR Rapperswil) und der Vorbereitungsarbeiten für den Nachfolge-Task-26 aus.

Das HyCo-Eranet endete im Herbst 2008. Insgesamt ergaben sich aus der Zusammenarbeit in HyCo-Eranet 7 transnationale Calls mit 7 geförderten Projekte (total 6 Mio. €). Weiter entstanden diverse Berichte, so zum Beispiel ein Überblick über die nationalen Programme und eine zusammenfassende Broschüre. Im Rahmen der Joint Technology Initiative (JTI) für Wasserstoff und Brennstoffzellen (FCH) wäre der Plattform HyCo-Eranet in den nächsten Jahren eine wichtige Rolle als Koordinationsstelle zwischen der JTI und den nationalen Programmen zugekommen. Diese Funktion übernimmt nun aber die neu gebildete States Representatives Group der JTI.

Seit April 2008 sind EU-weit auch die Regionen und Gemeinden im Netzwerk HyRaMP Hydrogen Regions and Municipalities Partnership koordiniert (www.hy-ramp.eu). Beim Abgleich mit FCH-JTI und der Koordination von Forschung und Demonstration auf Projektebene leistete das SPF der Fachhochschule für Technik Rapperswil wichtige Koordinationsarbeit. Aktuell sind jedoch keine Schweizer Akteure bei HyRaMP beteiligt.

Basierend auf den Vorarbeiten der Hydrogen and Fuel Cell Platform HFP der EU, und dem in diesem Gremium 2007 ausgearbeiteten Implementation Plan (IP) wurde 2008 von der EU-Kommission (EC) und der Industrie (European Industry Grouping, www.fchindustry-jti.eu) die *Fuel Cell and Hydrogen Joint Technology Initiative* mit einer geplanten Laufzeit bis Ende 2017 lanciert (www.hfpeurope.org/hfp/jti). Unter der Führung europäischer Firmen und der EC, mit Schweizer Beteiligung in der Managment Crew, wurden das JTI-Umsetzungskonzept sowie die Forschungs- und Demonstrationsprogramme erarbeitet. Un-

ter anderem resultierten daraus der Multi-Annual Implementation Plan (MAIP) 2008–2013, in welchem neben den quantifizierten Zielen 2010 und 2015 bis auf Projektebene die Themen mit Beschreibung und Budget ausgearbeitet wurden. Die Schwergewichte von MAIP liegen unter anderem in den folgenden Bereichen:

- Grossdemonstration von einigen 100 Fahrzeugen inklusive Betankungsinfrastruktur;
- Koordinierte Zusammenarbeit für einen europäischen Brennstoffzellenstapel für den Mobilitätsbereich;
- Entwicklung und Demonstration von nachhaltiger Produktion, Speicherung und Verteilungsmethoden von Wasserstoff;
- Demonstrationsprojekte im stationären Bereich;
- Early Market: Demonstration und Verbreitung von «Back-up Power»-Systemen, unterbrechungsfreien Stromversorgungen (USVs) und tragbaren Stromversorgungsprodukten sowie von Industrie-Fahrzeugen mit Fokus auf Material Handling (Gabelstapler);
- Aufbau und Etablierung von vorteilhaften Marktkonditionen (Codes and Standards).

Der MAIP wurde vom Governing Board der FCH-JTI angenommen. Ausgehend vom Konzept des MAIP wurde der Annual Implementation Plan (AIP) 08 abgeleitet. Davon ausgehend wurde im Oktober 2008 von der EC ein erster FCH-JTI Call mit einem Volumen von 28,1 Mio. € lanciert. Von Schweizer Seite beteiligten sich das PSI, die HTA Luzern sowie Akteure aus dem SOF-CH-Netzwerk an entsprechenden Projektkonsortien. Die Evaluation der Anträge findet in der ersten Hälfte 2009 statt. Ein zweiter Call mit ca. 70 Mio. € Funding soll 2009 lanciert werden. Themen werden unter anderem sein: Katalysatoren für die Reformierung von Kohlenwasserstoffen, Gasreinigungsprozesse, Hochtemperaturelektrolyse, feste und flüssige Wasserstoffspeicherung, Wasserstoffinfrastruktur, Demonstration von Brennstoffzellenfahrzeugen und verbesserte PEFC-Komponenten.

Auf Ebene der BFE-Programmleitung war die Schweiz 2008 neben der Mitarbeit in der IEA an diversen Konferenzen, Workshops und Diskussionsrunden beteiligt und hat solche zum Teil auch finanziell unterstützt. Speziell zu erwähnen sind dabei die *Fuel Cell Expo* in Tokyo im Februar 2008, die *World Hydrogen Energy Conference and Fair* in Brisbane im Juni 2008, das internationale *Lucerne Fuel Cell Forum* im Juli 2008, die *FCH-JTI General Stakeholder Assembly* im Oktober 2008 und die Treffen der *FCH-JTI States Representatives Group*.

Die im Jahr 2004 vom BFE ins Leben gerufene Symposiumsreihe *Fuel Cell Research Symposium Modelling and Experimental Validation* wurde auch im Berichtsjahr erfolgreich fortgeführt. Das fünfte Symposium wurde mit Unterstützung des BFE an der ZHAW Winterthur im März 2008 [6, 27] durchgeführt. Ursprünglich nahmen an diesem Workshop vor allem Forscher aus Deutschland und der Schweiz teil, wobei im Berichtsjahr die internationale Beteiligung mit Beiträgen aus zehn verschiedenen Ländern wesentlich stärker war. Bedeutsam ist ebenfalls die aktive Beteiligung von Industrievertretern (General Motors, Bosch, Daimler AG, Siemens, Toyota sowie diverse KMUs). 2009 ist das sechste Symposium vom DLR Stuttgart und der Uni Karlsruhe organisiert und im Frühling 2010 ist geplant, dass das siebte Symposium an der EPFL statt findet.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Brennstoffzellen

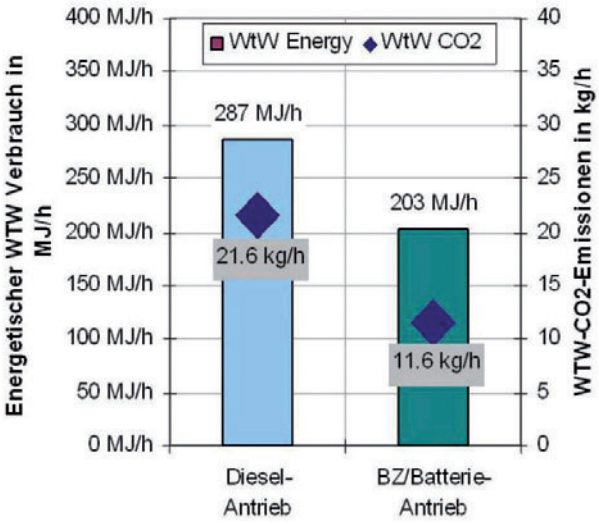
Im SOFC-Bereich hat die Firma Dantherm auf der Basis einer HotBox der Firma HTceramix das Demonstrationsystem *Asterix* für Wärme-Kraft-Koppelung (WKK) aufgebaut und praxisrelevante Leistungseigenschaften im Labor demonstriert (siehe Figur 11 links). Im Jahr 2009 wird angestrebt, ein 500-W-System einem praxis-relevanten, repräsentativen Langzeittest zu unterziehen. Die erforderliche Anzahl Prüfstände ist bei der Mutterfirma SOFCpower in Trento (Italien) im Aufbau.

Im Demonstrationsbereich engagiert sich weiterhin die Firma Hexis AG mit ihrem «Galileo 1000 N»-System sehr stark (siehe Figur 11 rechts). Unter anderem konnte sich Hexis über den deutschen Ableger Hexis GmbH an dem nationalen Innovationsprogramm für Brennstoffzellen und Wasserstoff beteiligen. Hier konnten Galieo-Systeme für praktische Anwendungstests geliefert werden.

Im Demonstrationsbereich konzentriert sich die Brennstoffzellengruppe der BFH in Biel weiter auf die Entwicklung und Demonstration von PEM-Brennstoffzellenstapeln und Brennstoffzellensystemen bis zu einer elektrischen Leistung von 1 kW für Mobilitätsanwendungen (Projekte: Sam I, Sam II (hybrid) und PEM-Scoot). Ein weiteres Demonstrationsprojekt ist Teil des von der KTI unterstützten Projekts für die Weiterentwicklung des IHPoS-Stapels mit einer Anwendung in einer mobilen Minibar der Elvetino AG.



Figur 11: Links: WKK-Demonstrationssystem Asterix der Firma Dantherm auf der Basis eines HTceramix/ SOFCpower-Brennstoffzellenstacks (Quelle: HTceramix [14]). Rechts: WKK-Gerät «Galileo 1000 N» der Firma Hexis AG. (Quelle: Hexis, [13])



Figur 12: Vergleich des energetischen «Well-to-Wheel» (WtW)-Verbrauchs und der WtW-CO_2-Emissionen für ein Kommunalfahrzeug basierend auf konventionellem Dieselantrieb (Verbrennungsmotor) respektive auf Brennstoffzellen-Batterie-Hybridantrieb versorgt mit Wasserstoff aus Erdgas. (Quelle: EMPA, [28])

Im CCEM-Projekt *Hydrogen driven Municipal Vehicle (hy.muve)* [28], welches vom BFE mitunterstützt wird, wird in einem Projektkonsortium bestehend aus der EMPA, dem PSI und den schweizerischen Industriepartnern Bucher Schörling AG, Brusa AG und Messer Schweiz AG ein Brennstoffzellenantrieb für ein Kommunalfahrzeuge entwickelt. Der Antrieb wird anschliessend im Rahmen einer eineinhalbjährigen Praxiserprobung hinsichtlich seines Alterungsverhaltens unter realen Umgebungsbedingungen getestet. Dabei werden die grundsätzliche Eignung für den Einsatz in solchen Fahrzeugen und sozioökonomische Fragestellungen untersucht (siehe Figur 12). Damit kann in der Schweiz ein weiterer Folgeschritt mit Wasserstoffantrieben «vom Labor auf die Strasse» gemacht werden.

An der Luzerner Hochschule für Technik & Architektur (HTA) wurde im BFE-Projekt *Fortsetzung Feldtests USV für GSM-Basisstationen mit BZ* [29] ein Prototyp einer Anlage zur unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) mit Brennstoffzellen entwickelt und in Betrieb genommen. Um das verzögerte Anfahrverhalten der Brennstoffzelle zu überbrücken wurden Superkapazitäten integriert. In einem ersten Projekt wurde das Brennstoffzellen-System an eine reale Telekommunikationsbasisstation (GSM-Antenne der Swisscom) angeschlossen und im Feldtest für den Zeitraum eines Jahres erprobt. Aufgrund der guten Ergebnisse und um Erfahrungen zum Langzeitverhalten der Brennstoffzelle zu gewinnen wird dieser Feldtest im aktuellen Projekt bis Mitte 2009 fortgesetzt. Der Feldtest umfasst monatliche Stromausfallsimulationen bei einer realen Antennenlast von ca. 2,4 kW sowie Tests mit externer Last bis 8,5 kW. Die Ergebnisse der bisher rund 300 Stromausfallsimulationen mit einer Gesamtlaufzeit der Brennstoffzelle von ca. 75 Stunden sind positiv zu bewerten. Die Brennstoffzelle startete 100 % zuverlässig, wobei eine leichte Degradation der Brennstoffzelle festgestellt wurde. Das Projekt findet in Zusammenarbeit mit den Industriepartnern Swisscom (Schweiz) AG als Anwender von USV-Anlagen im Telekommunikationsbereich und APC Industrial Systems als Hersteller von USV-Anlagen statt.

In der *Konzeptstudie für eine Energieversorgung mobile Basisstation Polycom mit BZ* [30] wurde der Einsatz eines kommerziell erhältlichen Brennstoffzellensystems für die Energieversorgung einer mobilen Basisstation für das Funknetz Polycom evaluiert. Ziel war es, die Entscheidungsgrundlage für den Bau zu erarbeiten. Hierzu wurde das System hinsichtlich Systemeignung, Systemreife und Kosten beurteilt, mögliche Brennstoffversorgungen evaluiert, und geprüft, wo der Energiebedarf des Gesamtsystems optimierbar ist.

Wasserstoff

Demonstrationsprojekte in den Bereichen Wasserstoff und PEM-Brennstoffzellen sind aus Gründen hoher Investitionskosten und limitierter Verfügbarkeit von Wasserstoff generell schwierig zu realisieren.

Ein ursprünglich von der Universität Fribourg im Zusammenhang mit einem Pistenfahrzeug-Pilot-Projekt der «Swiss Alps 3000» entwickeltes Metallhydrid-Wasserstoffspeichersystem steht nach wie vor im praktischen Einsatz. Aktuell ist dieses Speichersystem in ein mit Wasserstoff betriebe-

nes Touristenboot in der Stadt Birmingham im Einsatz.

Ein tragender Baustein für die künftige Umsetzung von Wasserstoffproduktionsprojekten ist die Verfügbarkeit von entsprechenden Elektolyseuren. Im industriebasierten KTI-Projekt *Neue Membranen für alkalische Elektrolyseure (NMAE2)* [31] von IHT und EMPA werden Ersatzmaterialien für die nur noch bis Ende 2008 (!) erlaubten Asbestdiaphragmen für alkalische Druckelektrolyseure erforscht, neue Membranen aufgebaut und ihre Einsatzfähigkeit geprüft.

Im Projekt *Hydrogène dans les ports (H2port)* [32] der HES-SO in Yverdon wird der Einbau von Brennstoffzellensystemen in kleinere Ausflugsboote untersucht. Ziel des Projektes ist die richtige Dimensionierung von Wasserstofftankstellen und von H_2-Tanks in den Booten. Hierzu wurde ein Rechenprogramm entwickelt, welches die Dimensionierung einer Gesamtanlage betreffend Kosten einer Wasserstofftankfüllung, Grösse des notwendigen Elektrolyseurs, Reichweite des Bootes und weiteren wichtigen Parametern erlaubt. Zum Thema Öko-Mobilität auf Gewässern wurde ein Fragebogen an 110 Instanzen (Industrien, Vereine, Gemeinden, Bootsbauer) versendet. Die Hauptaussagen der retournierten Fragebogen waren: Eine Mehrheit ist sich der Gewässerverschmutzung durch Motorboote bewusst und kennt sowohl elektrisch betriebene Boote als auch die Brennstoffzellentechnologie. Auch die Vorteile der elektrischen Navigation (keine Abgase, weniger Lärm) wurden als sehr positiv bewertet und viele wären auch bereit, ein Brennstoffzellenboot zu kaufen. Da der Kaufpreis jedoch mangels Marktreife und kommerziell erhältlicher Produkten weitestgehend unbekannt ist, hat letztere Aussage nur eine geringe Aussagekraft.

Neben den oben erwähnten Demonstrationsprojekten im Bereich PEM-Brennstoffzellen, welche auch für die Wasserstofftechnologie relevant sind, werden momentan verschiedene weitere Demonstrationsprojekte angedacht, wobei diese zum Teil nur geringe Realisierungschancen aufweisen. Aufgrund der Fülle von Ideen ist geplant, ein BFE-Pilot- und Demonstrationsprojekt im Bereich der gesamten Energiekette Wasserstoff gezielt zu planen und zu realisieren, in Zusammenarbeit mit verschiedenen Schweizer Akteuren.

Bewertung 2008 und Ausblick 2009

Der Anfang des Berichtsjahr 2008 war auf Programmebene geprägt durch die Vorstellung des Detailkonzeptes 2008-2011 vor der Commission de la Recherche (CORE) sowie deren positives Evaluierungresultat. Für die Themen Wasserstoff und Brennstoffzellen heisst das, dass es nach wie vor eine klare, offizielle Unterstützung gibt, welche im Fall von zukünftigen, generellen Budgetaufstockungen auch finanziell ausgebaut würde.

Von Analyse und Vorgaben des Detailkonzeptes ausgehend, versuchte die Leitung des BFE Forschungsprogramms Brennstoffzellen und Wasserstoff im Berichtsjahr 2008 folgende Schwachpunkte weiter zu verbessern: (a) geringe Beteiligung der Privatwirtschaft, (b) mangelnde Umsetzung in Prototypen, (c) Information und (d) Akquisition von zusätzlichen Finanzierungspartnern. Rückblickend kann festgestellt werden, dass diesbezüglich dank der Unterstützung des BFE Programms und insbesondere dank der qualitativ hochstehenden Arbeit der Projektnehmer selbst signifikante Fortschritte errreicht werden konnten. Konkrete Ergebnisse sind:

a. Privatwirtschaft: Start der Brennstoffzellen-Entwicklungsprojekte PSI/Belenos sowie EMPA/BFH/Ceka/elvetino; Fortsetzung der USV-Brennstoffzellen-Demo-projekte HTA/Swisscom/APC; Aufbau des industrienahen Brennstoffzellen-Testlabors BFH/ PSI;

b. Prototypen: Ausbau von Hexis AG Richtung Deutschland; gemeinsamer Aufbau des WKK Demonstrator-Systems Asterix von HTceramix und Dantherm; Machbarkeit des BFH Ministapels; Ausbau des hy.muve -Projektes durch Unterstützung des BFE-P&D-Programms;

c. Information: Guter Austausch und verstärkte Kommunikation mit und unter den Projektnehmern dank Reviews, Projekt-Set-up Meetings und Vertragspartnerbesuche seitens der Programm- und Bereichsleitung; Beteiligung in IEA Forschungsprogrammen, starke Beteiligung an nationalen und internationalen Konferenzen und Ausstellungen (CH, EU, JP, AU); Mitarbeit bei EU-FCH-JTI und ERANet; Allgemein intensivierter internationaler Informationsfluss in und durch die Schweiz; und

d. Akquisition: Erweiterung der finanziellen Unterstützung von PEChouse (EU-NanoPEC); verschiedenste Eingaben in EU-FCH-JTI durch Industrie und Forschung; verstärkter Miteinbezug verschiedenster Förderstellen (SNF, KTI, CCEM, Swisselctric Research.

Trotz einer ansehnlichen Liste von Erfolgen sind für 2008 auch einige Misserfolge zu berichten.

So wurden beispielsweise einige EU-FCH-JTI Anträge mit Schweizer Beteiligung sowie Projekte beim CCEM und der KTI aus verschiedenen Gründen abgewiesen. Es muss auch festgestellt werden, dass die industrielle Basis in der Schweiz nach wie vor sehr dünn ist und einzelne Themen wie Wasserstoffspeicherung noch unterkritische Ressourcen und optimierbares Zusammenarbeitspotenzial haben.

Als Ausblick für das Jahr 2009 seien als wichtigste Ziele genannt:

- Fortlaufende Unterstützung laufender und viel versprechende Kernprojekte sowie der tragenden Projektnehmer-Konsortien;
- Ausrichtung der Forschungsaktivitäten weiterhin auf die Anforderungen der Industrie;
- Unterstützung von Grundlagenprojekten (Dissertationen) als Wissens- und Innovations-Generatoren und als Sicherung von künftigen Kompetenzträgern (Ausbildung);
- Verstärkte Zusatzfinanzierungen durch öffentliche, private und institutionelle Förderer sowie durch EU-Projekte;
- Fortführung und Ausbau der P&D Projektaktivitäten.

Auf dieser Basis soll weiter die Priorisierung und Realisierung von Teilen aus folgendem EU-nahem Zielkatalog hingearbeitet werden: Beteiligung an Grossdemonstrationen mit Brennstoffzellen-Fahrzeugen und Betankungs-Infrastruktur, Zusammenarbeit für einen Europäischen Automotive- Brennstoffzellenstapel, Entwicklung und Demonstration von nachhaltiger Wasserstoff Produktion, Speicherung und Verteilung, Demonstrationsprojekte im stationären Bereich, sowie die Einführung der Technologie in Pilotmärkte.

International betrachtet war das Jahr 2008 in Europa geprägt durch den Start der Joint Technology Initiative für Brennstoffzellen und Wasserstoff, ein gemeinsames Programm der Europäischen Union zusammen mit der Industrie zur Markteinführung der Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnologie in den kommenden Jahren. Ähnlich grosse Programme existieren bereits in den USA und Japan. Weltweit engagiert sich die Industrie stark insbesondere im Bereich Mobilitätsanwendungen der Brennstoffzellentechnologie. So hat Honda 2008 weltweit zum ersten Mal die Serienproduktion eines Brennstoffzellen-Fahrzeugs (FCX Clarity) aufgenommen. Neben Honda sind es insbesondere die Autohersteller Opel / GM und Daimler, welche sich in diesem Bereich stark machen. Es besteht hier ein allgemeiner Konsens, dass sich für elektrisch betriebene Fahrzeuge Batterien und Brennstoffzellen langfristig ergänzen werden. Reine Batteriefahrzeuge wären theoretisch die effizienteste Lösung, die sich jedoch nur für einen Teil der gesamten Fahrzeugflotte realisieren lässt. Die Anwendung von Wasserstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen hat langfristig gute Perspektiven, wenn alle technischen Parameter, Infrastrukturaspekte wie auch Kundenanforderungen an die Leistungsparameter mitberücksichtigt werden.

Auf Seite Infrastruktur wurden im Jahr 2008 weltweit 15 neue Wasserstoff-Tankstellen in Betrieb genommen. Die Gesamtzahl stieg damit auf 175 Tankstellen, wobei weitere 108 Tankstellen sich in Planung befinden. In Europa gibt es verschiedene Bestrebungen, transnationale Autobahnen mit einem Wasserstoff-Tankstellennetz auszurüsten.

Zusammenfassend ist global gesehen im Moment viel in Bewegung im Bereich Brennstoffzellen-/ Wasserstofftechnologie. Die Schweiz kann auf Grund der hervorragenden Kompetenzen hierzulande weiter einen Beitrag leisten, sowohl im Bereich Forschung wie auch vermehrt noch im Bereich der Umsetzung in Pilot- und Demonstrationsprojekten.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2008 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden
(siehe www.recherche-energetique.ch).

[1] Bundesamt für Energie, «Energieforschungsprogramme Brennstoffzellen und Wasserstoff für die Jahre 2008 bis 2011», Januar 2008, Download: www.energieforschung.ch.

[2] Bundesamt für Energie, «Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 bis 2011», April 2007, Download: www.energieforschung.ch.

[3] Scherer G. (guenther.scherer@psi.ch), PSI, Villigen: «Protonen-Leitende Polymermembranen für Brennstoff- und Elektrolysezellen», (JB).

[4] Scherer G. et. al. (guenther.scherer@psi.ch) , PSI, Villigen: «Lebensdauer Limitierungen von Brennstoffzellen-Membranen: Mechanismen, Methoden und Innovationen», (JB).

[5] Gubler L. (lorenz.gubler@psi.ch) , PSI, Villigen: «Enhancing PEFC Durability and Reliability under Application-Relevant Conditions» (go.PEF-CH), (JB).

[6] Büchi F. (felix.buechi@psi.ch), PSI, Villigen: «Model Based Investigation of PEM Fuel Cell Performance with focus on Porous Layer Properties» (Cal.PEF-CH), (JB).

[7] Thiele D. und Züttel A. (andreas.zuettel@EMPA.ch), EMPA, Dübendorf: «New Highly Active Oxygen Reduction Electrode for PEM Fuel Cell and Zn/Air Battery Application» (NORA), (SB).

[8] Höckel M. (hkm1@bfh.ch) , Hochschule für Technik und Informatik, Biel: «Erweiterung des BFH Testlabors für PEM Brennstoffzellen», (SB).

[9] Höckel M. (hkm1@bfh.ch) , Hochschule für Technik und Informatik, Biel: «IHPoS: Independent-Hydrogen-Power-System», Nr 7700.1 EPRP-IW.

[10] Fumey B. (benjamin_fumey@kastanet.org), Privat, Steffisburg: «Machbarkeitsstudie für ein PEFC-mini-Stapel im Leistungsbereich bis 100 W» (HYP), (SB).

[11] Sfeir J. (josef.sfeir@hexis.com), HEXIS AG, Winterthur: «Enhancing the Lifetime of SOFC Stacks for Combined Heat and Power Applications» (SOF-CH), (SB).

[12] Sfeir J. (josef.sfeir@hexis.com), HEXIS AG, Winterthur: «Accelerated Testing of SOFC-Components» (AccelenT), (JB).

[13] Sfeir J. (josef.sfeir@hexis.com), HEXIS AG, Winterthur: «Simulationsunterstützung für die Weiterentwicklung von Stacks mit geringerer thermomechanischer Belastung», (SB).

[14] Hoffmann J. (jan.hoffmann@htceramix.ch) , HTceramix SA, Yverdon: «System Reliability of a Product-Near CHP System Operating with a SOFC HoTbox™», (SB). Dieses Projekt ist einer der Schweizer Beiträge zum EU-Projekt REAL-SOFC.

[15] Sivula K. und Graetzel M. (Michael_graetzel@icp.dc.epfl.ch), EPFL, Lausanne: «PEChouse: A Competence Centre Devoted to the Photoelectochemical Splitting of Water and Production of Hydrogen», http://pechouse.epfl, (JB).

[16] Constable E. (Edwin.Constable@unibas.ch), Universität, Basel: «Nefios-Hydro: Nanocrystalline Electrodes Functionalized with Light Sensitized [2Fe2S] Iron-Sulfur Clusters for Hydrogen Production» (Nefios), (SB).

[17] Braun A. et al. (arthur.braun@EMPA.ch), EMPA, Dübendorf: «Fundamental Aspects of Photocatalysis and Photoelectrochemistry / Basic Research Instrumentation for Functional Characterization», (JB Kurzfassung).

[18] Braun A. et al. (arthur.braun@EMPA.ch), EMPA, Dübendorf: «Synthesis and Assessment of Mixed Metal-Oxide Nanoparticles and Films for Solar Photo-Electrochemical Hydrogen Fuel Production», (JB Kurzfassung).

[19] Züttel A. et al. (andreas.zuettel@EMPA.ch), EMPA, Dübendorf: «Hydrogen Storage in New Complex Hydrides» (COMPHY), (JB).

[20] Züttel A. et al. (andreas.zuettel@EMPA.ch) , EMPA, Dübendorf: «Relevant Physical Aspects of Hydrides for System Integration and Safety» (SAFSYS), (JB).

[21] Züttel A., Schlappbach L., et al., «Hydrogen as a Future Energy Carrier», Wiley-VCH, 2008, ISBN: 978-3-527-30817-0.

[22] Züttel A. et al., (andreas.zuettel@EMPA.ch), EMPA, Dübendorf: «Hydrogen Report Switzerland 08/09».

[23] Spirig M. und Luzzi A. (info@PECNet.org), SPF-HSR, Rapperswil: «PECNet - Aufbau eines Schweizer Kompetenznetzwerkes für die solare Wasserspaltung mittels hybrider PV-PEC Zellen», (SB).

[24] Bucheli O. (olivier.bucheli@htceramix.ch), HTceramix SA, Yverdon: «Participation of Switzerland in IEA Implementing Agreement, Annex XVIII (SOFC)» (SB).

[25] Renz S. (renz.btr@swissonline.ch), THOMA+RENZ, Basel: «Market Outlook for Stationary Fuel Cells», (SB).

[26] Luzzi A. (andreas@luzzi.ch), «Hydrogen from Water-Photolysis», Final Report IEA-HIA Task-20, www.ieahia.org.

[27] Schumacher J. et al., ZHAW, Winterthur: «5th Fuel Cell Research Symposium on Modelling and Experimental Validation», Proceedings verfügbar [ModSym], 11.-12. März 2008, www.ccp.zhw.ch.

[28] Bach C. (Christian.Bach@EMPA.ch), EMPA, Dübendorf: «Kommunales Brennstoffzellenfahrzeug, CCEM Projekt» (HyMuve), 2008.

[29] Trachte U. (utrachte@hta.fhz.ch), HTA, Luzern: «Fortsetzung Feldtests USV für GSM-Basisstationen mit BZ», (JB).

[30] Trachte U. (utrachte@hta.fhz.ch), HTA, Luzern: «Konzeptstudie für eine Energieversorgung mobile Basisstation Polycom», (SB).

[31] Züttel A. et al. (andreas.zuettel@EMPA.ch) , EMPA, Dübendorf: «Neue Membranen für alkalische Elektrolyseure», KTI Projekt 8574.

[32] Affolter JF. (jean-francois.affolter@hieg-vd.ch), HES-SO, Yverdon: «Hydrogène dans les Ports» (H2port), (SB).

Impressum

Juni 2009
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
Druck: Ackermanndruck AG, Bern-Liebefeld
Bezug der Publikation: www.energieforschung.ch

Programm- und Bereichsleiter
Dr. Stefan Oberholzer
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
stefan.oberholzer@bfe.admin.ch

Rapport de synthèse 2008 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2008 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Verfahrenstechnik

Martin Pulfer

martin.pulfer@bfe.admin.ch



Bei der mechanischen Entwässerung von Gras anfallendes Presswasser, eingesetzt als Düngemittel, steigert den Ertrag der Agrarflächen. Die mechanische Entwässerung senkt aber insbesondere den Energiebedarf bei der nachfolgenden Trocknung und Herstellung der Futtermittelpellets.

Programmschwerpunkte

Ausgangslage

In der Schweiz werden, wie in anderen stark industrialisierten Ländern, Verfahrens- und Fertigungstechnikintensiv eingesetzt. Entsprechend hoch ist der Anteil einerseits an der Wertschöpfung, andererseits aber auch am Energieverbrauch und damit am CO_2-Ausstoss: Prozesse sind in der Schweiz für etwa 15 % des Endenergieverbrauches und für 43 % des auf Brenn- und Treibstoff basierten CO_2-Ausstosses verantwortlich. Energetische Aspekte wurden bisher oft nur zweitrangig beachtet. Es wird geschätzt, dass mittels gezielter Optimierung des Ressourceneinsatzes ein beträchtliches Sparpotenzial von 30–50 % realisierbar ist.

Ab dem 1. Januar 2008 gilt in der Schweiz eine CO_2-Abgabe auf fossilen Brennstoffen von 3 Rp. pro Liter Heizöläquivalent. Dies hat über 1 500 energieintensive Unternehmen bewogen, mit dem Bund eine Reduktionsverpflichtung einzugehen und sich dadurch von der Abgabe zu befreien. Die beschlossene Reduktion um 3,8 Mio. t CO_2 entspricht einer Verminderung von 35 % des gesamten CO_2-Ausstosses der Wirtschaft. Die geplante Reduktionsleistung der Unternehmen ist sogar noch grösser, wird jedoch durch Wirtschaftswachstum teilweise wieder egalisiert.

Ziel des Forschungsprogramms Verfahrenstechnik des BFE ist es, die Industrie bei ihren Bemühungen zur Reduktion des Primärenergieverbrauchs und des CO_2-Ausstosses zu unterstützen und wo nötig koordinierend zu unterstützen. Wichtig dabei sind die gezielte Erforschung von neuen Technologien, die Integration von bestehenden Verfahren und die Initiierung von Realisierungsmassnahmen. Die dazu verfügbaren Ressourcen des Forschungsprogramms Verfahrenstechnik werden hierzu subsidiär zu den Möglichkeiten der Privatindustrie und den übrigen Mitteln der öffentlichen Hand eingesetzt. Von 2003 bis 2005 betrugen die gesamten öffentlichen Investitionen pro Jahr rund 3,7 Mio. Franken. Gemäss dem Konzept der Energieforschung des Bundes 2008–2011 wird eine Erhöhung der öffentlichen Mittel auf 5 Mio. Franken für die Forschung, sowie auf 1 Mio. Franken für Pilot- und Demonstrationsprojekte (P+D-Projekte) angestrebt.

Stand der Technik

Industrielle Prozesse – d.h. Verfahrens- und Fertigungstechnik – sind eine vielschichtige, industriell etablierte Anwendungs- und Umsetzungsdisziplin. In der Praxis handelt es sich um Anwendung und Kombination reifer Grundverfahren, welche in entsprechenden Reaktoren und Apparaturen nutzbar gemacht und professionell zu kleinen bis sehr grossen Anlagen zusammen gebaut werden. Aufgrund von neuen Technologien, Materialien, verbesserten Verfahren und Maschinen sowie sich stetig ändernden Marktbedürfnissen bergen die angewendeten Techniken immer wieder neue Optimierungsmöglichkeiten. Zusammen mit den bisher eher vernachlässigten Energieaspekten ergibt dies ein hohes Potenzial für energetische Verbesserungen und somit viel Forschungs- und Umsetzungsbedarf. Für eine künftige nachhaltig und strategisch fokussierte Themenwahl und Lösungssuche ist dabei eine gesamtheitliche, systematische Betrachtungsweise unter Beachtung der einzelnen Grundverfahren, deren Kombination zu Verfahrensstufen und des gesamten Prozesses sowie auch der Energieintensität der Ausgangs-, End- und Nebenprodukte erforderlich.

Potenziale

Gemäss Schweizer Energiestatistik des Bundesamt für Statistik (BFS) für das Jahr 2006 verbraucht die Schweizer Industrie 175 PJ, was 20 % des gesamten Schweizerischen Endenergieverbrauchs entspricht. Davon werden 136 PJ von den industriellen Prozessen verbraucht. Prozesswärme, Antriebe, Prozessenergie sowie Raumwärme sind dabei die Hauptverbrauchergruppen. Das auf 30–50 % geschätzte Sparpotenzial ergibt 40–65 PJ, respektive 4–8 % Einsparung des gesamten Schweizerischen Endenergieverbrauchs. International wird das Einsparpotenzial auf etwa das 200-fache des Schweizer Verbrauchs geschätzt.

Schweizer Akteure und Zusammenarbeit mit anderen Forschungsprogramm

13 Institute mit ca. 150 Forschern sind in der Verfahrenstechnik für energierelevante Forschung in der Schweiz aktiv. In der Fertigungstechnik sind es geschätzt dreifach so viele. In der Industrie gibt es mit auf mehr als 3 000 geschätzt energieintensiven Unternehmen sehr viele potenzielle Akteure. Eine energiefokussierte, organisierte Stakeholder-Szene wie bei anderen technologiespezifischen Programmen gibt es aber nicht. Für den aktiven Austausch, die Kombination von Ideen und Kompetenzen sowie zur Erreichung der Ziele wird künftig eine vertiefte Kommunikation und Vernetzung wichtig sein. Dadurch lassen sich auch die aktuell eher noch breit gestreuten Einzelaktivitäten an einer Gesamtstrategie ausrichten und werden damit zu einem wahrnehmbaren Programm. Basis für Information und Vernetzung sind die bestehenden Vereinigungen und Verbände (EnAW,

SGVC, Swissmem, GWF). Da viele Themen auch Forschungsgegenstand von angrenzenden BFE-Forschungsprogrammen wie Elektrizität, industrielle Solarenergienutzung, Solarwärme, Energie in Gebäuden, Wärme-Kraft-Kopplung und Umgebungswärme sind, ist auch der Austausch mit diesen ein wesentlicher Erfolgsfaktor.

Forschungsschwerpunkte und Programmziele

Die momentanen Forschungsschwerpunkte haben sich in der Schweiz aufgrund des bisherigen Fokus auf Verfahrenstechnik und der Auswahl der wichtigsten, entwicklungsfähigen technischen Potenziale in folgenden Bereichen herausgebildet:

- Bessere Wärmeübertragung;
- Kostengünstigere Prozessintegration, Pinch-Light-Methode;
- Thermische Verfahren:
  a. Grundlagen und Auslegungstools (Simulation);
  b. Neue Verfahren, speziell für Trocknen und Trennen;
- Prozessenergie aus Abwärme und Einsatz erneuerbarer Energiequellen.

Eine Ausweitung der Forschungsschwerpunkte auch auf die Fertigungstechnik und damit auf alle energierelevanten industriellen Prozesse ist ein wichtiges Ziel der nächsten Jahre. Auf Programmebene ergeben sich aufgrund der Analyse der Grundsätze der Eidgenössischen Energieforschungskommission (CORE) zudem folgende drei Haupt-Aktionsbedürfnisse:

- Verbesserung der nationalen Vernetzung;
- Zielgruppengerechte Information, welche die Industrie für das Thema Energie sensibilisieren soll.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2008

Das Projekt *Advanced integration of energy conversion production processes and waste management in batch chemical plants* [1] der ETH Zürich und der EPFL Lausanne verbessert die energetische Ausbeute und das Abfallmanagement in Batch-Chemieanlagen. Hauptziel ist die Entwicklung eines neuen Konzepts, das die Integrationspotenziale zwischen Produktionsprozessen und der Abfallwirtschaft erschliesst. Die Studie betrachtet alle wesentlichen Grenzbedingungen und Restriktionen in den chemischen Anlagen. Die Methodenentwicklung wird im Rahmen eines Projektes des Schweizerischen Nationalfonds finanziert. Die Tätigkeiten in diesem zweiten Projektjahr haben sich auf die Entwicklung der Modelle konzentriert. Die Modelle sind mit den Prozessdaten, die 2007 gesammelt wurden, kalibriert worden.

Das Projekt *Optimierung Wärmerückgewinnung in der Batch-Polymerisation* [2] der Hochschule Luzern untersucht die Möglichkeiten zur verbesserten Wärmerückgewinnung mit Wärmetauschern. Versuchsobjekt ist die Nexis Fibers AG, die in ihrem Werk in Emmenbrücke einen Batch-Polymerisationsprozess betreibt. Die aus den Autoklaven austretenden Brüden werden in einer Wärmerückgewinnungsanlage (WRG-Anlage) kondensiert. Diese Anlage weist verschiedene Mängel auf. Die organischen Brüdenbestandteile (Oligomere, Aerosole) führen zu Fouling in den Wärmeüberträgern, wodurch die Leistungsfähigkeit der WRG markant reduziert wird. Weiter entstehen durch die Schwadendampfvernichtung grosse Exergieverluste, die sich negativ auf die Effizienz des Gesamtsystems auswirken. Zudem weist der Prozess relativ hohe Schadstoffemissionen auf. Die Hauptziele des Projektes sind, die WRG-Anlage zu ersetzen, die Mängel zu beseitigen und die Effizienz markant zu verbessern. Dazu wurde der Prozess mit Hilfe von theoretischen Berechnungen und Messungen systematisch analysiert. Die Analyse des Foulings zeigt, dass bereits sehr dünne Schichten den Wärmestrom massiv reduzieren.

Verschiedene Varianten zur Reduktion bzw. zur Beherrschung des Foulings wurden untersucht und verglichen. Die zunächst viel versprechende Lösung mit Brüdenwäsche, die verhindern soll, dass Fouling verursachende Stoffe in die WRG gelangen, wurde aus verschiedenen Gründen verworfen (u. a. hoher Essigsäurebedarf, Verwendung eines neuen Antischaummittels). Stattdessen wurde ein System mit teilredundanten Wärmeüberträgern, «kontrolliertem» Fouling (überwachter Druckanstieg des Brüdendampfes infolge Fouling) und einem automatisierten Reinigungssystem konzipiert und ausgelegt. In einem Mischkondensator sollen der Schwadendampf und der Abdampf aus dem Polymerisationsprozess niedergeschlagen werden. In einer Abschätzung des Einsparpotenzials wurde mit konservativen Annahmen eine Reduktion des CO_2-Ausstosses von rund 600 t und Kosteneinsparungen von rund CHF 340 000 pro Jahr berechnet.

Die Nexis Fibers AG befindet sich seit dem 3.11.2008 in der Nachlassstundung. Aus diesem Grund wurde das Projekt am 19.11.2008 ge-

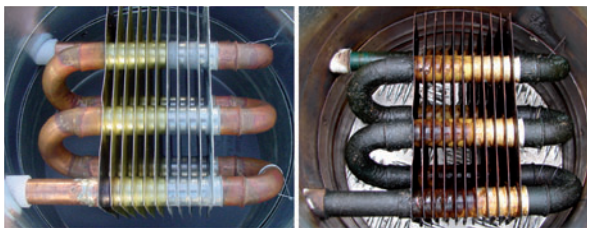


Bild 2: Auch sehr dünne Fouling-Schichten beeinträchtigen den Wärmetransport sehr massiv. Das Bild zeigt den Rohrboden eines von Fouling betroffenen Wärmetauschers.

stoppt. Über eine Wiederaufnahme des Projektes kann zurzeit keine Aussage gemacht werden. Bei einer Weiterführung des Projektes wird das Detail-Engineerung abgeschlossen, die WRG-Anlage realisiert und mit einer Messkampagne die Effizienzsteigerung bzw. die Reduktion der CO_2- und Schadstoff-Emissionen quantifiziert (Erfolgskontrolle).

Das Projekt *Effizienzsteigerung von landwirtschaftlichen Trocknungsanlagen für Futtermittel* [3] der FH Nordwestschweiz untersucht den Einfluss einer mechanischen Vortrocknung mit Schneckenpresse auf den Energieverbrauch und auf die Futtermittelqualität. Die Analysen im Berichtsjahr haben das Einsparpotenzial des neuen Trocknungsverfahrens mit Vorpressung für die Gras- und Maispelletsherstellung erneut nachgewiesen. Durch die mechanische Entwässerung mit Hilfe einer Vorpresse werden die Produktionskosten und der Heizölverbrauch reduziert, ohne den Nährstoffgehalt der Futtermittel negativ zu beeinflussen. Bei den energieintensiven Trocknungsprozessen kann durch die Vorpressung eine Einsparung von ca. 25 % an Heizöl extraleicht und damit eine Reduktion der CO_2-Emission um ca. 130 t CO_2 pro Jahr erzielt werden. Die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens ist bei schlechten Wetterbedingungen während der Futtermittelernte besonders hoch. Durch die Vorpressung können so wetterbedingte Schwankungen der Trocknungskosten abgefedert werden, da der Restfeuchtegehalt des Futtermaterials nach der Pressung auf konstantem Niveau liegt.



Bild 3: Das mechanische Auspressen der Pflanzenfeuchte reduziert den Energiebedarf bei der nachfolgenden Trocknung des Futtermittels und steigert dessen Qualität.

Aber auch bei den in der Schweiz relativ seltenen optimalen Wetterbedingungen rechnet sich das Verfahren. Die praktischen Versuche haben gezeigt, dass die Produktion von Trockenfuttermitteln überregional bzw. global in relevanten Grössenordnungen verbessert werden kann. Neben der Einsparung fossiler Energieträger und einer Kostensenkung findet eine bedeutende Reduktion der CO_2-Emissionen statt. Die Bodenuntersuchungen zeigten, dass bei Ausbringung von Presswasser auf die Felder der Boden mit Nährstoffen wie Stickstoff, Phosphor, Kalium und Magnesium angereichert wird. Die Ausbringung von Graspresssaft auf die Bodenoberfläche kann also den Nährstoffkreislauf positiv beeinflussen.

Das Institut für Chemie und Bioingenieurwissenschaften der ETH Zürich setzte ihre Forschungsarbeiten am Projekt *FINE-CHEM – an inventory estimation tool for fine chemicals* [4] fort. Im Jahr 2008 wurden die strukturbasierten Modelle auf der Basis neuronaler Netze weiter entwickelt und fertige, zur Anwendung bereite Modelle erstellt. Die im Jahr 2007 gewonnenen Daten wurden aufgearbeitet und in einen für die neuronalen Netze verwendbaren Trainingsdatensatz verarbeitet. Ein Datensatz von insgesamt 392 Datensätzen wurde verwendet. 96 Datensätze wurden der Ecoinvent-Datenbank entnommen, die restlichen wurden durch die Kooperationen mit der nationalen und internationalen Chemieindustrie gewonnen. Die Modelle wurden in ihrer Struktur optimiert. Fertige Modelle wurden für den kumulierten Energiebedarf (CED), das *Global Warming Potential* (GWP) und *Eco-Indicator 99-Punkte* (eine Life Cycle Assessment Methode zur Bestimmung eines aggregierten Umweltschadens) erstellt. Durch die breite Datenbasis sind die Modelle für

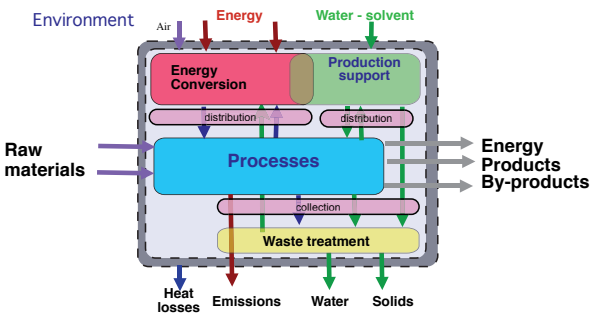


Bild 4: Prinzipskizze des Energie- und Stoffflusses in der Verfahrenstechnik.

eine Vielzahl von Chemikalienklassen anwendbar. Um die bei der Chemikalienproduktion kritischen Parameter zu bestimmen, für die die Modelle generiert werden sollten, wurde die Produktion von Chemikalien allgemein untersucht und die Quellen für die Haupt-Umweltschäden bestimmt. Dabei wurde eine breite Menge von Basischemikalien sowie zwei Pharmazeutika als Vertreter der Feinchemie untersucht. Ein Ergebnis war, dass Energieverbrauch einer der umweltrelevantesten Faktoren überhaupt in der Chemikalienproduktion ist.

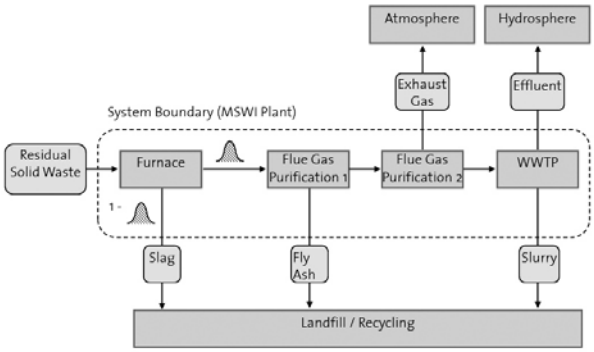


Bild 5: Modellierung der Abfallverbrennung.

Das Institut für Umweltingenieurwissenschaften der ETH Zürich führte seine Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Projekt *Decision-Support Tool to optimize Co-Prozessing of waste in the Cement Industry* [5] fort. Das Projektziel ist die Entwicklung eines Computerwerkzeugs für die Lebenszyklus-Einschätzung (LCA), zum Co-processing des Abfalls in der Zementindustrie festzusetzen und so die verschiedenen Abfallbehandlungsverfahren zu vergleichen. Das Kleberbetriebsmodul wurde abgeschlossen und die grafische Benutzerschnittstelle programmierte. Die Benutzerschnittstelle wurde weiter dem bereits entwickelten Aufschüttungsmodell und dem städtischen Einäscherungsmodell angepasst. Das Einäscherungsmodell wurde mit Emissionsdaten aus einer laufenden Untersuchung über überschüssige Verbrennungsöfen in Europa aktualisiert und ergänzt mit ausführlicheren Daten für das Metallrecycling. Das Modell für Sondermüllverbrennungsöfen wird 2009 hergestellt. Das Modellieren des Hochofenmodells erfolgt 2009 in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner. In der jährlichen Projektsitzung für 2008 wurde entschieden, den Bereich für das Modellieren der Abfallbehandlungsprozesse zu den Zementöfen, den Hochöfen, den städtischen Feststoffverbrennungsöfen, den Sondermüllverbrennungsöfen und den Aufschüttungen zu reduzieren. Dementsprechend werden andere Co-Verarbeitungsindustrien (Kohleenergieanlagen, ölbefeuerte Kraftwerke, Kalk- und Ziegelöfen) sowie Asphaltproduktion, Vergasung, Pyrolyse, Brennstoffproduktion, Phosphorwiederaufnahme aus Abwasserschlamm und die materielle Wiederverwertung vom Projektbereich ausgeschlossen. Die Genauigkeit der Vorhersage der Emissionen an der Kleberanlage wurde durch das Vergleichen der vorausgesagten Emissionen mit gemessenen Emissionen an einer spezifischen Kleberanlage analysiert. Die Entdeckungen sind, dass das Modell zuverlässige Vorhersagen für Treibhausgase, Stickstoff- und Schwefeloxide zur Verfügung stellt, während die Genauigkeit für Schwermetallemission niedriger ist. Dieses kann durch Ungewissheiten in der Konzentration der Schwermetalle in den Betriebsmitteln (Eingang) und in den Luftemissionen (Ausgang) erklärt werden, da die Konzentrationen häufig nah an- oder unterhalb der Nachweisgrenze sind. Die Co-Verarbeitung des getrockneten Abwasserschlamms in den Schweizer Zementöfen wurde für eine Studie festgesetzt, die durch das BFE und das BAFU in Auftrag gegeben wurde. Die Resultate zeigen, dass ein erheblicher Klima- und Umweltnutzen an der Kleberanlage erzielt werden kann.

Nationale und internationale Zusammenarbeit

Im Berichtsjahr unterstützte das Programm insgesamt drei Projekte aus dem ETH-Bereich und zwei der Fachhochschulen. Alle diese Projekte weisen eine starke Industriebeteiligung auf und sind überwiegend von den beteiligten Industriepartnern finanziert. Die öffentliche Hand ist praktisch nur mit dem BFE und teilweise mit dem BAFU im Forschungsbereich der industriellen Prozesse aktiv. Eine internationale Zusammenarbeit mit der EU fand wegen fehlender gemeinsamer Themen nicht statt. Hingegen hat das BFE den Kontakt mit dem Implementing Agreement der Internationale Energie Agentur (IEA) *Industrial Energy-Related Technologies and Systems* (IETS) aufgenommen.

Bewertung 2008 und Ausblick 2009

Betrachtet man die Programmschwerpunkte und die anvisierten Ziele für das Forschungsprogramm, so sind in allen 3 Bereichen (Systemoptimierung und -integration, Qualitätssicherung, neue Verfahren und Technologien) erfolgreich Projekte durchgeführt worden.

Liste der F+E-Projekte

[1] F. Maréchal, K. Hungerbühler (francois.marechal@epfl.ch), EPFL/ETHZ: Advanced integration of energy conversion production processes and waste management in batch chemical plants, Laufzeit 2007–2010 (JB).

[2] B. Wellig (beat.wellig@hslu.ch), CC für Thermische Energiesysteme & Verfahrenstechnik, Luzern: Optimierung Wärmerückgewinnung in der Batch-Polymerisation, Laufzeit 2007–2008 (JB).

[3] L. Sandoval (lisseth.sandoval@fhnw.ch), FHNW, Muttenz: Effizienzsteigerung von landwirtschaftlichen Trocknungsanlagen, Laufzeit 2007–2008 (JB).

[4] G. Wernet (gregor.wernet@chem.ethz.ch), ETH Zürich: Fine-Chem – An Inventory Estimation Tool For Fine Chemicals, Laufzeit 2006–2009 (JB).

[5] Michael E. Bösch (boesch@ifu.baug.ethz.ch), ETH Zürich: Development of an environmental decision support tool to optimize co processing of waste in the cement industry, Laufzeit 2007–2009 (JB).

Impressum

Juni 2009
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
Druck: Ackermanndruck AG, Bern-Liebefeld
Bezug der Publikation: www.energieforschung.ch

Programm- und Bereichsleiter
Martin Pulfer
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
martin.pulfer@bfe.admin.ch

Rapport de synthèse 2008 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2008 des BFE-Programmleiters

Programme de recherche
Chaleur solaire et stockage de chaleur

Jean-Christophe Hadorn

jchadorn@baseconsultants.com



Banc d'essais de systèmes complets au SPF à Rapperswil

Le SPF mesure sur ses 4 bancs tests accrédités les performances de systèmes de production d'eau chaude sanitaire en kit, avec ou sans thermosiphon. (photo : SPF)

Centres de gravité du programme

Le programme concerne la chaleur solaire à température comprise entre 0 et 150 °C et s'adresse à la couverture des besoins en chaleur dans les bâtiments par des solutions solaires actives. La demande en chaleur basse température, entre 10 et 60 °C, dans un pays comme la Suisse représente une part voisine de 50 % de la demande totale en énergie.

Le captage de l'énergie solaire est particulièrement efficace dans cette gamme de température. Le rendement annuel de conversion peut atteindre 50 à 60 % dans les cas favorables pour les meilleurs systèmes. La contribution du solaire thermique au bilan énergétique suisse est donc potentiellement très importante. Avec les technologies actuelles, le solaire a sans difficulté la capacité de substituer 60 % de la demande suisse pour l'eau chaude sanitaire et 15 % de la demande nette en chauffage de locaux sans stockage saisonnier.

Si le stockage saisonnier de chaleur devient possible, alors le potentiel de substitution est de 60 à 90 % des besoins en chauffage et eau sanitaire. Ceci signifierait une couverture de près de 40 % de la demande énergétique totale du pays !

Les centres de gravité du programme pour 2008 ont été :

- les tests de qualité des **capteurs** et **installations** solaires individuelles
- les nanocouches à propriété optique solaire
- la recherche de solutions de stockage dense de chaleur
- la climatisation solaire.

Les buts poursuivis ont été :

- l'utilisation intensive des **installations de test** du SPF pour qualifier les composants des installations solaires qui sont mis sur le marché
- le lancement d'un projet d'intégration architecturale des capteurs en couleur
- la faisabilité préliminaire d'une couche thermochromique pour lutter contre la surchauffe dans les capteurs
- les conclusions des travaux de la Tâche 32 Heat Storage de l' Agence internationale de l'énergie (AIE) dans le programme Solar Heating and Cooling (SHC)
- la connaissance des propriétés des hydrates de CO2 pour le transport et le stockage de froid
- le maintien des **outils de planification** que sont les données des capteurs testés et les logiciels de simulation de l'ensoleillement et des installations.

Travaux effectués et résultats acquis en 2008

Composants de la technique solaire

Le SPF réalise des tests de qualité et de performances des composants solaires pour pouvoir qualifier et améliorer les capteurs solaires sur le marché. Le SPF en tire quantité d'informations fondamentales sur le comportement à long terme des matériaux de la technique solaire. En 2008 la demande en tests a été soutenue preuve d'un marché très dynamique.

Mesure des performances et test de qualité des capteurs solaires

Il ne reste plus guère que des *tests de capteurs* selon la norme européenne « Solar Keymark ». Cela accroît la charge administrative car le test est lourd et la charge des équipements car il est long. C'est le choix du label « Solar Keymark » en tant que base des aides en Allemagne à partir de 2009 qui en est la cause [1].

- Le nombre de *tests de qualité* a également fortement augmenté car requis par le label européen. Les bancs d'essai du SPF ont été utilisés à 100 % [1].
- *L'accréditation* ISO 17025 du SPF en tant que organisme d'essais pour capteurs solaires thermiques et leurs composants a été maintenue [1].
- Le nouveau simulateur solaire d'intérieur est régulièrement utilisé, essentiellement à l'appui des fabricants de capteurs au stade du développement de nouveaux produits (figure 1) [1].
- Dans le test de la résistance des capteurs à tubes sous vide à la grêle, la nouvelle machine à grêlons du SPF a fait ses preuves [1].
- Des concepts de capteurs faisant appel aux polymères, en liaison avec une nouvelle tâche du programme Solar Heating and Cooling de l'AIE, un capteur hybride photovoltaïque et thermique ou un capteur non isolé donc mince, ont été étudiés, pour le moment sans application commerciale [1].

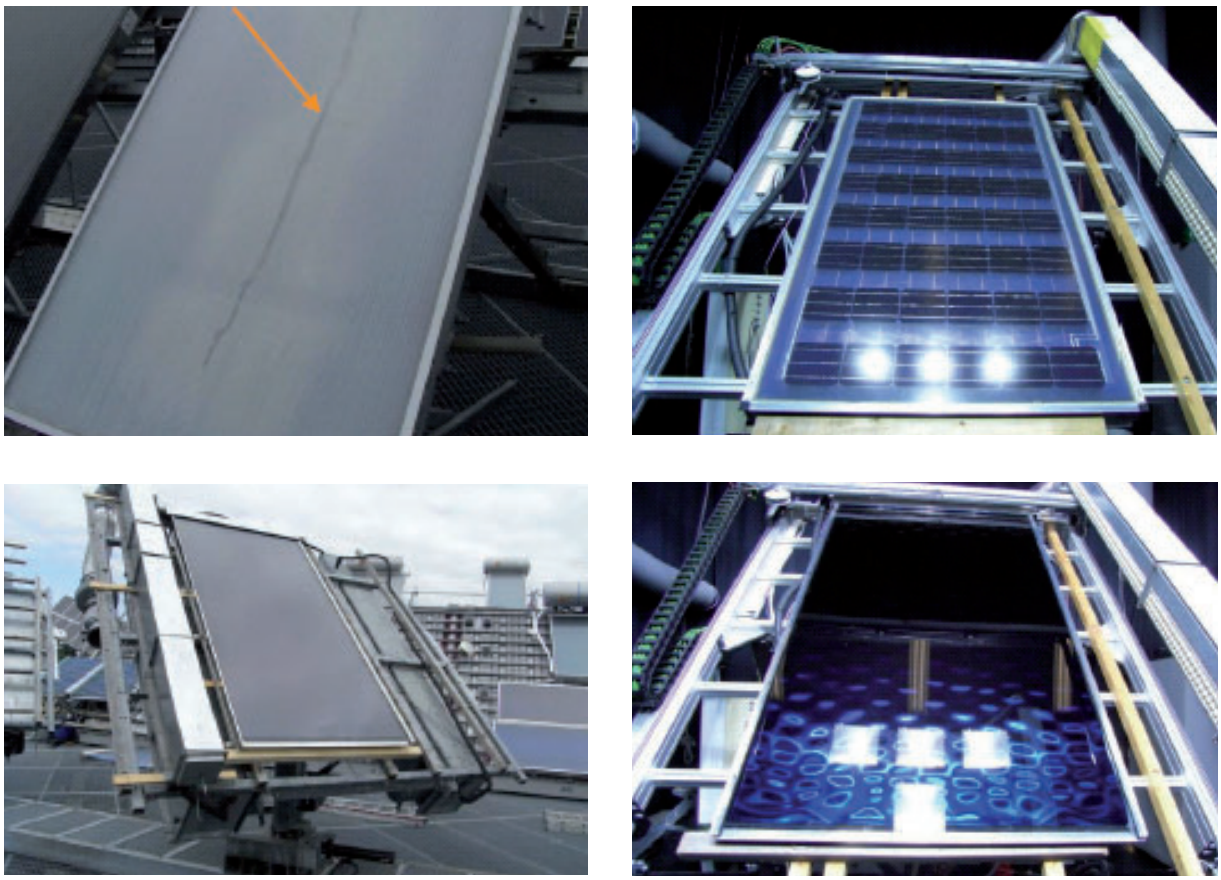


Figure 1 : Tests de capteurs au SPF en conditions réelles (à gauche) et dans le simulateur (à droite). (photos : SPF)

Matériaux

- Le test de certification dit *verre solaire* du SPF est toujours très demandé et sans concurrence. Il est très utile à la fois pour les fabricants de capteurs lors de leur choix de matériel et pour les fournisseurs de verre comme preuve de qualité pour les capteurs solaires [3].
- Le nombre de tests de raccords entre capteurs était élevé en début d'année et plus réduit en fin d'année [3].
- Le nombre de *tests de pâte de soudure* a également été réduit cette année, du fait de l'augmentation du soudage par laser des absorbeurs [3].
- L'étude du *dégazage des matériaux dans les* capteurs *vitrés* apporte des éléments précieux pour la conception de capteurs plus durables [3].
- La publication des résultats de *20 ans de tests de matériaux de couverture transparente* en extérieur a reçu un grand écho international (figure 2). Ces résultats ont une grande valeur non seulement pour le solaire thermique mais pour le bâtiment en général. Ils permettent de



Figure 2 : 20 années d'exposition d'échantillons de couverture transparentes pour capteurs solaires à Rapperswil (à gauche) et à Davos (à droite) avec une inclinaison fixe de 60° sur l'horizontal. (photos : SPF)

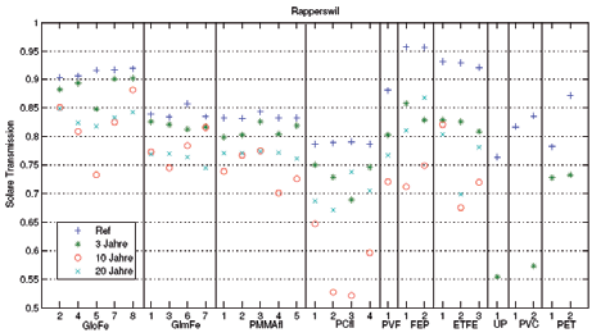


Figure 3 : Évolution en 20 ans de la transmission solaire de 30 échantillons de divers matériaux transparents, d'épaisseur 0,025 à 5 mm, placés à Rapperswil, avant nettoyage. L'UP, le PVC et le PET n'ont pas résisté, le PC (polycarbonate) est fortement dégradé ou sale après 20 ans. On remarque que la transmission à 20 ans peut être meilleure que celle à 10 ans, ceci est dû à un effet de nettoyage naturel par une forte pluie juste avant la mesure après 20 ans. (Graphe : SPF)

séparer l'influence de la dégradation de celle des salissures grâce à la comparaison avant et après nettoyage de l'échantillon, et l'effet de la perte de matière est aussi évalué (figure 3) [11].

– La *durabilité de couches sélectives à haute température* (400 °C) a été étudiée et les résultats partiels ont pu être publiés, qui orientent les choix pour des tubes de capteurs à concentration (figure 4). En effet, la croissance prévue de l'énergie solaire thermique pour la production d'électricité par voie thermodynamique se traduit par le développement de nouveaux absorbeurs solaires sous concentration. Avant le début d'une production en série, la durée de vie du matériel doit être testé. À cette fin, une

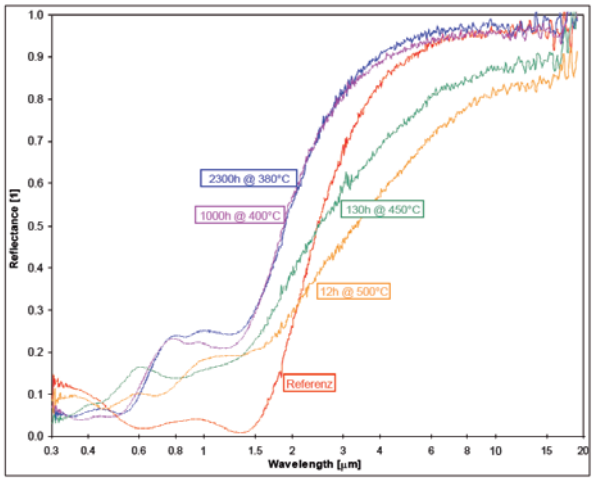


Figure 4 : Évolution de la courbe de réflexion d'un matériau sélectif après son exposition à la température. La dégradation en absorption et en émissivité dès 450 °C est manifeste – mesures SPF. (Graphe : SPF)

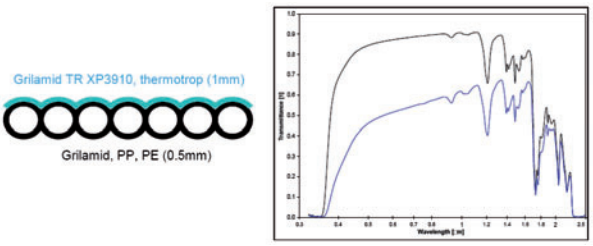


Figure 5 : Exemple d'un absorbeur en polymère extrudé protégé de la surchauffe par une couche à variation de propriété absorbante avec la température (diagramme de transmission du matériau déposé en surface à 20 °C (courbe noire) et 80 °C (courbe bleue) – mesures SPF. (Graphe : SPF)

méthodologie de test de vieillissement accélérée, développé au sein de l'AIE SHC Tâche 10, a été appliquée sur cinq absorbeurs pour applications à haute température. Afin de déterminer l'histogramme des températures subies par l'absorbeur d'une installation à concentration, le logiciel de simulation Polysun 4 a été étendu pour permettre la simulation des capteurs à poursuite du soleil. L'applicabilité de la méthodologie a été démontrée, mais certains problèmes nouveaux sont apparus. La dégradation de certaines couches a pu être observées et il serait souhaitable de tester les couches à des températures dépassant leur plage de fonctionnement de service. Les résultats sont directement utiles aux industriels qui ont participé à ces essais de durabilité [12].

– Dans le cadre de la Tâche 39 de l'AIE SHC, un *absorbeur en polymère* extrudé en continu a

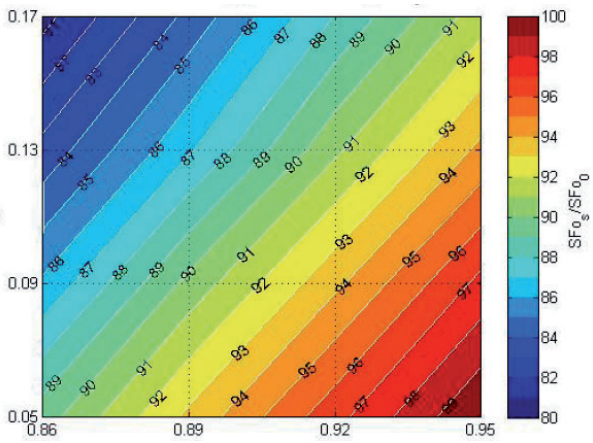


Figure 6 : Délimitation des propriétés thermochromiques d'un absorbeur de capteur solaire par simulation d'une installation de chauffage solaire pour une villa. Pour une combinaison absorption α = 0,95 et émissivité ε = 0,05 (coin inférieur gauche), l'installation de chauffage solaire de référence couvre une part solaire des besoins de 27 %, ce qui forme la référence 100 % du diagramme (rouge foncé). Si l'on abaisse l'absorption à 86 %, on lit sur le diagramme que la part solaire diminuera à 90 % de la part de référence. (Graphe : SPF)

été développé, avec une couche superficielle capable de résister à la surchauffe. Des espoirs existent de réaliser un capteur en plastique pouvant durer plus de 20 ans (figure 5) [3].

– Afin d'évaluer le potentiel de stockage de matériaux de densités de stockage d'énergie plus élevée que l'eau, les expériences avec la zéolite et le silicagel ont été poursuivies. Après plusieurs années d'essai, ces matériaux se révèlent cependant difficilement adaptés au stockage solaire. Le stockage par adsorption paraît délicat sans un matériau nouveau adapté aux plages de température du solaire (20 à 100 °C) [3].

– Des travaux prospectifs sur d'autres principes (changement de phase) et d'autres matériaux tels les sels de potassium ou d'ammoniac ont débuté au SPF, en complémentarité avec ce que le Lesbat fait aussi dans le programme de recherche à Yverdon [3].

– Les matériaux dits thermochromiques sont aussi une réponse à la surchauffe. Le SPF a montré l'espace possible du couple absorption/émissivité d'un absorbeur dans une étude par simulation avec Polysun (figure 6). Les travaux de fabrication de couches à propriété thermochromique ont donc débuté au Leso qui a acquis au cours des recherches menées sur les dépôts de couche de couleur pour les verres de capteur le savoir faire nécessaire, et les premiers résultats sont très prometteurs. [6]

Capteurs solaires en couleur

Le Leso de l'EPFL a poursuivi ses travaux sur les *capteurs solaires en couleur*. L'intégration architecturale de capteurs en façade est difficile avec les collecteurs actuels du fait de leur couleur très sombre (noir ou bleu très foncé) et des irrégularités ou défauts sur la surface des absorbeurs, souvent visibles à travers le verre de couverture. Le verre solaire de couleur mis au point au Leso (figure 7) est doté d'une série de plusieurs nanocouches interférentes lui conférant la couleur désirée par un calcul, et ce selon les épaisseurs des couches déposées. La phase précédente du projet a montré la faisabilité du concept et la qualité que l'on peut en attendre, mais il faut encore diversifier les résultats (couleurs, traitements), améliorer les performances et rendre la production industrielle économiquement viable. Les applications doivent être étudiées en détail et développées jusqu'au concept de façades actives. C'est l'objet de la phase III du projet qui a débuté en 2008 : sélection des verres, maîtrise des couleurs, tests de durabilité, et mise en œuvre en conditions réelles. L'activité 2008 au niveau des couches minces a été essentiellement

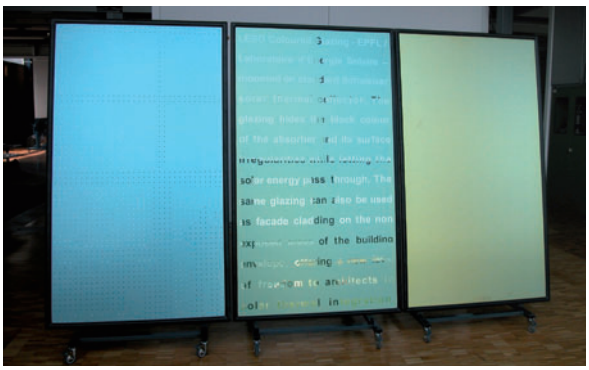


Figure 7 : Capteurs solaires du marché doté de 3 prototypes de verre solaire de couleur. (photo : Leso)

concentrée dans la préparation de l'équipement nouveau d'évaporation sous vide qui permettra de réaliser de nouvelles couleurs plus facilement qu'avec le procédé actuel de laboratoire et plus proche du procédé industriel de « magnetron sputtering » [5].

Une partie importante de la phase III en cours consiste à identifier les producteurs de verre blanc capables de fournir un produit avec un côté diffusant et un côté lisse. Des contacts ont été établis et des tests réalisés avec un fournisseur potentiel. Ces prototypes de verres trempés ont confirmé la capacité du traitement films minces à résister au trempage et la possibilité de réaliser un capteur très fin, tel celui de la société H+S Solar. Cependant les chercheurs du Leso sont toujours à la recherche d'un produit traité à l'acide qui présente à la fois une bonne transmission (environ 5 % de pertes) et un effet masquant suffisants.

Systèmes et installations solaires pour le bâtiment

Mesure des performances de systèmes

– Le dispositif de *test de quatre systèmes complets* en parallèle du SPF a été accrédité officiellement. Grâce à des améliorations dans la gestion automatisée des données, les bancs ont permis de tester 16 systèmes en 2008, pratiquement tous selon les directives du label « Solar Keymark » qui est de plus en plus demandé aussi pour les systèmes. Les résultats des tests sont disponibles sur le site Internet du SPF sous la forme d'un rapport de tests très précieux pour le choix d'une solution pour un décideur [2].

– Le SPF a développé la méthode CCT ou Concise Cycle Test initiée dans les travaux de l'AIE pour tester les systèmes combinés sur une séquence de 12 jours. L'amélioration principale de l'année concerne le modèle de chauffage dans Trnsys [2].

– Afin d'évaluer les performances du chauffage d'appoint, un équipement de mesures des gaz de fumée a été mise en œuvre sur le banc test [2].

– Les deux projets d'étude des transferts de chaleur dans *les échangeurs* immergés dans une cuve de stockage ont livré des résultats d'optimisation géométrique de tels échangeurs en spirale ou « tank in tank » (figure 8). Ils ont également permis au SPF d'acquérir la maîtrise du nouvel outil de mesures des conditions de courant dans les cuves soit une cuve transparente équipée d'un système de mesures de vitesses par la méthode dite « PIV » (Particle Image Velocimetry) [13, 14].

– En s'appuyant sur les travaux accomplis entre 1998 et 2004 dans la Tâche 32 de l'AIE SHC, le SPF a simulé dans un environnement de simulation standardisé internationalement, un concept nouveau de systèmes combinés dit *Maxlean*. Il s'agit d'une installation avec une cuve de stockage sans pression et une distribution à débit variable. Un algorithme original d'optimisation a été utilisé et combiné au simulateur. Il permet de trouver rapidement les zones optimales en terme de taille de composants sous des contraintes de coût global donné [2].

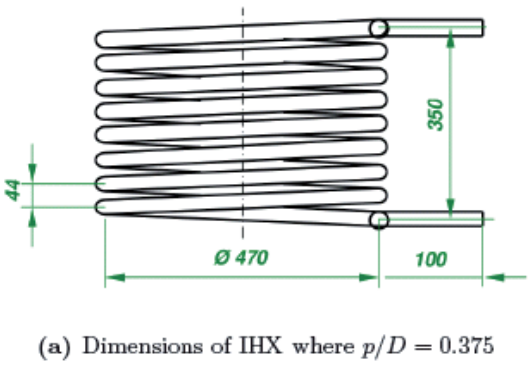
– Les résultats des travaux sur les pertes de chaleur des introductions dans les cuves et sur les meilleures solutions de siphon anti-convection naturelle ont été publiés à l'usage des ingénieurs et constructeurs de cuve de stockage solaire [2].

Intégration d'une installation solaire dans un réseau de chauffage à distance («Nahwärme»)

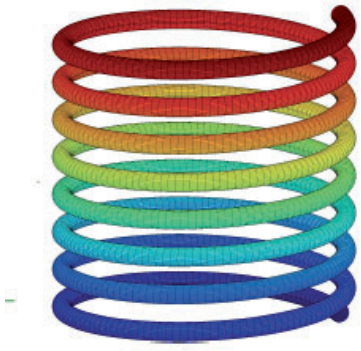
Sur le toit d'un bâtiment de l'école HS Rapperswil, on projette une installation solaire pour injecter de l'eau chaude dans le réseau de chauffage à distance de l'école. Les conditions de cette injection doivent être étudiées en détail, car en général les réseaux fonctionnent à température difficilement compatible avec le solaire, sauf peut-être en été, et rendent la solution délicate ou peu intéressante du point de vue de l'efficacité énergétique. Durant l'année 2008, des données de réseau ont été collectées afin de pouvoir simuler une installation future avec du solaire. Ce cas pourra servir de cas pilote pour d'autres situations similaires [10].

Climatisation solaire

Les mesures et l'optimisation de l'installation pilote du SPF pour la *réfrigération solaire thermique* avec une machine à absorption se sont poursuivis. Une attention particulière a été portée



(a) Dimensions of IHX where $p/D = 0.375$



(b) 3D visualisation of IHX where $p/D = 1.0$

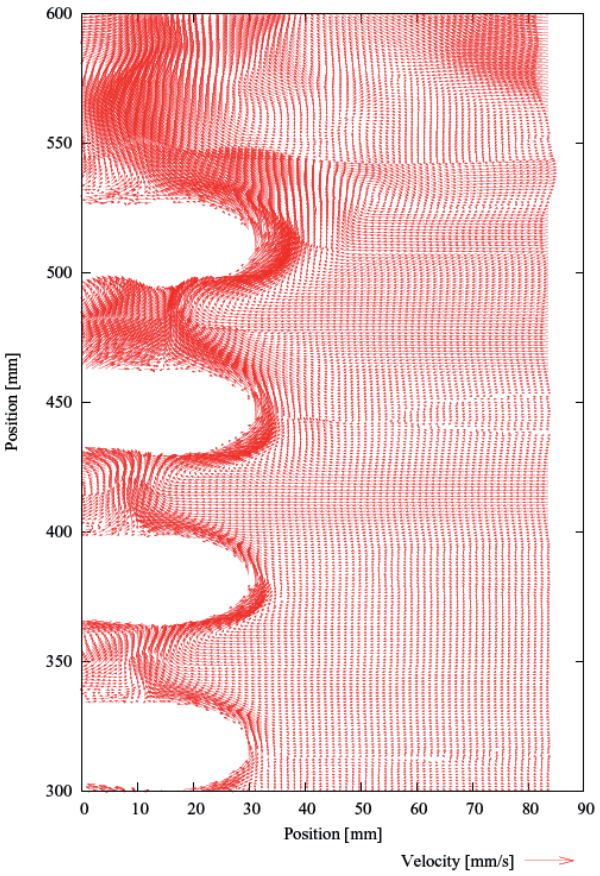


Figure 8 : Les courants de convection et les flux autour d'un échangeur immergé dans une cuve solaire peuvent être évalués quantitativement et qualitativement par l'installation PIV du SPF. (Graphe : SPF)

dans les possibilités de réduction de l'électricité des auxiliaires et de diminution du besoin en eau pour la dissipation de la chaleur en tour humide. Les mesures ont été utilisées pour développer un modèle pour Polysun [2].

Le nouveau projet *Solcool* de la HEIG-VD d'Yverdon a débuté. Il a pour objectif de démontrer le potentiel d'une installation permettant de produire de l'eau chaude pour le chauffage et/ou l'ECS en hiver et pour la climatisation en été. Le choix s'est porté sur une machine à adsorption commercialisée depuis peu en Europe à la suite des travaux de recherche du Fraunhofer ISE de Freiburg, afin d'étudier les interactions au niveau du système combiné solaire et pas les principes de l'adsorption connue par ailleurs. Dans le cadre de ce projet, un nouveau stand de tests a été dimensionné et installé dans les nouveaux laboratoires du Lesbat à Yverdon. Ce stand permet d'analyser les performances de la machine en émulant la production d'eau chaude des capteurs solaires et la consommation d'énergie d'une installation (bâtiment, processus industriel, etc.). La machine à adsorption achetée à l'entreprise Sortech (D) a été raccordée au banc de test (figure 9). Ce projet représente une contribution de la Suisse à la Tâche 38 de l'AIE SHC.

Une analyse du cycle de vie des composants a été réalisée en parallèle à l'installation au laboratoire des équipements. Elle montre que l'acier inoxydable du réseau hydraulique représente entre 40 et 70 % des impacts selon l'indicateur utilisé. L'étude qui sera conduite en 2009 permettra de mettre en avant des idées d'amélioration afin de baisser ces impacts [23].

Stockage de chaleur

Stockage avec matériaux à changement de phase (*PCM*)

Le rapport final du projet *Power PCM (« phase change materials »)* de la HEIG-VD d'Yverdon a été publié. Dans ce projet effectué durant la Tâche 32 de l'AIE SHC [18, 19], le potentiel de stockage d'énergie en utilisant des matériaux à changement de phase plongés dans la cuve d'un système solaire combiné (Arpège) a été évalué par mesure et simulation (figure 10). Les résultats obtenus ont montré que le potentiel d'utilisation des PCM dépend fortement de la puissance de l'appoint utilisé. Une puissance trop grande ne permet pas aux PCM d'emmagasiner/restituer la chaleur étant donné le mauvais transfert de chaleur dans ce type de matériau, même dans le cas d'un mélange de sodium acétate avec du graphite. L'objectif final de ce projet est de produire des abaques permettant un dimensionnement simple et rapide d'une cuve de stockage d'eau utilisant des matériaux à changements de phase (paraffine et sodium d'acétate avec du graphite), pour différentes puissances de soutirage, différents volumes de stockage et différents diamètres de module de PCM.

Pour atteindre ce but, le Lesbat a validé un nouveau modèle avec des résultats expérimentaux puis généré par simulation les abaques cherchées. Pour des installations de quelques kW de puissance et des volumes de stockage de plusieurs m³, le diamètre des modules contenant de l'acétate de sodium avec graphite (SAG) peut atteindre 50 à 80 mm. Toutefois, il faudra un grand nombre de modules de PCM, ce qui limitera l'intérêt économique. Du point de vue environnemental, l'utilisation de SAG comme PCM augmente les impacts totaux de l'installation solaire avec ce PCM. En effet, l'augmentation des impacts due à la présence du SAG et de son récipient en alu dans le stock d'eau, n'est pas contrebalancée

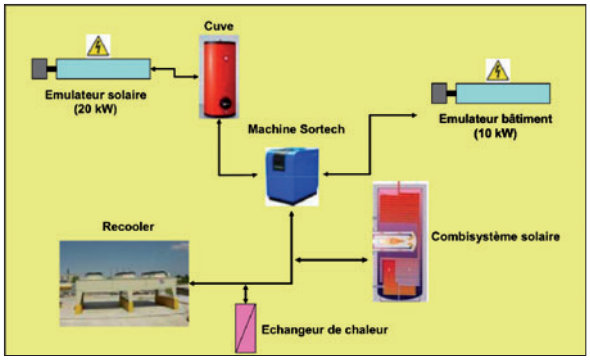


Figure 9 : Éléments de l'installation de climatisation solaire à adsorption Solcool testée au Lesbat. (Graphe : Lesbat)

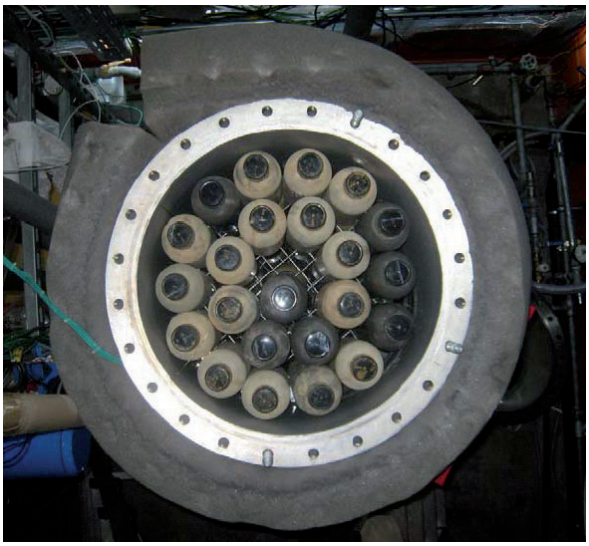


Figure 10 : Disposition de bouteilles pleines d'acétate de sodium dans la cuve d'une installation solaire combiné afin d'évaluer l'apport d'un supplément de densité de stockage à 57 °C dans le haut de la cuve. (photo : Empa)

par la diminution des impacts dues à la réduction d'énergie d'appoint (2–3 %) [17]. Etant donné ces résultats, il n'est pas recommandé d'utiliser du SAG pour le stockage d'énergie dans un système solaire combiné. Le projet a permis la mise au point d'un outil détaillé pour étudier de nouvelles configurations de matériau à changement de phase [16].

Stockage par sorption

Le projet *NaOH pour le stockage saisonnier* vise une haute densité de stockage thermique et des pertes thermiques faibles aussi bien lors de la charge que lors de la décharge. Cet objectif est recherché par un système de stockage par sorption. Le fonctionnement est similaire à une pompe à chaleur thermique avec la soude et l'eau comme fluide de travail.

Avant le test en laboratoire, des travaux de recherche théoriques ont été menés pour comprendre les conditions de fonctionnement et déterminer la chaleur spécifique du matériau. Dans le cas d'une plage de température d'utilisation de 70 °C la densité peut atteindre 3 fois celle de l'eau et sur une plage de 40 °C on peut espérer un facteur 6.

Un prototype de laboratoire a été créé dès 2006. Les premiers essais ont montré lors du cycle de charge des résultats comparables à la prévision par le calcul théorique. Après les premiers essais, le prototype a dû être légèrement transformé pour remédier à une corrosion de tube plastique et un défaut d'isolation. L'étanchéité de l'installation a été difficile à maîtriser, car la solution d'hydroxyde de sodium dans les réservoirs ne pouvait être transférée aisément.

Les tests 2008 montrent que la cristallisation de la solution d'hydroxyde de sodium et sa réversibilité médiocre est un problème non négligeable. Les conduites et les vannes endommagées en 2007 ont été changées et mieux isolées et le réservoir doit être maintenu en température par chauffage externe. La route pour remplacer l'eau comme moyen de stockage solaire est longue et difficile. Les expériences doivent se poursuivre [22].

Stockage et transport de froid

L'étude expérimentale de la viscosité du *coulis d'hydrates de* CO_2 et la mesure en temps réel de l'enthalpie du coulis s'est terminée avec succès à l'IGT de la HEIG-VD d'Yverdon. Une nouvelle méthode a été mise au point. Des articles scientifiques ont été acceptés dans des conférences internationales [21]. La phase de connaissance du coulis s'achève. Une phase de construction de prototype de circuit de froid fonctionnant au coulis et donc sans polluant a débuté en partenariat avec une entreprise de climatisation et un industriel de l'alimentaire intéressé par la découverte. Le financement est CTI et externe pour 2009 mais nous suivons ce projet très prometteur pour la chaîne du froid et le stockage de froid [20, 21].

Outils logiciels

Gestion des données

L'organisation des *bases de données internes du SPF* a été modifiée pour s'adapter aux demandes du réseau de l'école HS Rapperswil, et le site internet du SPF, très fréquenté au niveau international a été remodelé (www.solarenergy.ch) [4].

Simulation

- La *validation des modèles de composants de refroidissement solaire* dans le logiciel de simulation Polysun 4.0 a été débutée avec les mesures de l'installation pilote du SPF [3].
- Un *modèle de poursuite du soleil par un capteur* a été introduit dans Polysun 4.0. Tout capteur suiveur peut désormais être simulé. Plusieurs autres développements ont été réalisés pour suivre ou devancer la demande du marché en matière de simulation (pile à combustible, meilleur modèle de brûleur fossile, etc.) [4].
- La collaboration et le partage des fonctions pour le logiciel *Polysun*, avec la société Vela Solaris, spin off du SPF en 2006, fonctionne bien [4].

Evaluation de la ressource solaire

- Le but du projet *Solar Ressource Knowledge Management* qui est la Tâche 36 du programme SHC de l'AIE, est de rendre accessibles aux utilisateurs potentiels les données de gisement solaire sous une forme unifiée. Dans ce projet, Meteotest à Berne travaille sur la qualité de la prévision du rayonnement solaire global incorporée dans le logiciel Meteonorm que nous soutenons depuis 20 ans. Une validation du modèle suisse a été effectuée pour 3 sites aux Etats-Unis, et 2 autres modèles. L'incertitude trouvée a été de 18 à 50 % sur les valeurs horaires. Une validation pour les régions alpines sera faite en 2009. Un couplage avec le logiciel *PV Spyce* a été réalisé, permettant désormais la prévision de la production électrique solaire à 48 heures avec une plage d'incertitude calculable. Ceci est fort utile pour le solaire auprès des dispatcheurs électriques [9].
- L'Université de Genève collabore aussi à cette tâche. Sa part est d'analyser et d'évaluer certains modèles permettant le passage d'une composante à une autre du rayonnement solaire. Les principaux résultats montrent que

si les valeurs moyennes de rayonnement sont générées au moyen de la version 2007 de Meteonorm de façon relativement satisfaisante, c'est un peu moins le cas lors d'utilisation d'années spécifiques. De plus, si la répartition dynamique des prévisions a été améliorée en comparaison de mesures effectuées à Genève, ce n'est pas le cas lors d'une analyse sur des stations européennes ou américaines. Quatre publications de niveau international ont été réalisées en 2008 dans ce projet [7, 8].

Communication

- Le CD *Info CD* du SPF, qui rassemble tous les résultats de tests, les logiciels en version de démonstration et les publications du SPF, une œuvre de synthèse bi-annuelle, a été mis à disposition via Internet en 2008. L'interface et la programmation ont été entièrement refaits avec l'aide de la société Vela Solaris pour s'adapter aux outils modernes tels Java et l' « open source » afin de préserver les évolutions futures sur toute plateforme. Les ventes sont de l'ordre de 200 à 300 par an via le site internet [4].
- Le 30 mai 2008 nous avons organisé à Rapperswil la journée thématique annuelle dite *Industrietag* sur le *Stockage de chaleur* où les travaux de toutes les équipes du programme de recherche et de la Tâche 32 de l'AIE SHC ont été présentés à environ 100 personnes inscriptes. Les conclusions du déphaseur thermique diffusif ont été également présentées et le projet se poursuivra en collaboration entre Genève et Lisbonne, avec le départ du chercheur principal au Portugal faute de poste de professeur en Suisse [15].
- Le site internet du programme a été transféré du site www.solarch.ch vers les serveurs de l'OFEN et sera accessible courant 2009 sous : www.bfe.admin.ch/recherche/chaleursolaire

Collaboration internationale

Le SPF établit des collaborations bilatérales avec des industriels dans le monde, pour la plupart à caractère confidentiel car liées aux produits nouveaux. Ceci est une source d'informations pour le SPF et une reconnaissance de la qualité des tests et des conseils de ses ingénieurs. Nous devons maintenir cette qualité du centre de compétences si nous ne voulons pas devenir de simples importateurs de produits solaires étrangers testés en Allemagne.

A notre connaissance aucune équipe suisse n'a été impliquée dans de nouveaux projets européens en matière de solaire thermique ou stockage de chaleur en 2008.

Ce sont surtout des travaux du programme SHC de l'AIE (www.iea-shc.org) qui permettent à nos équipes d'échanger au niveau international, et cette plateforme collaborative est essentielle pour nous faire progresser plus rapidement que si nous restions isolés. Nous participons aux tâches suivantes :

- Tâche 32 sur le stockage [18,19] : la tâche a été conclue par une présentation à Eurosun 2008 à Lisbonne. Les résultats sont importants en terme de connaissance scientifique mais n'ont pas réussi à déboucher sur un matériau connu concurrent de l'eau pour le stockage solaire. Une nouvelle tâche (intitulée 42/24 car elle dépend de 2 programmes, SHC Task 42 et ECS Task 24) poursuit les travaux en repartant au niveau de la recherche de nouveaux matériaux.
- Tâche 36 sur les données d'ensoleillement : le projet AIE est mené conjointement avec le programme européen Mesor, pour lequel un premier prototype de mise à disposition de différents paramètres de rayonnement et climatiques est d'ores et déjà en ligne sur le site www.mesor.net. Une tâche qui va déboucher sur des méthodes validées.
- Tâche 38 sur la réfrigération solaire : le SPF et le Lesbat sont nos participants et le partage des informations est ici fondamental pour nous avec d'autres groupes plus avancés. Une tâche essentielle sur le chemin des installations de froid solaire dans le monde.
- Tâche 39 sur les polymères dans le solaire thermique : le SPF est un pilier des travaux. Au Leso, des tests ont été effectués pour simuler l'application des films couleurs à des capteurs polymères Solarnor. Il a été possible de présenter des résultats de simulation sur un bâtiment existant à Oslo en collaboration avec l'Université d'Oslo : une tâche importante pour évaluer des substituts aux métaux.
- Tâche 41 (nouvelle) sur l'architecture solaire : le Leso participera comme chef d'une sous-tâche en introduisant le projet des capteurs en couleur. Une tâche très bien accueillie par les pays du SHC lors du vote.
- Le SPF participe aux travaux de normalisation européens (CEN).

Projets pilotes et de démonstration

Construit en 1978, rénové en 2005, propriété de la commune de Sierre, le *complexe* sportif *de Guillamo* abrite aujourd'hui une piscine couverte, des salles de fitness, un centre wellness et un bar. Une installation solaire de 591 m2 a été réalisée en 2005 en adaptation à un circuit existant, afin de couvrir une partie des besoins d'énergie pour le chauffage des piscines et la production d'eau chaude sanitaire (figure 11). Cette réalisation a bénéficié du soutien financier du Service de l'Energie du canton du Valais et de l'Office Fédéral de l'Energie, dans le cadre du programme P&D (Pilotes et Démonstration) [24].



Figure 11 : La toiture solaire du centre sportif alimente le complexe en eau chaude sanitaire et chauffe en partie les bassins. (photo : Energie Solaire SA)

Évaluation de l'année 2008 et perspectives 2009

Nous soulignons avec satisfaction le positionnement du SPF au niveau international : qualité, expérience et sérieux des travaux sont reconnus. De même le fait que le nombre de tests de capteurs ne faiblit pas, dénote le dynamisme de l'industrie et de son innovation. Il montre aussi la forte concurrence de ce marché, avec les capteurs chinois.

Changement annoncé au SPF : le directeur depuis 4 années, Andreas Luzzi, a été appelé à de grands projets de solaire thermique à concentration en Australie par une société privée, la recherche d'un remplaçant de carrure internationale a débuté, et ce pour une entrée en fonction à mi 2009. Nous pensons que du fait de l'équipe dirigeante de 3 personnes très compétentes aux postes clés, la continuité se fera sans problème majeur. La nomination du successeur est de la compétence de la haute école de Rapperswil.

Il est réjouissant que les tests selon « Solar keymark » dominent. Enfin une norme internationale s'impose, ce qui facilitera la circulation des produits et en tout cas de leur label en Europe. Ceci évitera à nos industriels de devoir refaire les tests en Allemagne ou en France. Le SPF doit conserver sa capacité de faire le protocole européen et sa participation à la normalisation EU.

La recherche de solution alternative à l'eau pour le stockage solaire a été décevante. Les matériaux résistent et il faut mettre plus de moyens au niveau national et international pour lever le verrou pour le moment scientifique.

L'espoir dans les couches minces pour la thermochromie et les verres de couleur est toujours fort et soutenu par les avancées des projets.

Le renforcement des travaux de recherche sur les systèmes de refroidissement solaire doit nous permettre de comprendre les difficultés de la technique thermique, en concurrence à terme avec un compresseur mu par une source photovoltaïque. Notons toutefois que nous avons acquis les machines dans les 2 projets d'Allemagne, faute d'industriel du domaine en Suisse.

Liste des projets R+D

(RA) Rapport annuel 2008 existant

(RI) Rapport intermédiaire existant

(RF) Rapport final existant

Voir www.bfe.admin.ch/recherche/chaleursolaire dans la rubrique « Projets »

Chaleur solaire

[1] A. Bohren, A. Luzzi (info@solarenergy.ch), SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie ◆ Teil A: Kollektoren in solarthermischen Systemen (RA Projekt 43729) http://www.solarenergy.ch/.

[2] E. Frank, S. Laipple, R. Haberl, P. Gantenbein, A. Luzzi (info@solarenergy.ch), SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie ◆ Teil B: Thermische Solarsysteme (RA Projekt 43729) http://www.solarenergy.ch/.

[3] S. Brunold, F. Flückiger, P. Gantenbein, F. Ruesch, A. Luzzi (info@solarenergy.ch), SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie ◆ Teil C: Materialien & Komponenten in solarthermischen Systemen (RA Projekt 43729) http://www.solarenergy.ch/.

[4] H. Marty, P. Gantenbein, E. Frank, A. Luzzi (info@solarenergy.ch), SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie ◆ Teil D: Informatik (Jahresbericht Projekt 43729) http://www.solarenergy.ch/.

[5] C. Roecker (christian.roecker@epfl.ch) Leso EPFL, Lausanne: Capteurs solaires en couleur – Phase III:

Intégration architecturale (RA du projet 100506) http://leso.epfl.ch/.

[6] S. Brunold, P. Vogelsanger, H. Marty (info@solarenergy.ch), SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie ◆ Beurteilung des Möglichkeiten von thermochromen Schichten als Potentielle Ueberhitzungsschutzmassnahme für solarthermischen Kollektoren (RF Projekt 43729, 33 Seiten) http://www.solarenergy.ch/.

[7] P. Ineichen, Cuepe Uni GE, Genève: IEA SHC Task 36 Solar resource management (RA projet 101498).

[8] P. Ineichen, Cuepe Uni GE, Genève: Meteonorm validation on measurements from Geneva (RI projet 101498), A broadband simplified version of the Solis clear sky model, Solar Energy 82 (2008) 758-762, Comparison and validation of three global-to-beam irradiance models against ground measurements, Solar Energy 82 (2008) 501-512, Conversion function between the Linke turbidity and the atmospheric water vapor and aerosol content, Solar Energy 82 (2008) 1095-1097.

[9] J. Remund, Meteotest, Bern: IEA SHC Task 36 Solar resource knowledge management – Global radiation and PV production forecast (RA projet 101498).

[10] P. Gantenbein, E. Frank (info@solarenergy.ch), SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie ◆ Integration solarthermischer Anlagen in ein arealbezogenes Nahwärmenetz (RA Projekt 43729) http://www.solarenergy.ch/.

[11] F. Ruesch, S. Brunold, U. Frei, (Interfloat Corp.), T. Häuselmann, E. Frank (info@solarenergy.ch), SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie ◆ Langzeit-Alterungsuntersuchung an Abdeckungsmaterialien für thermische Sonnenkollektoren (RF Projekt 1988-2008, 59 Seiten) http://www.solarenergy.ch/.

[12] S. Brunold, F. Ruesch (info@solarenergy.ch), SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie ◆ Alterungsprüfungen an Solarabsorbern im Mitteltemperaturbereich (RF Projekt 102349, 22 Seiten) http://www.solarenergy.ch/.

Stockage de chaleur

[13] E. Frank, A. Luzzi (info@solarenergy.ch), SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie ◆ Stömungsuntersuchungen an Schichtspeichern und wärmetauschern (RA Projekt 102340) http://www.solarenergy.ch/.

[14] W. Logie, E. Frank, A. Luzzi (info@solarenergy.ch), SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie ◆ Evaluation of solar thermal storages with quantitative flow visualisation (RF Projekt 102340, 35 Seiten) http://www.solarenergy.ch/.

[15] P. Hollmuller, B. Lachal, Cuepe Uni GE, Genève: Control thermal phase shifting, SPF – Industrietag, Rapperswil, 30 May 2008, (Présentation du projet 45'914) http://www.cuepe.ch.

[16] S. Citherlet, J. Bony, J. Morel, (stephane.citherlet@heig-vd.ch) Lesbat, HEIG-VD, Yverdon: POWER PCM (RF 2008 Projet 100522, 38 pages) www.heig-vd.ch.

[17] N. Jungblut, ESU, Uster, N. Guyen, Lesbat, HEIG-VD, Yverdon: Life Cycle Inventory of Sodium Acetate and Expanded Graphite (Annexe au RF 2008 Projet 100522, 14 pages) www.heig-vd.ch.

[18] J.-C. Hadorn, Base consultants SA, Genève, J. Wellstein, Basel: Wärmespeicherung als zentrales Anliegen – IEA SHC Task 32, article dans Energieforschung, April 2008, 2 pages) www.iea-shc.org.

[19] J.-C. Hadorn, Base consultants SA, Lausanne: (a) Heat Storage for solar heat, a keynote présentation • (b) IEA SH&C Task 32 Advanced storage concepts for solar and low energy buildings – conclusions (Presentations at Eurosun 2008, Lisbon) http://www.iea-shc.org.

[20] O. Sari, J. Hu, F. Brun, N. Erbeau, IGT, HEIG-VD, Yverdon, P. Homsy, Nestec, J.-C. Logel, AXIMA : In-situ Study of the Thermal Properties of Hydrate Slurry by High Pressure DSC (article du projet 101582, Conférences IIR Beijing 2007, 8 pages).

[21] O. Sari, J. Hu, S. Eicher, P. Egolf, IGT, HEIG-VD, Yverdon, P. Homsy, Nestec: (a) Thermophysical and flow properties of CO2 hydrate slurry (article du projet 101582, 8th IIR Conference on natural working fluids, Copenhagen 2008, 9 pages), (b) Thermophysical and flow properties of CO2 hydrate slurry (article du projet 101582, International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, July 14-17, 2008, 10 pages).

[22] R. Weber, EMPA : NAOH-Speicher für saisonale Wärmespeicherung (RA Projekt 153614).

[23] S. Citherlet, C. Hildbrand, A. Kleijer Lesbat, HEIG-VD, Yverdon: Solcool – Climatisation et chauffage par combisystème (RA Projet 152645).

Liste des projets P+D

[24] Energie Solaire SA, Sierre: *Complexe sportif Guillamo*, janvier 2008, 11 pages (RF projet 100503).

Impressum
Juni 2009
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
Druck: Ackermanndruck AG, Bern-Liebefeld
Bezug der Publikation: www.energieforschung.ch

Programmleiter
Jean-Christophe Hadorn
Base Consultants SA
8 Rue du Nant
c.p. 6268
CH-1211 Genève 6
jchadorn@baseconsultants.com

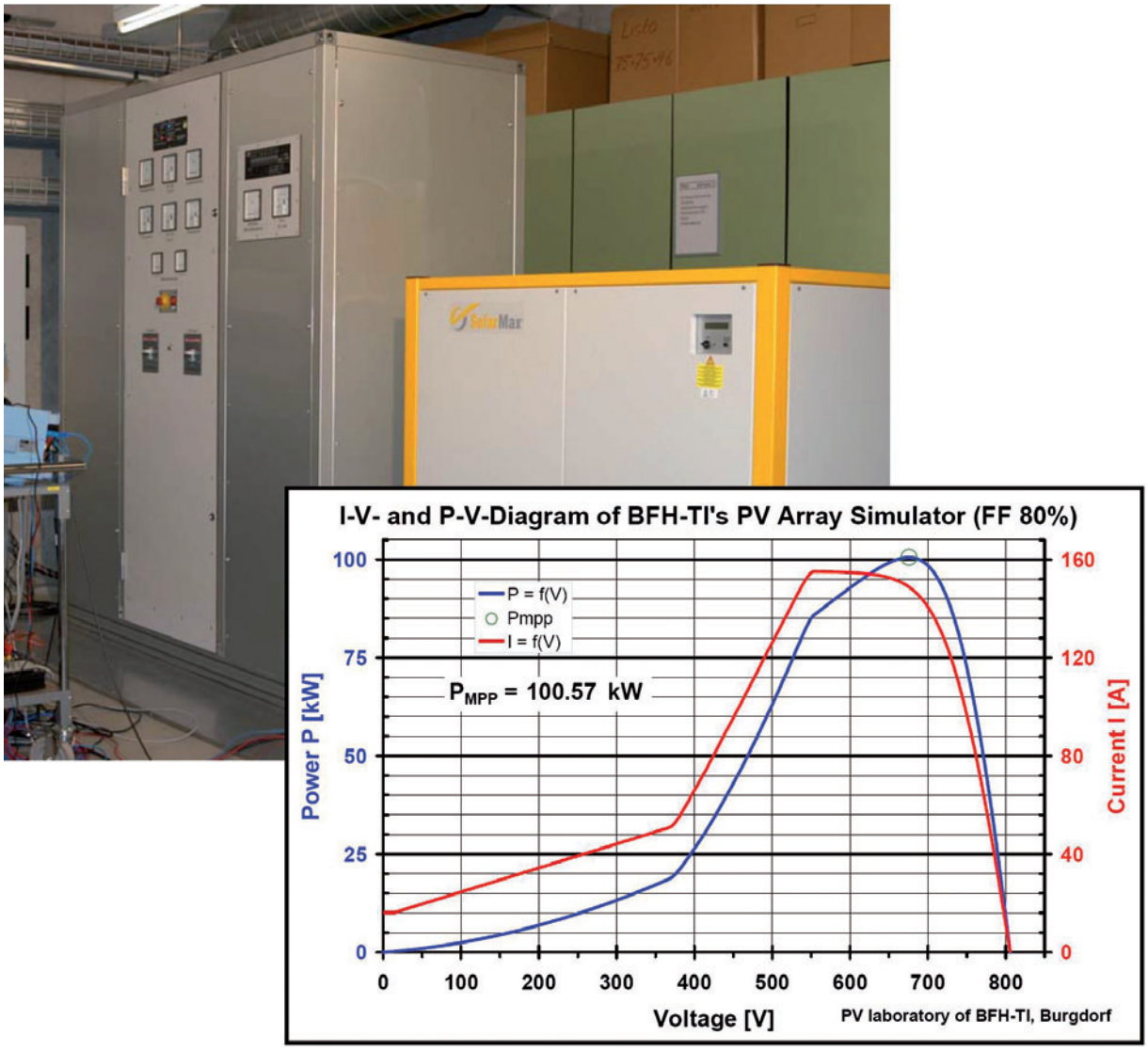
Bereichsleiter
Andreas Eckmanns
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
andreas.eckmanns@bfe.admin.ch

Rapport de synthèse 2008 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2008 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Photovoltaik

Stefan Nowak

stefan.nowak@netenergy.ch



100-kW-Solargenerator-Simulator

Am Photovoltaiklabor der BFH-TI in Burgdorf wurde ein 100-kW-Solargenerator-Simulator aufgebaut, welcher weltweit der grösste seiner Art ist. Mit diesem Gerät können Wirkungsgradkennlinien und Maximum Power Point Tracking (MPPT) von Wechselrichtern bis zu 100 kW Leistung gemessen werden. (Bildquelle: BFH-TI)

Programmschwerpunkte

Die Photovoltaik erfuhr im Jahr 2008 weltweit wie auch in der Schweiz einen weiteren Aufschwung, wobei sich im letzten Quartal erwartungsgemäss auch Auswirkungen der globalen Wirtschaftskrise auf die Photovoltaik und eine Verlangsamung der Entwicklung abzeichneten. Vom allgemeinen Aufschwung war auch das Programm Photovoltaik massgeblich betroffen, indem das Interesse von Forschung und Industrie am Thema weiter gross ist und sich die Schweizer Industrie-Aktivitäten weiter verstärkten. Durch die im Verlauf des Jahres 2008 eingeführte kostendeckende Einspeisevergütung für Strom aus erneuerbaren Energien gewannen anwendungsorientierte Fragestellungen an zusätzlicher Bedeutung. Durch die breite Programmabstützung im Bereich der Forschung konnte der bisherige Umfang des Programms im Jahr 2008 übertroffen werden. Das anhaltende Wachstum des internationalen Photovoltaik-Marktes bildet eine wichtige Grundlage für den weiterhin erfolgenden, deutlichen Ausbau der Photovoltaik-Industriebasis in der Schweiz. Die Kompetenz der Schweizer Photovoltaik-Forschung ist mehr denn je gefragt und führt immer häufiger zu industrieorientierten Projekten.

Das Programm Photovoltaik verfolgt eine ausgeprägte Ausrichtung auf die industrielle Umsetzung und die internationale Wettbewerbsfähigkeit, sowohl für Produkte wie auch für die vorgelagerte Forschung. Laufende Aktivitäten in Forschung und Entwicklung sowie noch bestehende Projekte im Bereich von Pilot- und Demonstrationsanlagen umfassen im Berichtsjahr 2008 ca. 50 Projekte, wobei alle bekannten Projekte mit einer Förderung der öffentlichen Hand berücksichtigt sind.

Gestützt auf das Energieforschungskonzept der Eidgenössischen Energieforschungskommission CORE [36] verfolgt das Schweizer Photovoltaik Programm in der Periode 2008–2011 die folgenden Ziele [37]:

- Senkung der Kosten der Solarzellen und -module;
- Kostenziel 2011: Modul 3 Fr./W, System 5 Fr./W;
- Steigerung des Wirkungsgrades (Solarzellen);
- Senkung des Material- und Energieeinsatzes;
- Vereinfachung und Standardisierung der elektrischen Systemtechnik; Steigerung der Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Wechselrichtern;
- Erhöhung der Verfügbarkeit und der Vielfalt industrieller Produkte.

Dazu ist das Programm Photovoltaik in folgende fünf Bereiche aufgeteilt:

Solarzellen der Zukunft

Die Arbeiten zu **Dünnschichtsolarzellen** waren im Berichtsjahr wie bisher fokussiert auf die Schwerpunkte **Silizium** (amorph, mikrokristallin), Zellen auf der Basis von **Verbindungshalbleitern** (CIGS) sowie **Farbstoffzellen**. Die Grundlagen für **organische und Polymersolarzellen** als mögliche langfristige Technologieoptionen gewinnen gesamthaft an Bedeutung und bewegen sich gleichzeitig vom Konzept zur Solarzelle. Die mit Nachdruck verfolgte Industrialisierung von Produktionsprozessen steht bei den Silizium-Dünnschichtsolarzellen in einem fortgeschrittenen Stadium und bei den Verbindungshalbleitern ist ein industrielles Projekt im Aufbau. Im Jahr 2008 wurden die Industrieprojekte für grössere Fertigungsanlagen mit Dünnschichtsolarzellen vorangetrieben. Solarzellen auf flexiblen Substraten gewinnen zudem weiterhin an Bedeutung.

Gemäss Energieforschungskonzept der CORE 2008–2011 [36] lauten die Ziele für den Bereich Solarzellen:

- Industrielle Fertigung von Solarzellen und -modulen auf Basis von Dünnschichttechnologien mit dem Ziel von wettbewerbsfähigen Herstellungsprozessen und Produkten (Zellen, Module);
- Mittel- und langfristige Materialoptionen für Solarzellen der Zukunft (z.B. organische und polymere Solarzellen) mit dem Ziel, dazu die internationale Zusammenarbeit in Europa auszubauen;
- Fertigungsprozesse für dünnere Wafer mit dem Ziel einer Waferdicke von 150 µm.

Die Ziele für den Bereich der Solarzellen werden im Detailkonzept Photovoltaik [37] weiter präzisiert. Die Forschungsarbeiten an Solarzellen stellen bezüglich Mitteleinsatz den wichtigsten Bereich des Schweizer Photovoltaik-Programms dar. Entsprechend kommen auch diverse Förderinstrumente zum Einsatz.

Module und Gebäudeintegration

Das Gebiet der Solarmodule ist im Programm Photovoltaik eng mit der Anwendung der **Gebäudeintegration** verbunden. Im Vordergrund stehen Modultechnologien, welche mit den in der Schweiz entwickelten Solarzellen einhergehen. Forschungsthemen in diesem Bereich können neue bzw. verbesserte Verfahren zur Herstellung von Solarmodulen (z.B. Verpackung, Verschal-

tung, neue Materialien) sowie deren Eigenschaften (z.B. Langzeitstabilität, mechanische, optische und thermische Eigenschaften) sein.

Gemäss Energieforschungskonzept der CORE 2008–2011 [36] lauten die Ziele für den Bereich Solarmodule und Gebäudeintegration:

– Echte Integration von Dünnschichtsolarzellen in neue Produkte für die Gebäudeintegration mit dem Ziel, neue Photovoltaik-Gebäude-Komponenten, insbesondere mit Dünnschichttechnologie, industriell zu fertigen.

Produktsynergien der Photovoltaik mit der Gebäudetechnik – in der Gebäudehülle ebenso wie mit der Haustechnik (z.B. Brennstoffzellen) – mit dem Ziel, neue Lösungsansätze für die Optimierung der Energieproduktion und der Energienutzung im Gebäude zu erarbeiten.

Elektrische Systemtechnik

Die elektrische Systemtechnik, insbesondere für Wechselrichter, ist weit fortgeschritten und entsprechend besteht ein breites Angebot am Markt, inklusive diverser erfolgreicher Schweizer Produkte. Die notwendige Weiterentwicklung der Wechselrichter erfolgt zumeist durch die Industrie. Dagegen ist die **Qualitätssicherung** in diesem Schwerpunkt sicherzustellen, ebenso wie die dazu erforderlichen Prozeduren (z.B. Zertifizierung von Produkten). Punktueller Bedarf entsteht durch allgemeine Fortschritte in der elektrischen Systemtechnik und neue Anwendungen.

Neue Optionen in der elektrischen Systemtechnik werden durch die fortschreitende elektrische Haustechnik ermöglicht. In Zukunft werden Informationen über den Betriebszustand diverser haustechnischer Anlagen in verstärktem Ausmass ausgetauscht werden.

Die elektrischen Systemkomponenten sind in einer Photovoltaik Anlage diejenigen Komponenten, welche in der Vergangenheit zu den schwächsten Gliedern gehörten, und für zahlreiche Ausfälle verantwortlich waren. Obwohl sich diese Situation in den letzten Jahren verbessert hat, bleibt das Langzeitverhalten von Photovoltaik-Komponenten und -Anlagen ein wichtiges Anliegen, welches durch einige, jedoch begrenzte Analysen vertieft werden soll. Die Zuverlässigkeit und Sicherheit von Photovoltaik-Komponenten und -Anlagen sind Gebiete, die in letzter Zeit vermehrt Beachtung gefunden haben (z.B. Lichtbogen).

Ein in Zukunft wichtiger werdendes Thema ist die Integration der Photovoltaik ins elektrische Netz. Dies betrifft weniger die Fragen in Bezug auf eine einzelne Anlage als vielmehr die Wechselwirkung einer grösseren Zahl von Photovoltaikanlagen mit dem elektrischen Netz. Im Zusammenhang mit der erwarteten Entwicklung von Smart Grids können sich neue Anforderungen und Chancen für die Photovoltaik ergeben. Es interessieren hier in erster Linie Photovoltaik spezifische Fragestellungen.

Gemäss Energieforschungskonzept der CORE 2008–2011 [36] lauten die Ziele für den Bereich Elektrische Systemtechnik:

– Neue Systemkomponenten für netzgekoppelte Anlagen, Insel- und Hybridsysteme mit dem Ziel von integrierten Produktlösungen für den kombinierten Netz-, Insel und Hybridbetrieb;

Dezentrale Energieerzeugungssysteme, Energiespeicherung und -nutzung mit dem Ziel einer aktiven Verbrauchssteuerung.

Begleitende Themen

In diesem, die Technik zum Teil ergänzenden Bereich werden einerseits allgemeine, für die weitere Marktentwicklung der Photovoltaik notwendige Voraussetzungen sichergestellt, z.B. in Bezug auf fortgeschrittene Hilfsinstrumente für die Planung und das Monitoring von Photovoltaikanlagen, die Quantifizierung von Umweltaspekten, usw.. Um die Marktrelevanz sicherzustellen, sind solche Projekte in enger Zusammenarbeit mit den entsprechenden Stellen auszuführen.

Eine zweite Kategorie von Projekten in diesem Schwerpunkt bilden neue, in Kombination mit anderen Energieformen mögliche Anwendungen der Photovoltaik, sei es mit anderen Formen der Sonnenenergie (Solararchitektur und thermische Solarenergie), in Konzepten der nachhaltigen Mobilität (Elektromobile, Solarboote, usw.) oder in Kombination mit anderen Energieträgern (z.B. Wasserstoff, Thermophotovoltaik). Auch hier ist eine gute Koordination mit entsprechenden Förderstellen sicherzustellen und die eigentliche Entwicklung fachbezogen einzugrenzen. Dies bedeutet, dass sowohl die primäre energetische Nutzung wie auch der spezifische Entwicklungsbedarf identifiziert werden müssen.

Institutionelle internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit wird grundsätzlich in allen bisher besprochenen Bereichen angestrebt und ist auch dementsprechend etabliert. Nebst dieser projektbezogenen internationalen Zusammenarbeit ist diese aber auch auf der Ebene der Institutionen anhaltend zu gewährleisten. Die bisherigen Erfahrungen und der Nutzen dieser Zusammenarbeit für die Schweiz können allgemein als sehr gut eingestuft werden. Demnach bildet die Kontinuität dieser internationalen Zusammenarbeit ein strategisches Element des Programms Photovoltaik. Angesichts der raschen

internationalen Entwicklung der Photovoltaik ist diese Zusammenarbeit in Zukunft in allen Bereichen fortzuführen.

Im Vordergrund stehen folgende internationale Institutionen:

- Europäische Kommission (EC): Rahmenforschungsprogramme, SET-Plan;
- EU PV Technology Platform (PV TP): Strategic Research Agenda, SET Plan;
- PV-ERA-Net-Kooperation zwischen europäischen Forschungsprogrammen;
- IEA PVPS: Forschungskooperation im Rahmen der IEA;
- IEC: Normentätigkeit;
- Organisationen zur Entwicklungszusammenarbeit: internationale Organisationen, z.B. gtz, GEF, IFC, WB.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2008

Zell-Technologie

Die **grosse Bandbreite der Schweizer Solarzellenforschung** konnte im Berichtsjahr 2008 dank der breiten Abstützung dieser Forschung mit Erfolg fortgesetzt werden. Die Beteiligung an EU-Projekten des 6. und 7. Rahmenforschungsprogramms sowie KTI-Projekte bildeten hier gewichtige Elemente.

a) Dünnschichtsilizium

Die wesentlichen Entwicklungen im Bereich des Dünnschichtsiliziums finden an der Universität Neuchâtel (IMT), an der EPFL (CRPP) sowie bei den Unternehmen Oerlikon Solar (Trübbach und Neuchâtel) und VHF-Technologies (Yverdon) statt und stellen den wichtigsten Schwerpunkt des Photovoltaik-Programms dar. Das PSI und die Empa Thun ergänzen diesen Schwerpunkt mit neuen Ansätzen.

Das IMT begann im Berichtsjahr eine neue Phase des Projektes zu *Silizium-Dünnschichtsolarzellen und -modulen* [1a]. Die Ziele dieses 4-jährigen BFE-Projektes bestehen darin, die Kosten von Silizium Dünnschichtsolarzellen weiter zu senken, wobei amorphes Silizium, SiGe-Verbindungen und mikrokristallines Silizium Gegenstand der Forschung sind. Es sollen diejenigen Fortschritte erzielt werden, welche Herstellungskosten < 1 €/Wp bei einem Wirkungsgrad von > 10 % erlauben. Das Projekt befasst sich mit den vier Ebenen Materialien, Prozesse, Komponenten (Devices) und Zuverlässigkeit und umfasst entsprechende Depositionssysteme (Fig. 1) sowie umfangreiche analytische Methoden. Die Zusammenarbeit mit der Industrie erfolgte primär mit den Unternehmen Oerlikon Solar und VHF-Technologies, welche die am IMT entwickelten Prozesse in ihre Produkte implementieren. Neu hinzugekommen ist seitens der Industriepartner die Firma Roth & Rau, welche mit dem IMT eine umfangreiche Forschungspartnerschaft eingegangen ist. Folgende Resultate aus dem Berichtsjahr seien hier erwähnt:

Materialien: Aufbauend auf den Resultaten der Vorjahre für amorphe und mikrokristalline Einfach-Solarzellen (single junction) auf Glassubstraten und der Entwicklung von Zwischenreflektor Schichten auf der Basis von ZnO bzw. SiOx, wurde eine weitere Erhöhung des Wirkungsgrads der mikromorphen Solarzelle angestrebt. Mit einer Zwischenreflektor-Schicht aus SiOx wurde im Berichtsjahr der Wirkungsgrad von mikromorphen Solarzellen auf 1 cm^2 Fläche auf 13,1 % erhöht. Für transparente leitende Oxydschichten (TCO) aus ZnO konnte im Feuchte-Wärme-Test (85 ºC, 85 % relative Feuchtigkeit) eine gute Stabilität erzielt werden.

Prozesse: Ein Schwerpunkt war im Berichtsjahr die Herstellung von mikrokristallinem Silizium bei hohen Abscheideraten. Als Resultat konnte bei einer gegenüber früher deutlich höheren Abscheiderate von 1 nm/s eine mikrokristalline Einfach-Solarzelle mit einem Wirkungsgrad von 7,1 % hergestellt werden. Weitere Aktivitäten befassten sich mit der Herstellung von nanotexturierten Substraten sowie Laser-Strukturierung (laser scribing) der Solarzellen zur monolithischen Verschaltung.

Komponenten: Nebst der bereits erwähnten mikromorphen Solarzelle mit einem Wirkungsgrad von 13,1 % wurden amorphe (p-i-n)-Tandem-Solarzellen auf Glas mit einem Anfangswirkungsgrad von 9,8 % bzw. einem stabilisierten Wirkungsgrad[1] von 8,3 % erreicht. Für die Anwendung auf Plastiksubstraten wurden mit einer ZnO-Zwischenreflektor-Schicht mikromorphe (n-i-p)-Solarzellen mit einem stabilisierten Wirkungsgrad von 10,1 % erzielt.

[1] Als Wirkungsgrad einer Solarzelle wird das Verhältnis von erzeugter elektrischer Leistung zur Leistung der Globalstrahlung bezeichnet. Der Wirkungsgrad wird dabei für normierte Bedingungen (STC = Standard Test Conditions) angegeben: Einstrahlungsstärke von 1000 W/m^2, konstante Temperatur der Solarzelle von 25 °C, ein Strahlungsspektrum AM (Air Mass) von 1,5. Halbleitermaterialien mit einer einfachen Bandlücke können nur einen Teil des solaren Spektrums absorbieren. Der maximale theoretische Wirkungsgrad (Shokley-Queisser-Limit) liegt bei 33 %. Solarzellen aus amorphem Silizium zeigen das Phänomen der Lichtalterung (Staebler-Wronski-Effekt): der Wirkungsgrad nimmt mit der Zeit ab und stabilisiert sich auf einem niedrigeren Wert, den man als stabilisierten Wirkungsgrad bezeichnet. Der Anfangswirkungsgrad kann je nach Zelle 10–30 % über dem stabilisierten Wirkungsgrad liegen.

Zuverlässigkeit: Bei dieser am IMT neu aufgebauten Tätigkeit geht es um die zuverlässige Verpackung der verschiedenen Solarzellen. Die dazu gehörigen Arbeiten umfassen die Adhäsion von Polymeren auf Glas, die Wasserdiffusion in Verpackungsschichten für Solarzellen, den Wassergehalt von Polymeren sowie die Kompatibilität mit der elektrischen Kontaktierung und mit Rückreflektorschichten.

Das KTI-Projekt *Flexible photovoltaics – next generation high efficiency and low cost thin film silicon modules* [1b] wurde im Berichtsjahr zwischen dem IMT und VHF-Technologies fortgesetzt. In diesem Vorhaben wird angestrebt, die bisher bei VHF-Technologies in ihrer ersten Produktgeneration bei flexiblen Solarzellen realisierten Wirkungsgrade von ca. 4,5 % signifikant zu erhöhen. Durch die Verwendung eines rückseitigen, diffus streuenden dielektrischen Reflektors, einer Substratstrukturierung und einer amorphen Zellenstruktur in Tandemkonfiguration soll der Wirkungsgrad der industriellen Produkte auf 6 % erhöht werden. Auf kleiner Fläche wurden auf Einfachzellen bzw. Tandemzellen mit einem stabilisierten Wirkungsgrad von 7,3 % bzw. 8,0 % gute Fortschritte erzielt. Ein weiteres KTI-Projekt des IMT befasst sich mit *transparenten leitenden Oxyden auf der Grundlage von ZnO* [1c].

Das durch den Axpo-Naturstromfonds unterstützte Projekt *Thific – Thin film on crystalline silicon* [1d] wurde am IMT fortgesetzt. In diesem Vorhaben werden extrem effiziente Solarzellen mit 20–22 % Wirkungsgrad angestrebt. Dabei kommt das bekannte Konzept einer Heteroverbindung (hetero junction) zwischen kristallinen Silizium-Solarzellen und amorphen bzw. mikrokristallinen Solarzellen zur Anwendung (HIT-Zelle). Der Fortschritt im Vergleich zu andern HIT-Zellen liegt in der Verwendung von Siliziumwafern deutlich geringerer Dicke bis gegen 100 µm und der damit verbundenen Material- bzw. Energieeinsparung. In Vorarbeiten zu diesem Vorhaben wurde bereits ein Wirkungsgrad von 19 % erreicht. Eine wesentliche Rolle für diese Solarzelle kommt der Grenzfläche zwischen dem kristallinen Siliziumwafer und der amorphen Dünnschichtsolarzelle zu; diese Grenzfläche sollte in Hinsicht auf den weiteren Schichtaufbau atomar scharf sein. Das bessere Verständnis dieser Grenzfläche führte im Berichtsjahr zu Solarzellen mit einer Klemmenspannung von 700 mV.

Im neuen EU-Projekt Hetsi*: Heterojunction solar cells based on a-Si/c-Si* [1e] arbeitet das IMT auch international auf dem Thema der Heteroverbindungssolarzelle. Dieses Projekt verbindet zum ersten Mal zwölf europäische Unternehmen und Forschungsinstitute aus den Gebieten des kristallinen Siliziums und der Silizium-Dünnschichtsolarzellen in einem solchen Projekt. Das Projekt ergänzt die Untersuchungen zur oben erwähnten Grenzfläche und dem darauf erfolgenden Schichtaufbau der amorphen Solarzelle. In Hinsicht auf die industrielle Nutzung der Projektergebnisse wurde am IMT ein neues automatisiertes grossflächiges Depositionssystem (410 x 520 mm^2) aufgebaut.

Das EU-Projekt Flexcellence [1f] unter Schweizer Koordination des IMT und Beteiligung von VHF-Technologies wurde im Berichtsjahr erfolgreich abgeschlossen. In diesem Projekt ging es um flexible Solarzellen auf Kunststoff- und Metallsubstraten und die dafür notwendigen Produktionstechnologien. Im Vorhaben wurden drei unterschiedliche Ansätze zur roll-to-roll-Beschichtung untersucht, namentlich Mikrowellen-PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition), Hot Wire CVD (Chemical Vapor Deposition) und VHF PECVD. Das IMT bzw. VHF-Technologies befassen sich mit dem letzten der drei genannten Verfahren. Am IMT wurde im Berichtsjahr mittels PECVD eine mikromorphe Tandemzelle



Figur 1: Automatisiertes Dünnschichtsilizium-Doppelkammer-Depositionssystem auf der Grundlage der KAI-M plasma box von Oerlikon. (Bildquelle: IMT)



Figur 2: Mehrfach Prozesskammer VHF-Technologies. (Bildquelle: IMT)

auf Kunststoff (PEN) mit einem stabilisierten Wirkungsgrad von 9,8 % realisiert (Fig. 2)

Im EU-Projekt Athlet [1g] befassen sich das IMT und Oerlikon Solar mit der Weiterentwicklung der Silizium-Dünnschichtsolarzellen. Für mikromorphe Tandemzellen lautet das Ziel: 10 % stabiler Wirkungsgrad bei einer Fläche von 1 m^2 und 10 Å/s Depositionsrate bzw. Modulproduktionskosten von < 0,5 €/Wp. Dieses Projekt ergänzt das eingangs aufgeführte BFE-Projekt am IMT. Im Berichtsjahr konnte unter Einsatz der oben erwähnten SiOx-Zwischenreflektorschicht ein Anfangswirkungsgrad von mikromorphen Solarzellen von 13,3 % erreicht werden. Mit einem am IMT neu aufgebauten industriellen Depositionssystem konnten mikromorphe Solarzellen mit 11 % Wirkungsgrad und 9,4 % stabilisiertem Wirkungsgrad hergestellt werden.

Das IMT wechselte auf Ende 2008 seine institutionelle Anbindung von der Universität Neuchâtel zur EPFL, wobei der Standort Neuchâtel beibehalten wird.

Ein neues KTI-Projekt am CRPP der EPFL befasst sich mit der Entwicklung eines neuen PECVD-Reaktors für die Deposition von Dünnschichtsolarzellen [2].

Das neue BFE-Projekt am PSI *Zweidimensionale Nanostrukturen für Siliziumsolarzellen* [3a] geht der Frage nach optimalen Ansätzen für zweidimensionale optische Beugungsstrukturen auf Silizium-Dünnschichtsolarzellen nach. In einer ersten Phase werden diese numerisch modelliert. Später sollen solche Strukturen experimentell realisiert und ausgemessen werden. Im Berichtsjahr wurden verschiedene Algorithmen und deren Konvergenzverhalten untersucht.

Im neuen EU-Projekt *High-Ef – Large grained, low stress multi-crystalline silicon thin film solar cells on glass by a novel combined diode laser and solid phase crystallization process* [4] arbeitet die Empa Thun an einem neuen Prozess zur Herstellung hoch effizienter Silizium-Dünnschichtsolarzellen. Der Prozess verbindet eine durch Laserschmelzen verursachte Kristallisation einer amorphen Siliziumschicht mit der Festphasenepitaxie. Daraus soll ein wettbewerbsfähiger Prozess für Dünnschichtsolarzellen mit einem Wirkungsgrad grösser 10 % erreicht werden. Die Technologie soll durch den deutschen Hersteller CSG Solar genutzt werden. Die Arbeiten an der Empa befassten sich mit der Charakterisierung der Mikrostruktur sowie mit mechanischen Eigenschaften des erzeugten Siliziums.

b) II-VI Verbindungen (CIGS)

Die Gruppe Dünnschichtphysik an der ETHZ hat über viele Jahre EU-Projekte zum Thema Solarzellen auf der Basis von Verbindungshalbleitern (CIGS, CdTe) durchgeführt. Das BFE-Projekt *Large area flexible CIGS* [5a] untersucht die Hochskalierung von CIGS-Solarzellen auf grösseren flexiblen Substraten. Einerseits sollen dabei die notwendigen Vakuum-Depositionsanlagen verbessert, und andererseits der Wirkungsgrad und die Zuverlässigkeit der CIGS-Solarzellen erhöht werden. Ziel ist es, einen Wirkungsgrad von 12 % auf Polyimidsubstraten zu erreichen. Weiter sollen alternative Rückseitenkontakte entwickelt werden.

Die Depositionsanlagen werden im Haus entwickelt und in Hinsicht auf Prozess-Reproduzierbarkeit und In-line-Abscheidung optimiert. Ein wichtiger Punkt bei der grossflächigen Deposition ist eine genügend homogene Verteilung der Schichteigenschaften (z.B. Schichtzusammensetzung, Schichtdicke) über die Fläche des Substrates. Dazu wurden die verwendeten Verdampfer der einzelnen Materialien in Hinsicht auf Verdampfungsprofile und Schichtdicke analysiert. Für eine Substratbreite von 25 cm wurde eine akzeptable Homogenität erreicht.

Für die Rückkontakte wurden Alternativen zum konventionellen Molybdän (Mo) entwickelt; bevorzugte Materialien sind transparente Oxydschichten wie Indium tin oxide (ITO) und Metall-Nitride. Mit ITO als Rückkontakt wurden auf Polyimid flexible CIGS-Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von 11,9 % erreicht. Mit Ti/TiN als Rückkontakt konnte der Wirkungsgrad für einzelne Solarzellen auf bis zu 13,1 % erhöht werden, sodass mit diesen alternativen Rückkontakten im Vergleich zum bisherigen Referenzwert und Weltrekord von 14,1 % (mit Mo-Rückkontakt) interessante Perspektiven eröffnet werden.

Im BFE-Projekt *Thin film CIGS solar cells with a novel low cost process* [5b] entwickelt die Gruppe Dünnschichtphysik der ETHZ eine völlig neuartige Herstellung einer CIGS-Solarzelle. Unter Verwendung einer Ionenaustausch-Reaktion wird dabei das Kupfer aus kupferhaltigen wässrigen bzw. organischen Lösungen in dünne Filme von Indiumselenid eingebaut. Letztere werden durch Koevaporation hergestellt. Struktur und Zusammensetzung der so erzeugten Schichten wurden durch oberflächenanalytische Methoden bestimmt. Die organische Lösung ergibt einen zuverlässigeren und reproduzierbareren Einbau von Kupfer, führte aber bisher nicht zu besseren Wirkungsgraden der so hergestellten CIGS-Solarzellen. Die mit wässriger Lösung hergestellten Zellen erreichten bisher einen Wirkungsgrad von 4,1 %, diejenigen mit organischer Lösung einen Wirkungsgrad von 3,5 %.

Das EU-Projekt *Larcis* [5c] befasst sich mit grossflächigen Prozessen zur industriellen Produktion

von CIGS-Solarzellen. Dabei befasst sich die Gruppe Dünnschichtphysik einerseits mit der Optimierung der Zellrückkontakte auf der Grundlage von Molybdän sowie alternativer Materialien, insbesondere TiN und ZrN bzw. deren Kombination mit Molybdän. Im Berichtsjahr wurde andererseits der Einfluss von Art und Menge der Natrium-Behandlung auf die Eigenschaften der CIGS-Solarzellen näher untersucht. Dazu wurde die Dicke der Natriumschicht zwischen 0 und 40 nm variiert. Die optimalen Eigenschaften wurden bei einer 20 nm dicken Natriumschicht erzielt. Die Abscheidung der Natriumschicht erfolgte bisher mehrheitlich in der Form einer Nachbehandlung (post deposition treatment PDT). Im Berichtsjahr wurde zudem die Koevaporation von Natrium untersucht; diese hat den Vorteil, dass sie besser in einem In-line-Prozess verwendet werden kann. Damit wurde ein Wirkungsgrad der CIGS-Solarzellen von 12,5 % erreicht. Ein weiterer Aspekt betraf die Herstellung von Puffer-freien CIGS-Absorberschichten (die Pufferschicht besteht üblicherweise aus einer dünnen Schicht aus CdS). Unter Verwendung einer abschliessenden Oberflächenschicht aus In_xSe_y wurde eine Puffer-freie CIGS-Solarzelle mit 12,0 % Wirkungsgrad erzielt, was noch tiefer ist als mit der CdS-Pufferschicht.

Im EU-Projekt *Athlet* [5d] ist die Gruppe Dünnschichtphysik an zwei Arbeitspaketen zu CIGS-Solarzellen beteiligt. Im Vordergrund stehen einerseits ergänzende Entwicklungsarbeiten für flexible Solarzellen auf Polyimid, und andererseits werden neue Verfahren für Pufferschichten auf der Grundlage von In_2S_3 und die Abscheidung der Solarzellen auf TCO-Schichten vertieft untersucht. Im Berichtsjahr wurden mit In_2S_3 CdS-freie CIGS-Solarzellen auf Polyimid mit einem Wirkungsgrad von 10,1 % erreicht. Zur Herstellung der In_2S_3-Pufferschicht wurde neu die Verwendung von Ultraschall-Spray-Pyrolyse untersucht. Die besten CIGS-Zellen erreichten hier auf Glas einen Wirkungsgrad von 12,4 %. In Hinsicht auf CIGS-Tandemzellen wurden entsprechende Schichtabfolgen hergestellt. Durch Veränderung des Gallium-Gehaltes kann der Photostrom für einen Tandemaufbau angepasst werden.

Im KTI-Projekt *Laser patterning of CIGS solar cells on flexible foils for monolithic integration* [5e] in Zusammenarbeit mit Flisom und der Berner Fachhochschule für Technik und Informatik (Institut für angewandte Laser Technologie) untersucht die Gruppe Dünnschichtphysik der ETHZ die Laser-Strukturierung von flexiblen CIGS-Solarzellen für die monolithische Verschaltung zu Solarmodulen. Im Berichtsjahr wurde das Lasersystem aufgebaut und einzelne Laser-scribes untersucht. Ein Prototyp eines monolithisch verschalteten flexiblen CIGS-Solarmoduls konnte hergestellt werden (Fig. 3).

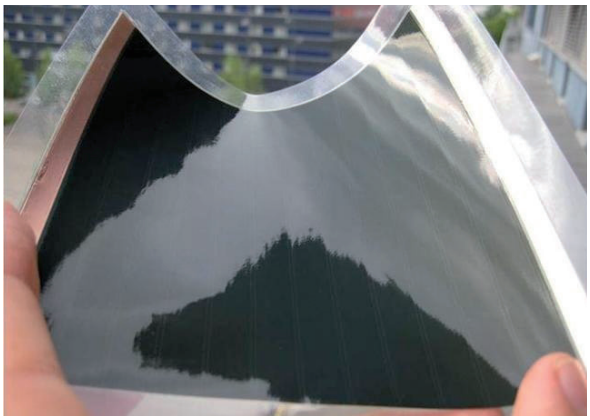
Im durch den Axpo-Naturstromfonds unterstützten Projekt *Development of flexible CIGS solar modules with metal grids* [6] entwickelt die Start-up Firma Flisom die Verschaltung der CIGS-Solarzellen auf flexiblen Substraten durch Metallgitter. Es werden verschiedene Verfahren zur Verschaltung untersucht. Auch hier wurde ein Demonstrator-Modul hergestellt (Fig. 4).

Die Gruppe Dünnschichtphysik der ETHZ wechselt per Ende 2008 ihre institutionelle Anbindung zur Empa Dübendorf und baut dort ihre Laboratorien neu auf.

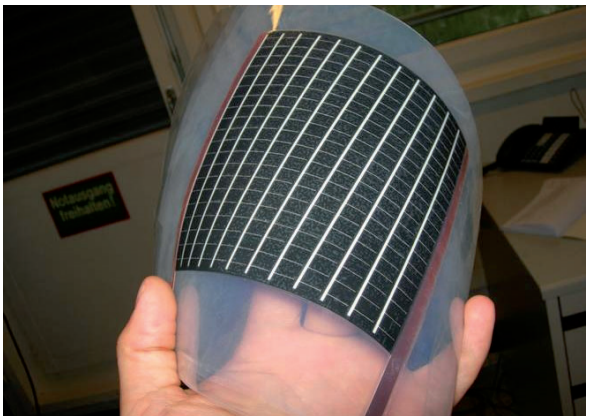
c) Farbstoff und organische Solarzellen

Farbstoffsolarzellen und insbesondere organische Solarzellen gewinnen derzeit national und international an Bedeutung. Auch in der Schweiz befasst sich eine Reihe von Forschungsinstituten neu mit diesen Themen.

Die Entwicklung von farbstoffsensibilisierten, nanokristallinen Solarzellen wurde am LPI (ISIC) der EPFL fortgesetzt. Wichtige Arbeiten dazu erfolgen im neuen EU-Projekt *Robust DSC* [7]. In diesem



Figur 3: Prototyp eines monolithisch verschalteten flexiblen CIGS Solarmoduls. (Bildquelle: ETHZ)



Figur 4: Demonstrator-Modul einer CIGS Solarzelle. (Bildquelle: Flisom)

Projekt arbeiten die wesentlichen akademischen und industriellen Organisationen Europa's auf dem Gebiet der Farbstoffsolarzellen zusammen mit dem Ziel, Materialien und Herstellungsprozesse für ein Solarmodul mit 7 % Wirkungsgrad zu entwickeln. Parallel dazu werden mehr grundlegende Untersuchungen mit neuen Materialien und Konfigurationen durchgeführt, welche einen Laborwirkungsgrad von 14 % zum Ziel haben.

Mit Unterstützung der Gebert-Rüf-Stiftung arbeitet das Institute of Computational Physics (ICP) an der Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften (ZHAW) mit dem LPI der EPFL am neuen Projekt *ModSol – Modelling, simulation and loss analysis of dye sensitized solar cells* [8a]. Dabei soll mittels verschiedenen Modellen das optische, physikalische und elektrochemische Verhalten der Farbstoffsolarzelle modelliert und grafisch dargestellt werden. Die ersten Arbeiten betreffen die optische Modellierung und ein eindimensionales Flächenmodell der Farbstoffsolarzelle.

Die Empa Dübendorf baut im Labor für funktionale Polymere eine Kompetenz auf dem Gebiet der organischen Solarzellen auf. Im Vorhaben *Organic Photovoltaic Devices* [9a] wird die Kombination von Cyanin Farbstoffen mit PCBM Blends (Fulleren Derivate) sowie die Nanostrukturierung des Übergangs zwischen Donor- und Akzeptor-Materialien untersucht. Die Mikrostruktur kann in Dimensionen unter 100 nm eingestellt werden, wodurch die optoelektronischen Eigenschaften gezielt beeinflusst werden können.

Zur transnationalen europäischen Forschungszusammenarbeit fand im Rahmen des PV-ERA-Net-Projektes [38] (siehe unten) die Ausschreibung Polymol für Polymer und molekulare Solarzellen statt, an der sich auch das Schweizer Photovoltaik-Forschungsprogramm beteiligte. Von den insgesamt acht Projektvorschlägen wurden vier zur Ausführung ausgewählt, zwei davon mit Schweizer Beteiligung. An der Empa Dübendorf beginnt im Januar 2009 dazu das Projekt *HIOS-Cell* [9b], welches in engem Bezug zum oben beschriebenen Schwerpunkt der Empa auf dem Gebiet der organischen Solarzellen steht. Die Empa Dübendorf führt weiter eine KTI-Machbarkeitsstudie zum Thema *Transparent and Flexible Solar Cell Electrodes made from Precision Fabric* [9c] durch.

Ein weiteres neues Projekt aus der Polymol Ausschreibung hat an der Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften (ZHAW) begonnen: *Apollo – efficient areal organic solar cells via printing* [8b] verbindet europäische Kompetenzen auf dem Gebiet der plastic electronics, um dadurch einfach herstellbare organische Solarzellen zu entwickeln. Das Ziel ist, diese Solarzellen wie gedruckte Schaltungen herstellen zu können. Aus der Schweiz beteiligen sich nebst der ZHAW, welche das Projekt leitet und sich mit der Zellmodellierung befasst, die Ciba und das CSEM.

Das EU-Projekt *OrgaPvNet* [10a] ist ein Netzwerkprojekt, welches die europäischen Akteure auf dem Gebiet der organischen Solarzellen zusammenführt und die künftigen Strategien auf diesem Gebiet erarbeiten soll. Solaronix ist eines der vier KMU's, welche an diesem insgesamt 22 Partner umfassenden Projekt beteiligt sind. Die Projektaktivitäten konzentrierten sich bisher auf verschiedene Workshops, in denen organische Solarzellen sowohl wissenschaftlich-technisch wie marktbezogen thematisiert wurden.

Das EU-Projekt *Napolyde* [10b] steht für interdisziplinäre Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der nanostrukturierten Polymer-Deposition in Hinsicht auf Anwendungen im Energiebereich und der smart devices. Es führt 23 verschiedene Partner aus sehr unterschiedlichen Fachgebieten und Anwendungsfeldern wie z.B. Mikroelektronik, Beschichtung oder Biomedizin zusammen und verfolgt sowohl kleine wie grossflächige Applikationen. In der Schweiz sind Solaronix und das CSEM an diesen Arbeiten beteiligt – die Photovoltaik ist ein explizit anvisiertes Anwendungsgebiet. Es wurden monolithisch verschaltete Farbstoffzellen-Kleinmodule (10 x 10 cm^2) mit 5,6 % Wirkungsgrad hergestellt. Dabei interessieren insbesondere die notwendigen Arbeitsschritte und die erzielten Materialeigenschaften.

Solaronix beteiligte sich am EU-Projekt *Fullspectrum* [10c], welches im Berichtsjahr abgeschlossen wurde. *Fullspectrum* war eines der ersten Integrierten Projekte im Bereich der Photovoltaik; es führte unterschiedliche Ansätze zur besseren Nutzung des Strahlungsspektrums in einem Projekt zusammen (III-V multijunctions, Thermophotovoltaik, intermediate band cells, molekulare Konzepte); dabei wurden Wirkungsgrade bis zu 40 % angestrebt. Solaronix war in diesem Projekt insbesondere mit unterstützenden Arbeiten zu neuen molekularen Konzepten beteiligt. Dabei ging es um die Rolle von Farbstoffsolarzellen in 2-Photon-Prozessen bzw. in flachen Konzentratoren. Solaronix befasste sich hier mit den Messungen der Stromspannungskennlinie, der spektralen Empfindlichkeit und der Stabilität der flachen Konzentratoren. Im Berichtsjahr konnte für die entwickelten flachen Konzentratoren eine Stabilität bis zu zwei Jahren Aussenbewitterung nachgewiesen werden.

Ein verwandtes Konzept wird in einem neuen KTI-Projekt *Development of efficient luminescent concentrators based on inorganic/organic nanomaterials for applications in solar energy conversion* [11] durch das Institut für anorganische Chemie der Universität Zürich in Zusammenarbeit mit

Optical Additives durchgeführt. In diesem Projekt werden Farbstoff-Zeolithen eingesetzt, welche durch ihre supramolekulare Organisation eine effiziente Konzentration sicherstellen sollen. Im Berichtsjahr wurden die vorbereitenden Arbeitsschritte optimiert.

d) Übergreifende Projekte

Das durch die Empa Dübendorf koordinierte CCEM-Projekt *ThinPV* [9d], welches auch durch Swisselectric Research unterstützt wird, führt die verschiedenen Akteure der Schweizer Dünn schichtsolarzellen-Forschung in einem Projekt zusammen. Gemeinsam wird an ausgewählten Fragestellungen der verschiedenen Technologien gearbeitet. Auf dem Gebiet der Silizium-Dünnschichtsolarzellen geht es um das Verständnis der plasmaphysikalischen Prozesse, wozu am IMT in Neuchâtel entsprechende analytische Methoden aufgebaut wurden (optische Emissionsspektroskopie, Infrarot-Absorptionsspektroskopie und Laser-Streuung). Ein weiteres Teilprojekt befasst sich mit hybriden Tandemzellen zwischen CIGS-Solarzellen und Farbstoffsolarzellen sowie der Optimierung der einzelnen Teilzellen, insbesondere der Farbstoffsolarzelle. Der Rekordwirkungsgrad einer gestapelten Farbstoff/CIGS-Tandemsolarzelle beträgt 15 %; im Berichtsjahr wurde die monolithische Integration dieser Tandemzelle entwickelt, der erreichte Wirkungsgrad beträgt hier 9,9 %. Ein drittes Teilprojekt befasst sich besonders mit der Ausbildung von Nachwuchsforschern; im Berichtsjahr wurde dazu ein Workshop zum Thema *A look inside solar cells* [39] erfolgreich durchgeführt.

Das Institut für Solartechnik SPF an der HSR Rapperswil baute mit dem BFE-Projekt *PECNet* [12] ein Kompetenzzentrum für die solare Wasserspaltung mittels hybrider PV-PEC-Zellen auf. Das Vorhaben ist technologisch primär in der Photoelektrochemie angesiedelt, hat aber auch einen möglichen Bezug zur Photovoltaik. In einem ersten Schritt wurden die verschiedenen Kompetenzen und das vorhandene Know-how zusammengeführt und entsprechende Publikationen erfasst. Zusammen mit dem Energy Centre wird am ISIC der EPFL das PEChouse als Koordinationsstelle aufgebaut. Das Projekt wurde im Berichtsjahr abgeschlossen.

Solarmodule und Gebäudeintegration

Gebäudeintegrierte Anlagen stellen nach wie vor das primär angestrebte Anwendungsgebiet der Photovoltaik in der Schweiz dar. Dabei muss aber präzisiert werden, was unter einer gebäudeintegrierten Anlage zu verstehen ist (angebaute Anlagen oder echte Integration). Während in den letzten Jahren in Solar- bzw. Ökostrombörsen häufig die kostengünstigsten Lösungen für Flachdachanwendungen zum Einsatz gelangten, wird weiterhin an der Kostenreduktion von Lösungen mit einem stärkeren Integrationsaspekt gearbeitet. Die ab 2009 eingeführte kostendeckende Einspeisevergütung (KEV) für Solarstrom trägt den unterschiedlichen Kosten der verschiedenen Anlagen Rechnung und sollte gebäudeintegrierte Anlagen begünstigen. Da inzwischen für die Montage am Gebäude eine Reihe von Systemen erfolgreich umgesetzt werden konnte (siehe auch Abschnitt P+D), verlagert sich die Entwicklung vermehrt auf das Solarmodul selbst.

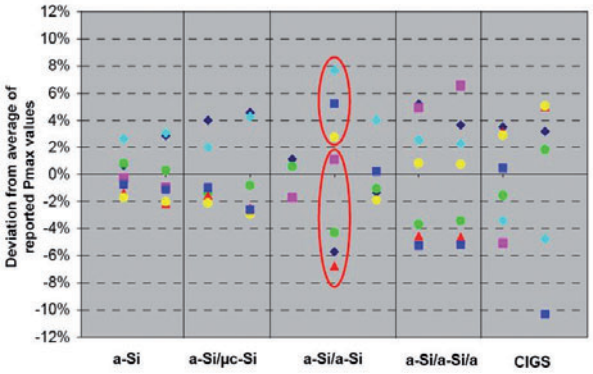
Swiss Solar Systems (3S) hat als Nachfolgeprojekt des im Vorjahr abgeschlossenen EU-Projektes *BIPV-CIS* [13a] die Entwicklung eines dachintegrierten Moduls im BFE-Projekt *Smarttile* [13b] weiter verfolgt. Mit der vorgeschlagenen Lösung soll ein Dachelement entwickelt werden, welches aufgrund des Montagesystems und der erweiterten Funktionalität (z.B. Anschlussdose) die Herstellungskosten reduziert und eine industrielle Massenfertigung ermöglicht. Weitere Aspekte betreffen die Dichtung in vertikaler Richtung, den Übergang zu konventionellen Dachziegeln, die Verwendung von Standardlaminaten, die Lösung ohne Aluminiumrahmen und Werkzeuge zur Montage sowie die Unterkonstruktion. Im Berichtsjahr erfolgte eine Konzentration auf die Anforderungen im Rahmen von Normprüfungen und die Konsequenzen für das Produktdesign. Dabei kommt insbesondere den Anforderungen an das Brandverhalten eine wichtige Bedeutung zu.

Am LTC (IMX) der EPFL wurde das KTI-Projekt *Ultralight photovoltaic structures* [14] im Berichtsjahr abgeschlossen. Das ursprüngliche Ziel war die Entwicklung eines sehr leichten und festen Photovoltaikmoduls (< 1 kg/m^2) mittels Sandwichstruktur für die Anwendung im Solarflugzeug *Solarimpulse* [18] von Betrand Piccard. Lösungsansätze wurden für monokristalline Siliziumsolarzellen und Farbstoffsolarzellen erarbeitet. Dabei stand das mechanische Verhalten unter Belastung und die Verpackung der Solarzellen im Vordergrund der Untersuchungen. Im Jahr 2007 kam VHF Technologies als zusätzlicher Partner ins Projekt. Damit rückte auch die Anwendung der Projektresultate in Hinsicht auf die Gebäudeintegration in den Blickwinkel.

Vereinzelte neue Konzepte und Produkte zur Photovoltaik-Gebäudeintegration wurden im Rahmen von P+D-Projekten erprobt (siehe entsprechendes Kapitel).

Elektrische Systemtechnik

Das **Schwergewicht in der Systemtechnik** liegt generell auf der Qualitätssicherung von Kompo-



Figur 5: Leistungsabweichungen (P_{MAX}) von Dünnschicht-Testmodulen bei STC-Bedingungen. (Bildquelle: Isaac)



Figur 6: 100-kW-Solargenerator-Simulators mit einem 100-kW-Wechselrichter von Sputnik. (Bildquelle: BFH-TI)

nenten (Module, Wechselrichter), Systemen (Auslegung, Energieertrag) und Anlagen (Langzeitbeobachtungen). Die Erkenntnisse aus diesen anwendungsnahen Fragen sind – besonders in einem rasch wachsenden Markt – für Sicherheit, Zuverlässigkeit und Energieertrag künftiger Anlagen wie auch für die Standardisierung der Produkte von grosser Bedeutung. Zusammen mit der fortschreitenden Kostenreduktion bei Komponenten und Systemen kann damit mittel- und langfristig die notwendige Wettbewerbsfähigkeit der Photovoltaik in langlebigen Anlagen erreicht werden.

Das Isaac an der SUPSI hat im Berichtsjahr das Projekt *Centrale Isaac-Tiso 2007–2010* [15a] fortgesetzt. Das gemäss ISO 17025 für Messungen zertifizierte Labor mit dem Sonnensimulator der Klasse A erhielt im Oktober 2008 die 8. offizielle Akkreditierung. Es wurde ein weiterer Solarsimulator von Pasan aufgebaut. Die als Dienstleistungen für Dritte ausgeführten Messungen der Strom–Spannungs-Kennlinie von Solarmodulen konnten mit einer Anzahl von 458 ausgeführten Messungen erneut deutlich zulegen. Zudem wurden für einzelne Produkte weitere Parameter wie Temperaturkoeffizienten oder das Verhalten bei unterschiedlicher Einstrahlung bestimmt.

Der 11. Testzyklus der Aussenmessungen hat im Berichtsjahr an 13 kommerziellen Modulen angefangen (4 mc-Si, 4 sc-Si, 1 HIT, 1 a-Si/a-Si Tandem, 1 a-Si/µc-Si, 2 CIS). Die gemessenen Leistungen der kristallinen Solarmodule am Anfang des 15 Monate langen Testzyklus lagen im Mittel bei –2,6 % der spezifizierten Leistung, wobei diese Abweichung zwischen +0,5 % und –10,5 % betrug.

Eine spezielle Entwicklung betrifft die korrekte Innenmessung von Dünnschichtmodulen. Je nach Technologie und Fabrikat sind hier Vorbehandlungen notwendig, z.B. durch Strom oder Licht. Oft braucht es auch eine spektrale Korrektur, welche aufgrund von Messungen des spektralen Ansprechverhaltens (spectral response) bestimmt wird.

Das Isaac beteiligte sich im Berichtsjahr weiterhin an den Arbeiten zum EU-Projekt *Performance* [15b]. Dieses vom Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme in Freiburg koordinierte vierjährige Projekt befasst sich mit allen pränormativen Arbeiten von Solarzellen bis hin zu Systemen und von Momentanmessungen bis zu Langzeitanalysen. Das Isaac ist an den Untersuchungen zu Performance und Energieproduktion von Photovoltaik-Modulen sowie der Modellierung beteiligt. Im Berichtsjahr wurde die Messeinrichtung des Isaac verbessert. Sechs europäische Testlaboratorien mit unterschiedlicher Infrastruktur führten im Berichtsjahr einen Round Robin Test an Dünnschichtmodulen durch. Die gemessenen Maximalleistungen zwischen den verschiedenen Laboratorien weisen eine Bandbreite bis zu ±7 % auf. Die grösseren Abweichungen werden durch nicht angepasste Strombedingungen erklärt (current mismatch). Amorphe Einfach-Solarzellen zeigten im Vergleich der verschiedenen Laboratorien die kleinsten Abweichungen, während diese bei amorphen Si-Tripelzellen und CIGS-Solarzellen am grössten waren (Fig. 5).

Besondere Arbeiten sind der Messung des Energieertrags der Solarmodule bei unterschiedlicher Einstrahlung gewidmet. Verschiedene Verfahren wurden dazu geprüft. Diese Resultate fliessen in die Arbeiten zur neuen IEC-Norm 61853 ein. Im Arbeitspaket zur Gebäudeintegration wurden wichtige neue Publikationen erarbeitet [40–42].

Das Isaac an der SUPSI wird im neuen Jahr 2009 bedeutende Investitionen tätigen, um die für *akkreditierte Messungen von Modulen gemäss IEC* [15c] notwendige Infrastrukturen aufzubauen. Aufgrund der grossen Nachfrage für solche Messungen und der am Isaac vorhandenen langjährigen Fachkompetenz ist die Zeit günstig für ein solches Vorhaben.

Am Photovoltaiklabor an der FH Burgdorf wurde das Projekt *Photovoltaik-Systemtechnik PVSYSTE 2007–2010* [16] fortgesetzt. Die teilweise seit 1992 ohne Unterbruch durchgeführten Langzeitmessungen an inzwischen 70 PV-Anlagen wurden weitergeführt. In Zusammenarbeit mit der Adev Burgdorf wurde die 2007 realisierte Modulvergleichs-Anlage mit vier weiteren kristallinen Modultechnologien erweitert und ins Monitoringprojekt eingeschlossen (total 20,3 kW_p), so dass dort nun 6 verschiedene Modultechnologien unter praktisch identischen Bedingungen im Einsatz sind. Für halbautomatische Wechselrichtertests wurde die Test-Software für den 20-kW-Solargenerator-Simulator auf vollautomatische Tests umgebaut. Ein grosser Teil der Projektaktivitäten war der Entwicklung und Inbetriebnahme des neuen linearen Solargenerator-Simulators von 100 kW gewidmet. Dieser Solargenerator-Simulator dürfte der weltweit grösste seiner Art sein. Bisher konnten an einem 100-kW-Wechselrichter Wirkungsgradkennlinien auf drei verschiedenen Spannungsstufen bis zu einer Leistung von maximal 92,2 kW aufgenommen werden (Fig. 6).

Die im Jahr 2006 begonnenen Untersuchungen bezüglich Blitzstromverhalten von Bypassdioden wurden auch 2008 weiter geführt und die theoretische Analyse weiter ausgebaut. Nach dem erfolgreichen Umbau des Stossstromgenerators auf einigermassen normgerechte Stossströme konnten auch verschiedene Bypassdioden in Modulen praktisch getestet werden.

Das EU-Projekt SOS-PVI *(Security of supply photovoltaic inverter)* [17], in welchem Maxwell Technologies als Schweizer Partner mitarbeitet, wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. In diesem Vorhaben wurden fünf Prototypen eines Wechselrichters mit integrierter Backup Funktion erarbeitet. Nebst der technischen Lösung für den Wechselrichter, wurden vor allem auch Fragen zur Lastkurve in bestimmten Netzen und die notwendigen Regelkreise untersucht.

Begleitende Themen

Das PSI beteiligte sich im Rahmen des integrierten EU-Projektes *Fullspectrum* [3b] an den internationalen Arbeiten zum Thema der Thermophotovoltaik (TPV). Das Projekt wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Gestützt auf frühere Projekte bearbeitete das PSI in diesem Projekt systemtechnische Aspekte in einem gasbetriebenen Testsystem. Der experimentelle Aufbau in einem Prototypen umfasst IR-Filter, Emitter, Zellenverschaltung und -kühlung sowie die entsprechende Messdatenerfassung. Seitens des PSI gelangen dazu Silizium-Solarzellen zum Einsatz während bei anderen Instituten GaSb-Solarzellen weiter entwickelt wurden.

Das symbolträchtige Projekt *Solarimpulse* [18] von Bertrand Piccard und verschiedenen Partnern wurde im Berichtsjahr fortgesetzt. Das Ziel dieses Projektes ist die Weltumrundung mit einem photovoltaisch betriebenen Flugzeug. Ein weiteres Projekt dieser visionären Art ist das Projekt *PlanetSolar* [19], welches von einer Westschweizer Gruppe um den Initianten Raphaël Domjan entwickelt wird. PlanetSolar soll ein solarbetriebenes Boot werden, welches ebenfalls die Erde umrunden wird. Beide Projekte stellen primär private Initiativen dar, wobei in konkreten Technologiefragen eine Zusammenarbeit mit Hochschulen erfolgt. Bei beiden Vorhaben sind im Berichtsjahr konkrete Schritte zur Realisierung bzw. zum Bau erfolgt.

Nationale Zusammenarbeit

Im Berichtsjahr wurde die vielfältige nationale Zusammenarbeit anlässlich von verschiedenen Projekten weiter gepflegt; daran beteiligt waren Hochschulen, Fachhochschulen, Forschungsinstitute und die Privatwirtschaft. Die Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen konnte deutlich intensiviert werden, sowohl in neuen Projekten mit der KTI wie auch in der Form von direkten Mandaten der Industrie an ausgewählte Forschungsinstitute. Angesichts des global wachsenden Photovoltaik-Marktes konnte zudem ein zunehmendes Interesse von neuen Industrieunternehmen verzeichnet werden. Zum ersten Mal fand im Berichtsjahr der neu ins Leben gerufene *Photovoltaic Executive Day* mit Entscheidungsträgern aus der Photovoltaik-Forschung, der Schweizer Industrie und der Verwaltung (BFE, KTI, CORE) erfolgreich statt.

Auf Programmebene wurde die Zusammenarbeit mit vielen Stellen des Bundes, der Kantone und der Elektrizitätswirtschaft weiter gepflegt. Besonders hervorzuheben sind dazu der stete Austausch mit dem Staatssekretariat für Bildung und Forschung SBF, der KTI, dem BAFU, der DEZA und dem SECO sowie aus der Elektrizitätswirtschaft mit dem VSE, der Swisselectric und der Gesellschaft Mont-Soleil. Diese vielfältigen Kontakte erlauben die anhaltend wichtige breite Abstützung des Programms.

Internationale Zusammenarbeit

Die Beteiligung am Photovoltaikprogramm der IEA (IEA PVPS) wurde im Berichtsjahr mit Kontinuität fortgesetzt, sowohl auf der Projektebene wie im Executive Committee (ExCo) [43]. Die Schweiz hält weiterhin den Vorsitz dieses weltweiten Programms inne. Für die Beteiligung an ausgewählten Projekten im Rahmen des IEA-PVPS-Programms konnte der 2005 geschaffene Schweizer IEA PVPS Pool fortgesetzt werden. Dieser Pool wird derzeit getragen durch das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (Ewz), die Kantone Basel-Stadt und Genf, die Gesellschaft Mont-Soleil, sowie durch den Fachverband Swissolar.

Nova Energie vertritt die Schweiz in Task 1 von IEA PVPS, welcher allgemeine *Informationsaktivitäten* [20] zur Aufgabe hat. Im Berichtsjahr wurde ein weiterer nationaler Bericht über die Photovoltaik in der Schweiz bis 2007 [44] ausgearbeitet. Auf dieser Grundlage wurde die 13. Ausgabe des jährlichen internationalen Berichtes (*Trends Report*) über die Marktentwicklung der Photovoltaik in den IEA-Ländern erstellt [45]. Dieser Bericht stellt eine immer häufiger zitierte Referenz dar und wurde erneut für aktuelle Analysen der Photovoltaik verwendet [46–49]. Der *IEA PVPS Newsletter* [50] informiert regelmässig über die Arbeiten in und rund um das IEA-PVPS-Programm und wird an 250 Adressaten in der Schweiz verteilt. Seit 2008 wird die homepage von IEA PVPS [51] in der Schweiz betreut.

In IEA PVPS Task 2 über *Betriebserfahrungen* [21] stellte TNC den Schweizer Beitrag. Dieses Projekt wurde formal im Vorjahr abgeschlossen – es wurden aber noch abschliessende Berichte fertig gestellt. Die PVPS-Datenbank *Performance Database*, welche weiterhin auch online zugänglich [52] ist, umfasst 505 Photovoltaikanlagen aus 22 Ländern mit insgesamt rund 1600 Betriebsjahren und 13,5 MWp Anlagenleistung. Aus der Schweiz sind 66 Anlagen mit einer totalen Leistung von 2 MWp in der Datenbank enthalten. Aufgrund der Bedeutung von Qualitätssicherung und Zuverlässigkeit von Photovoltaikanlagen für den wachsenden Markt wird an einem Folgeprojekt Task 13 zu diesem Thema gearbeitet.

Im Rahmen der interdepartementalen Plattform (SECO, DEZA, BAFU, BFE) zur Förderung der erneuerbaren Energien in der internationalen Zusammenarbeit Repic [53] leistet Entec den Schweizer Beitrag zu IEA PVPS Task 9 über die *Photovoltaik-Entwicklungszusammenarbeit* [22a]. Die Schweiz ist in diesem Projekt für die Koordination der Arbeiten mit multilateralen und bilateralen Organisationen verantwortlich. Im Berichtsjahr wurden im Rahmen dieses Projektes Treffen in Busan (Korea) sowie Workshops in Tunis und Phnom Penh abgehalten. Task 9 setzt in seinen Arbeiten einen Schwerpunkt auf Energiedienstleistungen in verschiedenen Anwendungsfeldern und beschäftigt sich häufig mit Ansätzen, welche sich nicht allein auf die Photovoltaik begrenzen lassen [54]. Im Berichtsjahr wurde das Thema der Wasserversorgung weiter vertieft.

Planair vertritt die Schweiz in IEA PVPS Task 10 zur *Photovoltaik im urbanen Raum* [23]. Aus Schweizer Sicht stehen städteplanerische Fragen und solche des elektrischen Netzes im Vordergrund. Durch den Einbezug der Stadt Neuchâtel in den Schweizer Beitrag sollen die anstehenden Fragen konkret aus dieser Perspektive angegangen werden. Task 10 steht in engem Kontakt mit dem EU-Projekt *PV-Upscale* [55], welches ähnliche Ziele auf europäischer Ebene verfolgte und im Berichtsjahr abgeschlossen wurde. Die Schweiz hat einen Bericht zum Thema *Urban PV policies* erarbeitet. Task 10 hat ausserdem verschiedene Berichte fertiggestellt [56–60]. Besonders ist hier die systematische Analyse von Mehrwerten der Photovoltaik über die Energie hinaus zu erwähnen, welche erstmals differenzierte quantitative und länderspezifische Aussagen zu diesem Thema macht.

Sputnik vertritt die Schweiz in IEA PVPS Task 11 zu *hybriden Photovoltaik-Systemen in Mininetzen* [24], einem Gebiet, das – wenn auch nicht so sehr in der Schweiz – global von immer grösserem Interesse wird, und weit reichende technische Fragestellungen betreffend Systemdesign, Regelungsfragen und der Penetration von Photovoltaik in Mininetzen beinhaltet.

ESU Services vertritt die Schweiz im neusten IEA PVPS Task 12 zu *Umwelt-, Sicherheits- und Gesundheitsaspekten* [25] der Photovoltaik. Ziel des Projektes ist, industriell möglichst aktuelle, relevante und international abgeglichene Informationen zu diesem bedeutenden Thema aufzuarbeiten und zu publizieren. Damit sollen die zum Teil noch widersprüchlichen bzw. quantitativ abweichenden Aussagen auf eine bessere Grundlage gestellt werden. Die Schweiz konzentriert sich in PVPS Task 12 auf die Lebenszyklusanalyse (LCA). Ausserdem befasst sich Task 12 auch mit den Methoden zur Rezyklierung von Photovoltaik-Modulen. Zu letzterem Thema wurde die Vereinigung *PV Cycle* gegründet, welche im Berichtsjahr eine wichtige Publikation erarbeitete [61].

Meteotest [26] und die Groupe Energie an der Universität Genf [27] erbringen zusammen den Schweizer Beitrag zum Task 36 *Solar resource knowledge management* des IEA-SHC-Programms. Dieses Projekt sieht vor, die verschiedenen Methoden und Datengrundlagen von Solar-

daten global aufzuarbeiten und verfügbar zu machen. Task 36 ist organisatorisch Bestandteil des IEA-SHC-Programms, inhaltlich ist es jedoch für alle Solartechnologien relevant; dementsprechend erfolgt eine Zusammenarbeit mit den weiteren IEA Programmen zur Solarenergie (IEA PVPS und IEA Solarpaces). Im Projekt wird die Qualität verschiedener Strahlungsmodelle und daraus abgeleiteter Produkte verglichen und optimiert. Im Berichtsjahr konzentrierten sich die Arbeiten auf den Vergleich der Strahlungsvorhersage anhand von verschiedenen Modellen.

Swissolar vertritt die Schweiz im TC 82 der International Electrotechnical Commission (IEC) zu *Photovoltaik Normen* [28]. Die Normenarbeit im Bereich der photovoltaischen Systeme ist in sechs Working Group's (WG) aufgeteilt (Glossary, Modules, non-concentrating, Systems, PV energy storage systems, Balance-of-system (BOS) components, Concentrator modules). Die Schweiz beteiligt sich primär an den Arbeiten der WG's zu nicht konzentrierenden Modulen, zu Systemen und zu BOS-Komponenten. In der Photovoltaik konnte trotz der IEC nicht verhindert werden, dass viele nationale Normen entstanden. Diese wurden meist im Rahmen von nationalen Energieprogrammen initiiert und zum Teil auch finanziert. In den letzten Jahren sind das Interesse und der Wille gestiegen, dass nun diese nationalen Normen im Rahmen der IEC harmonisiert werden sollen. Im Berichtsjahr wurden acht verschiedene Normen publiziert [62–69]. In der Schweiz werden die Arbeiten durch das TK 82 begleitet [70].

Die Beteiligung am EU-Projekt *PV-ERA-Net* [22b], welches Programmkoordinationsstellen und verantwortliche Ministerien aus 13 Ländern unter dem ERA-Net-Schema [71] zusammenführt, wurde durch die Photovoltaik-Programmleitung (BFE, NET Nowak Energie & Technologie) sichergestellt. Die Schweiz leitet in diesem Projekt das erste Arbeitspaket zum Informationsaustausch über Europäische Photovoltaik-Programme. Im Berichtsjahr wurden, nebst dem kontinuierlichen Informationsaustausch und einer Projektdatenbank, die Modelle der Zusammenarbeit zwischen verschiedenen nationalen Programme abgeschlossen. Die erste gemeinsame Ausschreibung Polymol zum Thema von organischen und Polymer-Solarzellen wurde im Berichtsjahr abgeschlossen mit 4 transnationalen Projekten, die nun alle begonnen haben. Die Schweiz war an dieser Ausschreibung beteiligt und zwei der vier bewilligten Projekte finden mit der Empa Dübendorf [9b] bzw. mit den Schweizer Partnern ZHAW, CSEM und Ciba [8b] statt. PV-ERA-Net wurde im Herbst 2008 um ein Jahr verlängert.

Ein bedeutendes Thema bildete weiter die in der Europäischen Photovoltaik-Technologie-Plattform publizierte *Strategic research agenda* (SRA) [72], welche als wichtiges europäisches Referenzdokument betrachtet wird. Von Bedeutung ist dieses Dokument einerseits aufgrund seiner umfassenden Beschreibung der kurz-, mittel- und langfristigen Forschungsthemen in der Photovoltaik, der zeitlichen Entwicklung von Technologie und Wirtschaftlichkeit sowie in Bezug auf die Beziehungen zwischen privater und öffentlicher (national und EU) Forschung. Gegenwärtig wird dazu ein *Implementation Plan* erarbeitet.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Im Berichtsjahr konnte gerade noch ein neues P+D-Projekt beim BFE im Bereich PV begonnen werden. Seit 2003 wurden damit insgesamt fünf neue Projekte gestartet. Ein weiteres P+D-Projekt wird durch den Axpo Naturstromfonds unterstützt. Dies ist im Vergleich zur Zeit vor 2003 marginal, wo jährlich 10 und mehr Projekte ins P+D-Programm aufgenommen wurden. Ein Teil dieser «alten» Projekte setzt im aktuellen Photovoltaik-Markt erfreulicherweise immer noch gewisse Akzente. Mit den wenigen aktiven PV-P+D-Projekten fehlt in Hinsicht auf die Anwendung ein wesentliches Glied in der Umsetzung von Forschung und Entwicklung hin zu industriellen Produkten und Verfahren, und damit zum Markt. Damit bleibt die Wirkung dieses Programmteils weiterhin unterkritisch. Schweizer Firmen haben es so seit Jahren zunehmend schwerer, neue und innovative Produkte für den Photovoltaik Anwendungsbereich auf den Markt zu bringen.

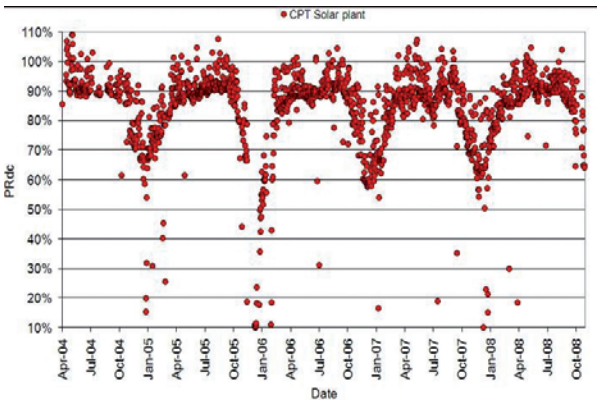
Die noch verbleibenden Photovoltaik-P+D-Projekte behandelten schwerpunktmässig weiterhin die Thematik der **Photovoltaik-Gebäudeintegration**.

Neue P+D Projekte

- *Smarttile* (Piloteinsatz eines neuen Photovoltaik Dachintegrationssystems, das werkzeuglos montiert werden kann und auf eine industrielle Produktion hin optimiert wird; Leitung: 3S Swiss Solar Systems [13b]
- Am Bahnhof Münsingen realisierte TNC die weltweit erste bifaciale Photovoltaik-Lärmschutzanlage [29] entlang einer Bahnlinie. Sie weist eine Nennleistung von 7,25 kWp (Frontseite) bzw. 5,6 kWp (Rückseite) auf. Finan-



Figur 7: Bifaciale Photovoltaik-Lärmschutzanlage. (Bildquelle: TNC)



Figur 8: CPT Solar; thermisch isolierte amorphe PV-Module seit 4 Jahren ohne Degradationseffekte. (Bildquelle: Isaac)

ziert wurde die Anlage von der Gemeinde mit Unterstützung der InfraWerkeMünsingen sowie des Kantons Bern. Da die SBB im Bereich der Photovoltaikanlage keine herkömmlichen Glas-Lärmschutzelemente einbauen mussten, haben sie der Gemeinde den entsprechenden Beitrag gutgeschrieben. (Fig. 7)

Laufende P+D Projekte

Bei den laufenden Projekten belegen die bisherigen Messungen im Rahmen des Projekts Degradations- und Annealingverhalten[2] von Modulen mit amorphen Zellen die Annahme, dass durch das Erwärmen von amorphen Modulen auf gewisse Grenztemperaturen die weitere Degradation weit gehend gestoppt oder bei höheren Temperaturen gar rückgängig gemacht werden kann [30] (Fig. 8).

Die Messungen am Nullenergieschulhaus Ekkharthof Kreuzlingen (Minergiebau kombiniert mit Photovoltaik und Wärmepumpe) zeigen, dass durch gezieltes Lastmanagement im Frühling, Sommer und Herbst eine hohe Korrelation zwischen Solarstromproduktion und Stromverbrauch (inkl. Wärmepumpe) erreicht werden kann [31].

Die laufenden Projekte umfassen (in chronologischer Reihenfolge):

Anlagen

- Degradations- und Annealingverhalten von Modulen mit amorphen Zellen (Messungen und Analysen auf der Basis der Flachdachintegration CPT Solar; Leitung: Isaac) [30];
- Praxistest Backup Wechselrichter: Verhalten eines netzgekoppelten Wechselrichters mit unterbrechungsfreier Stromversorgung bei Stromausfall im Praxistest; Leitung: Enecolo [32a];
- Photovoltaikanlage Nullenergieschulhaus Ekkharthof Kreuzlingen: Einbindung einer PV-Anlage ins Energiekonzept eines Nullenergieschulhauses; Leitung: Böhni, Energie und Umwelt [31];
- 2-kWp-Flexcell-Experimentaldach mit flexiblen amorphen Solarzellen in einem Dachelement aus einer Thermoform; Leitung: VHF-Technologies [33].

Messkampagnen

- Messkampagne Wittigkofen: Detaillierte Messungen und Auswertungen mit Visualisierung der Daten zur 80-kWp-Fassade Wittigkofen; Leitung: Ingenieurbüro Hostettler [34a].

Studien – Hilfsmittel – diverse Projekte

- Photovoltaikstatistik der Schweiz 2007; Leitung: Ingenieurbüro Hostettler [34b].

Im Jahr 2008 abgeschlossene P+D-Projekte

Im Jahr 2008 wurden die folgenden P+D-Projekte abgeschlossen (in chronologischer Reihenfolge):

Anlagen

- 12-kWp-Solight-Pilotanlage: Pilotmässige Umsetzung von zwei verschiedenen Solight-Varianten; Leitung: Energiebüro [35];
- Dachanlage Turnhalle Wiesendangen mit amorphen Dünnschichtmodulen: Einsatz von Biosol-XXL-Dachelementen bestehend aus UNI-Solar-Dünnschichtmodulen kombiniert mit Solrif-Rahmen; Leitung: Enecolo [32b].

[2] Als Annealing (Ausglühen) bezeichnet man in der Materialbearbeitung eine Wärmebehandlung, bei der das Material kurzzeitig über die Kristallisationstemperatur erwärmt und dann wieder abgekühlt wird. Dadurch lassen sich gewisse Materialeigenschaften gezielt verändern (zum Beispiel die Anzahl Defektstellen im Kristallgitter).

Bewertung 2008 und Ausblick 2009

2008 war für die Photovoltaik national und international ein sehr dynamisches und weit gehend erfolgreiches Jahr, wobei die globale Finanz- und Wirtschaftskrise die rasch wachsende Photovoltaikindustrie nicht verschont hat. Der Engpass in der Verfügbarkeit von Rohsilizium für die kristallinen Siliziumzellen besteht zwar noch, es zeichnet sich hier aber eine Entspannung ab. Die seit 2007 eingetretene Trendumkehr zu niedrigeren Systempreisen wurde fortgesetzt, und es wird dazu von einer weiter beschleunigten Kostenreduktion ausgegangen. Die Ankündigungen für Investitionen in Dünnschichttechnologien setzten sich auch 2008 fort. Für 2009 wurden zahlreiche neue Industrieprojekte angekündigt, wobei erste GWp-Einheiten diskutiert werden. Total könnte die Produktionskapazität für Dünnschichtmodule im Jahr 2009 bis 5 GWp erreichen, wobei damit zu rechnen ist, dass sich durch die aktuelle Finanzkrise ein Teil der Projekte zumindest verzögern oder überhaupt nicht umsetzen lässt.

Dank der politischen Diskussion im Vorjahr rund um das Stromversorgungsgesetz und der darin beschlossenen Förderung der erneuerbaren Energien erhielt die Photovoltaik auch in der Schweiz weiterhin grosse Aufmerksamkeit. Mit der im Berichtsjahr eingeführten kostendeckenden Einspeisevergütung (KEV) wurden sehr viele Erwartungen geweckt und entsprechend viele Eingaben für Projekte gemacht, welche nun aufgrund der geltenden Deckelung einen langen Stau bilden, bis die Anlagen in die KEV aufgenommen werden können. Obwohl im quantitativen Ausmass eng begrenzt, sollte die KEV aber trotzdem zu einer Belebung des Schweizer Photovoltaikmarktes führen und damit auch die technologische Entwicklung stimulieren.

Vor diesem Hintergrund ist auch die Situation der Schweizer Photovoltaik zu beurteilen: Forschung und Technologie befinden sich aufgrund einer breiten Abstützung auf einem auch international betrachtet hohen Niveau. Die Schweizer Photovoltaik-Kompetenzzentren konnten im Berichtsjahr weiter gestärkt werden; die globale Dimension der Photovoltaik erfordert hier aber weitere Schritte, um mit der internationalen Entwicklung mithalten zu können. Eine quantitativ ausreichende Masse und ein starker Industriebezug sind kritische Erfolgsfaktoren, denen in den kommenden Jahren noch mehr Bedeutung zukommen wird. Die industrielle Umsetzung und die internationale Ausrichtung werden durch die zahlreichen KTI- und EU-Projekte belegt: Im Berichtsjahr waren es 7 KTI- und 12 EU-Projekte mit direktem Bezug zur Photovoltaik. Andererseits bestehen durch die fehlenden P+D-Mittel und dem begrenzt wachsenden Markt gewichtige Nachteile für die Umsetzung im eigenen Land. Trotz diesen erschwerten Bedingungen finden auch in der Schweiz wachsende industrielle Photovoltaikaktivitäten statt. Gestützt auf Umfragen wird das Exportvolumen der Schweizer Photovoltaik für 2008 auf mindestens 1'500 Mio. CHF geschätzt. Zusammen mit dem Heimmarkt kann der Gesamtumsatz der Schweizer Photovoltaik mit mindestens 1'600 Mio. CHF beziffert werden.

Die Umsetzung der Schweizer Photovoltaik-Forschung in industrielle Produkte ist damit vor allem auf dem Gebiet der Dünnschichtsolarzellen in den letzten Jahren eine Erfolgsgeschichte, welche in guter Übereinstimmung mit den langjährigen Programmzielen geschieht. Im Berichtsjahr wurden zwei konkrete Industrievorhaben vorangetrieben, welche erstmals auch die Produktion von Dünnschichtsolarzellen im industriellen Massstab in der Schweiz beinhalten: 25 MW durch Flexcell bzw. VHF-Technologies in Yverdon, 30 MW durch Pramac bei Locarno. Ebenfalls Erfolg versprechend, aber etwas schwieriger, präsentiert sich die Situation bei der gebäudeintegrierten Photovoltaik, da dieser Markt sowohl national wie international noch nicht so stark ausgeprägt ist. Dies könnte sich aufgrund der neuen Rahmenbedingungen in der Schweiz und in vereinzelten anderen Ländern, z.B. Frankreich, in den nächsten Jahren ändern.

Das Programm Photovoltaik wird weiter bestrebt sein, durch die breite Abstützung eine kritische Grösse zu bewahren und eine bedeutende Marktwirkung zu erzielen. Dazu soll von allen möglichen Fördermechanismen Gebrauch gemacht werden und diese gleichzeitig optimal koordiniert und Ziel führend eingesetzt werden. Das neue *Energieforschungskonzept 2008–2011* der CORE bildet die Grundlage für die Ausrichtung der Photovoltaik-Forschung ab 2008 [36]. Das entsprechende Detail Forschungskonzept wurde im Berichtsjahr fertig gestellt und im Sommer von der CORE zur Ausführung genehmigt [37]. Darin werden die jüngsten nationalen und internationalen Entwicklungen berücksichtigt und die Prioritäten der nächsten Jahre festgelegt.

Der nationale Informations- und Erfahrungsaustausch bleibt weiterhin ein wichtiges Thema. Die Photovoltaik Webseite http://www.photovoltaik.ch beinhaltet alle wesentlichen Informationen sowie Berichte und dient damit als Informationsinstrument, das laufend unterhalten wird. Die Schweizer Photovoltaik war an der 23. Europäischen Photovoltaik-Konferenz im September in Valencia mit ihren Beiträgen gut vertreten [75].

Für das Jahr 2009 kann in Bezug auf die Photovoltaik-Forschung weiterhin von einer dynamischen Situation ausgegangen werden. Interessante Perspektiven entstehen zudem durch den Umstand, dass die Forschungsgruppen von Neuchâtel und Zürich ihre institutionelle Anbindung wechseln, sodass auch dadurch neue Entwicklungen zu erwarten sind.

Liste der F+E-Projekte

Jahresbericht 2008 und Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch unter der angegebenen Projektnummer). Einzelne Jahresberichte und Schlussberichte können von www.photovoltaic.ch herunter geladen werden. Unter den aufgeführten Internet-Adressen sind weiter gehende Informationen vorhanden.

[1] C. Ballif, (christophe.ballif@epfl.ch), IMT, UNI-Neuchâtel, Neuchâtel: a) New processes and device structures for the fabrication of high efficiency thin film silicon photovoltaic modules (Jahresbericht) b) Flexible Photovoltaics – next generation high efficiency and low cost thin film silicon modules (Jahresbericht) c) Development of a novel surface treatment of LP-CVD ZnO layers used as Transparent Conductive Oxide for thin film silicon solar cells d) High efficiency thin-film passivated silicon solar cells and modules - THIFIC: Thin film on crystalline Si (Jahresbericht) e) HETSI: Heterojunction Solar Cells based on a-Si / c-Si (Jahresbericht) f) FLEXCELLENCE: Roll-to-roll technology for the production of high efficiency low cost thin film silicon photovoltaic modules (Jahresbericht) www.unine.ch/flex g) ATHLET: Advanced Thin Film Technologies for Cost Effective Photovoltaics (Jahresbericht) http://www.hmi.de/projects/athlet / www.unine.ch/pv.

[2] Ch. Hollenstein, (christophe.hollenstein@epfl.ch) EPFL - CRPP, Lausanne A new low ion energy bombardment PECVD reactor for the deposition of thin film silicon for solar cell applications http://crppwww.epfl.ch.

[3] D. Gablinger, R. Morf, (david.gablinger@psi.ch), PSI, Villigen: a) Zweidimensionale Nanostrukturen für Silizium-Solarzellen (Jahresbericht) b) W. Durisch, (wilhelm.durisch@psi.ch): FULLSPECTRUM: A new PV wave making more efficient use of the solar spectrum(Schlussbericht) http://www.fullspectrum-eu.org / http://www.psi.ch.

[4] X. Maeder, J. Michler, (Xavier.Maeder@empa.ch), Empa, Thun: HIGH-EF - Large grained, low stress multicrystalline silicon thin film solar cells on glass by a novel combined diode laser and solid phase crystallization process (Jahresbericht) http://www.empathun.ch.

[5] A.N. Tiwari, (Ayodhya.Tiwari@empa.ch), ETH, Zürich: a) Large Area flexible CIGS: Flexible CIGS solar cells on large area polymer foils with in-line deposition methods and application of alternative back contacts (Jahresbericht) b) Thin Film CIGS Solar Cells with a Novel Low Cost Process (Jahresbericht) c) LARCIS: Large-Area CIS Based Solar Modules for Highly Productive Manufacturing (Jahresbericht) d) ATHLET: Advanced Thin-Film Technologies for Cost Effective Photovoltaics (Jahresbericht) http://www.hmi.de/projects/athlet/ e) Laser patterning of Cu(In,Ga)Se2 solar cells on flexible foils for monolithic integration (Jahresbericht) http://www.tfp.ethz.ch.

[6] R. Kern, M. Kaelin, (marc.kaelin@flisom.ch), Flisom, Zürich: Development of flexible CIGS Solar Modules with metal Grids (Jahresbericht) http://www.flisom.ch.

[7] R. Thampi, (ravindranathan.thampi@epfl.ch), EPFL - ISIC, Lausanne: ROBUST DC: Efficient and Robust Dye Sensitzed Solar Cells and Modules (Jahresbericht) http://isic.epfl.ch.

[8] 1 J.O. Schumacher, 1 M. Schmid, 2 G. Rothenberger, 2 S. Wenger, (juergen.schumacher@zhaw.ch), 1 Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW - ICP, Winterthur 2 EPFL - LPI, Lausanne: a) ModSol: Modeling, simulation and loss analysis of dye-sensitized solar cells (Jahresbericht) b) 1 B. Ruhstaller, 1 R. Häusermann, 1 N. A. Reinke, 2 C. Winnewisser, 2 T. Offermans, 3 M. Turbiez, 3 M. Düggeli, 4 R. Janssen, 5 J. Bisquert, (beat.ruhstaller@zhaw.ch), 1 ZHAW, Winterthur, 2 CSEM, Basel, 3 Ciba Inc., Basel, 4 TU Eindhoven, Netherlands, 5 Universitat Jaume I, Spain: Apollo: Efficient areal organic solar cells via printing (Jahresbericht) http://www.zhaw.ch.

[9] F. Nüesch, (frank.nueesch@empa.ch), Empa, Dübendorf: a) Organic photovoltaic devices (Jahresbericht) b) HIOS-Cell c) Transparent and Flexible Solar Cell Electrodes made from Precision Fabric d) ThinPV - Cost efficient thin film photovoltaics for future electricity generation (Jahresbericht) http://www.empa.ch.

[10] T. Meyer, (toby@solaronix.com), Solaronix, Aubonne: a) OrgaPvNet: Coordination Action towards stable and low-cost organic solar cell technologies and their application (Jahresbericht) b) NAPOLYDE: Nano structured polymer deposition processes for mass production of innovative systems for energy production & control and for smart devices (Jahresbericht) c) FULLSPECTRUM: A new PV wave making more efficient use of the solar spectrum (Jahresbericht) http://www.fullspectrum-eu.org / http://www.solaronix.com.

[11] D. Brühwiler, (bruehwi@aci.uzh.ch), ACI - University of Zurich, Zürich: Development of efficient luminescent concentrators based on inorganic/organic nanomaterials for applications in solar energy conversion (Jahresbericht) http://www.aci.uzh.ch.

[12] M. Spirig, (info@solarenergy.ch), Institut für Solartechnik SPF, Rapperswil: PECNet: Aufbau eines Schweizer Kompetenznetzwerks für die Solare Wasserspaltung mittels hybrider PV-PEC Zellen (Jahresbericht, Schlussbericht Projekt 101883) http://www.solarenergy.ch.

[13] T. Szacsvay, (sz@3-s.ch), 3S, Lyss: a) BIPV-CIS- Improved integration of PV into existing buildings by using thin film modules for retrofit (Schlussbericht) b) Smarttile: Innovative Photovoltaik-Indachlösung (Jahresbericht) http://www.3-s.ch.

[14] Y. Leterrier, J. Rion, L. Lalande, P. Liska, A. Vasilopoulos, (yves.leterrier@epfl.ch), EPFL - LTC, Lausanne: Ultralight Photovoltaic Structures (Jahresbericht, Schlussbericht) http://ltc.epfl.ch.

[15] D. Chianese, (domenico.chianese@supsi.ch), SUPSI, DACD, ISAAC-TISO, Canobbio: a) Centrale di test ISAAC-TISO: Qualità e resa energetica di moduli fotovoltaici (Jahresbericht) b) G. Friesen, (gabi.friesen@supsi.ch) PERFORMANCE - ISAAC Activities (Jahresbericht) http://www.pv-performance.org c) Lifetime, mechanical and security testing for PV module certification http://www.isaac.supsi.ch.

[16] H. Häberlin, L. Borgna, D. Gfeller, M. Kämpfer, M. Münger, Ph. Schärf, U. Zwahlen, (heinrich.haeberlin@bfh.ch), Berner Fachhochschule, Technik und Informatik, Burgdorf: Photovoltaik Systemtechnik 2007-2010 (pvsyste 07-10) (Jahresbericht) http://www.pvtest.ch.

[17] P. Gaillard, (pgaillard@maxwell.com), Maxwell Technologies, Rossens: SoS-PVi: Security of Supply Photovoltaic Inverter (Jahresbericht, Schlussbericht) http://www.maxwell.com.

[18] A. Borschberg, (andre.borschberg@solarimpulse.com), Solar Impulse, Lausanne: Solarimpulse http://www.solar-impulse.com.

[19] R. Domjan, (info@planetsolar.org), PlanetSolar, Yverdon-les-Bains: PlanetSolar http://www.planetsolar.org.

[20] P. Hüsser, (pius.huesser@novaenergie.ch), Nova Energie, Aarau: Schweizer Beitrag zum IEA PVPS Programm - Task 1 (Jahresbericht) www.iea-pvps.org / http://www.novaenergie.ch.

[21] Th. Nordmann, L. Clavadetscher, (nordmann@tnc.ch), TNC Consulting, Erlenbach: IEA PVPS Programm Task 2 Schweizer Beitrag 2008 (Jahresbericht) http://www.tnc.ch.

[22] S. Nowak, (info@repic.ch), NET, St. Ursen: a) REPIC: Swiss Interdepartmental Platform for Renewable Energy and energy efficiency Promotion in International Cooperation (Jahresbericht) http://www.repic.ch b) 1 S. Nowak, 1 M. Gutschner, 1 S. Gnos; 2 S. Oberholzer, (stefan.nowak@netenergy.ch), 1 NET, St. Ursen, 2 BFE, Ittigen: PV-ERA-NET: Networking and Integration of National and Regional Programmes in the Field of Photovoltaic (PV) Solar Energy Research and Technological Development (RTD) in the European Research Area (ERA) (Jahresbericht) http://www.pv-era.net / http://www.netenergy.ch.

[23] P. Renaud, L. Perret, (pierre.renaud@planair.ch), Planair, La Sagne: IEA PVPS Task 10 – Swiss contribution (Jahresbericht) http://www.planair.ch.

[24] M. Ryser, (michel.ryser@solarmax.com), Sputnik, Biel: IEA PVPS Task 11 : Hybride Photovoltaik Systemen in Mininetzen.

[25] R. Frischknecht, M. Stucki, (frischknecht@esu-services.ch), ESU-services, Uster: IEA-PVPS Task 12: Swiss activities in 2008 - Aktualisierung der Ökobilanz von CdTe - PV (Jahresbericht) http://www.esu-services.ch.

[26] J. Remund, (remund@meteotest.ch), Meteotest, Bern: IEA SHC Task 36: Solar resource knowledge management (Jahresbericht) http://www.meteotest.ch.

[27] P. Ineichen, (pierre.ineichen@unige.ch), UNIGE Groupe Energie, Genève: Solar Resource Management, IEA Solar Heating & Cooling Programme, Task 36 http://www.unige.ch/energie/.

[28] P. Toggweiler, T. Hostettler, (peter.toggweiler@enecolo.ch), Swissolar, Zürich: Normierung für PV-Systeme (Jahresbericht) http://www.swissolar.ch / http://www.enecolo.ch.

Liste der P+D-Projekte

Jahresbericht 2008 und Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch unter der angegebenen Projektnummer). Einzelne Jahresberichte und Schlussberichte können von www.photovoltaic.ch herunter geladen werden. Unter den aufgeführten Internet-Adressen sind weiter gehende Informationen vorhanden.

[29] Th. Nordmann, (nordmann@tnc.ch), TNC Consulting, Erlenbach: Bifaciale Photovoltaik-Lärmschutzanlage http://www.tnc.ch.

[30] D. Chianese, (domenico.chianese@supsi.ch), SUPSI, DACD, ISAAC-TISO, Canobbio: Degradations- und Annealingverhalten von Modulen mit amorphen Zellen (Jahresbericht) http://www.isaac.supsi.ch.

[31] Th. Böhni, (boehni@euu.ch), Böhni Energie und Umwelt, Frauenfeld: Nullenergieschulhaus Heilpädagogisches Zentrum Ekkharthof Kreuzlingen (Jahresbericht) http://www.euu.ch.

[32] P. Toggweiler, (info@enecolo.ch) , Enecolo, Mönchaltorf: a) Praxistest Backup Wechselrichter (Jahresbericht) b) Dachintegration mit amorphen Dünnschichtzellen Turnhalle Wiesendangen (Schlussbericht Projekt 101788) http://www.solarstrom.ch.

[33] P. Goulpié, (pascal.goulpie@flexcell.com), VHF-Technologies, Yverdon, Toiture expérimentale 2kW Flexcell (Jahresbericht) http://www.flexcell.ch.

[34] Th. Hostettler (Hostettler_Engineering@Compuserve.com), Ingenieurbüro Hostettler, Bern: a) Messkampagne Wittigkofen b) Photovoltaic Energy Statistics of Switzerland 2007 (Jahresbericht).

[35] Ch. Meier, (info@energieburo.ch), Energiebüro, Zürich: Preparation and Realisation of the Test- and Pilot Installation SOLIGHT (Schlussbericht Projekt 100116) http://www.energieburo.ch.

Referenzen

[36] Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 bis 2011, Eidgenössische Energieforschungskommission CORE, 2007, http://www.energieforschung.ch.

[37] Konzept des Energieforschungsprogramm Photovoltaik für die Jahre 2008 - 2011, Bundesamt für Energie, 2008, http://www.photovoltaic.ch.

[38] http://www.pv-era.net.

[39] A Look Inside Solar Cells, Workshop 16. - 18. November 2008 in Ascona, Organisation: F. Nüesch, (frank.nueesch@empa.ch), Empa, Dübendorf, http://www.empa.ch/scw.

[40] Current state-of-the art and best practices of BiPV, http://www.pv-performance.org.

[41] Regulations and building codes for BiPV systems in Europe, September 2008, http://www.pv-performance.org.

[42] Actual temperatures of building integrated PV modules, September 2008, http://www.pv-performance.org.

[43] Annual Report 2008, IEA PVPS, 2009, http://www.iea-pvps.org.

[44] National Survey Report on PV Power Applications in Switzerland 2007, P. Hüsser, (pius.huesser@novaenergie.ch), Nova Energie, August 2008.

[45] Trends in Photovoltaic Applications in selected IEA countries between 1992 and 2007, IEA PVPS Task T1-17:2008, http://www.iea-pvps.org.

[46] Nachhaltigkeitsstudie – Solarenergie 2008 – Stürmische Zeiten vor dem nächsten Hoch, M. Fawer-Wasser (matthias.fawer@sarasin.ch), Sarasin, November 2008.

[47] MIT Future of Solar Energy Study, Executive Director: Joshua Linn (jlinn@mit.edu), Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge MA USA.

[48] Solar PV Development Strategies in Europe, 2008–2020, Thomas Gregory (tgregory@emerging-energy.com), Emerging Energy Research, Cambridge MA USA, http://www.emerging-energy.com, June 2008.

[49] Photovoltaic Energy Generation, General Secretary: Thomas P. Pearsall, (Pearsall@epic-assoc.com), EPIC, Paris http://www.epic-assoc.com.

[50] IEA PVPS Newsletter, zu beziehen bei Nova Energie, Schachenallee 29, 5000 Aarau, Fax 062 834 03 23, (pius.huesser@novaenergie.ch).

[51] http://www.iea-pvps.org.

[52] Performance Database, IEA PVPS Task 2, May 2007, download: http://www.iea-pvps-task2.org.

[53] http://www.repic.ch.

[54] Renewable Energy Services for Developing Countries - In Support of the Millennium Development Goals: Recommended Practice & Key Lessons, IEA PVPS Task 9-09-2008, February 2008, http://www.iea-pvps.org.

[55] http://www.pvupscale.org.

[56] Country Specific Added Value Analysis of PV Systems, IEA PVPS Task 10-02-2008, January 2008, http://www.iea-pvps.org / http://www.iea-pvps-task10.org.

[57] Urban BIPV in the New Residential Construction Industry, IEA PVPS Task 10-03-2008, January 2008, http://www.iea-pvps.org / http://www.iea-pvps-task10.org.

[58] Examples of community-scale PV installation in urban area: PV community database, IEA PVPS Task 10-04-2008, January 2008, http://www.iea-pvps.org / http://www.iea-pvps-task10.org.

[59] Visual Tool for Photovoltaics Operating on Electric Grids, 2008, http://www.iea-pvps-task10.org.

[60] IEA PVPS Educational Tool: Building Integrated PV Educational Tool, http://www.bipvtool.com.

[61] Study on the development of a take back and recovery system for photovoltaic products, K. Sander, (sander@oekopol.de), Ökopol, November 2007, http://www.pvcycle.org.

[62] IEC 61646 (2008-05) Ed. 2.0 Bilingual English and French: Thin-film terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval http://www.iec.ch.

[63] IEC 62116 (2008-09) Ed. 1.0 Bilingual English and French: Test procedure of islanding prevention measures for utility-interconnected photovoltaic inverters http://www.iec.ch.

[64] IEC/TS 62257-7 (2008-04) Ed. 1.0 English: Recommendations for small renewable energy and hybrid systems for rural electrification - Part 7: Generators http://www.iec.ch.

[65] IEC/TS 62257-7-3 (2008-04) Ed. 1.0 English: Recommendations for small renewable energy and hybrid systems for rural electrification - Part 7-3: Generator set - Selection of generator sets for rural electrification systems http://www.iec.ch.

[66] IEC/TS 62257-9-1 (2008-09) Ed. 1.0 English: Recommendations for small renewable energy and hybrid systems for rural electrification - Part 9-1: Micropower systems http://www.iec.ch.

[67] IEC/TS 62257-9-6 (2008-09) Ed. 1.0 English: Recommendations for small renewable energy and hybrid systems for rural electrification - Part 9-6: Integrated system - Selection of Photovoltaic Individual Electrification Systems (PV-IES) http://www.iec.ch.

[68] IEC 60904-7 (2008-11) Ed. 3.0 Bilingual English and French: Photovoltaic devices - Part 7: Computation of the spectral mismatch correction for measurements of photovoltaic devices http://www.iec.ch.

[69] IEC 60904-3 (2008-04) Ed. 2.0 Bilingual English and French: Photovoltaic devices - Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data http://www.iec.ch.

[70] Schweizer Nationalkomitee - Technische Fachkommission TK 82, Kontakt: Electrosuisse, Ansprechpartner des TK 82, Eliane Andenmatten (eliane.andenmatten@electrosuisse.ch, 044 956 11 11), Vorsitzenden des TK 82, Herrn Peter Toggweiler (Peter.Toggweiler@enecolo.ch, 044 994 90 01).

[71] http://ec.europa.eu/research/fp6/index_en.cfm?p=9_eranet.

[72] Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology, The European Photovoltaic Technology Platform, 2007, http://www.eupvplatform.org/fileadmin/Documents/PVPT_SRA_Complete_070604.pdf.

[73] http://www.eupvplatform.org.

[74] European Strategic Energy Technology Plan (SET Plan), http://ec.europa.eu/energy/technology/set_plan/set_plan_en.htm.

[75] Die 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference & Exhibition Valencia 01. - 05.09.2008 aus Schweizer Sicht, zu beziehen bei der Programmleitung Photovoltaik, c/o NET, Waldweg 8, 1717 St. Ursen, info@netenergy.ch, http://www.photovoltaic.ch.

Impressum

Juni 2009
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
Druck: Ackermanndruck AG, Bern-Liebefeld
Bezug der Publikation: www.energieforschung.ch

Programmleiter
Dr. Stefan Nowak
NET Nowak Energie & Technologie AG
Waldweg 8
CH-1717 St. Ursen
stefan.nowak@netenergy.ch

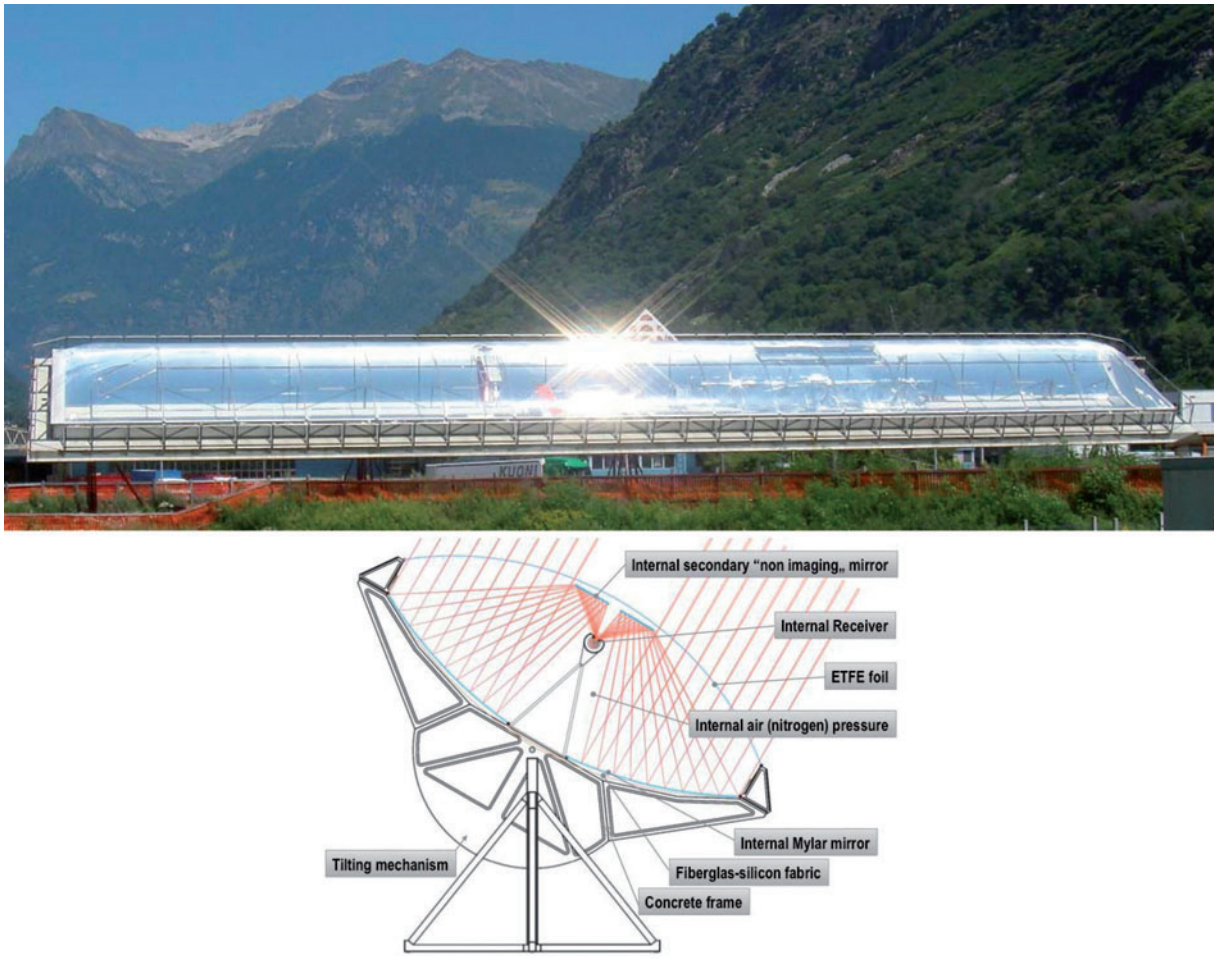
Bereichsleiter
Dr. Stefan Oberholzer
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
stefan.oberholzer@bfe.admin.ch

Rapport de synthèse 2008 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2008 des BFE-Programmleiters

Programme de recherche Utilisation industrielle de l'énergie solaire

Pierre Renaud

pierre.renaud@planair.ch



Prototypes de concentrateur solaire développés au Tessin par ALE Airlight Energy

La photo montre le deuxième prototype mis en fonction à Biasca (TI). Le schéma représente la coupe transversale du troisième et dernier concept de concentrateur ALE Airlight Energy.
(Source : www.airlightenergy.com)

Centres de gravité du programme et buts fixés

Les systèmes solaires thermiques à concentration transforment la radiation solaire en énergie thermique à haute température pour produire de l'électricité, des matériaux ou pour induire des réactions chimiques. Cette énergie thermique peut aussi être utilisée directement dans des processus industriels.

Les trois axes principaux du programme sont chacun concernés par un projet :

- Thermochimie solaire : travail de recherche du Paul Scherrer Institut (PSI) ;
- Processus industriels : étude de faisabilité sur le site de Novartis à Nyon ;
- Centrales solaires thermiques à concentration (CSP) : développement d'un prototype par la société ALE Airlight Energy à Biasca.

Dans le domaine de la **thermochimie solaire**, le but pour 2008 était de faire fonctionner le prototype de réacteur de 10 kW de manière fiable et sans interruptions.

Concernant le domaine de la **chaleur solaire à haute température dans les processus industriels**, l'objectif pour 2008 était d'évaluer, sur les plans techniques et économiques, une installation visant l'augmentation du niveau de température de la chaleur résiduelle d'un procédé grâce à une installation solaire thermique à concentration afin d'en permettre la valorisation et ceci dans l'optique d'un possible transfert dans d'autres sites.

A la suite d'un séminaire entre spécialistes (octobre 2007) et d'une conférence nationale (octobre 2008) sur les CSP, il est apparu que la recherche et l'industrie suisses devaient se concentrer sur des marchés de niche tels que le développement de prototypes et de composantes spécifiques de centrales (héliostat, concentrateurs, échangeurs de chaleur, turbines, régulation, technologie de concentration, ingénierie, logiciels, etc.). Dans le domaine des **CSP**, l'objectif 2008 était de finaliser, au niveau de l'ingénierie, l'investigation et le design d'un concept novateur de système de concentrateur pour la production d'électricité solaire thermique efficace et rentable (y c. la construction d'un prototype et une campagne de mesures).

Travaux effectués et résultats acquis en 2008

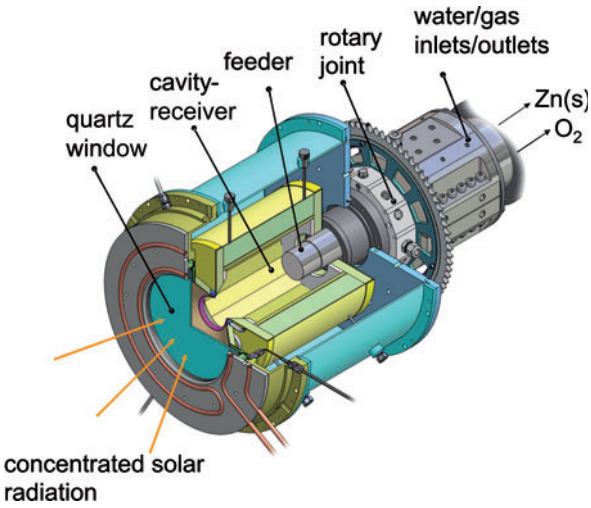
Thermochimie solaire

Langfristiges Forschungsziel des Labors für Solartechnik (LST) am Paul Scherrer Institut PSI und der Professur für Erneuerbare Energieträger (PRE) an der ETH Zürich sind solare thermochemische Kreisprozesse, die konzentrierte Sonnenenergie effizient in chemische Energieträger wie Wasserstoff umwandeln. Besonders verheissungsvoll ist der zweistufige Zinkoxid/Zink-Zyklus: (1) der erste Schritt ist die endotherme solarthermische Dissoziation von Zinkoxid (ZnO) zu Zink (Zn) und Sauerstoff (O_2); (2) der zweite Schritt ist die nicht-solare exotherme Aufspaltung von Wasser (H_2O) mit Zn zu Wasserstoff (H_2) und ZnO, welches anschliessend wieder dem solaren Prozess zugeführt wird.

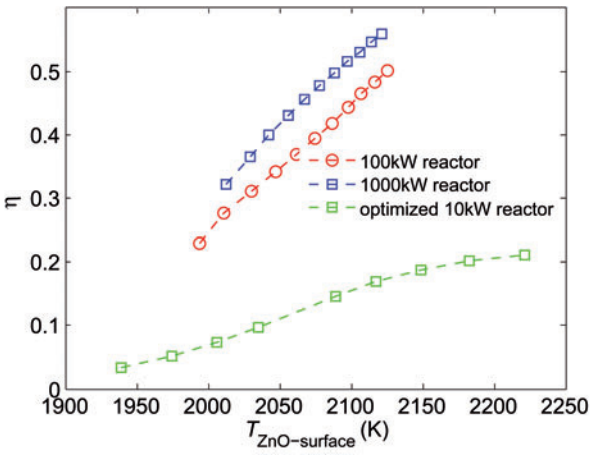
Solarchemische Herstellung von Wasserstoff mittels Zinkoxid/Zink-Kreisprozess

Der erste Schritt des Zinkoxid/Zink-Kreisprozesses wird gegenwärtig im Projekt *Towards Industrial Solar Production of Zinc – Reactor Optimization for Scale-Up* am PSI im 10-kW-Massstab optimiert und soll anschliessend in einer 100-kW-Pilotanlage demonstriert werden [1]. Figur 1 zeigt den rotierenden 10-kW-Hochtemperatur-Solarreaktor, der im Hochfluss-Solarsimulator des PSI (HFSS) bei Temperaturen bis 2000 K getestet wurde. Mit einer modifizierten Quench-Einheit am Ausgang der Kavität wurde eine verbesserte Trennung der Produktgase Zn(g) und O_2 sowie eine höhere Zinkausbeute angestrebt. In einer ersten Messkampagne wurden insgesamt 15 Experimente mit einem bis drei ZnO-Förderzyklen durchgeführt. Eine maximale Strahlungsleistung zwischen 9,1 kW und 11,6 kW wurde benötigt, um Temperaturen im Bereich von 1757–2001 K in der Kavität zu erreichen. Ein typisches Experiment dauerte 50–90 Minuten (ohne Aufheizphase). Der experimentelle Befund, dass die Zinkausbeute mit zunehmender Verdünnung bzw. abnehmendem Zink-Partialdruck steigt, ist im Einklang mit einem kinetischen Modell zur Evaluation der Trennung von Gemischen aus Zinkdampf und Sauerstoff.

In einer zweiten Messkampagne wurden die Inertgasströme zum Schutz des Fensters vor Verschmutzung durch Partikelablagerung weiter optimiert. In einem ersten Schritt wurden Visualisierungsexperimente durchgeführt, um die optimale Strömungskonfiguration im kalten Reaktor zu finden. In einem zweiten Schritt wurden die verheissungsvollsten Strömungskonfigurationen mit dem *Zirrus*-Reaktor im *HFSS* getestet. Bei dieser Messkampagne wurde ein neues Verfahren zum



Figur 1: Schema des 10-kW-Prototypreaktors für die solarthermische Dissoziation von ZnO in Zn und O2. (Bildquelle: PSI)



Figur 2: Energieumwandlungswirkungsgrad η als Funktion der maximalen Oberflächentemperatur $T_{ZnO-surface}$. (Bildquelle: PSI)

Einbringen von ZnO in die Reaktorkavität getestet. Statt die einfallende Strahlung während des Förderns komplett abzublocken, wurde die Strahlungsleistung lediglich auf ein akzeptables Niveau reduziert, um das Abschmelzen der wassergekühlten Spitze des Förderers zu verhindern.

Im Rahmen einer Dissertation wurde ein instationäres Wärmeübertragungsmodell entwickelt, um die thermische Leistung des Solarreaktorprototyps für die solare Dissoziation von ZnO im Temperaturbereich von 1600–2130 K zu analysieren [2].

Wärmeleitungsverluste zur wassergekühlten Quench-Einheit und Strahlungswärmeverluste durch den ringförmigen Kavitätsausgang wurden als Hauptgründe für die tiefen Wirkungsgradzahlen von maximal etwa 3 % für den 10-kW-Reaktorprototyp identifiziert. Wie Modellrechnungen zeigen, kann der Energieumwandlungswirkungsgrad η des Prototypreaktors auf bis zu 17 % erhöht werden, wenn die Geometrie am Ausgang der Kavität so optimiert wird, dass die Wärmeleitungsverluste durch Verkleinerung oder komplette Entfernung von wassergekühlten Teilen verringert werden.

Figur 2 zeigt η als Funktion von $T_{ZnO-surface}$ für den optimierten 10-kW-Reaktorprototyp sowie für zwei aufskalierte 100-kW- and 1000-kW-Pilotreaktoren. Durch Aufskalieren der solaren Reaktortechnologie besteht das Potenzial, Energieumwandlungswirkungsgrade von über 50 % zu erreichen, hauptsächlich dank höherer Reaktionsraten bei höheren Betriebstemperaturen, die durch Verminderung der Wärmeleitungsverluste im optimierten Reaktor erzielt werden können.

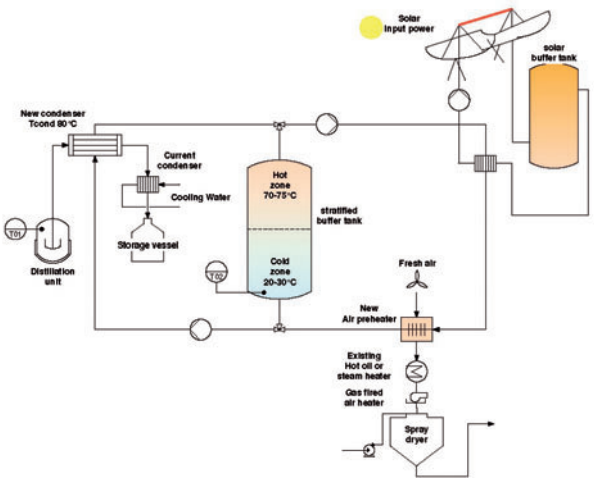
Der zweite Schritt des Zinkoxid/Zink-Kreisprozesses wurde im ETH-Projekt *Zinc Hydrolysis for Hydrogen Production* weiter erforscht. In einem Röhrenreaktor mit geheizten Wänden wurde ein Strom von Zinkdampf mit Wasserdampf gequencht, wobei Wasserstoff zusammen mit Zink/Zinkoxid-Nanopartikeln produziert wurde [5].

Solarthermische Herstellung von Wasserstoff und Synthesegas aus fossilen Rohstoffen

Im Rahmen des EU-Projekts *SOLHYCARB* (2006–2010) ist im Sommer 2009 ein Scale-up der solarchemischen Reaktortechnologie auf 50 kW geplant. Dabei soll Methan (CH_4) thermisch zu Wasserstoff und hochwertigem Kohlenstoff («carbon black») zersetzt werden. Die Hochtemperaturprozesswärme wird durch konzentrierte Strahlung bereitgestellt. Vorbereitungsarbeiten wurden mit einem 5-kW-Reaktorprototyp im Solarofen des PSI und im Solarsimulator an der ETH Zürich geleistet. Im Berichtsjahr wurden insgesamt 52 Experimente mit einem Leistungseintrag von 3–6 kW durchgeführt, wobei eine maximale Methankonversion X_{CH4} von 90 % bei einer Reaktionstemperatur von über 1600 K erreicht wurde. Mit ausgewählten experimentellen Daten wurde ein instationäres Strahlungswärmeübertragungsmodell validiert.

Beim EU-Projekt *SOLREF* (2005–2009) ist im Jahr 2009 die experimentelle Demonstration der solaren Dampfreformierung von Methan für verschiedene Anwendungen wie Wasserstoffproduktion oder Stromerzeugung in einer 400-kW-Pilotanlage vorgesehen. Die Projektpartner an der ETH Zürich sind für thermodynamische Analysen und die dynamische Modellierung von Reaktoren und Prozessen zuständig.

Die solare Dampfvergasung von Schwerölderivaten («Petcoke» oder «Petroleum Coke») und



Figur 3: Szenario A: Wärmerückgewinnung an der Destillation, Speicherung im Tank, Erhitzung in Solaranlage mit eigenem (kleinen) Pufferspeicher und Beheizung des Sprühtrockners (Lufterhitzer, 215 °C). (Bildquelle: Novartis Consumer Health)

die Produktion von hochwertigem Synthesegas wird in einem von der ETH Zürich initiierten Industrieprojekt *SynPet* (2002–2009) erforscht. Ähnliche Prozesse wurden am PSI modelliert und im *HFSS* experimentell untersucht, und zwar in einem modifizierten Festbettreaktor, der im Rahmen des EU-Projekts *SOLZINC* (2001–2005) für den karbothermischen ZnO/Zn-Prozess entwickelt und in einer Pilotanlage mit 300 kW solarer Leistung erfolgreich getestet worden war.

Explorative Studien neuer solarchemischer Prozesse

An der ETH Zürich und am PSI werden im Rahmen von Studienarbeiten laufend neue Prozesse untersucht, um abzuklären, ob die benötigte Prozesswärme mit konzentrierter Sonnenenergie bereitgestellt werden kann. Als erstes Beispiel sei hier die Produktion von Wasserstoff mit einem zweistufigen thermochemischen Prozess erwähnt, der auf einer Redoxreaktion mit Magnesiumoxid (MgO) und Magnesium (Mg) basiert. Ein zweites Beispiel ist die Herstellung von Ammoniak (NH_3) mit einem zweistufigen thermochemischen Kreisprozess als Alternative zum konventionellen Haber-Bosch-Prozess. Als Alternative zur CO_2-Sequestrierung werden zweistufige solarchemische Kreisprozesse mit ZnO/Zn- und Fe_3O_4/FeO-Redoxreaktionen für die Zersetzung von CO_2 in die Grundelemente C, CO und O_2 vorgeschlagen. Thermochemische Kreisprozesse werden auch untersucht, um CO_2 aus der Umgebungsluft abzutrennen. Beispielsweise wird in einem Fliessbett in zwei Schritten CaO karbonisiert und $CaCO_3$ kalziniert, wobei konzentrierte Sonnenenergie die Hochtemperatur-Prozesswärme liefert. Ein weiterer solarer Prozess betrifft die Produktion von Magnesium (Mg), wozu erste thermodynamische Untersuchungen und Umweltanalysen durchgeführt wurden.

Chaleur solaire à haute température dans les processus industriels

Die Konzeptstudie umfasste die Ist-Analyse der bestehenden Anlagen, die konzeptionelle verfahrenstechnische Dimensionierung der Anlagenteile (solarthermisch und konventionell) sowie eine Kostenschätzung [3].

Drei grundsätzlich unterschiedliche Szenarien von Verfahrensschemata ergeben sich, wie eine Solaranlage in den Betrieb integriert werden kann (siehe Figur 3):

- Szenario A: Solare Prozesswärme und Abwärmenutzung begrenzt auf Produktionsbetrieb;
- Szenario B: Solare Prozesswärme und Abwärmenutzung in Kombination mit Einspeisung ins Wärmeträgersystem;
- Szenario C: Solare Prozesswärme ohne Abwärmenutzung nur zur Einspeisung ins Wärmeträgersystem.

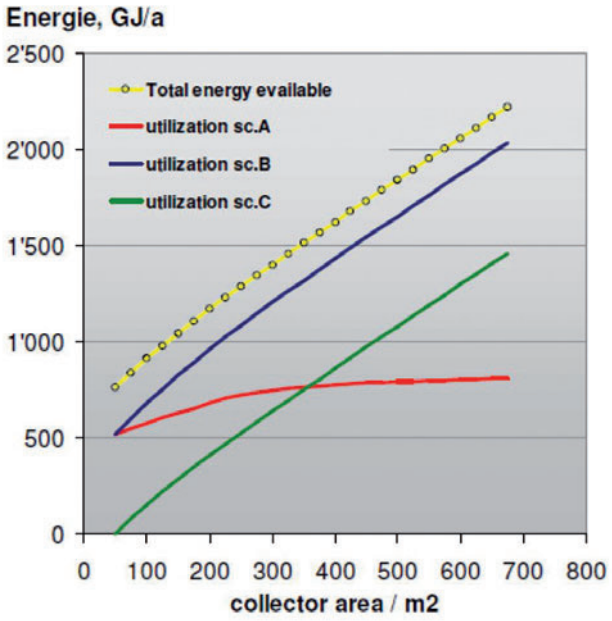
Für die Wärmeerzeugung auf Prozesswärmeniveau werden konzentrierende Solarkollektoren benötigt. In dieser Studie wurden einachsig nachgeführte Parabolrinnenkollektoren untersucht. Die Errichtung der Solaranlage ist an drei möglichen Positionen am Standort Nyon untersucht worden:

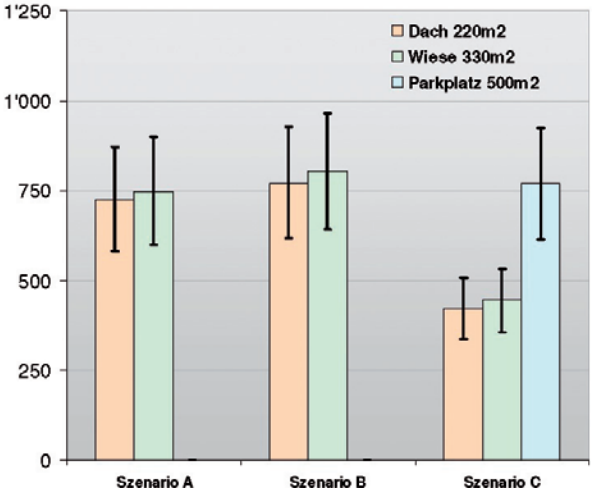
- Option 1: Auf dem Dach des Produktionsgebäudes;
- Option 2: Auf einer Wiese unmittelbar neben dem Produktionsgebäude;
- Option 3: Auf dem PW-Parkplatz des Standortes in ca. 300 m Entfernung vom Produktionsgebäude.

Eine qualitative Beurteilung der verschiedenen Szenarien und Aufstellungsoptionen ist im Abschnitt 3.5 des Schlussberichtes gegeben [3].

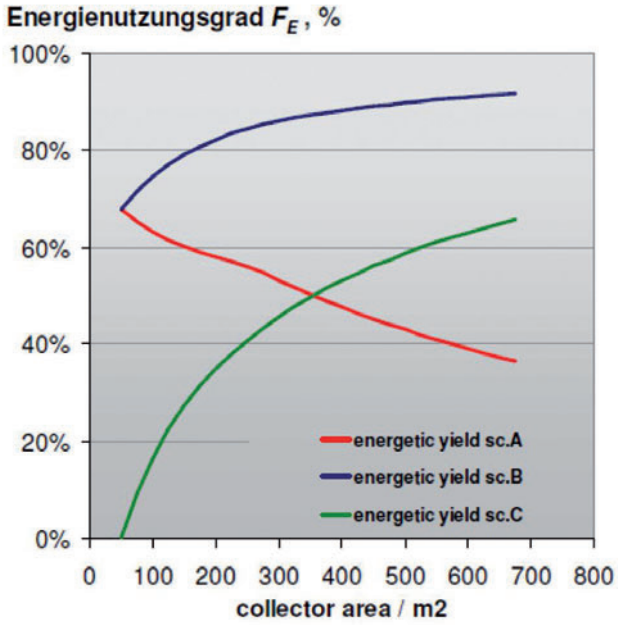
Zur Berechnung der Wärmerückgewinnung, der solaren Aufwertung und der Anwendung im Prozess wurde ein Modell entworfen, welches die verschiedenen Wärmeströme in und um die chemische Produktion und die Solaranlage berücksichtigt. Zur Erstellung des Solarmodells wurde Polysun4[1] erweitert, damit ein Prozesswärmesystem mit Solarintegration, wie jenes der Novartis in Nyon, simuliert werden kann. Um zu simulieren, wie gross der solare Ertrag ist, bedurfte es einiger Neuentwicklungen und Erweiterungen von Poly-

[1] Polysun4 wird gemeinsam mit der Spin-Off Firma Vela Solaris weiterentwickelt (www.velasolaris.com).





Figur 5: Investitionskosten der verschiedenen Szenarien in kCHF. (Bildquelle: Novartis Consumer Health)



Figur 4: Modellierte jährliche Energien (oben) und energetischer Nutzungsgrad (unten). (Bildquelle: Novartis Consumer Health)

sun4-Komponenten. Wichtige Einflussgrössen für die Modellierung sind naturgemäss die verfügbare Fläche der Solarkollektoren sowie die Grösse des Speichertanks. Für die jeweiligen Szenarien wurden für diese Parameter die resultierenden jährlichen Energieströme wie auch die jährlichen energetischen Nutzungsgrade berechnet (siehe Figur 4).

Für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit wurden die folgenden Betriebskosten der Anlage und die Kapitalkosten (mit 9 % verzinst) sowie die Abschreibung der Anlage über deren Lebensdauer von 25 Jahren berücksichtigt. Für die drei Szenarien wurden für unterschiedliche Optionen die jeweiligen Investitionskosten berechnet (siehe Figur 5). Die wirtschaftliche Bewertung der verschiedenen Optionen erfolgte mittels statischer (Pay-Back) und dynamischer (Netto Barwert NPV und interne Rentabilität IRR) Methoden.

In dieser Machbarkeitsstudie wurde gezeigt, dass eine solarthermische Aufwertung von Niedertemperatur-Prozessabwärme mittels konzentrierender Solarkollektoren technisch gut möglich ist. Der Aufwand für die Gewinnung, Speicherung und erneute Integration der Wärme in den Prozess ist mit konventionellen verfahrenstechnischen Einheiten realisierbar. Die Einbindung der Solarkollektoren stellt regeltechnisch moderate Anforderungen. Es existieren marktreife Parabolrinnenkollektoren in Modulbauweise, die von Anbietern schlüsselfertig geliefert und installiert werden. Grundsätzlich ist dieses Konzept zur Abwärmenutzung überall dort anwendbar, wo folgende Kriterien erfüllt sind:

- Verfügbarkeit von Prozessabwärme, möglichst kontinuierlich (reduziert den Pufferbedarf);
- Solare Einstrahlung von direktem (nicht diffusem) Sonnenlicht in der Grössenordung von Nyon (1300 kWh/m^2/a) oder besser. Denkbare Standorte in der Schweiz sind insbesondere das Wallis, das Tessin und das Engadin. Die Region Basel wäre allenfalls denkbar.

Ein entsprechendes Projekt hat Chancen auf eine Realisierung, wenn folgende Punkte gegeben sind:

Die erwartete Lebensdauer der Abwärmequelle (Prozess) ist noch für über ca. 10 Jahre gesichert;

Ein Unternehmen ist bereit, für erneuerbare Energien einen Mehrpreis zu bezahlen.

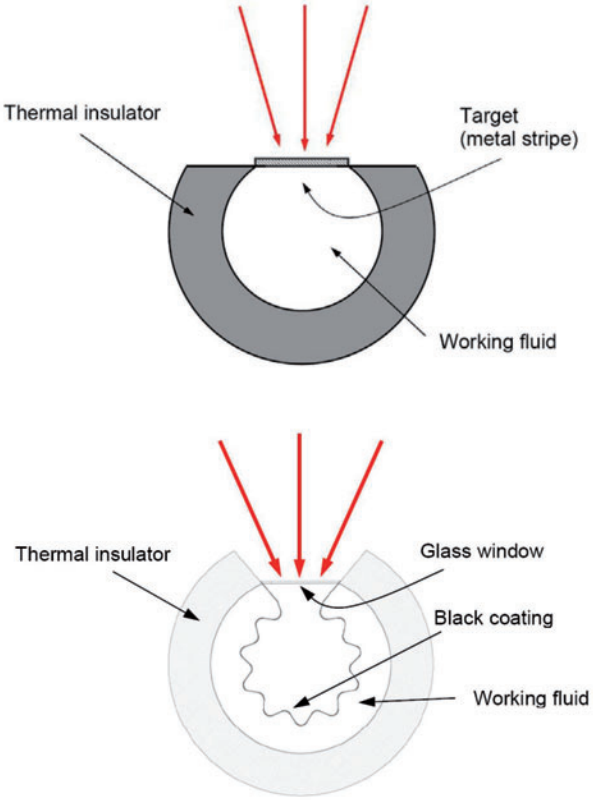


Figure 6: Coupe transversale des récepteurs tubulaire (en haut) et à cavité cylindrique (en bas). (Source : Airlight Energy SA)

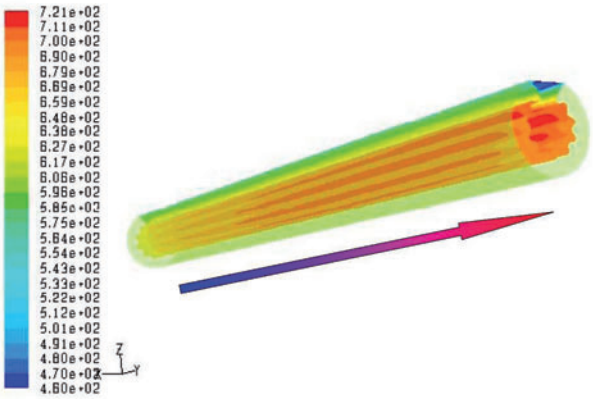


Figure 7: Simulations CFD (Computational Fluid Dynamics) du contour statique de température (échelle en K) du modèle 5 de récepteur à cavité cylindrique. (Source : Airlight Energy SA)

avec des fluides caloporteurs gazeux (air et azote) et sur la prévision de sa performance. Les solutions explorées concernent des absorbeurs tubulaires et des absorbeurs à cavité cylindrique (voir Fig. 6).

Pour chaque modèle d'absorbeur appartenant aux deux familles susmentionnées, une série de simulations fluido- thermodynamiques ont été effectuées pour vérifier l'efficacité de l'absorbeur

Centrales solaires thermiques à concentration (CSP)

Le projet *Solair – Innovative solar collectors for efficient and cost-effective solar thermal power generation* a démarré à la fin de 2007 et s'est terminé avec succès en décembre 2008 [4]. Le présent projet de la société ALE Airlight Energy a comme objectif l'ingénierie et la conception d'un nouveau concept de système de concentrateur efficace et rentable pour la production d'énergie solaire thermique. La technologie exploite une structure gonflable pour concentrer le rayonnement solaire. Cette nouvelle disposition permet de réduire les coûts d'investissement du champ de concentrateurs et promet d'être économiquement compétitive. Un premier prototype, construit en 2007, a été remanié et fortement modifié. Dans la nouvelle configuration, en utilisant des miroirs secondaires, le foyer est situé à proximité de la structure principale et permet l'intégration de l'absorbeur dans la structure gonflée.

Les travaux effectués et les résultats acquis en 2008 sont présentés en détail dans le rapport final

Développement de l'absorbeur

La Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana (Supsi) a mené une étude détaillée sur la conception d'un absorbeur fonctionnant

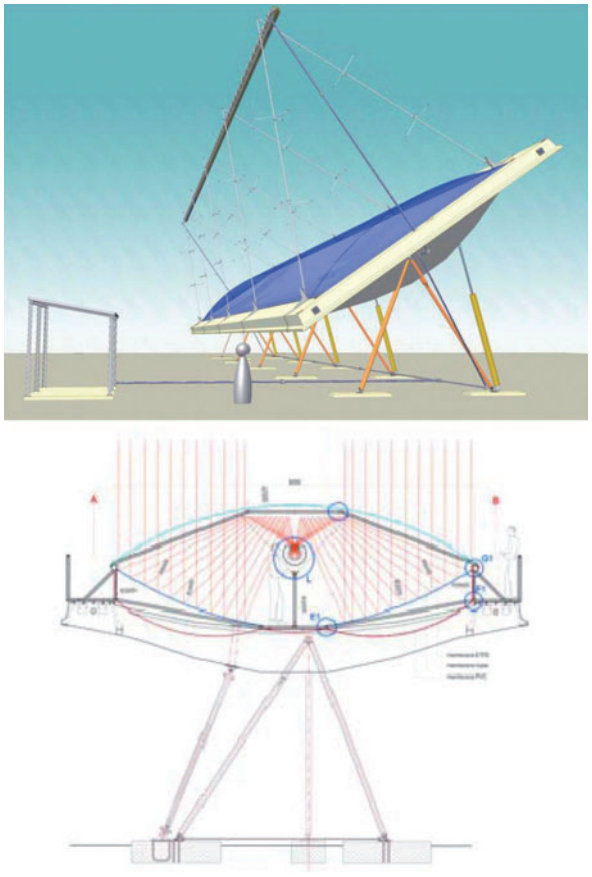


Figure 8: En haut : image CAD du 1er prototype ; en bas : coupe transversale du 2ème prototype de collecteur Airlight du projet [4]. (Source : Airlight Energy SA)

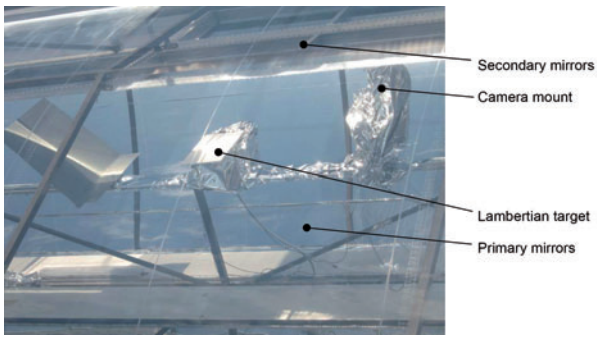


Figure 9: Cible lambertienne et caméra montée. *(Source : Airlight Energy SA)*

et pour évaluer, en première approximation, les performances en termes de transmission d'énergie vers le fluide caloporteur et les pertes de pression du flux. Un gros avantage du nouveau concept de concentrateur Airlight est le fait que l'absorbeur est positionné à l'intérieur du coussin d'air délimité par l'Etfe en le protégeant du vent, ce qui permet une réduction des pertes de chaleur par convection. Les résultats des simulations ont montré que les performances obtenues avec les absorbeurs tubulaires sont très mauvaises pour les conditions de flux d'air requises par le concentrateur Solair. Par contre, le concept d'absorbeur à cavité cylindrique a montré des meilleures performances dans le transfert de l'énergie électromagnétique concentrée en énergie thermique dans le fluide caloporteur (voir Fig. 7). La question la plus critique qui se pose actuellement est celle des pertes de pression du flux.

Simulations

De son côté, l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich (ETHZ) a effectué des simulations du flux solaire par la méthode Monte Carlo. Le modèle prend en compte l'extension spatiale du soleil, les erreurs statistiques de trajectoire, les erreurs aléatoire d'orientation de la surface des miroirs, les erreurs systématiques de la forme des miroirs, en raison d'une déformation du système par son propre poids, les réflectances non-idéales, les pertes de rayonnement dues à l'ombrage et aux effets de bord. Les flux de distribution et la distribution de la concentration sur la surface focale en 2-D, les flux de distribution sur la paroi de la cavité de l'absorbeur, et les performances générales du système ont été calculés. Les résultats obtenus ont montré que le système est plus sensible à de petites déformations de sa structure causées par son propre poids, ainsi qu'aux erreurs de courbure de la surface des miroirs, en particulier des miroirs primaires (MP). En excluant toutes les imperfections liées au système, le maximum théorique de la performance du système a été déterminé et le pic de concentration dans le plan focal a été trouvé à 150. Ce résultat est en cohérence avec le résultat d'un concentrateur parabolique comparable.

Prototype

Depuis le début du projet, le concept de concentrateur Solair a évolué avec comme objectif une optimisation des performances. Les deux premiers prototypes ont également été construits (voir Fig. 8) tandis que le nouveau a pour l'instant juste été dessiné (voir schéma en page de garde). La principale différence entre le troisième concept et le deuxième est le changement de la structure en béton incluant un nouveau mécanisme de basculement qui profite de la grande rigidité du cadre en béton.

Caractérisation optique

Le prototype de concentrateur solaire d'Airlight a été caractérisé optiquement. Les intensités du flux solaire radiatif ont été mesurées avec une caméra CCD calibrée en capturant l'image du soleil sur une plaque lambertienne (à réflexion diffusée) placée dans le plan focal (voir Fig. 9).

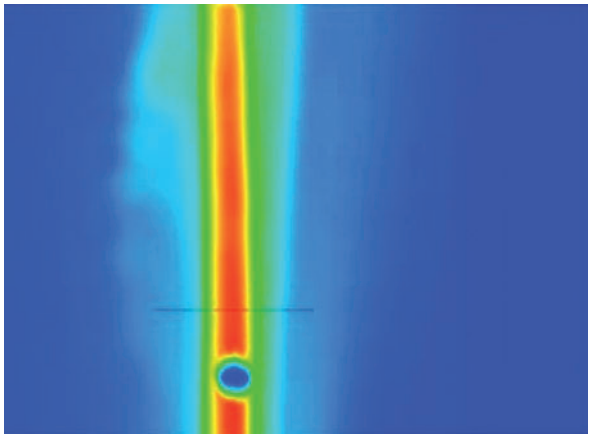


Figure 10: Exemple de donnée calibréess de la caméra. (Source : Airlight Energy SA)

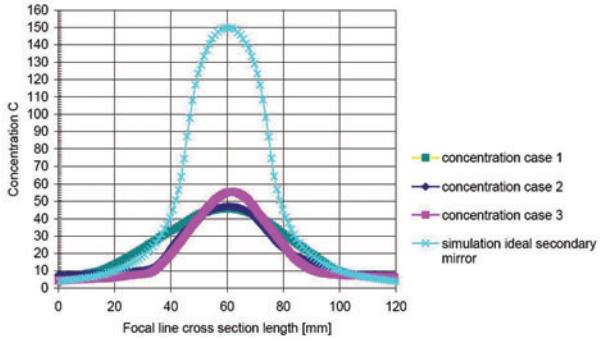


Figure 11: Comparaison avec la simulation du miroir secondaire idéal. (Source : Airlight Energy SA)

Les mesures effectuées le 25 septembre 2008 ont donné une insolation normale directe entre 800 et 870 W/m^2 sans nuage. Un exemple de mesure représentative avec la dernière configuration du miroir secondaire est présenté dans la figure 10, où sont présentées les données optiques. La ligne rouge indique la position de la coupe transversale perpendiculaire à l'axe optique du concentrateur, où est mesurée la distribution de la concentration sur l'ouverture. Comme les miroirs secondaires de forme icurvée, nécessaires pour corriger la géométrie du système, n'étaient pas disponibles, pour cette raison, un jeu de miroirs secondaires plats a été utilisé pendant les mesures. Avec ces miroirs secondaires non idéaux, des pics de concentrations de l'ordre de 45–65 ont été atteints. Une comparaison entre la concentration mesurée et une simulation de Monte Carlo de la concentration en utilisant des miroirs secondaires idéaux est illustré à la figure 11.

Collaboration nationale

Thermochimie solaire

Das Labor für Solartechnik (LST) am PSI und die Professur für Erneuerbare Energieträger (PRE) an der ETH Zürich erforschen gemeinsam solarchemischen Hochtemperaturprozesse. Die beiden Labors sind aktiv im Rahmen des neu gegründeten Competence Center Energy and Mobility (CCEM) und von Hydropole – Swiss Hydrogen Association. Mit folgenden Forschungslabors besteht eine enge Zusammenarbeit:

- Zn Hydrolyse: ETH Zürich – Particle Technology Laboratory (Prof. S. Pratsinis);
- Hochtemperatur-Materialien: EMPA – High Performance Ceramics Laboratory (Dr. U. Vogt).

Chaleur solaire à haute température dans les processus industriels

Dieses Projekt erfolgt in Zusammenarbeit mit dem Institut für Solartechnik SPF der Hochschule für Technik Rapperswil HSR. Das SPF ist zuständig für die solartechnischen Aspekte der Anlage.

Centrales solaires thermiques à concentration (CSP)

Le projet Solair représente une collaboration scientifique entre Airlight, Supsi (Institute for Computer Integrated Manufacturing for Sustainable Development of the Innovative Technologies Department) et l'ETHZ (Institute of Energy Technology of the Mechanical and Process Engineering Department).

Collaboration internationale

Thermochimie solaire

Die Forschung auf dem Gebiet der Hochtemparatur-Solarchemie ist international eingebettet in verschiedene Implementing Agreements der International Energy Agency (IEA):

- Solarpaces: Operating Agent des Task II (Solar Chemistry Research) ist Dr. A. Meier;
- IPHE – International Partnership for the Hydrogen Economy (Projekt Solar Driven High Temperature Thermochemical Production of Hydrogen) ;
- Sollab – Alliance of European Laboratories on solar thermal concentrating systems (Zusammenschluss von fünf führenden europäischen Forschungslabors).

Aktuell wird mit folgenden Forschungsinstitutionen zusammengearbeitet:

- Australien: ANU – Australian National University, Canberra; CSIRO – Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Energy Center, Newcastle, NSW;
- Deutschland: DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Köln und Stuttgart;
- Frankreich: CNRS – Centre National de la Recherche Scientifique, Odeillo;
- Israel: WIS – Weizmann Institute of Science, Rehovot;
- Japan: TIT – Tokyo Institute of Technology, Tokyo;
- Spanien: Ciemat – Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Madrid und Almería;
- USA: NREL – National Renewable Energy Laboratories, Golden, CO; SNL – Sandia National Laboratory, Albuquerque, NM; UC – University of Colorado, Denver, CO.

Évaluation de l'année 2008 et perspectives 2009

Le PSI et l'ETH Zurich sont les acteurs centraux et donnent une importante impulsion à la recherche dans le domaine de la thermochimie solaire en Suisse. L'année 2008 a permis une accélération significative dans le processus de développement d'un des cycles thermodynamiques solaire les plus prometteurs (ZnO/Zn). Les campagnes de mesures ont permis l'optimisation du prototype de réacteur de 10 kW et l'évaluation de différents paramètres dans l'objectif de faire fonctionner en 2009 le prototype de manière fiable et sans interruptions. Un objectif ultérieur pour 2009 est le démarrage du projet pour l'installation solaire pilote de 100 kW (prévu dans le four solaire de l'Odeillo).

Concernant le domaine de la chaleur solaire à haute température dans les processus industriels, l'étude menée en 2008 sur le site de Novartis à Nyon a été finalisée avec succès. Cette étude représente une première en Suisse et son transfert dans d'autres procédés et sites industriels est tout à fait possible. La perspective pour 2009 est de passer à la phase de réalisation d'un projet, chez Novartis Nyon ou d'autres industries.

En 2008, la première conférence suisse sur les CSP a attiré plusieurs acteurs du domaine (instituts de recherche et industrie) et a montré leur engagement dans des projets concrets. Le projet d'Airlight au Tessin a été finalisé avec succès. Le travail fourni par les partenaires a permis la conception, la réalisation et la caractérisation optique du deuxième prototype de concentrateur. La perspective pour 2009 est de poursuivre l'optimisation du concentrateur Airlight avec la construction du troisième prototype afin de pouvoir réaliser la première installation pilote. Le suivi de projets en cours et la contribution au lancement de nouveaux projets prometteurs est une priorité du programme.

Liste des projets R+D

[1] A. Meier (anton.meier@psi.ch), A. Steinfeld, PSI-ETHZ: Towards Industrial Solar Production of Zinc and Hydrogen – Reactor Optimization for Scale-Up (BFE-Projekt Nr. 102420/153045, Project Proposal, 2008-2011).

[2] L.O. Schunk: Solar thermal dissociation of zinc oxide – reaction kinetics, reactor design, experimentation and modeling (Ph.D. Thesis No. 18041, ETH Zürich, October 2008).

[3] A. Luzzi, H. Marti, R. Müller (reto.mueller@bmgeng.ch), BMG Engineering AG: Solarthermische Abwärmenutzung – Aufwertung von Abwärme mittels Solarthermie zur Erzeugung hochwertiger Prozessenergie (Schlussbericht BFE-Projekt Nr. 102351).

[4] M.C. Barbato, Ph. Haueter, R. Bader, A. Steinfeld, A. Pedretti (andrea.pedretti@airlightenergy.com), ALE Airlight Energy SA, Biasca: Solair – Innovative solar collectors for efficient and cost-effective solar thermal power generation (Rapport final Projet 102327).

Références

[5] A. Steinfeld, PSI-ETHZ: **Zinc Hydrolysis for Hydrogen Production**, Forschung zur Hydrolyse von Zn wird durch Finanzmittel der ETH Zürich, Professur für Erneuerbare Energieträger (PRE) ermöglicht; www.pre.eth.ch.

Impressum

Juni 2009
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
Druck: Ackermanndruck AG, Bern-Liebefeld
Bezug der Publikation: www.energieforschung.ch

Programmleiter
Pierre Renaud
Planair SA
Crêt 108a
CH-2314 La Sagne
pierre.renaud@planair.ch

Bereichsleiter
Dr. Stefan Oberholzer
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
stefan.oberholzer@bfe.admin.ch

Rapport de synthèse 2008 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2008 der BFE-Programmleiterin

Forschungsprogramm Biomasse & Holzenergie

Sandra Hermle

sandra.hermle@bfe.admin.ch



Laboranlage zur katalytischen hydrothermalen Vergasung

Am Paul Scherrer Institut in Villigen wird die katalytische hydrothermale Vergasung von Biomasse in einer kontinuierlichen Laboranlage mit einem Durchsatz von 1 kg/h untersucht. Typische Betriebsbedingungen sind 400 °C und 30 MPa.

Programmschwerpunkte

Das Forschungsprogramm Biomasse bietet durch die Vielfalt an einsetzbaren Substraten (Holz, Gülle, Mist, organische Abfälle etc.) für die Energiegewinnung eine breite Palette an Nutzungsmöglichkeiten. Die Schwerpunkte der Forschung sind dabei klar definiert:

- Systemoptimierung und -integration
- Qualitätssicherung
- neue Verfahren und Technologien.

Im Bereich Holzenergie wurden im Jahr 2008 die Konversionstechnologien Verbrennung und Vergasung gefördert. Bei der Verbrennung galt es **Feinstaubemissionen zu reduzieren**, den **Jahresnutzungsgrad zu erhöhen** und für **Qualität sichernde Massnahmen** wie z.B. für Typenprüfungen neue Messverfahren zu entwickeln. Neue Technologien sollten dabei ebenso gefördert wie bereits bestehende optimiert werden. Die Reduktion von Emissionen kann sowohl mittels Primärmassnahmen – sprich Verbesserung der Verbrennungstechnik – als auch mit Hilfe von Sekundärmassnahmen – dem Einsatz von Partikelabscheidern – gelöst werden. Bei der Vergasungsforschung stand die **Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades,** die **Rohgasreinigung** und die **Diagnostik** während des Vergasungsprozesses und bei der Gasaufbereitung im Vordergrund. Die **Entwicklung von Sicherheitsrichtlinien** bei der Anlagenkonstruktion waren genauso wichtig wie die **Förderungen von neuen Vergasungstechnologien** wie z.B. die Vergasung von feuchter Biomasse.

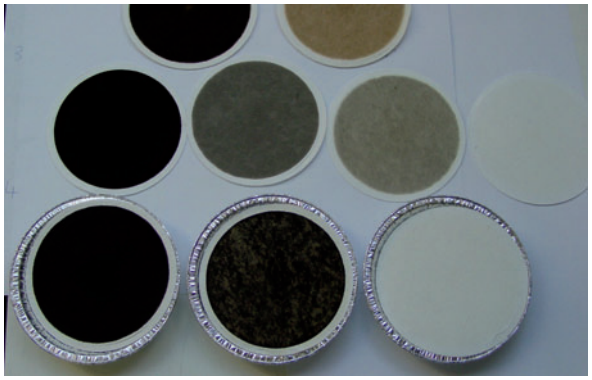
Im Bereich der übrigen Biomasse lag das Hauptaugenmerk auf der anaeroben Vergärung. Schwerpunkte waren bei dieser Technologie die **Verbesserung des biologischen Wirkungsgrades**, die **Optimierung der Wärmenutzung von Biogasanlagen**, die **Ermittlung von Emissionen** (Methan, Ammoniak, Lachgas) bei der Vergärung und Gasaufbereitung, **Schadstoffe in Kompost und Gärgut**, **Anaerobtechniken** zur Behandlung von Abfällen und kommunalen Abwässern.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2008

Verbrennung

Bei der Verbrennungsforschung stand die ganze Prozesskette von der Holzgewinnung über die Verarbeitung bis zur Nutzung im Fokus. Holz als nachwachsender einheimischer Brennstoff erlebte in den letzten Jahren eine Renaissance und gerade Hackschnitzel und Pellets sind aufgrund von Komfortansprüchen sehr gefragt. Pellets lassen sich nicht nur aus Sägemehl herstellen, sondern auch aus Waldfrischholz. Es besteht ein grosses Interesse daran, den Wassergehalt des zu verarbeitenden Holzes auf natürlichem Weg möglichst stark zu reduzieren, damit der Brennwert des Holzes ansteigt. Im Projekt *Feuchtegehalt-Änderungen des Waldfrischholzes bei Lagerung im Wald* [1] wurden eine Reihe von Lagerungsexperimenten durchgeführt, bei denen die Art der Lagerung, der Ort der Lagerung und der Schlagzeitpunkt variiert wurden. Ziel des Projektes war die Ermittlung der optimalen Lagerungsdauer und Lagerungsmethodik für frisch geschlagenes Holz im Wald und deren wirtschaftliche Folgen für die Pelletierung. Es zeigte sich, dass die ideale Erntezeit für Fichten 3–5 Monate beträgt, während die Buche nach 8–9 Monaten einen durchschnittlichen Wassergehalt von <35 % erreicht (Auslagerungsbeginn im Frühjahr). Grundsätzlich gilt, dass je dünner und kürzer die Rundhölzer sind, umso schneller trocknen sie. Auch eine Entrindung und eine trockene Unterlage wirken sich positiv auf die Trocknung aus. Eine Abdeckung der Polter lohnt sich erst 4–8 Monate nach der Poltererstellung, denn mit der Abdeckung kann auch langfristig ein Wiederanstieg des Wassergehaltes verhindert werden. Der Anfangswassergehalt der Stämme zeigte keine Korrelation mit dem Schlagzeitpunkt.

Bei der Nutzung der Holzenergie sind Pelletheizungen auf dem Vormarsch (Anzahl Pelletheizungen in der Schweiz 1990: 0; 2007: 12'690), jedoch sind die zahlreich vorhandenen Stückholzheizungen nicht zu vernachlässigen (Anzahl Stückholzheizungen in der Schweiz 1990: 689'184; 2007: 661'350). Ein zentrales Thema bei der Verbrennung ist die Feinstaubproblematik (siehe auch



Figur 1: Filter nach Beprobung einer handbeschickten Holzheizung. (HSLU)

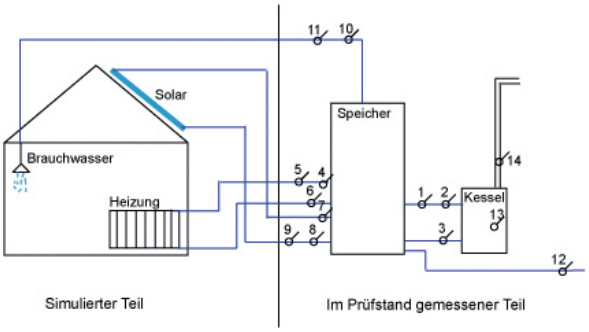
Schwerpunkte des Forschungsprogramms Biomasse [2]).

Sowohl bei Pellet-, als auch bei Stückholzheizungen und Holzöfen erweist sich besonders die Anfeuerungsphase als kritisch bezüglich Partikelemissionen. Das Projekt *Partikelemissionen von Holzfeuerungen bis 70 kW* [3] untersucht den Einfluss der Betriebsweise von Holzfeuerungen auf die Feinstaubemissionen (Figur 1). Ziel ist es, aus den Untersuchungen Konsequenzen für einen optimalen Betrieb sowie für Kontroll- und Vollzugsverfahren abzuleiten. Im Jahr 2008 wurden mehrere Holzöfen (handbeschickte Öfen und Pelletöfen) im Bioenergielabor der Hochschule für Technik und Architektur Luzern (HSLU) in Horw gemessen, wobei nebst der konventionellen gravimetrischen Staubmessung im Abgas auch Probenahmen der Kondensate sowie Bestimmungen der Anzahlkonzentrationen und Korngrössenspektren erfolgten. In diesem Projekt zeigt sich, dass die Anfeuerungsphase überproportional zu den Gesamtpartikelemissionen beiträgt, diese allerdings in den heutigen Typenprüfungen nicht eingeschlossen wird. Bei manuell betriebenen Holzöfen hängen die Partikelemissionen sehr stark von der Betriebsweise ab. Es konnte gezeigt werden, dass unter typischen Bedingungen hohe Konzentrationen von organisch kondensierbaren Verbindungen emittiert werden, welche mit den heutigen Messmethoden zur Typenprüfung nicht oder nur teilweise erfasst werden, aber durchaus gesundheitsrelevant sind. Ein Vergleich zwischen Emissionsverhalten mit Naturzug und mit konstantem Kaminzug (gemäss Bedingungen für die Typenprüfung) zeigte höhere Partikelemissionen in der Startphase beim Naturzug, jedoch gleiche Emissionsmengen in der stabilen Brandphase. Im Jahr 2009 liegt der Fokus auf Stückholzkesseln und Pelletfeuerungen. Abschliessend erfolgt eine zusammenfassende Auswertung mit der Ableitung von Empfehlungen und Schlussfolgerungen.

Im Zusammenhang mit diesen Untersuchungen steht das Projekt *Erweiterte Partikelanalytik für Holzfeuerungsabgase* [4]. Emissionsmessungen wurden sowohl am Ökozentrum Langenbruck, als auch an der HSLU in Horw an verschiedenen Holzfeuerungstechnologien durchgeführt. Ziel dieses Projektes ist mittels online Aerosolanalytik die Emissionen mit der in instationären Verbrennungsphasen notwendigen Zeitauflösung zu messen, um gezielt technische Verbesserungen an Feuerungen vorzunehmen. Es konnte gezeigt werden, dass die gravimetrischen Standard-Messungen (offline) der Partikelmasse von Holzfeuerungsemissionen mit auf 150 °C erwärmten Filtern mit den online Messungen korrelieren, welche nach Verdünnung bei 150 °C gemessen wurde. Die online-Messungen zeigten insbesondere auf, dass die Emissionsmenge bei Standard-Messungen stark davon abhängt, wann genau die Messungen begonnen werden. Wichtig ist auch die Tatsache, dass die Photochemie durch die Bildung sekundärer organischer Partikelmasse zu einer Verdoppelung, häufig sogar Verdreifachung der partikulären organischen Masse führt. Das bedeutet, dass nicht nur durch die direkten Emissionen, sondern auch durch die Bildung in der Atmosphäre zusätzlich viel Partikelmasse gebildet werden kann. Für 2009 sind weitere Messungen geplant.

Das Projekt *Emissionsarme Startphase bei Stückholzkessel* [5] beschäftigt sich mit der Konstruktion eines Prototyps. Ziel des Projektes ist die Reduktion von CO und Feinstaub in der Startphase bei Stückholzkessel. Das Ziel soll mit einer neuen Geometrie des Rostes, der Anpassung von Primär- und Sekundärluftzufuhr sowie einer einfachen Bedienungsprozedur erreicht werden. Geprüft wird auch die automatische Zündung des Brennstoffes. Im Laufe der Testmessungen an einem modifizierten Kessel hat sich gezeigt, dass die Form des Rostes eine zentrale Bedeutung für eine optimale Startphase hat. Die Rostform muss eine gute Luftverteilung sowie das sichere Ausbreiten des Feuers vom Zündzeitpunkt auf die ganze Rostfläche gewährleisten. Um den Einfluss diverser Parameter (Regel-Parameter, Anfeuerprozedur, Stückigkeit des Holzes) auf die Güte der Startphase zu ermitteln, sind im Jahr 2009 weitere Optimierungstests der Firma Salerno Engler GmbH zusammen mit der Lopper AG vorgesehen. In einem nächsten Schritt folgen dann Feldmessungen, um die Tauglichkeit der gewählten Lösung zu prüfen.

Ein zweiter wichtiger Forschungsbereich im Themenfeld Holzenergie ist neben den Emissionen die Erhöhung des Jahresnutzungsgrades mittels Systemoptimierungen. Am Institut für Solartechnik an der Hochschule für Technik in Rapperswil (SPF) läuft zurzeit das Projekt *PelletSolar-2 Systemoptimierung von Pelletfeuerungen in Kombination mit thermischen Solaranlagen basierend*



Figur 2: Messstellenschema des Projektes PelletSolar-2. (SPF)

auf dynamischen Simulationen und Messungen im Prüfstand [6].

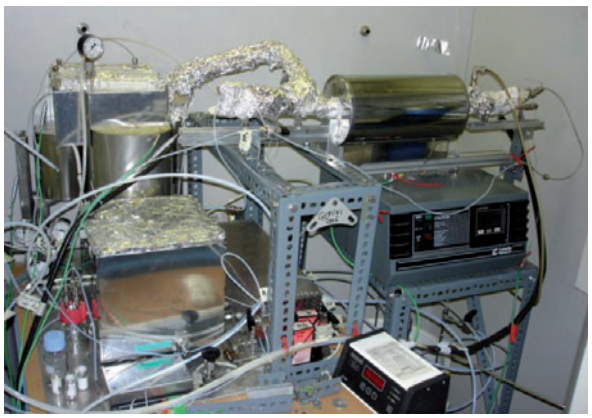
Das Projekt hat die energetische Optimierung von Systemen, welche Pelletkessel mit Solaranlagen kombinieren, zum Ziel (Figur 2). Im Vorgängerprojekt *PelletSolar-1* [7] konnte am Beispiel eines ausgewählten Pellet-Solar-Systems das Potenzial zur energetischen und der damit einhergehenden emissionstechnischen Optimierung von Pelletsystemen aufgezeigt werden. Der energetisch optimierte Betrieb wurde über eine verbesserte Regelungsstrategie und hydraulische Einbindung erzielt. Insbesondere liess sich die Frequenz von Start-Stop-Zyklen durch eine optimierte Betriebsführung stark reduzieren. Im Rahmen des Folgeprojekt PelletSolar-2 wird nun die Allgemeingültigkeit dieser Resultate anhand von zwei weiteren Systemen geprüft. Neben der energetischen Optimierung umfasst PelletSolar-2 auch die Bewertung von solarkombinierten Pelletsystemen aus emissionstechnischer Sicht. Hierzu werden die Emissionsfaktoren in Abhängigkeit des Betriebszustandes im Jahr 2009 ermittelt werden (HSLU; Projekt *Emissionsfaktoren moderner Pelletkessel unter typischen Heizbedingungen*). Zur Berechnung von Jahresemissionsfrachten werden die gemessenen Emissionsfaktoren ins Simulationsmodell integriert (SPF). Ziel dieses Projektes ist es, das Systemprüfverfahren für Pelletsysteme soweit zu entwickeln, dass Anbieter von Pelletsystemen allgemein die Möglichkeit haben, ihr System am SPF praxisnah testen zu lassen. Zurzeit werden die Daten des ersten gemessenen Kombisystems ausgewertet. Das zweite System soll im März 2009 gemessen werden. Im Zusammenhang mit den Arbeiten an PelletSolar-2 konnte eine Zusammenarbeit mit dem österreichischen Forschungsinstitut ABC (Austrian Bioenergy Center) in die Wege geleitet werden, um gemeinsam eine neue Methode für das Prüfverfahren von Biomasse-Kleinfeuerungen zu entwickeln. Die neue Methode soll Anreize schaffen, die Qualität und Effizienz der geprüften Produkte zu verbessern (Projekt *SimPel: Entwicklung einer Methode zur Bestimmung von Jahresnutzungsgraden von Biomasse-Kleinfeuerungen*).

Holzenergiesymposium 2008

Eine ideale Plattform, um sich über die neuesten Forschungsthemen auszutauschen ist das alljährlich stattfindende Holzenergiesymposium [8]. Dieses Jahr feierte dieses Symposium seine zehnjährige Auflage mit den Themenschwerpunkten Ökonomie, Technik und Luftreinhaltung. Im ersten Teil wurden die ökonomischen und politischen Rahmenbedingungen der Holzenergie diskutiert. Ausgehend von einer Übersicht zur Energiepolitik des Bundes wurden die Förderinstrumente der Stiftung Klimarappen vorgestellt und von Prof. Dr. E. Jochem als Experten für Energieökonomie die Potenziale der Biomasse aufgezeigt. Im zweiten Teil wurden neueste Anwendungen zur Wärme- und Stromerzeugung aus Holz beschrieben. Nebst dem Holzkraftwerk Basel wurde die in Stans in Betrieb stehende Anlage mit Festbettvergasung erläutert. Im Weiteren wurden der Einsatz einer Heissluftturbine, die thermoelektrische Stomerzeugung in Pelletfeuerungen sowie die Möglichkeiten zur Strömungsoptimierung von Feuerräumen vorgestellt. Der dritte Teil war dem Thema Feinstaub und Luftreinhaltung gewidmet. Aufgabe der Technik ist es, die Feinstäube zu reduzieren. Allerdings stellt sich vorab die Frage, wie verschiedene Feinstäube auf unsere Gesundheit wirken, um daraus abzuleiten, welche Eigenschaften gemessen und welche Grenzwerte umgesetzt werden sollen. Diese Frage behandelte Frau Dr. R. Rapp, die sich als Fachärztin intensiv mit den Gesundheitswirkungen von Feinstaub befasst. Danach wurden neue Entwicklungen zur Feinstaubabscheidung vorgestellt und diskutiert, wie die Luftreinhaltevorschriften für solche Anlagen kontrolliert werden können.

Vergasung

Die Rohgasreinigung stellt bei der Vergasungstechnologie einen wichtigen Prozessschritt dar. Aufgrund physikalischer Einschränkungen und der Tatsache, dass Gleichgewichtszustände der chemischen Gleichgewichtsreaktionen meist nicht erreicht werden, können auch bei höheren Vergasungstemperaturen und längeren Gasverweilzeiten im Reaktor nicht alle Produkte der pyrolytischen Zersetzung in CO, CO_2, CH_4 und H_2 konvertiert werden. Deshalb finden sich im Rohgas unterschiedliche Mengen verschiedener höher siedender Kohlenwasserstoffverbindungen. Je nach Vergasertyp, Vergasungsbedingungen und Art des eingesetzten Biobrennstoffs enthält das Rohgas zusätzlich noch unterschiedliche



Figur 3: Anlage für Experimente mit CPO-Katalysatoren im Mikro-Festbett. (PSI)

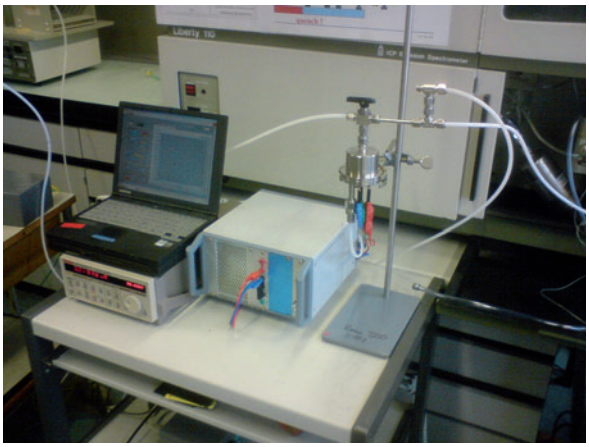
Mengen an Grob- und Feinpartikeln (d.h. Staub, Asche, Bettmaterial), Alkalien, Schwefel-, Halogen- und Stickstoffverbindungen. Um Erosionen, Korrosionen oder Ablagerungen in nachgelagerten Anlagenteilen und emissionsseitige Umweltbelastungen zu vermeiden, muss das Rohgas gereinigt werden.

Mittels Feldmessungen an Versuchsanlagen und systematischen Experimenten in Mikroreaktoren werden zunächst die Anforderungen an die Reinigungsstufen überprüft. Hierzu ist der Aufbau einer optimalen Analytik zur quantitativen und qualitativen Bestimmung von Schwefelspezies im ppm-Bereich notwendig. Danach sollen mögliche Entschwefelungskatalysatoren und Absorbermaterialien getestet und die Betriebsparameter für das meist versprechende Konzept optimiert werden. Bis dato wurde der Gas-Chromatograph mit Schwefelluminiszenz-Detektor (GC/SCD) angeschafft und die Methoden weiter entwickelt. In einem nächsten Schritt wird die Methodenentwicklung abgeschlossen werden, um dann die Feldmessungen durchzuführen. Parallel dazu wurde mittels systematischer Experimente mit CPO-Katalysatoren (CPO: catalytic partial oxidation) in Mikroreaktoren die Aktivität des Katalysators bestimmt (Figur 3). Ebenfalls fanden Screening- Experimente mit HDS-Katalysatoren (HDS: Hydrodesulphurierung) und Hochtemperatur-Nickelkatalysatoren statt. Im nächsten Jahr sollen weitere Katalysatoren erprobt und die besten Kandidaten bestimmt werden.

Nicht nur holzige Biomasse ist für die Vergasungstechnologie geeignet, auch «nasse» Biomasse kann in ein Produktgas umgewandelt werden. Die katalytische hydrothermale Vergasung erlaubt die vollständige Umwandlung speziell von nasser Biomasse in Methan mit einem hohen Wirkungsgrad unter Rückgewinnung der Nährsalze. Dieses vom PSI entwickelte Verfahren wird im Projekt *Optimierung der Hydrolyse und Salzabtrennung bei der hydrothermalen Vergasung von Biomasse* [10] im Rahmen der Förderung neuer Vergasungstechnologien (gemäss Forschungsprogrammschwerpunkt s.o.) weiter erprobt. Ein Hindernis für die Umsetzung sind chemische Reaktionen von Salzen mit dem organischen Anteil der Biomasse, was zur Koksbildung und vorzeitiger, unerwünschter Gasbildung führen kann. Dadurch wird die Abscheidung der Salze erschwert und Anlagenteile können verstopfen. Ziel des Projektes ist einerseits die Untersuchung der chemisch-physikalischen Grundlagen dieser Reaktionen und andererseits die Erarbeitung chemisch-verfahrenstechnischer Massnahmen, um die Koksbildung zu vermeiden. Anhand der Umsetzung verschiedener organischer Modellsubstanzen mit unterschiedlichen Salzen soll untersucht werden, welche chemischen Vorgänge bei der Verflüssigung von Biomasse und der anschliessenden Salzabscheidung ablaufen. 2008 wurden zahlreiche Versuche durchgeführt. Neben der Aufnahme von Temperaturprofilen im Erhitzer, Salzabscheider und Reaktor unter unterschiedlichen Bedingungen wurden Vergasungs- und Salzabscheidungsversuche mit wässrigen Glyzerin- und Glyzerin-Kaliumphosphatlösungen untersucht.

Als Katalysator wurde Ruthenium auf einem Kohlenstoffträger verwendet. Aus den Versuchen resultierte, dass die technische Konstruktion des Salzabscheiders noch nicht optimal ist, da die eingestellte Solltemperatur erst am Ende der Heizstrecke erreicht wird. Dieser Mangel kann aber teilweise durch eine Erhöhung der Erhitzertemperatur kompensiert werden (Nachteil: Problem der Koksbildung). Wird statt Wasser Glyzerin- oder ein Glyzerin-Salz-Feed eingesetzt, so verschieben sich die Temperaturprofilkurven des Salzabscheiders zu höheren Temperaturen. Auch die Temperaturprofile des Reaktors werden durch eine Umstellung des Feeds stark beeinflusst. Die Temperatur des Salzabscheiders beeinflusst die Reaktortemperatur, jedoch nicht anders herum. Die Vergasung einer Glyzerinlösung ohne Salz konnte relativ problemlos in einem breit gefächerten Parameterspektrum realisiert werden. Bei der Zugabe von Kaliumphosphat kommt es bereits im Salzabscheider zu einer verstärkten Umsetzung von Glyzerin unter Gasbildung; gleichzeitig geht aber die Bildung von teerartigen Substanzen im Vergleich zur Vergasung ohne Salz zurück. Nachteilig war die Deaktivierung des Katalysators nach ca. 80 Stunden Standzeit. Im Jahre 2009 wird der Fokus auf der systematischen Untersuchung der Reaktionen von biomasserelevanten Salzen mit organischen Molekülen im Hinblick auf die Koksbildung liegen.

Biomassen enthalten Spurenstoffe wie Alkalien, Schwermetalle, Schwefel, Halogene etc. Bei der



Figur 4: Versuchsanlage Ionisationsdetektor. (PSI)

Umwandlung von Biomasse zu Strom oder Syngas können die in Spuren vorhandenen Alkalien Anlageteile schädigen (Turbinen, Katalysatoren, Wärmetauscher, Brennstoffzellen) oder Prozessschritte verunmöglichen. Ziel des Projektes *Oberflächen-Ionisationsdetektor zur Online Messung von Alkalien in Prozessgasen* [11] ist die Entwicklung und Anwendung eines feldtauglichen Alkalidetektors zur kontinuierlichen Messung von Alkalien (Natrium, Kalium) in Prozessgasen (Figur 4).

In diesem Jahr wurden sowohl Messungen des Alkalidetektors gekoppelt mit einem Thermogravimeter durchgeführt, als auch eine Testmessung mit einem verdünnten Produktgas des Holzvergasers am Paul Scherrer Institut (PSI). Bei den Versuchen zeigte sich, dass das Messsignal des bestehenden Detektors durch folgende Parameter beeinflusst wird: Grösse der Partikel, Geschwindigkeit des Gasflusses, Gaszusammensetzung. Auch traten während den Feldmessungen wiederholt Probleme durch Ablagerungen im Detektor auf, welche zu Kriechströmen führen können und ein künstliches Signal ergeben. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde ein neuer Detektor entworfen und gebaut, bei dem z.B. die Gasstromführung mit weniger Turbulenzen im Messbereich verbunden ist. Des Weiteren wurde ein gleichgerichteter Gasstrom mit der Flugbahn der Ionen realisiert, die Abdeckung des Strömungsquerschnittes durch das Filament wurde optimiert, die Distanz zwischen Filament und Detektor wurde variabel gestaltet und es wurde eine Heizung eingebaut, um Ablagerungen zu minimieren. Die letzten Schritte zur Vervollständigung des neuen Designs stehen in folgenden Bereichen an: die Reaktionszeit der Temperaturregelung des Filaments soll verkürzt werden, wodurch eine höhere Lebensdauer des Filaments zu erwarten ist. Weiter soll ein Konzept für die geplanten Koaxialanschlüsse ausgearbeitet und umgesetzt werden, um Fremdströme von der Messung auszuschliessen. Im Weiteren soll eine feldtaugliche Kalibrierungsmöglichkeit entwickelt werden. Parallel dazu soll auch die Beeinflussung des Signals durch Wasserstoff, Sauerstoff, Methan und Wasser untersucht werden.

Anaerobe Vergärung

Obwohl seit über einem Jahrzehnt in der Schweiz feste biogene Kommunalabfälle vergoren werden, wurde noch nie der Wassergehalt und der Gehalt an organischer Substanz der Ausgangsmaterialien systematisch erfasst. Dies ist genau das Ziel des Projektes *Bestimmung der TS- (Trockensubstanzgehalt) und OS- (Gehalt an organischer Substanz) Gehalte von Ausgangsmaterialien für die Feststoffvergärung* [12]. Die Untersuchungen sollen statistisch klar abgegrenzte Bereiche für verschiedene Materialien wie Grüngut, Haushaltsabfälle und Speisereste aus der Gastronomie liefern, wobei auch weitere Einflussfaktoren wie z.B. Wetterlagen berücksichtigt werden. Die Daten sollen Planungsgrundlagen liefern und unter anderem auch Klarheit verschaffen, mit welchen Werten im Fall der Erstellung von Ökobilanzen gerechnet werden kann. Mit dieser Studie konnte gezeigt werden, dass der TS-Gehalt stark von der Lage und dem Einzugsgebiet der Biogasanlage abhängt. In Städten und deren Agglomerationsgemeinden mit entsprechend viel Gewerbe- und Gastrobetrieben und verdichtetem Bauen in der Innenstadt, was zu einem kleineren Anteil des Gartenabraums führt, liegt der TS-Gehalt des Eingangsmaterials bei nur rund 26–27 %. In Mittellandgemeinden mit ansässigen Gewerbe- und Gastrobetrieben kann mit einem mittleren TS-Gehalt von etwa 30–31 % gerechnet werden. Wenn aus dem Einzugsgebiet vorwiegend Küchen- und Gartenabfälle mit wenig Gastro- und Gewerbeabfälle angeliefert werden, erhöht sich der mittlere TS-Gehalt auf rund 33–34 %. Bei intensiv geförderter Einsammlung ohne Entsorgungsgebühr, ohne Gewerbe- und Gastroabfälle und grossem Anteil an Gartenbesitzern kann der mittlere TS-Gehalt des Inputmaterials auf rund 38 % ansteigen. Generell können die Eingangswerte innerhalb von Tagen und auch je nach Jahreszeit sehr stark schwanken. Während der Vegetationsperiode sind die TS-Eingangswerte im Durchschnitt um 5 % tiefer. Nasse Witterung scheint keinen sehr grossen Einfluss auf den TS-Gehalt zu haben. Bezüglich der Fragestellung des OS-Gehaltes liegt dieser bei Proben mit relativ viel Haushalts- und Gewerbeabfällen im Verhältnis zum Gartenabraum durchschnittlich bei rund 77 % der TS. Reine Gewerbe- und Gastroabfälle können aber ohne weiteres OS-Gehalte von über 90 % aufweisen. Der Kohlenstoffgehalt des Ausgangsmaterials liegt bei rund 40 % der TS.

Die im kommunalen Abwasser gespeicherte chemische Energie und die enthaltenen Rohstoffe wie Stickstoff und Phosphor werden derzeit in der Schweiz nur in geringem Masse genutzt. Im Rahmen der zukünftigen Planung und Erneuerung bestehender Anlagen soll eine weitaus bessere Effizienz erreicht werden. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen partiell neue Verfahren und Techniken sowie eine veränderte Biologie zum Einsatz kommen. In der Schweiz beruht die kommunale Abwasserreinigung meist auf der Belebtschlamm-Technologie. Der Energieaufwand der herkömmlichen Reinigung ist hoch, obwohl das Abwasser reichlich Energie in Form von organischem Kohlenstoff enthält, die nur teilweise genutzt wird. Ziel der Studie *Anaerobe Behandlung kommunaler Abwässer in der Schweiz* [13] ist es, in Bezug auf

kommende Infrastruktur-Erneuerungen innovative und nachhaltige Ansätze zu evaluieren, diese in die künftige Anlagenplanung zu integrieren und dadurch eine optimierte energetische und stoffliche Bilanz zu erreichen. Besondere Aufmerksamkeit soll auf die anaerobe Behandlung, bzw. auf die Kombination von anaeroben und aeroben Verfahren und neuartigen Filtrationstechniken im Bereich der kommunalen Abwässer gelegt werden. Die wichtigsten Beurteilungskriterien dieser Studie sind ökologische und ökonomische Vorteile der Abwasserreinigung, die sich aus Energieeinsparung/Energieproduktion und einem besseren Recyling von Nährstoffen ergeben. Im Folgenden werden verschiedene technische Konzepte der Abwasserreinigung mit kombinierter Biogasproduktion evaluiert: 1. Verfahrenskombinationen mit Biogas-produzierendem Anaerobreaktor im Abwasser-Nebenstrom; 2. Verfahrenskombination mit Biogas-produzierendem Anaerobreaktor im Hauptabwasserstrom (sowie klassischer Schlammbehandlung). Die Vorteile der Variante 1, Vergärung im Nebenstrom, sind ein absolut pathogenfreier Abfluss und die Möglichkeit, im relativ kleinen anaeroben Reaktorvolumen thermophile Bedingungen zu erzeugen, was die Biogasausbeute und die Gasqualität fördert. Nachteile sind zu erwartenden Probleme im Bereich der Abwasser-Membranfiltration wie «Fouling» und Biofilmbildung. Durch die zweistufige anaerobe Vergärung der Variante 2 ist ebenfalls eine gute Biogasausbeute zu erwarten. Ferner wird das Potenzial des Membranfouling-Problems aufgrund der anderen Beschaffenheit des zu filtrierenden Mediums hier nicht so hoch eingeschätzt. Ein Nachteil dieser Variante ist, dass recht hohe Wassermengen durch den anaeroben Membranreaktor gepumpt werden müssen, wodurch die Membranflächen auf eine hohe hydraulische Belastung ausgelegt werden müssen, was die Kosten erhöht. Es gilt festzuhalten, dass für eine zukünftige, zeitgemässe Abwasserreinigung erhebliche Umstellungen und Investitionen notwendig sind. Es werden besonders Membrantechnologien in Betracht gezogen, die wesentliche Vorteile mit sich bringen, jedoch auch intensiveren Unterhalt beanspruchen. Es besteht noch erheblicher Forschungsbedarf bezüglich der anearoben Biologien sowie des Zusammenwirkens der verschiedenen Systemkomponenten.



Figur 5: Bogensieb, ein Element des Membran-Bioreaktors. (Agrenum, Meritec)

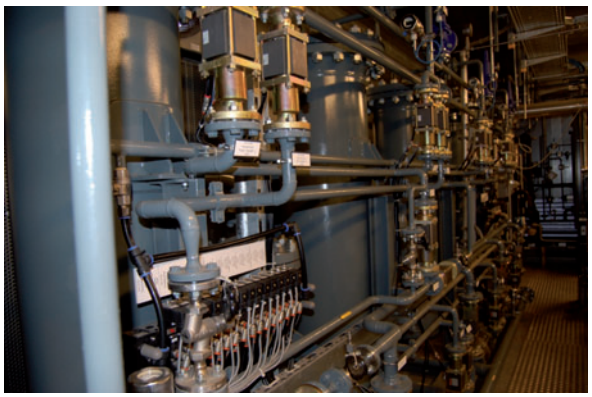
Ebenfalls mit Membrantechnologien beschäftigt sich das Projekt *Vergärung von Gülle und Co-Substraten in einem Membran-Bioreaktor (MBR)* [14]. Bei konventionellen Biogasanlagen wird bei jeder Beschickung des Reaktors ein Teil der aktiven Bakterienmasse, als auch nicht vollständig vergorene Biomasse ausgeschwemmt. Das MBR-Verfahren verspricht gegenüber des heute üblichen Rührkesselsystems den Rückhalt der aktiven Biomasse im Fermenter, die Trennung von hydraulischer Aufenthaltszeit und Schlammaufenthaltsdauer, die Entkeimung des Auslaufs aus dem Fermenter und die Möglichkeit eines schnelleren und vollständigeren Abbaus der organischen Substanz und damit eine höhere Effizienz der Vergärung (Figur 5). Des Weiteren besteht die Möglichkeit der gezielten stofflichen Weiterbehandlung. Die Kombination der energetischen und stofflichen Behandlung mit dem MBR und zusätzlicher Aufbereitung mittels Umkehrosmose lässt zusätzliche Vorteile, wie erheblich kleinere Lagervolumen und deutlich geringere Transport- und Ausbringkosten sowie hygienisch einwandfreie Düngerfraktionen erwarten.

Aufbereitete Düngerfraktionen lassen sich mit der Ammoniakstrippung zu einem Handelsdünger weiterbehandeln, wodurch auch die Abwärme genutzt wird. Im Projekt soll die Leistungsfähigkeit des MBR-Verfahrens (Raumbelastung, Gasausbeute, Gasqualität, hydraulische Verweildauer, Schlammaufenthaltsdauer etc.) genauer definiert und mit der konventionellen Vergärung verglichen werden. Die Wirtschaftlichkeit und die Implementierung des Systems sind weitere wichtige Punkte.

Ein wichtiger Punkt bei der Planung und der Konstruktion von landwirtschaftlichen Biogasanlagen stellt die Abwärmenutzung dar. Neben der benötigten Wärme zum Heizen des Fermenters der Vergärungsanlage (ca. 30 % der Bruttowärmeproduktion) sowie für die Warmwasseraufbereitung und das Heizen der Räume auf dem Hof, bleibt

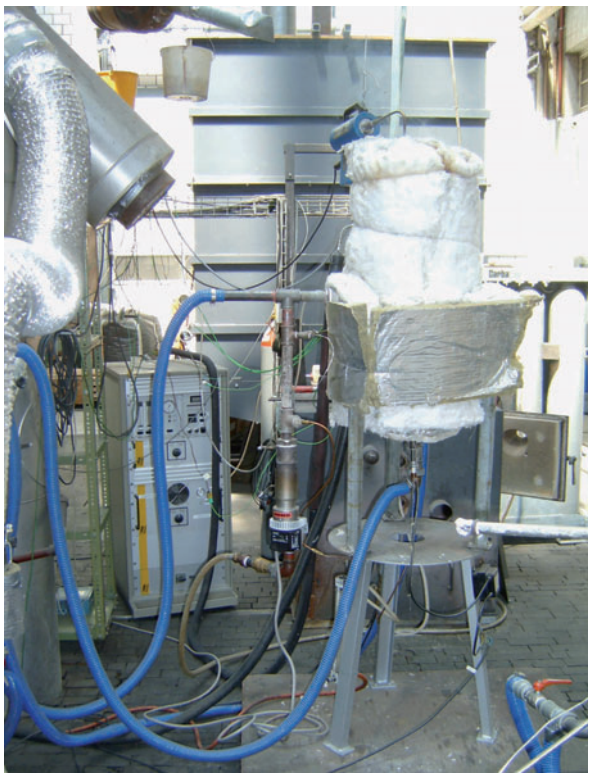
meist ein grosser ungenutzter Wärmeanteil übrig. Ziel des Projektes *Abwärmenutzung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen* [15] ist die Erstellung eines Instrumentariums, welches einem Biogasanlagenbetreiber bzw. -abwärmenutzer eine systematische Evaluation der optimalen Abwärmenutzung ermöglichen soll. Neben den Gestehungskosten, welche in einem wirtschaftlichen Bereich liegen müssen, ist dem Bewertungskriterium «Nutzungsgrad der Nettowärmeproduktion» sehr hohe Priorität beizumessen. In dieser Studie wurden 15 Abwärmenutzungsvarianten ausgewählt und mittels qualitativer und quantitativer Kriterien bewertet. Die Untersuchungen der Varianten hat gezeigt, dass höchste Nutzungsgrade erzielt werden können, wenn z.B. Winterbedarfsprofile mit Sommerbedarfsprofilen kombiniert werden können; konstante Bedarfsprofile mit einer Leistungsskalierung von 100 % erschlossen werden können (vollständige Nutzung zur Verstromung mittels ORC-Prozess); konstante Bedarfsprofile als Sockellast mit weiteren Profilen kombiniert werden können etc. Es zeigte sich, dass der Tradeoff zwischen den verschiedenen Kriterien ja nach Abwärmenutzungsvarianten sehr unterschiedlich sein kann.

Der Nährstoffkreislauf, insbesondere das Element Stickstoff, ist in Bezug zu Biogasanlagen ein komplexes Thema, welchem im Projekt *Etat de l'art des méthodes (rentables) pour l'élimination, la concentration ou la transformation de l'azote pour les installations de biogaz agricoles de taille petite/moyenne* [16] Rechnung getragen wird. Substrate für Biogasanlagen wie Abwässer und Gülle enthalten neben kohlenstoffhaltigen Verbindungen auch stickstoffhaltige, welche in Ammoniak umgewandelt werden können. Ammoniak ist eine lösliche Stickstoffverbindung, die sich durch die Ausbringung des Gärrests als Dünger verflüchtigt und zum sauren Regen beiträgt. Wird Wasser mit Nitrat- oder organischen Stickstoffen mit dem Sickerwasser aus der Bodenlösung ausgewaschen und gelangt auf diesem Wege in die Oberflächengewässer, resultiert daraus eine Überdüngung (Eutrophierung). Sollte die Behandlung von Stickstoff in Biogasanlagen in Zukunft bindend werden, so stellt sich die Frage, ob die mittleren und kleineren landwirtschaftlichen Biogasanlagen noch rentabel bewirtschaftet werden können. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, den Stickstoff zu behandeln. Allerdings sind diese Techniken bisher nie für die mittleren bis kleinen landwirtschaftlichen Anlagen in Betracht gezogen worden. Diese Studie soll die verschiedenen zur Verfügung stehenden Techniken zur Elimination, Aufkonzentrierung oder Umwandlung von Stickstoff auf ihre Anwendbarkeit in landwirtschaftlichen Biogasanlagen von kleiner bis mittlerer Grösse (50–150 kW_{el}) untersuchen. Die Studie ist in vier Arbeitsschritte unterteilt. Zuerst soll ein Überblick über die rechtliche und politische Situation in der EU und der Schweiz im Hinblick auf die Stickstoffproblematik im Landwirtschaftssektor gegeben werden. In einem zweiten Schritt wird ein Überblick über alle vorhandenen oder sich in der Entwicklung befindenden Techniken zur Stickstoffbehandlung erstellt. Dieser Arbeitsschritt wurde 2008 begonnen und nun fortgeführt. Anschliessend wird für kleine bis mittlere landwirtschaftliche Biogasanlagen die passendste Technik ermittelt und zwar für jede Behandlungsform (Elimination, Transformation, Konzentration). Es wird eine technische und ökonomische Analyse der wichtigsten Parameter erstellt werden, und von den bereits bestehenden Techniken wird eine Beschreibung der Vor- und Nachteile gegeben. Der vierte Schritt beschreibt dann die möglichen Einschränkungen für kleinere und mittlere landwirtschaftliche Biogasanlagen, die sich aus den untersuchten Techniken und/oder den politischen Rahmenbedingungen ergeben. Des Weiteren sollen in diesem letzten Arbeitsschritt Empfehlungen für die Forschung gegeben werden.



Figur 6: Die vier CO_2-Adsorber der Faulgasaufbereitungsanlage bei der Ara Luzern.

Die Aufbereitung von Biogas zu Erdgasqualität und die Einspeisung von aufbereitetem Methan in bestehende Verteilernetze haben sich in letzter Zeit stark verbreitet. Die Prozesskette der Aufbereitung steht teilweise unter dem Verdacht, prozess- und betriebsbedingt Methan (ein bedeutendes Klimagas) in die Atmosphäre frei zu setzen (Methanschlupf, Restmethan). Übersteigen diese Methanverluste ein kritisches Mass, so ist die Klimaneutralität der gesamten Biogasprozesskette in Frage gestellt. Die Studie *Methanverluste bei der Biogasaufbereitung* [17] vermass die Methanfrachten der Druckwechseladsorptionsanlage (PSA) (Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften ZHAW) der ARA Region Luzern (GALU) und bilanziert die Methanverluste im Bilanzzeitraum 2007 (Figur 6).



Figur 7: Versuchsanlage des Brenners im Labor. (Ökozentrum Langenbruck)

Es konnte gezeigt werden, dass von der 2007 insgesamt aufbereiteten Methanfracht 2,6 % als Methanverlust anfallen. Von dieser Menge fallen 88 % während der normalen Produktionsphase der PSA Anlage an. Auf Anfahr- und Ausfahrprozesse sind 2 % resp. 10 % des Methanverlustes zurück zu führen. Diese könnten durch Rückführung in den Gasspeicher komplett eliminiert werden, jedoch würde dies erhebliche monetäre Belastungen bedeuten.

Im Vergleich zu den jährlichen Stromkosten der PSA-Anlage von CHF 18'000. – bedingt der Methanverlust eine Gewinneinbusse von CHF 4'200.–. Setzt man für das schweizweit pro Jahr aufbereitete Biogas einen durchschnittlichen Schlupf von 2,6 % an, so errechnet sich eine Gesamtemission alleine durch die Aufbereitung von 26 t. Wäre man dazu in der Lage, sämtliches in der Schweiz produzierte Biogas aufzubereiten, und verursacht dabei im Schnitt ebenfalls 2,6 % Methanverlust, würde das eine jährliche Emission durch die Gasreinigung von 1'300 t Methan bedeuten. Dies sind weniger als 0,5 % der emittierten Methan-Gesamtmenge der Schweiz. Dennoch ist diese Menge nicht vernachlässigbar, und es gilt im Weiteren zu untersuchen, wo und wieviel Methan entlang der ganzen Produktionskette entweicht.

Der im obigen Projekt untersuchte Methanschlupf kann mittels der innovativen Flox-Technologie energetisch genutzt werden. Erdgasbefeuerte Flox-Brenner begannen vor ca. 15 Jahren die konventionellen Gasbrenner in Hochtemperaturprozessen der Metallindustrie zu verdrängen, denn die konventionelle Technik hatte entweder mit niedrigen Wirkungsgraden oder hohen Stickoxid-Emissionen zu kämpfen. In den vergangenen drei Jahren wurde im Rahmen des EU-Forschungsprojektes Bio-Pro das Potenzial der Flox-Technologie zur Verbrennung von extrem niederkalorischen Gasen (Schwachgas) entdeckt. Die am Ökozentrum Langenbruck entwickelte Flox-Combustor-Technologie für die Schwachgasverbrennung ist bereits auf einer Altdeponie im Tessin im Einsatz. Der im Tessin installierte Flox-Brenner hat die Aufgabe, Methan zu CO_2 zu verbrennen, und so die treibhausrelevanten Emissionen zu reduzieren. Die Verbrennungswärme aus der reinen Schwachgasverbrennung kann noch nicht genutzt werden. Ziel des Projektes *Emissionsarme Verbrennung und energetische Nutzung von Schwachgasen bis unter 2,5 MJ/m³ – Entwicklung eines bivalent Kessels für Schwachgase und Biogas* [18] ist die Entwicklung eines Nullserien-tauglichen Schwachgaskessels zur energetischen Nutzung von Schwachgasen (Gemisch von 5 % CH_4 und 95 % CO_2). Gleichzeitig soll der Betrieb mit Erdgas möglich sein, um bei Ausfall der Schwachgaszufuhr die Energieversorgung der angeschlossenen Verbraucher zu sichern und die Funktion der Lastspitzen-Abdeckung zu erfüllen. Bis dato wurde in vier Iterationsschritten ein Brenner entwickelt, welcher sowohl die Luft, als auch den Brennstoff mit der Abgaswärme vorwärmt (Figur 7). Der Startbrenner konnte ebenfalls integriert werden. Da das Schwachgas als künstliches Gemisch aus CO_2- und CH_4-Flaschenbündeln hergestellt wird, besteht eine Volumenstromlimitierung, die wiederum die Leistung des Brenners auf ca. 4 kW beschränkt.

Zusammen mit dem anscheinend nicht ausreichenden Wirkungsgrad des Rekuperators konnten die Projektziele knapp nicht erreicht werden: Im Bereich des anvisierten Gasgemisches war die Verbrennung thermisch nicht mehr stabil. Theoretisch kann ein Gemisch aus 5 % CH_4 und 95 % CO_2 eine adiabate Temperaturerhöhung von 500 K erzeugen. 500 K entspricht aber beim vorliegenden Brenner gerade auch dem Temperaturgefälle zwischen Rekuperator-Innen- und -Aussenseite. Zusammen mit den Abstrahlungsverlusten konnte deshalb kein thermisch stabiler Zustand erreicht werden. Es zeigte sich auch, dass mindestens 1070 °C nötig sind, um bei einem so oxidationsunwilligen Gasgemisch eine vollständige Verbrennung zu erzeugen. Im Weiteren konnte nachgewiesen werden, dass es kein Methanschlupf beim Brenner selbst gibt, d.h. es entstehen weniger als



Figur 8: Gasbus von Bernmobil.

1 mg/m^3_n CH_4 bei CO-Emissionen gemäss dem Projektziel (100 mg/m^3_n bei 3 % O_2).

Die Projektziele werden mit einem hitzebeständigeren Brenner mit höherer Rekuperator-Effizienz als gut erreichbar eingestuft. 2009 soll ein einfacher Brenner gebaut werden, der in der Brennkammer 1200 °C dauerhaft aushält und eine Temperaturdifferenz von höchstens 400 K zum Betrieb benötigt. 400 K entspricht der adiabaten Erwärmung von 3 % CH_4 und 97 % CO_2 zusammen mit der nötigen Luftmenge.

Mit dem Projekt *Einführung von Gasbussen bei Bernmobil* [19] wurde ein Erfahrungsbericht erstellt, welcher im Sinne einer Erfolgskontrolle aufzeigt, wie weit das Ziel einer ökologischen Mobilität erreicht wurde. Dazu gehören neben den technischen, betrieblichen und finanziellen Aspekten auch die Auswirkungen auf die Umwelt (Luftqualität und Treibhausgase) und die Akzeptanz der neuen Technologie bei der Öffentlichkeit. Um ein umfassendes Bild der Einführung von Gasbussen in einem öffentlichen Verkehrsbetrieb zu erstellen, wurden 6 Aspekte im Einzelnen betrachtet: Erfahrungen mit der Gas-Technologie, Energieverbrauch, Emissionen und Lufthygiene, betriebliche Umstellungen, finanzielle Aspekte und Akzeptanz der Gasbusse (Figur 8). Es zeigte sich, dass das grösste Risiko während der Einführungsphase der Gasbusse bei Bernmobil der Betrieb der Gasbetankungsanlage war. Der Bau stellte sich als ein komplexes Projekt heraus, welches einer ausführlichen Projektführung bedarf. Ebenso ist eine gewisse Redundanz an Betankungsmöglichkeiten für die Aufrechterhaltung des Busbetriebs absolut notwendig. Für 45 Gasbusse standen 53 Langsambetankungsplätze und 2 Schnellbetankungsplätze im Busdepot zur Verfügung. Als nachteilig im Hinblick auf zusätzliche Sicherheitsmassnahmen erwies sich die Errichtung der CNG-Betankungsanlage (CNG: compressed natural gaz) in einem Wohngebiet. Erfreulich ist die Tatsache, dass lediglich rund 15 % der Störfälle bei den neuen Gasbussen auf die Gas-Antriebstechnik zurückzuführen war. Bezüglich des Verbrauchs liegt der mittlere Energieverbrauch der Gasbusse von Bernmobil rund 30 bis 35 % über dem der Dieselbusse.

In der ARA Bern kann genügend Biogas für den gesamten CNG-Busbetrieb aus organischem Substrat hergestellt werden. Durch den Betrieb der Busse mit Biogas entfallen die CO_2-Emissionen während der Fahrt der Busse. Dadurch kann der jährliche CO_2-Ausstoss um zirka 2000 Tonnen gesenkt werden. Die NO_x-Emissionen der Gasbusse belaufen sich auf gut 10 % der NO_x-Emissionen der Dieselbusse (Euro 3). Zudem stossen die Gasbusse nur etwa 4 % der Partikel-Emissionen der Dieselbusse aus. Es darf jedoch nicht vergessen werden, dass neue EURO-5-Dieselbusse ebenfalls deutlich weniger NO_x- und Partikelemissionen produzieren, als EURO-3-Dieselbusse. Während die CO-Emissionen der beiden Busse in etwa gleich hoch sind, stösst der CNG-Bus rund 15-mal mehr Kohlenwasserstoffe aus als der Dieselbus. Es kann angenommen werden, dass die HC-Emissionen des CNG-Buses zu einem grossen Teil aus Methan bestehen, da CH_4-Emissionen von Gasbussen häufig über 1 g/km liegen. Abschliessend gilt es festzuhalten, dass die Akzeptanz der neuen Gasbusse sowohl innerbetrieblich, als auch bei den Fahrgästen sehr gross ist und besonders der ökologische Vorteil der Gasbusse geschätzt wird.

Allein an den bisher genannten Projekten sieht man das grosse Interesse am Thema Biomasse in Forschungskreisen. An Informationen zum Thema mangelt es nicht: Forschung, Wirtschaft, Lehre und öffentliche Ämter gewinnen laufend neue Erkenntnisse, welche sie in Form von offiziellen Dokumenten oder Studien publizieren. Für Anwender, Entscheidungsträger und Interessierte besteht die Herausforderung darin, die gewünschten Informationen zu finden. Es fehlt allerdings eine zentrale Stelle mit einem Gesamtüberblick über die energetische und stoffliche Nutzung von Biomasse. Deshalb hat sich das Bundesamt für Umwelt (BAFU) zusammen mit dem Bundesamt für Energie (BFE) und dem Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) entschlossen, diese Lücke im Wissensmanagement zu schliessen und eine zentrale Anlaufstelle zu kreieren, über die wichtige Dokumente und Studien zum Thema Biomasse verfügbar sind. Dies soll in Form einer Internet-basierten *Infothek Biomasse* [20] realisiert werden. Die Infothek Biomasse umfasst die unterschiedlichen Biomasse-Rohstoffe, die unterschiedlichen Verarbeitungswege und Technologien sowie die unterschiedlichen Nutzungsvarianten (Nahrungs- und Futtermittel, stoffliche

Nutzung, Vergärung, Kompostierung, Verbrennung usw.). Um dem Anspruch der Aktualität gerecht werden zu können, werden in erster Linie Dokumente ab dem Jahr 2008 in der Datenbank erfasst. Wichtige Grundlagendokumente aus früheren Jahren werden identifiziert und ebenfalls aufgenommen. Als Grundlagendokumente werden Publikationen aufgenommen, welche seit dem Zeitpunkt ihrer Veröffentlichung Gültigkeit haben und häufig von Experten und Wissenschaftlern als Referenzen genannt werden. Die räumliche Systemgrenze entspricht der Landesgrenze der Schweiz sowie dem deutschsprachigen Raum in Europa (Deutschland, Österreich). Ebenfalls berücksichtigt wird eine Auswahl internationaler Publikationen. Um den Bezug zur Schweiz sicher zu stellen, werden nur Dokumente jener internationaler Organisationen in die Datenbank aufgenommen, in deren Gremien die Schweiz Einsitz hat. Die inhaltliche Systemgrenze soll analog der vom BAFU erarbeiteten Systemgrenze des Projekts *Biogene Güterflüsse Schweiz* [21] gezogen werden. Die Themenbereiche werden auf die drei Sektoren Produktion, Verarbeitung sowie Nutzung und Entsorgung aufgeteilt. Ein zentraler Punkt der Datenbank Infothek Biomasse ist die kontinuierliche Aktualisierung. Vorgeschlagen wird eine Kombination aus Hol- und Bring-Prinzip für die aktuellsten Publikationen. Ämter und Institutionen, die ein Interesse daran haben, dass ihre Studien in einer öffentlich zugänglichen und von der Zielgruppe (Vertreter von Behörden, Verbänden, Fachstellen) regelmässig genutzten Datenbank zentral gesammelt und aufbereitet werden, sollten ihre Dokumente dem Editor aktiv zur Verfügung stellen (Bring-Prinzip). Funktioniert das Bring-Prinzip bei einer Publikationsquelle nicht (z.B. weil es vergessen geht), sollte der Editor diese darauf aufmerksam machen und die neuesten Dokumente verlangen (Hol-Prinzip). Ein vierteljährliches Screening aller Quellen wird als sinnvoll erachtet, da somit einerseits der Arbeitsaufwand des Editors angemessen, wie auch die Aktualität der Dokumente gewährleistet ist.

Neben der Aufarbeitung der Literatur zum Thema Biomasse spielen auch Untersuchungen zu Chancen und Risiken neuer Technologien eine Rolle. Das Zentrum für Technologiefolgen-Abschätzung hat eine Studie zum Thema *Treibstoffe aus Biomasse – zweite Generation* [22] initiiert, welche das BFE finanziell aber auch inhaltlich (Einsitz in Begleitgruppe) mitträgt. Die zweite Generation Biotreibstoffe soll eine bessere Energie- und Umweltbilanz aufweisen: Als Ausgangsmaterialien sollen Holz, Stroh und Pflanzenabfälle dienen, d.h. es wird nicht Zucker oder Stärke, sondern Zellulose zu Treibstoff verarbeitet. Im Hinblick auf kommerzielle Anwendungen gibt es dabei aber noch grossen Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Die bereits reichlich vorhandenen Fachartikel und Studien, die zu den Biotreibstoffen generell veröffentlicht wurden, sollen als Einstieg in die Thematik systematisch ausgewertet werden. Als Schwerpunkt der interdisziplinären Studie sollen dann die Zukunftsperspektiven (Chancen und Risiken) von Biotreibstoffen der zweiten Generation abgeschätzt werden. Diese werden jetzt als zweckmässige Lösung dargestellt – es gibt dabei aber Unsicherheiten, da sich noch mehrere Produktionsmethoden in Entwicklung befinden und unklar ist, welche davon schliesslich für die Herstellung in grossem Massstab am besten geeignet sind. Eine vertiefte Abklärung unter Berücksichtigung der aktuellen Forschungsergebnisse ist deshalb erforderlich, damit diese Technologien umfassend beurteilt werden können. Dabei sind neben Fragen der Energieeffizienz und der Umweltbilanz auch wirtschaftliche und soziale Aspekte zu erörtern und Potenziale für künftige Entwicklungen sollen aufgezeigt werden. Anhand eines Kriterienkatalogs soll dargelegt werden, welche Kriterien zu erfüllen sind, damit ein Biotreibstoff überhaupt einen positiven Beitrag zu einer nachhaltigeren Mobilität leisten kann. Die Analyse unterschiedlicher Nutzungsformen von Biomasse soll zeigen, wie die Produktion von Treibstoffen zu beurteilen ist im Vergleich zu anderen Anwendungen von Biomasse, z.B. zur Erzeugung von Strom und Wärme. Im Rahmen des Projekts sollen auch die Akteure und Beweggründe identifiziert werden, die hinter der Förderung von Biotreibstoffen stehen. Dabei wird die Bedeutung der Mobilität in unserer Gesellschaft diskutiert, sowohl im Zusammenhang mit den individuellen Bedürfnissen als auch mit wirtschaftlichen Interessen. Abschliessend werden, beruhend auf einer breit abgestützten Gesamtbewertung, Empfehlungen formuliert, die sich an Entscheidungstragende, insbesondere an Politiker/innen, richten.

Nationale Zusammenarbeit

Die meisten der 2008 durchgeführten und laufenden Projekte basieren auf der Zusammenarbeit verschiedener Hochschulen und Fachhochschulen mit der Industrie. Es gilt das Fachwissen verschiedener Expertengruppen innerhalb der Schweiz zu bündeln, um so Synergien zu nutzen und nicht zuletzt auch Projekte zum Erfolg zu führen. Die nationale Zusammenarbeit wird auch durch den fachlichen Austausch, wie z.B. an national organisierten Symposien gefördert. Da das

BFE die Forschungsprojekte nur subsidiär fördert, sind die Gesuchssteller angehalten, weitere Mittel zur Finanzierung zu finden. Sehr marktnahe Projekte, von denen 2008 auch einige im Bereich Biomasse umgesetzt wurden, können zusätzlich bei der KTI, der Förderagentur für Technologie und Innovation, eingereicht werden. Bei Fragestellungen bezüglich Optimierung und Weiterentwicklung eines Produktes ist meist die Industrie als Partner gefragt. Ein weiteres wichtiges Element der Zusammenarbeit ist die Initiierung von Projekten, die ämterübergreifende Themen bearbeiten. Hier arbeitet das BFE z.B. mit dem BAFU und dem BLW zusammen.

Die nationale Zusammenarbeit ist ein wichtiges Instrument für einen effizienten Technologietransfer von der Forschung in die Wirtschaft. All diese vielfältigen Kontakte erlauben die anhaltend wichtige breite Abstützung der Programms.

Internationale Zusammenarbeit

Das BFE ist Mitglied beim *Technology Agreement Bioenergy* der IEA (International Energy Agency) [25], welches aus 13 Tasks (Annexes) besteht. Die Schweiz arbeitet in 3 Tasks aktiv mit.

Schweizer Mitarbeit in Task 32 «Biomass Combustion and Co-Firing»

In diesem Task arbeiten 10 Mitgliedsländer und die Europäischen Kommission zusammen. Ziel dieses Tasks ist die Verbreitung der Verbrennungstechnologie für Biomasse und Co-Feuerung zur Produktion von Wärme und Strom. Der Schwerpunkt der Aktivitäten liegt in der breiten Markteinführung der Biomasse-Verbrennungstechnologie und der Optimierung der Technologie. Technisch relevante Ziele sind eine höhere Brennstoffflexibilität, eine verbesserte Prozessführung und Sensorenentwicklung, Mechanismen der Korrosion und Ablagerungsbildung, Bildung und Emission von Partikeln, die Verbesserung vorhandener Systeme und die Entwicklung neuer Konzepte.

Die Mitarbeit der Schweiz sichert eine Vertretung der Interessen im Bereich Biomasse, eine Mitwirkung bei der Festlegung zukünftiger Schwerpunkte, die Vermittlung schweizerischer Forschungsresultate, die Bekanntmachung der Firmen aus der Schweiz sowie die Weitergabe der Informationen über internationale Aktivitäten an Interessierte in der Schweiz.

Für die künftige Ausrichtung des Tasks 32 wurde festgelegt, dass die bisherigen Schwerpunkte beibehalten werden. Dazu wird eine Liste der Prioritäten nachgeführt, die von allen Ländern ausgewählt werden und ein Ranking von 18 Themen aus 8 Kategorien umfasst. Aus der Schweiz wurde ein besonderes Interesse an den 5 Kategorien «Small scale biomass», «Industrial scale biomass» und «Simulation», «Emissions» und «Policy issues» angemeldet. Im Vergleich zu den bisherigen Aktivitäten wird herausgestrichen, dass der Einbezug der Industrie zu verstärken ist.

Unter Mitwirkung der Schweiz wurde im Rahmen der Mitgliedschaft in diesem Task die zweite Auflage des IEA-Handbuchs «The Handbook on Biomass Combustion and Co-firing» herausgegeben. Gleichzeitig wurde die erste Auflage auf Chinesisch übersetzt.

Das IEA-Projekt «Partikel» wurde unter Schweizer Leitung (HSLU) in Zusammenarbeit mit SP Sweden (Technical Research Institute of Sweden) durchgeführt. Die Erhebung von Emissionsfaktoren im Bereich Feinstaub hat einerseits aufgezeigt, dass die Feinstaubemissionen von handbeschickten Holzheizungen eine grosse Bandbreite aufweisen. Andererseits wurden den IEA-Mitgliedsstaaten bewusst, dass unterschiedliche Messbedingungen zu Emissionsfaktoren führen, die untereinander nicht direkt verglichen werden können. So wurde gezeigt, dass die Berücksichtigung der Kondensate im Abgas von handbeschickten Holzöfen zu einer 2- bis 20-fach höheren Feinstaubmasse führen kann im Vergleich zum im heissen Abgas ermittelten Feststoff.

Vom Task 32 wurde am 20. Oktober 2008 in Amsterdam ein Experten-Workshop über Anwendungen der Biomasse-Verbrennung in Kleinanlagen organisiert. Interessant für die Schweiz ist vor allem die Aussicht auf strengere Grenzwerte für Wirkungsgrade und Emissionen in der EU, obwohl deren Einführung noch unsicher ist. Damit verbunden stellt sich die Frage der Messmethodik insbesondere auch für den Feinstaub, zu welcher allein in der EU drei verschiedene Methoden zur Diskussion stehen, ohne dass bis dato ein Konsens in Sicht ist.

Bei der «16th EU Biomass Conference» war die Schweiz (HSLU) im Scientific Committee vertreten. Gegenüber den letzten EU-Konferenzen hat sich die Bedeutung der Biotreibstoffe wieder relativiert, während Verbrennung für Wärme und Vergasung für Strom wieder wichtiger geworden sind. Bei der Stossrichtung zum Transport mit erneuerbarer Energie gab es als Novum die Aussage wichtiger Exponenten, dass der künftige Individualverkehr über Elektrofahrzeuge erfolgen werde, und nicht wie in den letzten Jahren vermehrt

geäussert, über Fahrzeuge, die mit Biotreibstoffen betrieben werden. Im Weiteren wurde nun auch an dieser Konferenz als wesentliches Argument bestätigt, dass die Flächeneffizienz der Biotreibstoffe viel geringer ist als diejenige der Solarenergie, und dass landwirtschaftliche Flächen vorab zur Nahrungsproduktion zu nutzen sind. Zur ökologischen Beurteilung von biogenen Energieträgern wurden zwei Faktoren deutlich. Zwar sind Bewertungen der Umwandlungsverfahren verfügbar, die Gesamtbeurteilung wird aber oft durch die indirekten Effekte der Landumnutzung dominiert. Zudem kann die Gesamtbewertung bei vielen nachwachsenden Energieträgern durch N_2O und CH_4 dominiert werden, deren Emissionen mit riesigen Unsicherheiten behaftet sind.

Für die Schweiz wird 2009 in internationalen Gremien ein fortgesetzter Erfahrungsaustausch mit den anderen IEA-Mitgliedsländern angestrebt mit dem Schwerpunkt der Feinstaubemissionen sowie der Festlegung künftiger Normen und Grenzwerte. Als Folge der Zunahme der Holzenergienutzung und insbesondere des vermehrten Einsatzes von Feinstaubabscheidern besteht in Zukunft ein Bedarf an der Etablierung geordneter Nutzungs- und Entsorgungswege für die verschiedenen Aschesortimente. Diesbezüglich wird ebenfalls ein wertvoller Informationsaustausch mit der IEA angestrebt. Daneben besteht ein ungebrochenes Interesse an den Techniken zur Stromerzeugung und Wärmekraftkopplung aus Holz. Schliesslich ist der Erfahrungsaustausch über Förderinstrumente und marktwirtschaftliche Steuerungsinstrumente von zunehmendem Interesse.

Schweizer Mitarbeit in Task 33 «Thermal Gasification of Biomass»

Der zweite IEA Task im Technology Agreement Bioenergy, in dem die Schweiz mitarbeitet, ist Task 33 Thermal Gasification of Biomass. Dieser Task hat sich den Informationsaustausch zum Thema Biomassevergasung in der Forschung, Entwicklung und Anwendung zum Ziel gemacht. Gleichzeitig ist man bestrebt die Bioenergieindustrie mit einzubinden und die Zusammenarbeit zwischen den Mitgliedländern zu fördern. Das übergeordnete Ziel ist die Kommerzialisierung von effizienten, ökonomischen und umweltfreundlichen Biomasse-Vergasungsprozessen voranzutreiben, um Elektrizität, Wärme, Dampf und Synthesegas zu erzeugen. 10 Mitgliedsländer und die Europäische Kommission beteiligen sich an diesem Task. Die Mitarbeit der Schweiz hat folgende Ziele: Präsentation der in der Schweiz durchgeführten Arbeiten im Bereich Biomassevergasung; Kenntnis über den Stand der Aktivitäten in den Mitgliedstaaten erwerben; Weitergabe der Informationen an die Interessenten in der Schweiz; Einbringen der Interessen der Schweiz in die Zielsetzung und Aufgabenstellung von Task 33; Mitwirkung beim Erarbeiten eines Statusreports über die Biomassevergasung.

Im Bereich Biomassevergasung war die Schweiz auch im von der EU mitfinanzierten Netzwerk «ThermalNet» aktiv. Es besteht aus den «Unter-Netzwerken» PyNe (Pyrolyse), GasNet (Biomassevergasung) und CombNet (Biomasseverbrennung). ThermalNet mit den drei Unternetzwerken ist unterteilt in Arbeitspakete, den sogenannten «Work packages». Die einzelnen «Work packages» enthalten mehrere Tasks, welche von einem Task Leader geleitet werden. Die Schweiz hat bezüglich dieses Programms kein Abkommen mit der EU. Schweizer können daher im ThermalNet nicht als Partner auftreten, sondern nur den Status eines Subcontractor oder Experten erhalten. Die Schweiz ist als Co-Taskleader mit Schwerpunkt Vergasung im Task «Environment, Health, Safety» tätig. Risiken von Holzvergasern bezüglich Gesundheit, Sicherheit und Ökologie sind für alle Akteure der Holzvergasung ein wichtiges Thema. Nach längeren Vorarbeiten im Rahmen von Task 33 und ThermalNet wurde 2006 von der Europäischen Kommission im Programmbereich «Intelligent Energy Europe» (IEE) das Projekt «Gasification Guideline» bewilligt. In diesem Projekt soll eine Leitlinie für Vergasungsanlagen bezüglich Gesundheit, Sicherheit und Ökologie ausgearbeitet werden. Da die Schweiz nicht am Programm IEE beteiligt ist, ist sie in diesem Projekt nur als Subcontractor involviert.

Generell ist die Situation der Biomassevergasung so, dass im Bereich der Festbettvergasung überall in Europa im Jahr 2008 weitere kommerzielle Anlagen in Betrieb genommen wurden (zwei davon in der Schweiz). Noch immer ist aber offen, ob diese Anlagen kommerziell erfolgreich sein werden. Langjährige, gesicherte Daten sind immer noch rar. Bei kleinen Festbettvergasern für WKK-Anlagen liegen zahlreiche Betriebserfahrungen vor (mehrere Anlagen mit 5'000–50'000 Betriebsstunden); mehrere Anlagen wurden jedoch auch wieder stillgelegt. Alle Vergasertypen werden in Richtung Marktreife entwickelt. Die Verfügbarkeit ist jedoch immer noch zu tief (<75 %) und die Investitionskosten zu hoch (6'000–12'000 CHF/kW_{el}). Ebenfalls sind die Produktionskosten für Strom noch immer zu hoch (<30 Rp./kWh). Im Bereich der Wirbelschichtvergasung für WKK liegen ebenfalls zahlreiche Betriebserfahrungen vor (mehrere Anlagen mit 20'000–60'000 Betriebsstunden). Mehrere Anlagen sind in Konstruktion. Die spezifischen Investitionskosten belaufen sich auf 4'000–8'000 CHF/kWel und die Produktionskosten für Strom liegen zwischen 15 bis 20 Rp./kWh. Kommerzielle Anlagen sind für Co-firing,

WKK und IGCC (Vergasung mit integriertem Gas- und Dampfturbinenprozess) in Betrieb.

Schweizer Mitarbeit in Task 37 «Energy from Biogas and Landfill Gas»

Der dritte Task, in dem die Schweiz Mitglied im Rahmen des Technology Agreements Bioenergy ist, ist Task 37 *Energy from Biogas and Landfill Gas*. Hier stellt die Schweiz auch gleichzeitig den Taskleader. Auch bei diesem Task steht der Informationsaustausch über die anaerobe Vergärung an oberster Stelle. Das Themenfeld ist dabei komplex und reicht von der Produktion über die Aufbereitung und die Verwendung von Biogas als Energiequelle, vom Gärgut als Dünger und dem anaeroben Abbauprozess als Verbindung zur Abfallwirtschaft (Wasser). Die Vergärung versteht sich somit als ein Glied in der Kette der nachhaltigen Abfallaufbereitung und Energieproduktion mit dem Ziel, die Kreisläufe zu schliessen, was heute als «biorefinery» definiert wird. Das Hauptaugenmerk liegt in der Einführung angemessener Praktiken für das Abfallmanagement, in der Förderung von Biogasanlagen, Qualitätsverbesserung der Produkte und Verbesserung ökologischer Standards. Im Task 37 sind 10 Länder und die Europäische Kommission vertreten. Durch die Mitgliedschaft der Schweiz wird garantiert, dass die Informationen zur Schweizerischen Entwicklung gesammelt den anderen Mitgliederländern zur Verfügung gestellt werden, und dass umgekehrt die Informationen der anderen Task-Mitglieder auch wieder in die Netzwerke der Schweiz einfliessen. Zusätzlich gibt es einen bilateralen Informationsaustausch zwischen den verschiedenen Mitgliedsländern und der Schweiz.

Die generelle Entwicklung von Biogas zeigte im Jahr 2008 klar nach oben. Im Hinblick auf die KEV (kostendeckende Einspeisevergütung) wurden wieder mehr Anlagen geplant und gebaut als zuvor. Die Einführung der Steuerbefreiung von Biomethan und die Reduktion der MinÖSt (Mineralölsteuer) auf Erdgas zusammen mit der Installation des Biogasfonds (freiwillige Vereinbarung der Gasbranche mindestens 10 % Biomethan dem Erdgas als Treibstoff beizumischen) hat zu einer erhöhten Gasaufbereitung geführt. Dank den rund 30 % tieferen Treibstoffkosten beim Gas und den Förderaktionen der Gaswerke werden zunehmend mehr Gasautos gekauft und Tankstellen gebaut. Zurzeit sind 105 Gastankstellen in Betrieb und etwa 7'000 Fahrzeuge in Verkehr gesetzt. Qualitätssicherung bei der Produktion von Biogas und Gärgut sowie bei der Gasnutzung ist ein zunehmend wichtiges Thema und wird auch 2009 im Zentrum stehen. Task 37 hat daher entschieden, bis Ende 2009 eine entsprechende Publikation zu erarbeiten.

Das Jahr 2008 war im Biogasbereich sehr bewegt. Kanada und Frankreich stehen vor einer Periode stark steigenden Biogasanlagenbaus und auch in Grossbritanien wird wieder vermehrt in Biogasanlagen – auch mit gleichzeitiger Gasaufbereitung – investiert. Im Hinblick auf die Netzeinspeisung von Biogas ist auch in Holland und Deutschland viel geschehen. In Holland wurde eine sogenannte Biogasplattform gegründet, die sich aus Mitgliedern der Regierung, der Administration und der Industrie zusammensetzt und Biogasprojekte fördert. In Deutschland ist im März 2008 das Gaseinspeisegesetz in Kraft getreten, welches Aufbereitungsanlagen fördert. Andererseits sind die NaWaRo-Preise (nachwachsende Rohstoffe) so stark angestiegen, dass nicht wenige Anlagen und mit ihnen die Anlagenhersteller an den Rand des Konkurses kamen.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Das einzig momentan laufende Projekt beschäftigt sich mit der *Verfeuerung von Miscanthus* (Chinaschilf) [23]. Miscanthus ist eine mehrjährige Pflanze mit hohen Erträgen, die sich sehr umweltschonend anbauen lässt (extensive Düngung, kein chemischer Pflanzenschutz). Sie lässt sich weder als Nahrungs- noch als Futtermittel einsetzen. Neben der stofflichen Nutzung als Faserpflanze würde sie sich sehr gut als Energieträger eignen, sei es in Form von Häckseln oder Pellets. Sie hat, bezogen auf die Anbaufläche, sehr hohe Energieerträge und ist arbeitswirtschaftlich interessant, da nur eine Ernte pro Jahr notwendig ist.

Das Pilotprojekt soll objektive Grundlagen über den Einsatz von Miscanthus in Kleinfeuerungen bereitstellen. Mit dem Ziel die Feinstaubemissionen auf den Stand vergleichbarer Holzfeuerungen zu senken, ist die Kleinfeuerung mit einem Rauchgaswäscher ausgerüstet worden. Die Messungen und die betrieblichen Erfahrungen sollen belegen, inwieweit dies erreichbar ist. Im Projekt wird eine neue Kleinfeuerungsanlage von 30 kW eingesetzt und in 2 Stufen mit verschiedenen Brennstoffen beschickt: Holzschnitzel (Referenz) und reine Miscanthushäcksel.

Ein zweites im Jahre 2008 gefördertes Projekt ist das *Forschungslabor Bioenergie* [24]. Dies beinhaltete den Aufbau eines Forschungslabors zur Demonstration der technischen Möglichkeiten zur Untersuchung der Schadstoffbildung in Holzfeuerungen, sowie zur Demonstration und Anwendung der experimentellen und theoretischen Möglich-

keiten zur Entwicklung schadstoffarmer Techniken an der HSLU in Horw (Figur 9).

Die Infrastruktur umfasst insbesondere folgende Komponenten: Verbrennungslabor zum Betrieb von Feuerungsanlagen unter praxisnahen und unter idealen Bedingungen durch Simulation des Kamineinflusses; Versuchseinrichtung zur Abscheidung von Feinstäube; Versuchseinrichtung zur Untersuchung und Visualisierung der Strömungsverhältnisse. Das Labor wurde 2008 durch verschiedene Projekte bereits rege in Anspruch genommen.



Figur 9: Bioenergielabor Horw. (HSLU)

Bewertung 2008 und Ausblick 2009

Betrachtet man die Programmschwerpunkte und die anvisierten Ziele für das Forschungsprogramm, so sind in allen 3 Bereichen (Systemoptimierung und -integration, Qualitätssicherung, neue Verfahren und Technologien) erfolgreich Projekte durchgeführt worden.

Systemoptimierung und -integration

Im Bereich Holzenergie wurde das aktuelle Thema der Feinstaubemissionen von mehreren Seiten (handbeschickte Öfen, Pelletöfen, Stückholzkessel) angegangen. Es zeigte sich, dass die Anfeuerphase den kritischen Zeitpunkt des Betriebes darstellt. Durch die genaue Definition der entstehenden Verbindungen können nun betriebs- und feuerungstechnische Massnahmen getroffen werden, um die Betriebsweise zu optimieren. In den Bereich Systemoptimierung fällt auch ein verbessertes Zusammenspiel von Kombianlagen wie z.B. Pelletfeuerungen und Solarsysteme. Hier gilt es die Regeltechnik zu optimieren, um den Jahresnutzungsgrad des Systems zu erhöhen. In diesem Projektbereich wird die nationale Zusammenarbeit beispielhaft ersichtlich, da die Expertise aus zwei Bereichen gefragt ist. Neben der Verbrennungstechnologie beschäftigt sich auch die anaerobe Vergärung mit der Systemoptimierung und -integration. Ein wichtiges Thema ist in diesem Zusammenhang die Gasaufbereitung, die damit verbundenen Methanverluste und die Nutzung dieser Schwachgase. 2008 konnten wichtige Zahlen zu den Methanverlusten geliefert werden, welche sowohl ökologisch, als auch ökonomisch in Relation gesetzt wurden. Ein sehr umsetzungsorientiertes Projekt im Bereich Biogas, nämlich der Einsatz von Biogasbussen im öffentlichen Verkehr, zog eine positive Bilanz bezüglich der Betriebsumstellung. Dieses Projekt zeigt auch eine gute Zusammenarbeit zwischen Bundesamt und städtischen Betrieben.

Qualitätssicherung

Qualitätssichernde Massnahmen wurden in der Verbrennungsforschung angegangen, indem z.B. neue Messmethoden für Typenprüfungen untersucht wurden, um die Feinstaubproblematik mit einzubeziehen. Ziel ist es somit, aus den Untersuchungen Konsequenzen für einen optimalen Betrieb sowie für Kontroll- und Vollzugsverfahren abzuleiten. Bei der Vergasung wurde Qualitätssicherung und die internationale Zusammenarbeit mit der Erarbeitung einer europäischen Richtlinie über «Health, Safety and Environment» sehr transparent.

Neue Verfahren und Technologien

Der Schwerpunkt «Neue Verfahren und Technologien» wurde hauptsächlich in den Bereichen Vergasung und anaerobe Vergärung bearbeitet. Bei der Vergasung ist die Rohgasreinigung ein aktuelles Thema, bei welcher es den Wirkungsgrad zu verbessern gilt. Nicht nur holzige Biomasse kann vergast werden, auch für nasse Chargen ist dies Dank einer neuen Technologie, der hydrothermalen Vergasung, möglich. Dieser Ansatz bietet ebenfalls eine Rückgewinnung der Nährsalze, was der Forderung nach Schliessen von Stoffkreisläufen Rechnung trägt. Auch die online Überwachung von Spurenstoffen in Prozessgasen ist ein neues Verfahren, welches Umsetzungspotenzial besitzt, da somit die Langlebigkeit der Anlagenteile gesichert wird. Auch der Bereich der anaeroben Vergärung konnte neue Technologien im Forschungsumfeld platzieren. Energieeffizienz, die Erhöhung des biologischen Wirkungsgrades und der Nährstoffkreislauf standen im Vordergrund.

Das Substrat Biomasse ist sehr komplex und vielfältig, was auch die Bandbreite der Projekte demonstriert. Durch die Vielzahl der laufenden Pro-

jekte konnten zahlreiche Fragestellungen, welche im Rahmen des Forschungsprogramms Biomasse (2008–2011) des Bundes erhoben wurden, bearbeitet werden. Somit wurde das Jahresziel klar erreicht. Die meisten der oben beschriebenen Projekte sind noch nicht abgeschlossen und lassen auf spannende Ergebnisse hoffen. Für das Jahr 2009 werden als projektübergeordnete Ziele u.a. die verbesserte Effizienz des Gesamtsystems, die Reduktion von Emissionen, Kostensenkungen, Standardisierungen von Verfahren und die Entwicklung neuer Verfahren und Technologien definiert.

Schweizweiter Rundumschlag

Holz als Energiequelle ist in der Schweiz weiter auf dem Vormarsch. Dies zeigt auch die Tatsache, dass z.B. die Firma AEK Pellets in diesem Jahr die Erweiterung des Holzenergie-Pelletwerks in Klus in Betrieb nahm. Die AEK hat mit dem Ausbau ihrer Produktionsanlagen für Holzenergie-Pellets auf den doppelten Jahresausstoss von 60'000 t ausgebaut. Die Produktionsanlage erlaubt neu auch den Einsatz von feuchtem Sägemehl und feuchten Hobelspänen, welche in Schweizer Sägereibetrieben in grossen Mengen anfallen. Derzeit wird das feuchte Rohmaterial noch über die Wärme einer Gasheizung getrocknet. In einem nächsten Schritt soll eine Holzheizung diese ersetzen und den Einsatz «grauer Energie» aus fossilen Energieträgern für die Pelletsproduktion weiter verringern. Der Pellets-Verbrauch 2007 in der Schweiz lag bei ca. 80'000 t, in Europa bei ca. 3'200'000 t. Der bisherige Pellets-Verbrauch pro Kopf und Jahr lag in der Schweiz bei 2 kg, in Österreich, dem Führer in Mitteleuropa, bei 24 kg und in Schweden, dem Vorreiter und Weltführer, bei 101 kg (Wald und Holz 07/08).

Pellets sind nicht nur in kleinen Heizungsanlagen auf dem Vormarsch, immer mehr Betriebe und öffentliche Einrichtungen setzen auf Holzpellets statt auf fossile Brennstoffe. Die Zahl der Pelletheizanlagen mit Nennleistungen von mehreren hundert Kilowatt nimmt zu. Gerade für Gebäudetypen wie beispielsweise Sportmehrzweckhallen, Schwimmbäder oder Gewächshäuser von Gärtnereien mit ihrem über das gesamte Jahr relativ konstant hohem Wärmebedarf sind Pellets eine interessante Alternative. Gerade für Unternehmen mit einem hohen Energieverbrauch sind Pellets interessant, da die spezifischen Investitionskosten für die Kessel der Grossanlagen pro Kilowatt Nennleistung abnehmen. In Langendorf im Kanton Solothurn ging im Juli 2007 ein 800-Kilowatt-Pelletkessel in Betrieb – der bislang grösste in der Schweiz. Während Schnitzel ungefähr 5 Rp. pro kWh kosten, liegt man bei Pellets bei 7 Rp. In den allermeisten Fällen führt dieser Unterschied bei Grossanlagen zur Wahl von Schnitzeln. Grössere Pelletheizungen werden deshalb auch in Zukunft meistens Nischenlösungen für Situationen sein, wo eine Schnitzelheizung aus Platzgründen nicht in Frage kommt. Zudem wird die Forderung laut, dass in Pelletgrossanlagen auch endlich Industriepellets produziert werden müssen. Durch kostengünstigere Produktionsbedingungen, einfacheren Transport und grosse Mengenabnahme sind Industriepellets kostengünstiger als zertifizierte Pellets für den Hausbrand (Erneuerbare Energien, Nr. 4, August 2008).

Der Trend der industriellen Nutzung von Holz zur Wärme- und Stromerzeugung zeigt sich auch in der Projektierung und Realisation von Holzkraftwerken. Neben dem grössten Holzkraftwerk der Schweiz in Domat-Ems stehen weitere Projekte in Aussicht. Im Herbst 2008 ist das Holzkraftwerk Basel in Betrieb gegangen. Das Gemeinschaftsprojekt der Waldwirtschaft Nordwestschweiz, der Energiedienstleister Industrielle Werke Basel (IWB) und Elektra Baselland (ebl) ist mit seinen Leistungen von rund 21'000 kW Wärme und 4'000 kW Strom eines der bisher grössten Holzkraftwerke der Schweiz. Versorgt werden damit in Zukunft zwischen 5'000 und 7'000 Haushalte während sieben Monaten im Jahr. Zurzeit sind 9 Anlagen in Betrieb (Domat-Ems, Stans, Crissier, Biere, Meiringen, Otelfingen, Kleindöttingen, Spiez, Wila) und 40 bis 50 weitere Projekte sind in Planung. Auch in der neuen KVA Bern im Forsthaus West ist ein Holzheizkraftwerk geplant. Ab 2011 sollen dort 27'000 kW Wärme und 8'000 kW Strom produziert werden, wobei diese Energie der Bevölkerung der Stadt Bern sowie dem Bundeshaus geliefert werden soll (Umwelttechnik Schweiz, 09/08).

Mit einem höheren Anteil an holzbetriebenen Heizungen steigt auch die Debatte um die Feinstaubproblematik. Wie bereits oben erwähnt (Holzenergiesymposium), drängen zahlreiche Hersteller von Feinstaubabscheidern mit ihren Neuerungen auf den Markt. Auch in der Forschung beschäftigt man sich mit dem Feinstaub. Neben diversen vom BFE mitfinanzierten Projekten, welche sich mit dem Einfluss der Betriebsweise von Holzfeuerungen auf die Feinstaubemissionen beschäftigen, laufen auch Projekte, welche sich mit den Hauptquellen von Partikelemissionen befassen. Es zeigte sich, dass primäre Feinstaubemissionen vom Verkehr und von der Holzverbrennung gleichbedeutend sind, aber nur zu 25 % zu den Gesamtfeinstaubemissionen beitragen. Die Hauptfeinstaubquelle ist sekundären Ursprungs und beinhaltet die Oxidation verschiedener Spurengase in der Atmosphäre. Betrachtet man sowohl die primären Emissionen, als auch die Emissionen, die zu sekundären Aerosolen führen, so tragen der Verkehr, die Holzverbrennung und die Industrie am meisten

zum Feinstaub bei, aber die Landwirtschaft und konventionelle Heizsysteme dürfen auch nicht ausser Acht gelassen werden (PSI, Scientific Report, 2007).

Nicht nur in der Forschung, auch in der Praxis, z.B. auf der kantonalen Ebene, beschäftigt man sich mit der Biomasse und ihrem Potenzial. Im Kanton Bern, z.B. ist viel Biomasse in Form von Holz, landwirtschaftlichen Abfällen, organischen Abfällen aus der Industrie und Haushalten sowie aus Kläranlagen verfügbar, so dass der Kanton auf Energie aus Biomasse setzt. Gezielt eingesetzt, könnte einheimische Biomasse rund 8 % des heutigen Energiebedarfs decken. Angestrebt wird, mit der Biomasse bis ins Jahr 2035 je 10 % des Endenergiebedarfs beim Strom- und Wärmeverbrauch zu decken (www.be.ch). Die Energieanlagen müssen so optimiert werden, dass sowohl Strom als auch nutzbare Wärme erzeugt wird. Der Kanton Bern will nun in erster Linie die Rahmenbedingungen verbessern. Im Vordergrund stehen raumplanerische Massnahmen, finanzielle Beiträge an geeignete Anlagen und eine effiziente Bewilligungspraxis.

Nicht nur Holz ist im Energiebereich derzeit sehr gefragt, auch die nicht-holzige Biomasse wie Hofdünger, Restaurationsabfälle, Grüngut etc. werden stark genutzt.

Ende Mai 2008 wurde die Biogasanlage der Rhy-Biogas AG in Widnau eingeweiht. Dies ist die erste landwirtschaftliche Anlage in der Schweiz, welche das Biogas ins Erdgasnetz einspeist (Figur 10).



Figur 10: Gasaufbereitungsstation (PSA) zur Einspeisung ins Erdgasnetz. (Rhy Biogas AG; Widnau)

In dieser Anlage können jährlich bis zu 20'000 t Hofdünger und Co-Substrate vergärt werden. Die Substrateinbringung erfolgt jedoch nicht wie bei herkömmlichen Anlagen über Förderschnecken, sondern über ein Flüssigeinspülungssystem. Der grosse Vorteil dieser neuen Technologie liegt in der vorangehenden Komprimierung der festen Substrate ohne Sauerstoffzufuhr. Das Rohgas hat einen Methangehalt von 55-60 %. Es wird getrocknet, entschwefelt und über ein PSA-Verfahren (Druckwechsel-Adsorptionsverfahren) aufkonzentriert. Das Produktgas besteht zu mindestens 96 % aus Methan.

Um die Qualitätsanforderungen zur Einspeisung ins Erdgasnetz zu erfüllen, werden die Hauptkomponenten des Produktgases nach der Aufbereitung regelmässig gemessen. Anschliessend wird das Biogas verdichtet und dem Erdgasnetz zugeführt (Umwelttechnik Schweiz 06/08 und Merkblatt BiomassEnergie).

Die grösste landwirtschaftliche Biogasanlage mit Biogaseinspeisung steht in Inwil im Kanton Luzern (Swiss Farmer Power). In dieser Anlage können jährlich bis zu 61'000 t Gülle und bis zu 45'000 t Feststoffe – insbesondere Grünabfälle aus der Region – verarbeitet werden. Damit erbringt die Anlage einen wichtigen und sehr erwünschten Beitrag an die Reduktion der Stickstoff- und Phosphatfracht in den Boden. Die Inbetriebnahme der Anlage dauerte rund ein halbes Jahr. Seit Mitte Januar 2009 speist die Biogasanlage erstmals Gas ins regionale Erdgasnetz und wird in Zukunft jährlich 1.9 Mio m^3 Biogas, 8'000 m^3 Flüssigdünger und 15'000 m^3 Kompost liefern.

Biogas ist auch im Jura auf dem Vormarsch, denn im Sommer 2008 wurde in Porrentruy eine Anlage mit grossem Erfolg vorgestellt. Die Ursprungsproblematik lag in der Grüngutentsorgung der Gemeinde sowie der Geruchsbelästigung durch die Schweinehaltung. Die Schweinehaltung im Dorf wurde zugunsten einer Rindermast ausserhalb aufgegeben. Den Biogasanlagenbetreibern wurde eingeräumt, sämtliche Grüngutabfälle der umliegenden Gemeinden in ihrer Biogasanlage verwerten zu dürfen. Auch hier wird der gewonnene Strom ins lokale Stromnetz eingespeist und verkauft (Umwelttechnik Schweiz 7–8/08).

Das Amt für Entsorgung und Recycling Zürich geht neue Wege. Es startet ein Pilotprojekt, in welchem Küchenabfälle versuchsweise separat eingesammelt und zur Treibstoffgewinnung vergärt statt verbrannt werden. Das Pilotprojekt wird ein Jahr dauern. Um der Menge gesammelter Küchenabfälle in Zukunft gerecht zu werden, plant die Stadt Zürich ein geschlossenes Vergär- und Kompostierwerk. Die biogenen Haushaltsabfälle der Zürcher Bevölkerung landeten bisher im «Zü-

risack» und wurden verbrannt. Dies wird bis 2011 auch weiterhin der Fall sein. Ab 2011 soll dann die Vergärung von Küchenabfällen in der ganzen Stadt Zürich eingeführt werden (Umwelttechnik Schweiz 7–8/08).

Die Einspeisung von Biogas ins Erdgasnetz erfreut sich immer grösserem Interesse und damit entsteht auch Diskussionsgrundlage zu Aufbereitungstechniken von Biogas für die Einspeisung. Ein weit verbreitetes Verfahren ist die Druckwechseladsoption (PSA). Im März 2008 hat sich die Erdgas Zürich AG entschlossen, die Lizenz für das BCM-Verfahren (Biogas, CO_2, Methan; drucklose Aminwäsche) in der Schweiz zu erwerben. Zu dem bisher erfolgreich eingesetzten Verfahren der drucklosen Aminwäsche BCM-Sorb wurde jetzt ein weiteres druckloses Verfahren BCM-Clean entwickelt. Mit diesem Verfahren wird das aus dem Fermenter austretende Biogas drucklos vorbehandelt. Bei diesem Verfahren erfolgt eine Feinentschwefelung und eine gleichzeitige CO_2-Vorabscheidung von 30 bis 85 %, je nach gewünschtem Reinheitsgrad. Kombiniert man das BCM-Clean-Verfahren mit dem BCM-Sorb-Verfahren, so kann Biogas mit einem Methangehalt von über 99,5 Vol.-% erzeugt werden. Der Wärmebedarf für die Biomethanerzeugung beträgt anstatt 0,4 bis 0,6 kWh/Nm^3 nur 0,1 bis 0,3 kWh/Nm^3 und kann somit drastisch reduziert werden. Im Juni 2008 wurde im Klärwerk Obermeilen die erste BCM-Anlage errichtet. Es konnte ein einspeisefähiges Biomethan von 98,7 Vol. % erzeugt werden. Der Methanverlust lag bei 0,04 % (Umwelttechnik Schweiz 7–8/08).

Auch strategische und politische Überlegungen im Bereich Biomasse beschäftigten die Ämter im Jahre 2008. Mit der entstehenden Biomassestrategie wollen die Ämter ein Zeichen der Zusammenarbeit und Koordination im Biomassebereich setzen. Die Strategie enthält wichtige Ziele zu den Themen Produktion, Verarbeitung und Nutzung von Biomasse in der Schweiz und wird von den hauptsächlich betroffenen Bundesämtern (ARE, BAFU, BFE, BLW) anerkannt und im Jahr 2009 verabschiedet. Aufgrund der technischen, ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Entwicklungen muss diese Strategie periodisch kritisch überdacht, angepasst und möglicherweise auch weiter entwickelt werden.

Was die Gemüter 2008 im Ausland bewegte

Themen, die 2008 oft in Wissenschaftsartikeln zu finden waren, sind Ökobilanzen für Biotreibstoffe, Bioenergie-Potenzial, Biomasseproduktion mit Hilfe von Algen, Algen als Biotreibstoff und steigender Pelletmarkt. In den vergangenen Jahren wurde der Handel mit Biotreibstoffen intensiviert, nicht zuletzt auch durch Subventionen. Biotreibstoffe schienen die Lösung, um Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Nach dem Boom der Biotreibstoffe der ersten Generation machen sich auch kritische Stimmen bemerkbar, welche die positive Ökobilanz mit fundierten Erkenntnissen in Frage stellen. Hoffnungsträger sind mittlerweile die Biotreibstoffe der zweiten Generation geworden. Bei diesen gilt es jetzt, die Ökobilanz sorgfältig zu prüfen, und differenziert je nach Herstellungstechnologie zu betrachten (www.idw-online.de). Auch Fragen des Bioenergie-Potenzials werden berechtigterweise gestellt. Eine deutsche Studie konnte zeigen, dass nachhaltig produzierte Bioenergie bis zur Mitte dieses Jahrhunderts etwa ein Zehntel des weltweiten Bedarfs an Primärenergie decken kann. Für die nachhaltige Nutzung von Bioenergie ist ein Potenzial von 80 bis maximal 170 Exajoule (EJ, 10^{18} Joule) im Jahre 2050 angegeben. Diese Grössenordnung entspricht auch den veröffentlichten Zahlen der IEA [26]. Zum Vergleich: In der Schweiz beträgt der jährliche Energiebedarf 865 PJ (2007). Ein mittlerer Wert von 120 EJ pro Jahr entspricht in etwa einem Viertel des heutigen weltweiten Primärenergiebedarfs und knapp einem Zehntel des Bedarfs im Jahr 2050. Es wird davon ausgegangen, dass bis zum Jahr 2050 etwa die Hälfte des jährlichen Potenzials, 85 EJ, wirtschaftlich erschlossen werden kann. Untersuchungen haben ergeben, dass das Potenzial der Bioenergie die Kosten für den Klimaschutz massgeblich beeinflussen: Je höher das Potenzial, umso geringer sind die Gesamtausgaben zum Erreichen des Ziels, die globale Erwärmung auf 2 °C zu begrenzen (www.idw-online.de).

Mit der Mikroalgenproduktion tut sich ein neues Feld der Biomasseproduktion auf. Mikroalgen betreiben Photosynthese mit einem besonders hohen Wirkungsgrad. Ihre Biomasse kann zur Produktion von Biogas, Biodiesel und Bioethanol genutzt werden. Bei der Algenkultivierung können zusätzlich CO_2-Abgase aus Kraft-, Zement- oder Kalkwerken genutzt werden. Auf internationaler Ebene hat das Wettrennen um die besten Konzepte längst begonnen. Bislang sind die Techniken jedoch noch nicht ausgereift. Das Thema hat mittlerweile weltweit Fahrt aufgenommen. Anfang 2007 vermeldete das spanische Biotech-Unternehmen Bio-Fuel-Systems den Bau der weltweit ersten industriellen Anlage zur Algensprit-Produktion in der Region Alicante. Royal Dutch Shell plc und HR Biopetroleum haben den Bau einer Pilotanlage zum Anbau von Meeresalgen auf Hawaii angekündigt. In Israel hat die Firma Seambiotic eine Algenmassenproduktion mit Kraftwerksabgasen in «Open Pond»-Systemen bereits realisiert. Besonders in den USA gibt es eine Vielzahl von Start-up-Firmen mit ersten Pilotprojekten (www.idw-online.de).

Bezüglich dem Energielieferanten Holz ist die Pelletnachfrage sowohl in Österreich, als auch in Deutschland stark angestiegen. Stark wächst auch die Nutzung von Pellets für die Beheizung grosser Objekte wie Hotels, Gewerbebetriebe oder Wohnhausanlagen (Nr. 34 Holzzentralblatt). Gemäss Angaben aus Deutschland hat sich die Pelletproduktion innert Jahresfrist verdoppelt. In Deutschland werden zurzeit jährlich 2,2 Mio. t Pellets hergestellt. Neue Unternehmen sind in den Pelletmarkt eingestiegen, bestehende haben ihre Kapazitäten erweitert. Die Rohstoffbasis zur Herstellung von Holzpellets hat sich im Vergleich zu den vergangenen Jahren kaum verändert. Die meisten Pelletproduzenten beziehen ihren Rohstoff in Form von Sägemehl oder -spänen als Nebenprodukte von Sägewerken. Allerdings sind neue Rohstoffquellen wie Waldrestholz, schwache Äste und Baumkronen oder aktuell auch Kurzumtriebsholz aus schnell wachsenden Weiden im Kommen (Nr. 33 Holzzentralblatt). In Deutschland rechnet man mittelfristig mit einem Markanteil an Pelletheizungen von 3 bis 5 % am Heizungsmarkt, was bei geschätzten 20 Mio. Anlagen einen Bestand zwischen 600'000 und 1 Mio. bedeutet (Nr. 30 Holzzentralblatt). In Europa könnte sich die Produktion von Energiepellets bis 2020 auf 70 Mio. t/a verzehnfachen. Damit könnte ein Drittel des derzeitigen Heizölverbrauchs und rund 3 % der Kohlekraftwerke durch den aus Holz produzierten Energieträger ersetzt werden (Nr. 30 Holzzentralblatt).

Liste der F+E-Projekte

[1] U. Elber, Vision Engineering GmbH: Feuchtegehalt-Änderungen des Waldfrischholzes bei Lagerung im Wald (Schlussbericht Projekt 101410).

[2] Eidg. Energieforschungskommission CORE: Konzept der Energieforschung des Bundes 2008–2011 (http://www.bfe.admin.ch/themen/00519/index.html?lang=de).

[3] Th. Nussbaumer (thomas.nussbaumer@verenum.ch), J. Good, Verenum, Zürich, A. Doberer, HSLU Horw R. Bühler, Umwelt & Energie, Maschwanden: Partikelemissionen von Holzfeuerungen bis 70kW (Jahresbericht Projekt 101905).

[4] A. Prévôt (andre.prevot@psi.ch), U. Baltensperger, PSI, Villigen : Erweiterte Partikelanalytik für Holzfeuerungsabgase (Jahresbericht Projekt 102207).

[5] B. Salerno (basso.salerno@sesolar.ch) Salerno Engler Gmbh, Langenbruck, A. Jenni, ardens GmbH, Liestal, D. Schlottmann, Lopper AG, Buochs: Buondi-Emissionsarme Startphase bei Stückholzkessel (Jahresbericht Projekt 102525).

[6] L. Konersmann (Lars.Konersmann@solarenergy.ch), R. Haberl, E. Frank, SPF, Rapperswil: Pelletsolar-2 Systemoptimierung von Pelletfeuerungen in Kombination mit thermischen Solaranlagen basierend auf dynamischen Simulationen und Messungen im Prüfstand (Jahresbericht Projekt 101792).

[7] L. Konersmann (Lars.Konersmann@solarenergy.ch), M. Haller, P. Vogelsanger, SPF Rapperswil: Pelletsolar: Leistungsanalyse und Optimierung eines Pelletsolarkombinierten Systems für Heizung und Warmwasser (Schlussbericht Projekt 101792).

[8] Th. Nussbaumer (thomas.nussbaumer@verenum.ch): 10. Holzenergie-Symposium: Ökonomie, Technik und Luftreinhaltung. Tagung an der ETH Zürich am 12. September 2008, Verenum Zürich 2008, www.holzenergie-symposium.ch.

[9] T. Schildhauer (tilman.schildhauer@psi.ch), S. Biollaz, PSI, Villigen: Hochtemperatur-Entschwefelung für biogene Produktgase – Design und Optimierung (Jahresbericht Projekt 102133).

[10] J. Müller (johannes.mueller@psi.ch), F. Vogel, PSI, Villigen: Optimierung der Hydrolyse und Salzabtrennung bei der hydrothermalen Vergasung von Biomasse (Jahresbericht Projekt 102301).

[11] M. Wellinger (marco.wellinger@psi.ch), J. Wochele, Ch. Ludwig, PSI, Villigen: Oberflächen-Ionisationsdetektor zur Online Messung von Alkalien in Prozessgasen (MOPSID: Monitoring of Process Gases with a Surface Ionization Detector) (Jahresbericht Projekt 102093).

[12] W. Edelmann (edelmann@arbi.ch), Arbeitsgemeinschaft Bioenergie, Baar: Bestimmung der TS- und OS-Gehalte von Ausgangsmaterialien für die Feststoffvergärung (Schlussbericht Projekt 102112).

[13] R. Warthmann (Rolf.Warthmann@zhaw.ch), M. Kühni, ZHAW Wädenswil: Anaerobe Behandlung kommunaler Abwässer in der Schweiz (Jahresbericht Projekt 102774).

[14] J.-L. Hersener (hersener@agrenum.ch), Ingenieurbüro Hersener, Wiesendangen, U. Meier, Meritec GmbH, Guntershausen: Vergärung von Gülle und Co-Substraten in einem Membran-Bioreaktor (MBRII) (Jahresbericht Projekt 102406).

[15] S. Gutzwiller (stephan.gutzwiller@eicher-pauli.ch): Abwärmenutzung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen (Schlussbericht 102315).

[16] T. Bakx (Toine.Bakx@erep.ch), Y. Membrez, Erep SA, Aclens, A. Joss, Eawag, Dübendorf : Etat de l'art des méthodes (rentables) pour l'élimination, la concentration ou la transformation de l'azote pour les installations de biogaz agricoles de taille petite/moyenne (Jahresbericht Projekt 102684).

[17] S. Baum (sebastian.baum@zhaw.ch), U. Baier, ZHAW, Wädenswil, J. Judex, S. Biollaz, PSI, Villigen : Methanverluste bei der Biogasaufbereitung (Schlussbericht Projekt 101718).

[18] M. Schmid (schmid@oekozentrum.ch), H.P. Zumsteg, Ökozentrum, Langenbruck: Emissionsarme Verbrennung und energetische Nutzung von Schwachgasen bis unter 2.5MJ/m3 (Jahresbericht Projekt 102105).

[19] D. Finger (david.finger@infras.ch), N. Kljun, M. Keller, INFRAS, Bern: Die Einführung von Gasbussen bei Bernmobil (Schlussbericht Projekt 101462).

[20] A. Märki (Alexandra.Maerki@ebp.ch), K. Serafimova, EBP, Zollikon: Konzept für die Infothek Biomasse (Konzeptentwurf Projekt 102782).

[21] S. Baum (baum@zhaw.ch), U. Baier: Biogene Güterflüsse der Schweiz 2006, Massen- und Energieflüsse. Umwelt-Wissen Nr. 0831. Bundesamt für Umwelt, Bern: 115 S.

[22] A. Rüegsegger (adrian.ruegsegger@swtr.admin.ch), TA Swiss, Bern: Technology Assessment Studie «Treibstoffe aus Biomasse-zweite Generation» (Sitzungsunterlagen Projekt 102772).

Liste der P+D-Projekte

[23] T. Anken (thomas.anken@art.admin.ch), Agroscope, Tänikon: Miscanthus Kleinfeuerung (Jahresbericht Projekt 102882).

[24] Th. Nussbaumer (thomas.nussbaumer@hslu.ch): Forschungslabor Bioenergie (Schlussbericht 102306).

Referenzen

[25] International Energy Agency (IEA) Technology Agreement Bioenergy (http://www.ieabioenergy.com/).

[26] International Energy Agency (IEA) Energy Technology Perspectives 2008, Scenarios and Strategies to 2050.

Impressum

Juni 2009
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
Druck: Ackermanndruck AG, Bern-Liebefeld
Bezug der Publikation: www.energieforschung.ch

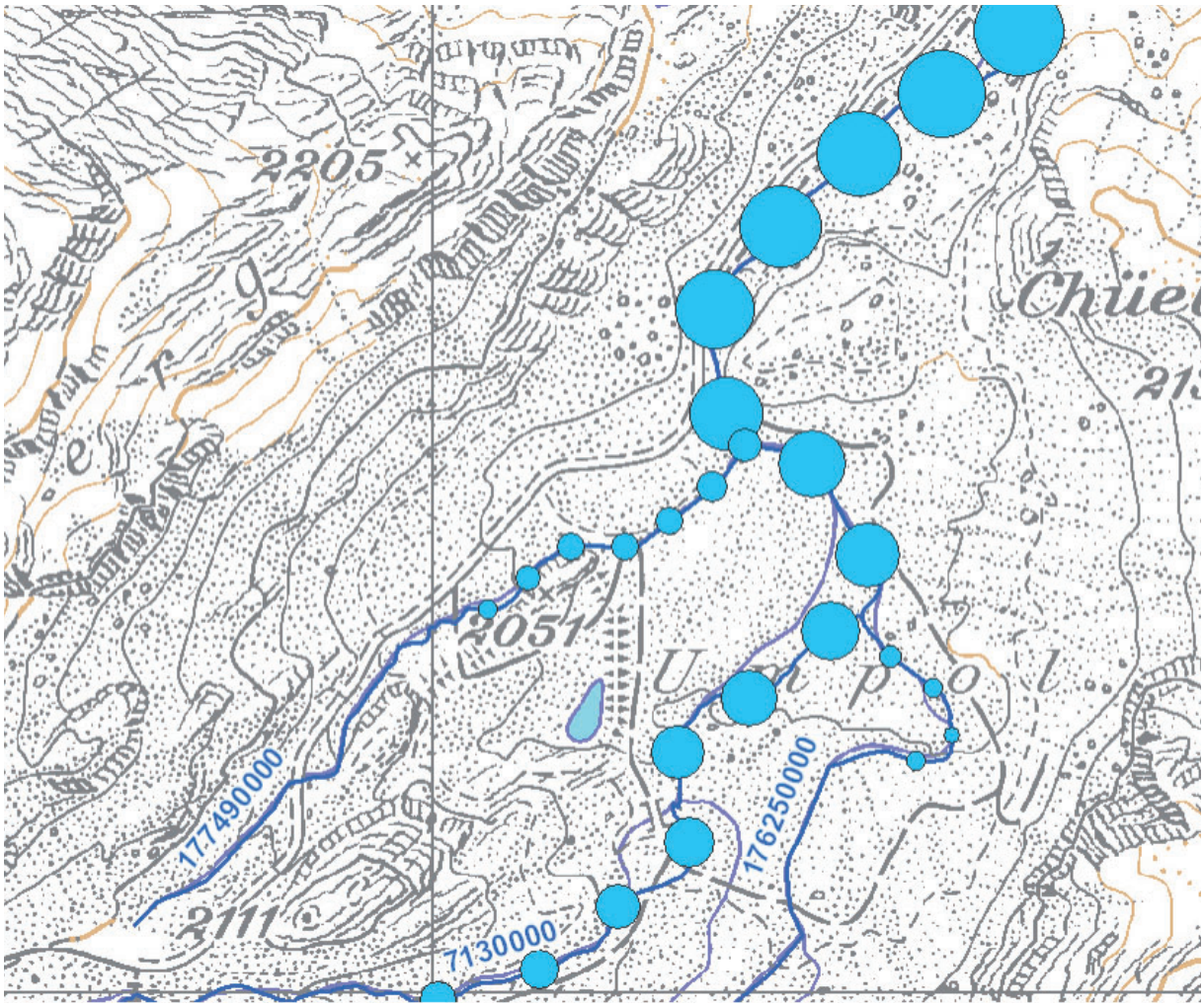
Programm- und Bereichsleiterin
Dr. Sandra Hermle
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
sandra.hermle@bfe.admin.ch

Rapport de synthèse 2008 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2008 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Wasserkraft

Klaus Jorde

klaus.jorde@entec.ch



Flächendeckende Ermittlung des Kleinwasserkraftpotenzials der Schweiz

Die Kreise auf der Karte repräsentieren lokale Einzugsgebietsgrössen, wie sie zur Ermittlung lokaler Abflüsse aus digitalen Geländemodellen ermittelt werden. (Schröder und Weidmann 2008 [5])

Programmschwerpunkte

Ziel für das Forschungsprogramm im Jahr 2008 war es in erster Linie, den ursprünglichen **Programmentwurf nach Vorgaben der CORE zu überarbeiten**, im Anschluss daran das **Programm zu publizieren** [8] und die entsprechende **Website** aufzuschalten, sowie eine **Begleitgruppe** zusammenzustellen und einzusetzen. Bestehende **Forschungsprojekte aus dem früheren Programm Kleinwasserkraftwerke** sollten weitergeführt und parallel dazu erste **neue Forschungsprojekte** in die Wege geleitet werden.

Generelles Ziel des im Frühjahr 2008 initiierten Forschungsprogramms Wasserkraft ist es, die **vollständige Nutzung des vorhandenen Wasserkraftpotenzials** der Schweiz unter einer gesamtheitlichen Betrachtungsweise zu unterstützen und fördern. Dabei geht es einerseits um die technische Erschliessung noch vorhandener Restpotenziale, z.B. durch **technische Verbesserungen und Neuentwicklungen**, die wirtschaftliche Vorteile bringen, und um die Entwicklung von **Lösungsansätzen** zu Problemen, welche die **Potenzialerschliessung** bremsen.

Andererseits geht es aber auch um den **Erhalt bestehender Nutzungen**, welche z.B. infolge der Klimaänderung bedroht sind, oder bei denen aufgrund bestimmter ökologischer Ansprüche (Restwasser, Schwallbetrieb usw.) oder anderer Faktoren (z.B. Stauraumverlandung) in der Zukunft Einschränkungen zu erwarten sind.

Bezüglich der vorhandenen **Potenziale für kleine Wasserkraftanlagen** sind bisher nicht einmal flächendeckende Daten für die Schweiz bekannt. Diese Lücke soll geschlossen werden. Ein weiterer Schritt hin zu einer möglichst vollständigen Potenzialausnutzung ist die **Beseitigung bestehender Hemmnisse** durch die Entwicklung von neuen Lösungsansätzen, insbesondere im Bereich des **Konfliktes zwischen Wasserkraft, Natur- und Landschaftsschutz**.

In wirtschaftlicher und technischer Hinsicht sind aber auch für **grosse Anlagen** noch neue offene Fragen zu klären, die insbesondere mit der sich verändernden Betriebsweise von Speicherkraftwerken zusammenhängen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2008

Programm nach Vorgaben der CORE überarbeitet

Das neue Forschungsprogramm Wasserkraft wurde der CORE erstmals als Programmentwurf im November 2007 vorgestellt und diskutiert. Er wurde generell für gut befunden und an die Programmleitung – mit der Bitte um Überarbeitung und insbesondere Straffung der Programmziele – zurückgegeben. Das jetzt vorliegende Programm [8] basiert auf den generellen Zielen, das gesamte vorhandene Wasserkraftpotenzial in der Schweiz zu erschliessen und zu der Beseitigung von Hemmnissen beizutragen, die dieser Erschliessung entgegenwirken. Zu diesen Hemmnissen zählen beispielsweise technische und wirtschaftliche Fragen bei Kleinwasserkraftwerken sowie ökologische Fragen bei Speicherkraftwerken und deren geplanten Erweiterungen. Daneben werden auch explizit Fragestellungen im Zusammenhang mit der Klimaveränderung sowie mögliche Konsequenzen veränderter Betriebsweisen der Speicherkraftwerke im europäischen Verbundnetz angesprochen.

Das überarbeitete Programm wird der CORE im Sommer 2009 nochmals vorgestellt. Eine Abstimmung mit dem zuständigen CORE-Paten, Prof. A. Wokaun, hat stattgefunden, und es wurde Einigkeit über die überarbeitete Formulierung des Forschungsprogramms erzielt.

Begleitgruppe

Für die wissenschaftliche Begleitgruppe des Forschungsprogramms konnten namhafte Experten aus verschiedenen Bereichen der Wasserkraftforschung und -nutzung gewonnen werden. Die Namen und Zugehörigkeiten sind nachfolgend aufgeführt.

- Robert Boes, VAW, ETH Zürich;
- Giovanni De Cesare, Laboratoire de Constructions Hydrauliques, EPFL, Lausanne;
- Walter Hauenstein, Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband;
- Ivo Scherrer, Entegra Wasserkraft AG;
- Thomas Staubli, Hochschule Luzern – Technik & Architektur;
- Bernhard Wehrli, Eawag, Zürich;
- Martin Kauert, Swisselectric Research, Bern (angefragt).

Eine erste Sitzung der Begleitgruppe ist zwar im Jahr 2008 nicht mehr zu Stande gekommen, jedoch für das erste Quartal 2009 geplant. Es ist vorgesehen, dass sich die Begleitgruppe maximal einmal pro Jahr trifft. Im Wesentlichen soll die Begleitgruppe unterstützend und kritisch begutachtend tätig sein und im Fall von spezifischen Fragestellungen zusätzliches Expertenwissen bzw. Ein-

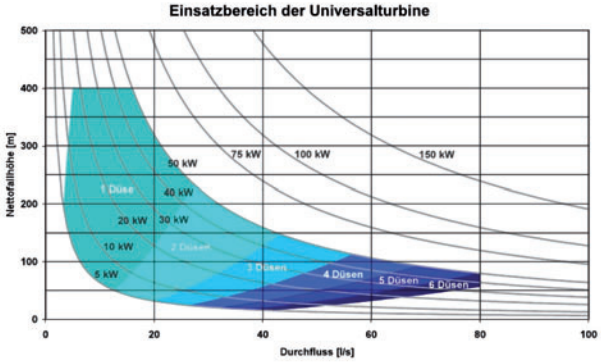
schätzungen zur Verfügung stellen. Zu den allgemeinen Aufgaben der Begleitgruppe gehört es, die Aktivitäten des Programms zu beobachten, die Forschungsschwerpunkte, wo erforderlich, anzupassen und alle Schweizer Wasserkraftaktivisten möglichst breit gestreut auf das Programm hinzuweisen.

Website

Die Website des Forschungsprogramms ist seit Januar 2009 aufgeschaltet unter www.bfe.admin.ch/forschungwasserkraft. Eine Reihe von Anfragen bezüglich Fördermöglichkeiten ist aufgrund der dort veröffentlichten Informationen und Förderschwerpunkte bereits eingegangen.

Forschungsprojekte aus dem früheren Programm Kleinwasserkraftwerke

Mehrere Projekte befassten sich mit dem Anwendungsgebiet der Energienutzung in Trinkwasser-Versorgungssystemen. Die Herausforderungen liegen hierbei in den oft sehr limitierten Platzverhältnissen oder beim benötigten Restdruck nach erfolgter Turbinierung. Das Projekt *Universell einsetzbare Turbine für Wasserversorgungen* [1] der Stiftung Revita konzentriert sich auf die Entwicklung der Gegendruckturbine – auch als Universalturbine bezeichnet – welche für den Einsatz in geschlossenen Wassersystemen vorgesehen ist und nach erfolgter Turbinierung einen Restdruck bereitstellt. Bis anhin wurden für diese Anwendungen Pumpen eingesetzt, die rückwärts betrieben wurden: das Wasser fliesst dabei rückwärts durch die Pumpe, die dadurch als Turbine wirkt und so Elektrizität produziert. Der Vorteil der Gegendruckturbine gegenüber den Pumpen liegt in einem besseren Wirkungsgrad und einer deutlich grösseren Flexibilität bezüglich des zu turbinierenden Wassers. In einem ersten Schritt wird die neue Turbine für Leistungen zwischen 5 und 50 kW entwickelt – einem für Trinkwasserkraftwerke typischen Anwendungsbereich (Figur 1).



Figur 1: Einsatzbereiche für die Universalturbine, eine universell einsetzbare Turbine für Wasserversorgungen. (Schindelholz und Fritschi 2008 [1])

Das Turbinenrad wird in einen luftdicht geschlossenen Raum eingebaut. Ein Luftkissen zwischen Turbinenrad und Wasserstand bestimmt den Restdruck, mit welchem das Wasser nach der Turbinierung zu den Verbrauchern gelangt. Der unterschiedliche Luftgehalt im zu- und abfliessenden Wasser verändert die Luftmenge im Luftdruckkissen. Ein Luftmengenregler sorgt deshalb für eine konstante Luftmenge. Das Luftkissen dämpft und absorbiert ausserdem Druckstösse im Wasserleitungsnetz

Ein weiteres Projekt beschäftigt sich mit der Entwicklung standardisierter Kleinturbinen. Das Kompetenzzentrum MHyLab verfolgt seit 1993 das Ziel, kleine hydraulische Turbinen zu entwickeln, die den Kriterien Zuverlässigkeit, Einfachheit und Performance genügen. Alle Arbeiten zielen darauf ab, die wirtschaftlich, ökologisch und technisch optimale Turbine für jedes Kleinwasserkraftwerk zu bestimmen. Bereits ausgereift sind Entwicklungen für den Bereich hoher Fallhöhen (60 bis 600 m), wo Peltonturbinen eingesetzt werden, und für den Bereich niedriger Fallhöhen (1,5 bis 30 m) mit Axialturbinen vom Typ Kaplan. Die Technik steht den KMU der Branche zur Verfügung. Bis heute werden weltweit 42 MHyLab-Kleinturbinen eingesetzt, von der Schweiz bis nach Neuseeland. Derzeit noch ungenügend abgedeckt ist der Bereich der mittleren Fallhöhen (20 bis 100 m), der mit diagonalen Turbinen bewirtschaftet wird. Dieser Bereich wird im Rahmen des Projekts *Turbines Diagonales 06* [2] untersucht. Die gesamten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten basieren auf dem Prinzip der Systematisierung und laufen wie folgt ab:

- Definition einer Basisturbine anhand der verwendeten Technik in der Grosswasserkraft;
- Anpassungen an die Besonderheiten der Kleinwasserkraft und Definition der Dimensionierungsparameter;
- Überprüfung der Anpassungen und weitere Vereinfachung anhand von numerischen Modellen;
- Bau einer Modell-Turbine im Labor und Installation auf dem Prüfstand;
- Tests und Entwicklungen auf dem Prüfstand, um die Turbine so einfach und leistungsstark wie möglich zu machen.

Die Laborarbeiten ermöglichen es, die Veränderungen der Konstruktionsparameter in Abhängigkeit z.B. des Durchflusses, des verfügbaren Gefälles oder der Drehzahl der Turbine zu bestimmen. Die erhaltenen Resultate können nach festgelegten Normen auf die realen Anwendungen übertragen werden. Somit ist es möglich, die für

einen bestimmten Standort optimale Turbine herzustellen.

Ein Vorprojekt zur *Optimierung von Kleinwasserkraftwerken durch Qualitätssicherung* behandelte erstmals Qualitätsmängel bei Kleinwasserkraftwerken und deren Prävention. Das Folgeprojekt befasst sich mit der *Optimierung von Spülvorgängen bei Kleinwasserkraftwerken* [3]. Die Verschmutzung der Rechen und Turbinen ist ein ständiges Problem beim Betrieb von Kleinwasserkraftwerken. Dies ist vor allem im Herbst und bei starkem Regen der Fall, wenn grosse Mengen an Laub und Geäst anfallen. Die Verschmutzung stellt oft das am häufigsten auftretende und grösste Problem bei Kleinanlagen dar und kann den Wirkungsgrad der Anlage innerhalb kurzer Zeit um 30–40 % reduzieren. Das bedeutet, dass sehr häufig entsprechende Spülprogramme durchgeführt werden müssen, in manchen Anlagen bei grossem Treibgutanfall im halbstündigen Rhythmus. Während Rechen üblicherweise ohne nennenswerte Störung des Betriebs mittels Rechenreiniger gereinigt werden können, muss zur Reinigung der Turbine diese meist geschlossen werden, wobei es zu einer erheblichen Beeinflussung des Betriebs kommt. Während des Spülens kann kein Strom produziert werden, je nach Spülprogramm wird sogar von der Turbine Leistung aufgenommen. Die Spülvorgänge hängen stark vom Turbinentyp ab. Die ideale Vorgehensweise ist hierfür noch nicht gefunden worden. Durch die Häufigkeit des Spülens ergibt sich ein erheblicher Verlust an Jahresarbeit, der je nach Anlage im Bereich von 3–10 % der Jahresproduktion liegen kann. Durch effizientere Spülprogramme, eine eventuelle bauliche Optimierung oder durch ein angepasstes Design kann ein Teil dieser Verluste vermieden werden. Das 2007 von der Hochschule Luzern, der Universität Stuttgart und verschiedenen Industriepartnern gestartete Forschungsprojekt befasst sich mit der Problematik und erstellt einen technischen Leitfaden.

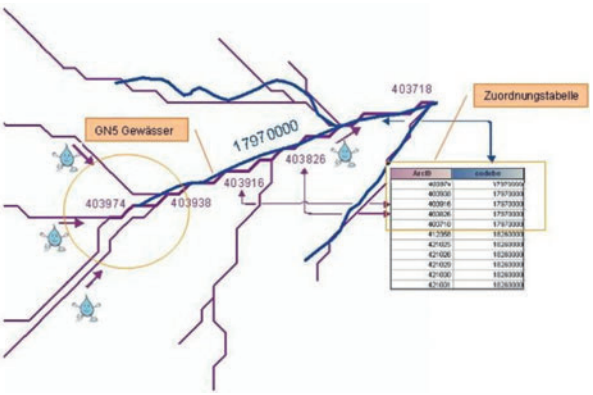
Die Funktionsweise einer neuartigen Fischaufstiegshilfe wird im Projekt *Monitoring der Fischschleuse des KW Buchholz* [4] geprüft. Konventionelle Fischaufstiegshilfen liessen sich bei der Stauanlage mit einer Höhe von 15 m und den beengten räumlichen Verhältnissen nicht realisieren. Die Fischaufstiegshilfe wurde deshalb in der Form einer Fischschleuse ausgeführt und direkt in die Vorbetonierung der alten Staumauer integriert. Diese Form des Fischaufstieges ist in der Schweiz erstmalig zur Anwendung gekommen und besitzt Pioniercharakter. Eine detaillierte Funktionskontrolle soll Aufschluss über die Wirksamkeit der gewählten Variante geben und den Schleusenbetrieb gegebenenfalls optimieren. Diese Informationen können für die Planung von zukünftigen Fischaufstiegsanlagen in dieser Form von grossem Nutzen sein. Die Untersuchungen umfassen neben der Kontrolle mittels Fischreuse über ein Jahr auch die Untersuchung von Kompensationswanderungen durch Einsetzen von Fischen im Unterwasser.

Neue Forschungsprojekte

Gemäss einem der Schwerpunkte des Forschungsprogramms Wasserkraft konnte ein neues vierjähriges Forschungsprojekt *Erhebung des Kleinwasserkraftpotenzials der Schweiz – ganzheitliche Beurteilung des Wasserkraftpotenzials* in die Wege geleitet werden. Das Teilprojekt *Ermittlung des hydroelektrischen Potenzials für Kleinwasserkraftwerke* [5] zielt einerseits darauf ab, erstmalig eine flächendeckende Erhebung des theoretischen Potenzials für Kleinwasserkraftwerke (< ca. 1 MW) in der Schweiz durchzuführen (Figur 2, Titelbild).

In einem weiteren Teilprojekt *Ganzheitliche Beurteilung des Wasserkraftpotenzials* [6] sollen ganzheitliche Bewertungskriterien erarbeitet werden, die es erlauben, eine realistische Schätzung bezüglich des Potenzialanteils abzugeben, der unter bestimmten sozioökonomischen, ökologischen und landschaftsplanerischen Gesichtspunkten tatsächlich nutzbar ist. Dabei sollen unterschiedliche Szenarien zu Grunde gelegt werden. Gesamtziel ist, das tatsächlich nutzbare Kleinwasserkraftpotenzial in der Schweiz unter verschiedenen Bewertungsansätzen qualifizieren und lokal zuordnen zu können.

Im Rahmen des *Leitbilds zur ganzheitlichen Bestimmung von potenziellen Standorten von Kleinwasserkraftwerken* [7] koordiniert das Netzwerk Wasser in Berggebieten (NWB) das gesamte Forschungsprojekt und stellt den Kontakt zu den Bergkantonen her, die als Endnutzer die Forschungsergebnisse heranziehen können, um bei der Bewertung der zahlreich eingehenden



Figur 2: Erstellen eines generischen Gewässerlaufs (Prinzipskizze) für die Ermittlung des Kleinwasserkraftpotenzials der Schweiz. (Schröder und Weidmann [5])

Anträge eine weitere Entscheidungsgrundlage zu haben.

Im Rahmen der Energiestrategie des Bundes liefert dieses Projekt erstmals verlässliche Zahlen über das tatsächlich noch erschliessbare Energiepotenzial kleiner Wasserkraftanlagen in der Schweiz.

Über dies bereits angelaufene Forschungsprojekt hinaus liegt eine Reihe von Anfragen für weitere Projekte vor, die alle aus dem Bereich *Turbinentechnologie* für kleine Wasserkraftpotenziale stammen. Eine Reihe von Anfragen musste allerdings auch abgelehnt werden.

Nationale Zusammenarbeit

Bereits im Vorfeld und während der Ausarbeitungsphase des Forschungsprogramms hat die Programmleitung den Kontakt zu verschiedenen Beteiligten im Bereich Wasserkraft in der Schweiz aufgenommen. Im Jahr 2008 hatten Gespräche mit den beiden wasserbaulichen Versuchsanstalten an den ETH (VAW Zürich, LCH Lausanne), Vertretern verschiedener Fachhochschulen (FH Luzern, Rapperswil, Sion), dem Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband, Energieversorgungs- und Wasserkraftunternehmen, sowie Vertretern anderer Wissenschaftsdisziplinen (Universitäten, Eawag, Empa) stattgefunden. Diese ursprünglichen Kontaktaufnahmen dienten in erster Linie dazu, die Einschätzung des notwendigen Forschungsbedarfs von möglichst vielen Experten zu erhalten und in das Programm einzuarbeiten.

Nachdem nun das Programm formuliert und der Öffentlichkeit vorgestellt ist [8], wurde die Begleitgruppe für das Forschungsprogramm aus den oben genannten Institutionen rekrutiert und die bestehenden Kontakte wurden verwendet, um das Forschungsprogramm auf breiter Basis bekannt zu machen.

Zusätzliche Kontakte wurden zu Swisselectric Research hergestellt, weitere Kontaktaufnahmen (KTI, SNF) sind für die nahe Zukunft vorgesehen. Die Programmleitung selbst wurde in der Zwischenzeit bereits mehrfach kontaktiert mit der Bitte um fachliche Begutachtung von Förderanträgen, die bei oben genannten Institutionen eingereicht worden sind.

Im Rahmen der Vorbereitung und Durchführung von Forschungsprojekten wurden Kontakte mit verschiedenen Institutionen aus Forschung, Verwaltung und Privatwirtschaft aufgebaut und vertieft (z.B. Universität Bern, Hochschule Luzern, Watergisweb AG, Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband, Netzwerk Wasser in Berggebieten).

Die im Programm angesprochene Ausbildungsinitiative der Schweizer Wasserkraftunternehmen wurde mit dem SWV erörtert; hier sind Aktivitäten bereits angelaufen. Die Programmleitung war an der Evaluation eingereichter Projekte beim Swiss Mountain Water Award beteiligt. Eine enge Zusammenarbeit und Abstimmung mit dem Programm Kleinwasserkraftwerke von EnergieSchweiz findet statt. Ebenso bestehen Kontakte bezüglich Zusammenarbeit mit der Wasser-Agenda 21.

Teilnahme an Tagungen

Der Programmleiter hat 2008 als Vertreter des Forschungsprogramms Wasserkraft an folgenden Tagungen teilgenommen:

- EnergieSchweiz Strategiekonferenz, 1./2. Juli 2008, Winterthur;
- Jahresveranstaltung Netzwerk Wasser in Berggebieten, 20. August 2008, Landquart;
- Otti-Tagung, 11. Internationales Anwenderforum Kleinwasserkraftwerke, 25./26. September 2008, Luzern;
- Pro-Natura-Tagung «Wieviel Wasserkraft verträgt die Schweiz», 17. Oktober 2008, Bern;
- Wasserkraft als Spitzenenergie – Chancen und Risiken, 18. November 2008, ETH Zürich.

Internationale Zusammenarbeit

Internationale Kooperationen wurden bisher konkret keine angestossen. Allerdings ist der Programmleiter aufgrund seiner übrigen Aktivitäten in internationale Projekte eingebunden, und es ist zu erwarten, dass auch das Forschungsprogramm Wasserkraft beziehungsweise einzelne Forschungsprojekte international vernetzt sein werden.

So war der Programmleiter beispielsweise mehrfach als Gutachter für die Norwegische Science Foundation tätig. Die Forschungsaufträge, die dabei zu begutachten waren, beschäftigten sich mit Schwall- und Sunkbetrieb und den ökologischen Auswirkungen unterhalb von Speichern sowie mit neuartigen Aufgabenstellungen für Speicherkraftwerke innerhalb des europäischen Stromnetzes.

Diese Fragestellungen decken sich weitgehend mit prioritären Punkten innerhalb des BFE-Forschungsprogramms Wasserkraft und die Programmleitung wird sich bemühen, hier eine internationale Vernetzung in die Wege zu leiten.

Darüber hinaus nahm der Programmleiter an der Otti-Tagung «11. Internationales Anwenderforum Kleinwasserkraftwerke» im September 2008 in Luzern teil.

Öffentlichkeitsarbeit

Das neu aufgelegte Forschungsprogramm Wasserkraft wurde seit der Aufschaltung der Website verschiedentlich der Öffentlichkeit vorgestellt, so z.B. in einem Beitrag im Bulletin SEV/VSE, anlässlich einer Tagung über Stauraumverlandung an der EPFL und in einer Pressemitteilung des Netzwerks Wasser in Berggebieten.

Bewertung 2008 und Ausblick 2009

Das neu geschaffene Forschungsprogramm Wasserkraft wurde im Jahr 2008 erfolgreich etabliert. Gewisse Verzögerungen sind eingetreten, weil ursprünglich vorgesehen war, dass überarbeitete Programm vor seiner Veröffentlichung nochmals der CORE vorzustellen. Dies war zunächst für November 2008 vorgesehen, wurde dann von der CORE aber kurzfristig aufgrund anderer Prioritäten auf unbestimmte Zeit verschoben. Weiterhin gab es einen Wechsel in der Bereichsleitung beim BFE. Die Website konnte zu Beginn des Jahres 2009 aufgeschaltet und freigegeben werden, so dass das Programm, die Schwerpunkte und Fördermöglichkeiten jetzt öffentlich zugänglich sind.

Eine Begleitgruppe wurde zwar zusammengestellt, es war jedoch nicht mehr möglich, eine erste Sitzung im Jahr 2008 zu organisieren.

Parallel zur Fertigstellung des Programms liefen bereits Gespräche und Verhandlungen bezüglich eines ersten grösseren Forschungsprojektes. Dieses Projekt zum Kleinwasserkraftpotenzial der Schweiz wurde mit massgeblicher Unterstützung durch die Programmleitung als interdisziplinäres Projekt erarbeitet und eingereicht. Ende Oktober 2008 wurden die Verträge zu dem Projekt unterschrieben und die Arbeiten konnten beginnen. Als besonderer Erfolg wird dabei angesehen, dass bei diesem Projekt nicht nur das technische Potenzial flächendeckend erhoben wird, sondern dass parallel dazu ganzheitliche Beurteilungsansätze entwickelt werden, die es den Entscheidungsbehörden ermöglichen werden, im Spannungsfeld Wasserkraftnutzung und Natur-/Landschaftsschutz ausgewogene Entscheidungen treffen zu können.

Zu den Schwerpunkten für das Jahr 2009 gehört neben weiteren Forschungsprojekten eine stärkere Verknüpfung des Forschungsprogramms Wasserkraft mit anderen Organisationen, die Forschungsprojekte im Energiebereich fördern. Dazu gehören insbesondere der SNF, die KTI und Swisselectric Research. Durch persönliche Kontakte soll hier sichergestellt werden, dass Möglichkeiten gemeinsamer Projekte und gegenseitiger Unterstützung so weit wie möglich ausgenutzt werden.

Liste der F+E-Projekte

[1] B. Schindelholz und M. Fritschi (bruno.schindelholz@revita.ch), Stiftung Revita, Langenbruck: Universell einsetzbare Turbine für Wasserversorgungen (JB Projekt 102033).

[2] V. Denis (info@mhylab.com), MHyLab, Montcherand: Turbines diagonales 06: Programme de développement d'une turbine hydraulique diagonale destinée à équiper les petites centrales à moyenne chute (25 à 100 m) (JB Projekt 101915).

[3] A. Abgottspon (andre.abgottspon@hslu.ch) und Th. Staubli (thomas.staubli@hslu.ch), Hochschule Luzern, Horw: Verschmutzung von Kleinwasserkraftanlagen (JB Projekt 102390).

[4] Ch. Ruhlé (christian.ruhle@bluewin.ch), Büro für Jagd- und Fischereifragen, Schmerikon, und I. Scherrer (ivo.scherrer@entegra.ch), Entegra Wasserkraft AG, St. Gallen: Kontrolle Fischschleuse KWKW Buchholz (JB Projekt 102418).

[5] U. Schröder und Y. Weidmann (u.schroeder@watergisweb.ch), Watergisweb AG, Bern: Erhebung des Kleinwasserkraftpotentials der Schweiz – Ermittlung des hydroelektrischen Potentials für Kleinwasserkraftwerke (JB Projekt 102835).

[6] R. Weingartner und C. Hemund (wein@giub.unibe.ch), Geographisches Institut der Universität Bern, Bern: Erhebung des Kleinwasserkraftpotentials der Schweiz: Ganzheitliche Bestimmung des Wasserkraftpotentials (JB Projekt 102835).

[7] D. Soldo (soldo@slf.ch), Netzwerk Wasser im Berggebiet, Davos: Erhebung des Kleinwasserkraftpotentials der Schweiz – Leitbild zur ganzheitlichen Bestimmung von potentiellen Standorten von Kleinwasserkraftwerken (JB Projekt 102835).

Referenzen

[8] K. Jorde (jorde@entec.ch), Entec AG, St. Gallen: Energieforschungsprogramm Wasserkraft für die Jahre 2008 – 2011 www.bfe.admin.ch/forschungwasserkraft.

Impressum

Juni 2009
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
Druck: Ackermanndruck AG, Bern-Liebefeld
Bezug der Publikation: www.energieforschung.ch

Programmleiter
Dr. Klaus Jorde
entec ag
St. Leonhardstr. 59
CH-9000 St.Gallen
jorde@entec.ch

Bereichsleiter
Dr. Michael Moser
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
michael.moser@bfe.admin.ch

Rapport de synthèse 2008 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2008 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Geothermie

Rudolf Minder

rudolf.minder@bluewin.ch



Die Kraftwerkseinheit der geothermischen Pilotanlage Soultz-sous-Fôrets (F)

Das Bild zeigt die 2008 in Betrieb genommene ORC-Kraftwerkseinheit. Links befindet sich der Generator, in der Mitte die ORC-Turbine und rechts einer der Wärmetauscher.

Programmschwerpunkte

Auch im Jahr 2008 wurden die in den Vorjahren definierten Schwerpunkte und Ziele im Wesentlichen beibehalten.

Im Bereich der **untiefen Geothermie,** speziell bei den Erdwärmesonden-Systemen, wurde im Berichtsjahr ein nach wie vor starkes Marktwachstum festgestellt. Besonders auch im Sanierungsbereich der Einfamilienhäuser wurden viele Ölheizungen durch EWS-Anlagen ersetzt. Bei diesen am Markt etablierten Anlagen sind zwar durchaus noch Verbesserungen möglich, jedoch ist Forschungsbedarf vor allem bei komplexen Systemen gegeben. Diese umfassen beispielsweise Anlagen, welche sowohl eine Funktion als Wärmequelle als auch eine Speicherfunktion aufweisen. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Frage der Nachhaltigkeit, welche einerseits die technische Lebensdauer der Systeme und andererseits die Ressource umfasst.

Für die Nutzung **tief liegender geothermischer Ressourcen** werden die Forschungsziele vor allem durch die Notwendigkeit bestimmt, die Prospektion zu verbessern und damit das Fündigkeitsrisiko zu reduzieren, was sich direkt auf die Wirtschaftlichkeit der Projekte auswirkt. Dies umfasst einerseits die Entwicklung verbesserter Prospektionsmethoden und andererseits die Realisierung und wissenschaftliche Auswertung von Bohrlöchern. Bei solchen, sowohl zeitlich als auch finanziell aufwendigen Forschungsvorhaben ist die internationale Zusammenarbeit besonders wichtig und sinnvoll.

Die Prospektion wird in der Schweiz erschwert durch die geologische Kleinräumigkeit und die beschränkte Verfügbarkeit von Informationen aus tiefen Bohrungen. Es ist deshalb wichtig, dass an den Standorten, bei welchen gute Aussichten für nutzbare Ressourcen bestehen Pilotanlagen realisiert werden. Zurzeit befinden sich mehrere Projekte zur Gewinnung von Strom und/oder Wärme aus tiefen Aquiferen in Entwicklung, sodass mit ersten Anlagen im Verlauf weniger Jahre gerechnet werden kann.

Neben der mittelfristig umsetzbaren Nutzung tiefer Aquifere besteht auch weiterhin grosses Interesse an der Technik der **Enhanced Geothermal Systems (EGS)**. Einerseits müssen die Erfahrungen mit dem derzeit sistierten Projekt in Basel noch weiter ausgewertet werden. Andererseits ist das internationale Projekt in Soultz-sous-Fôrets mit der Aufnahme der Stromerzeugung in einer interessanten Phase, sodass der Teilnahme an diesem Projekt eine hohe Priorität zukommt.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2008

Allgemeine Arbeiten

Base de données des fluides géothermiques sur GoogleEarth [1]*:* La base de données BDFGeotherm, réalisée en 2007, a été modifiée dans le but d'améliorer sa diffusion et de faciliter son emploi. Le logiciel GoogleEarth et le site Internet du Crège ont été utilisés pour convertir cette base regroupant des données sur les fluides thermaux souvent dispersées et difficiles d'accès. En téléchargeant le fichier «BDFGeotherm.kmz» depuis le site Internet du Crège et en ouvrant ce fichier dans GoogleEarth, 84 sites contenant des informations sur les fluides thermaux apparaissent sur un fond de carte géographique. Chaque site est représenté par une épingle dont la couleur représente un intervalle de température mesurée. Le secteur nord du massif du Jura et la vallée supérieure du Rhône sont les deux zones où se concentrent la majorité des sites. Des données sur l'utilisation de l'eau, la géologie, le débit, la température et la minéralisation de l'eau apparaissent dans une nouvelle fenêtre en cliquant sur l'épingle des sites. Pour chacun d'entre eux, un lien vers le site Internet du Crège permet d'obtenir des informations supplémentaires: description géographique, géologie du réservoir, propriétés hydrauliques, hydrochimie, isotopes et paramètres géothermaux. Pour un nombre limité de sites, des photos et des logs géologiques peuvent être visualisés et exportés. Les résultats sont communiqués au centre d'informations de l'organisation Swisstopo.

Geothermische Ressourcen, Erarbeitung und Bewertung des geothermischen Potentials der Schweiz, Phase 2008 [2]: Das Projekt «Geothermischer Ressourcenatlas der Schweiz» umfasst eine integrierte Bewertung der geothermischen Bodenschätze der Schweiz. Die Leistungsfähigkeit heutiger Rechner erlaubt es, 3D Modellierungen durchzuführen und damit regionale Einflussfaktoren, wie geologische und hydrogeologische Strukturen, kombiniert zu interpretieren. Die Resultate für das gesamte Mittelland von Genf bis zum Bodensee liegen nun vor. Die Methodik basiert auf Temperaturdaten und hydrogeologischen Messwerten, die über Jahre systematisch gesammelt wurden. Im Unterschied zu früheren Ressourcenanalysen werden hier geologische, hydrogeologische und petrophysikalische Daten in eine numerische 3D Untersuchung integriert. Die Analyse be-

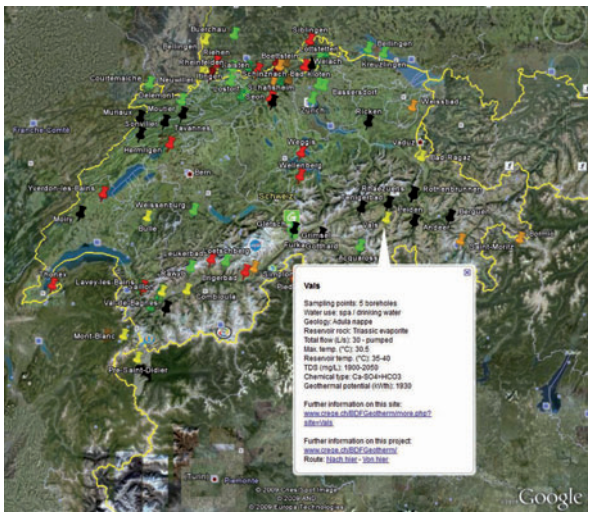


Figure 2: Carte de la Suisse avec les sources géothermiques. La source de Vals a été indiquée comme exemple.
Légende: Google Earth couleur des épingles. Entre paranthèses : Temperature du fluide (°C).
***Noir (<20)**; **Vert (20–30)**; **Jaune (30–40)**;*
Orange (40–50)**; **Rouge (>50)

inhaltet umfassende geologische und thermische Modelle. Es wurden folgende, geothermisch interessante Aquifere betrachtet: Obere Meeresmolasse, Oberer Malm, Oberer Muschelkalk und verwitterte, obere Kristallinzone. Die Ergebnisse werden als thermische Leistung und Energie darstellt. Die Resultate zeigen, dass Flächen von mehreren tausend km^2 mit viel versprechenden Aquiferen vorhanden sind.

Untiefe Geothermie

Le projet de recherche Rafraichissement par geocooling : bases pour un manuel de dimensionnement [3] a mis en évidence le manque des connaissances actuelles relatives à l'intégration de ce genre de système dans un bâtiment et de son interaction avec ce dernier, et par voie de conséquence sur le potentiel d'utilisation de ce type de système. L'objectif principal du présent projet est de combler ces lacunes et de rédiger un manuel sur la thématique. Il s'agit de:

- analyser les critères d'intégration dans un bâtiment d'un système de geocooling
- évaluer le potentiel de refroidissement en relation avec le bâtiment
- analyse de sensibilité en fonction des paramètres d'intégration et du dimensionnement
- établissement de règles de pré-dimensionnement pour des bâtiments à basse consommation énergétique.

Etude du potentiel d'utilisation du «géo-cooling» d'une installation avec sondes géothermiques verticales appliqué à un bâtiment administratif Minergie à Chiasso [4]: Le nouveau bâtiment de la douane de Brogeda-Chiasso a été construit pour satisfaire le standard Minergie. Les faibles besoins de chauffage et de refroidissement rendent possible des conditions idéales pour l'intégration d'un système géothermique basé sur le geocooling: un champ de sondes géothermiques est couplé à une pompe à chaleur en hiver et à la distribution de refroidissement par le biais d'un échangeur de chaleur en été. Le bâtiment a donc été utilisé comme objet de référence pour une étude de cas centrée sur le geocooling.

La simulation du système a montré qu'il est possible de le refroidir avec une température de départ de 22 °C.

Les clefs de dimensionnement suivantes ont été obtenues :

- puissance spécifique extraite : 28 W/m, énergie spécifique extraite : 43 kWh/(m·a) ;
- puissance spécifique injectée : 23 W/m, énergie spécifique injectée : 26 kWh/(m·a).

Le coût de l'énergie thermique de chauffage et de refroidissement est estimé à 10 centimes par kilowattheure, ce qui correspond à une charge de 5 CHF par mètre carré de surface de référence énergétique et par année. L'intégration et l'optimisation d'un système géothermique basé sur le geocooling apparait donc comme une option valable et concurrentielle pour un bâtiment administratif doté de dalles actives.

Ziel des Projektes *Erfahrungsbericht Erfolgskontrolle Heizen und Kühlen mit Erdwärmekörben* [5] ist das bessere Verständnis der Betriebsweise von kleinen und grossen Erdwärmekorbanlagen. Dazu wurden im Oktober 2008 zwei Anlagen mit Minidatenloggern ausgerüstet. Es sind dies eine Anlage zum Heizen und Kühlen in einem Einfamilienhaus sowie die eines 6-stöckigen Mehrfamilienhauses. Um für die Untersuchungsobjekte eine komplette Heiz- und Kühlperiode aufzeichnen zu können, läuft das Projekt bis Oktober 2009. Zu-

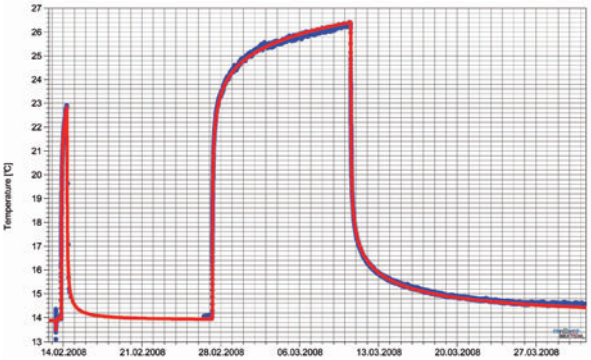


Figure 3: Comparison of measured (blue) and simulated (red) temperature.

sätzlich wurden bei den sanierten Anlagen die empfohlenen Massnahmen überprüft. Der Zwischenbericht 2008 stellte die Messmethoden, die Untersuchungsobjekte und erste Messdaten vor. Nach Ende der Heiz- und Kühlsaison 2008/09 werden die Datenlogger demontiert und die Daten ausgelesen. Anschliessend erfolgt die Auswertung der Datensätze. Die Messresultate werden im Rahmen des Schlussberichts dargestellt und miteinander verglichen. Basierend auf den daraus resultierenden Erkenntnissen wird eine Checkliste für die Auslegung von Erdwärmekörben erstellt.

Thermal Response Tests: Assessment and Validation [6]: The objectives of the project were to develop, test and implement new and innovative methods for the performance and analysis of thermal response tests (TRT). TRTs measure thermophysical properties of the ground for the purpose of dimensioning borehole heat exchangers. In a conventional TRT, a fluid circulating in a borehole withdraws (or feeds) a constant heat flow from (to) the formation. The temperature changes of the fluid associated with this process are recorded over a period of time and then analyzed. Newly developed testing equipment provided the technical premise to retrieve more information on the state of the underground with improved efficiency. As a result new analytical methods have successfully been used to interprete borehole measurements and to quantify the lateral and radial thermophysical conditions at a site (Fig. 3). These technical and analytical developments allow an optimization of thermal response testing in terms of time, cost and quality of results.

Effizienz- und thermische Behaglichkeitsermittlung einer über den Fussboden wirkenden erdgekoppelten Heiz- und Kühlanlage in Aarau [7]: Ziel des Projektes ist die praktische Überprüfung der auf Simulationen basierenden Erhebungen und Empfehlungen der über den Fussboden wirkenden Heizung und passiven Kühlung mit Erdsonden. Mit der vorgesehenen Messvorrichtung wird es möglich, das System hinsichtlich Energieverbrauch, Energieeffizienz, thermischer Behaglichkeit und Temperaturdifferenzen (Taupunkt) zu überprüfen und zu optimieren. Mit den zusätzlich in verschiedenen Tiefen der Erdsonden installierten Temperaturfühlern wird es zudem möglich, die vorgängig mit dem Erdwärmesonden-Simulationsprogramm EED ermittelten Projektdaten zu überprüfen und Aussagen hinsichtlich effektivem Wärmeentzug, Wärmerückgabe und spezifischer Entzugsleistung zu machen.

Grundlagedatenüberprüfung und Anpassungen des Groundwater Energy Designer Programms mittels realisierter Anlagen [8]: Ziel des Projektes ist eine Überprüfung bereits bestehender Anlagen hinsichtlich deren Effizienz, idealen Plazierung von Entnahme- und Rückgabebrunnen sowie Beeinflussung von Anlagen untereinander mittels Hard- und Software. Dabei sollen anhand evaluierter und mit entsprechender Messtechnik ausgerüsteter Anlagen Möglichkeiten zur Optimierung der Software Groundwater Energy Designer (GED) identifiziert und umgesetzt werden. Der GED ist auf Grund seiner Benutzerfreundlichkeit ein auch bei Bewilligungsbehörden weit verbreitetes Software-Tool. Des Weiteren ist vorgesehen, Programmanpassungen und -erweiterungen vorzunehmen, um den Abgleich von Mess- und Rechenwerten zu ermöglichen und dabei auch den wachsenden Anforderungen der Praxis Rechnung zu tragen. Der aktuelle Projektteil umfasst die Erstellung des Messkonzeptes und die Erweiterung der Software-Grundlagen.

Tiefe Geothermie

AGEPP – Alpine Geothermal Power Plant [9]: Le projet entend démontrer qu'il est possible, en exploitant des aquifères profonds du Cristallin dans les Alpes, de cogénérer chaleur et électricité avec la géothermie profonde. Le projet se subdivise en différentes phases, prévues selon un programme idéal de septembre 2005 à décembre 2011. La phase A (étude préliminaire), qui s'est terminée en juin 2006, a permis d'identifier deux sites favorables dans la Vallée du Rhône. Celui de Lavey (canton de Vaud) a été sélectionné pour la suite du projet, en raison de conditions géothermiques très favorables, de bonnes connaissances de l'hydrogéologie profonde et d'un contexte local favorable pour la production d'électricité et la valorisation de la chaleur. Dans l'aquifère thermal représenté par des gneiss fissurés jusqu'à 3-4 km de profondeur, on s'attend à rencontrer des fluides à une température estimée entre 100 et 120 °C, avec des débits de l'ordre de 50 à 75 l/s. La phase B du projet (étude de faisabilité et avant-projet de forage) est en cours depuis juillet 2007 et doit se terminer en mars 2009. Elle entend démontrer la faisabilité technique du projet de géothermie profonde à Lavey et doit préparer la réalisation du forage profond. Pour mener à bien la phase B, les études ont été réparties selon les quatre modules suivants: Captage et rejet des eaux profondes; Production d'électricité; Valorisation de la chaleur; Autorisations; communication et financement.

Machbarkeitsstudie Tiefen-Geothermie Stadt St. Gallen [10]: Zielsetzung der Machbarkeitsstudie ist es, ein Konzept für die Entwicklung einer Tiefen-Geothermie-Anlage in der Stadt St. Gallen zu erstellen. Um die Realisierbarkeit von reiner Wärmenutzung oder kombinierter Strom/Wärmenutzung abzuklären, werden die Chancen und Risiken mehrerer Varianten untersucht. Es sollen

ideale Standorte für die Tiefbohrungen identifiziert und mit den höffigsten Zielgebieten kombiniert werden. Dabei wird jeweils die produzierbare geothermische Energie den aktuellen Bohr- und Anlagekosten gegenübergestellt. Die herausgearbeiteten Empfehlungen zu Bohrtiefe, Reservoirgestein, produzierbarer Temperatur, möglicher Produktionsrate sowie die Kostenfolge sollen dem Auftraggeber eine solide Entscheidungsgrundlage für die Fortführung des Projektes bieten. Die Machbarkeitsstudie gliedert sich in die folgenden fünf Arbeitspakete (AP) auf:

- AP1 Ressourcen-Evaluation gemäss aktuellem Kenntnisstand;
- AP2 Erschliessungstechnik und -kosten;
- AP3 Erschliessungsstandorte im Raum St. Gallen;
- AP4 Kostenszenarien;
- AP5 Empfehlung und weiteres Vorgehen.

GP-La Côte : Géothermie profonde sur la Côte lémanique (canton Vaud) [11]: Le projet entend évaluer la faisabilité d'exploiter des aquifères carbonatés profonds dans des zones à forte perméabilité, situées sur la Côte lémanique (VD), au pied du Jura. En effet, il est très probable que la fracturation engendrée par les grands décrochements du Jura affecte favorablement la perméabilité des aquifères profonds du Malm et du Dogger, situés à des profondeurs moyennes de l'ordre de 800±200 m, respectivement 1'700 ± 200 m. Le projet dans son ensemble se subdivise en différentes phases, qui vont se succéder durant la période juillet 2008 – décembre 2011 (date prévue pour la mise production d'un puits profond). La phase A du projet, prévue de juillet à novembre 2008, représente une étude préliminaire sur deux sites favorables du point de vue géothermique et occupés par quatre localités (Nyon, Gland, Aubonne et Etoy). Elle doit permettre, sur la base d'une analyse préliminaire des informations existantes au niveau du sous-sol (géophysique, géologie, hydrogéologie et géothermie) et des possibilités de valorisation de la chaleur pour du chauffage à distance, de sélectionner une ou deux localités pour la poursuite du projet avec une étude de faisabilité.

Restauration du forage de Thônex en vue d'une production d'énergie thermique [12]: Le forage de Thônex a été réalisé en 1993 avec le but de trouver de l'eau chaude utilisable pour des buts énergétiques. Le forage arrivait jusqu'à une profondeur de 2 690 m mais n'avait jamais produit un débit suffisant pour l'utilisation. Il avait donc été abandonné. Des études sur l'utilisation du forage comme sonde géothermique profonde ont montré qu'au maximum une production de chaleur de 900 MWh/an pourrait être atteinte. Le projet de restauration du forage de Thônex a des buts scientifiques ainsi que des buts de démonstration. Sur le plan scientifique, le projet permets d'étudier l'état du forage, en particulier les déformations mécaniques et les quantités et propriétés des dépôts minéraux. Ces informations seront utiles pour d'autres projets de géothermie profonde en Suisse. En plus, le projet permet d'installer une station d'enregistrement sismique pour mieux caractériser la zone genevoise dans le but d'engranger des connaissances permettant de préparer des forages plus profonds de type EGS. Sur le plan de démonstration, le projet permettra d'évaluer les possibilités de valoriser, au moins partiellement, un forage «sec».

Modelling stimulation geothermal wells (FracChem – LaGeo) [13]: This project aims to improve the ability to model the impact of chemical stimulation on injectivity and productivity of geothermal wells. A number of wells in hydrothermal projects (e.g. Bad Schinznach) and EGS Projects (Soultz-sous-Forets) use chemical stimulation on a one-off basis. However, to be able to better model the phenomenon one should resort to wells that have undergone multiple chemical stimulation jobs with a documented production/injection history. The project uses data from the Berlin geothermal field in El Salvador (figure 4). The geothermal heat is extracted by conduction and convection. As a consequence, circulating hot water in the crust inevitably leads to dissolution, transport and re-deposition of minerals. In the case of heat extraction projects, the pores and the fractures in the water-bearing rocks may become clogged by mineral deposition, eventually stemming flow. This can limit the productive lifetime of an engineered geothermal system, even though heat may still be available at depth. Current research into water–rock interaction in geothermal reservoirs is directed at ways to enhance energy production and to avoid clogging of the rock openings. Such injectivity and productivity variations result from a complex inter-



Figure 4: Geothermal power plant Berlín, LaGeo, El Salvador.

play of mechanical, hydraulic, thermal and chemical processes. The degree of clogging and scale formation depends on the type of reservoir rocks and how they respond chemically to the injected fluids, as well as on reservoir and surface properties. Numerical simulation of fluid flow with coupled chemical reaction modelling is a powerful tool of choice and subject to active development in at the Crège to quantitatively understand the interplay of these effects during reservoir exploitation and to optimize the operation of a geothermal field.

Enhanced Geothermal Systems (EGS)

Durchführung einer Risikoanalyse zum seismischen Risiko des Projekts Deep Heat Mining Basel [14]*:* Der Auftrag hat zum Zweck, die besten verfügbaren wissenschaftlichen Entscheidungsgrundlagen zur Beurteilung der Tragbarkeit des Risikos des Projekts Deep Heat Mining für Basel und die trinationale Region in Form einer Risikoanalyse bereitzustellen und auszuwerten. Er beinhaltet:

- die Ermittlung und Quantifizierung in einer probabilistischen Betrachtungsweise der seismischen Gefährdung und des seismischen Risikos des Projekts Deep Heat Mining Basel sowie dessen Vergleich mit der natürlichen Seismizität;
- die Erarbeitung einer geeigneten Darstellung dieses Risikos sowie Vorschläge zur vergleichenden Bewertung der Ergebnisse;
- die Erarbeitung von Empfehlungen für das weitere Vorgehen aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse, allenfalls von verschiedenen Handlungsoptionen.

Nachmessungen Geothermiebohrung Basel1 (Projekt DHM) [15]: Seit dem Abbruch der hydraulischen Stimulation (8.12.2006) wurden in der Geothermie-Bohrung Basel 1 keine weiteren Nachmessungen durchgeführt. Augrund des gegenwärtigen Wissensstands kann davon ausgegangen werden, dass die Bohrung Basel 1 zwei potentielle geothermale Reservoirs schneidet, die für eine geothermische Nutzung weiterhin von Interesse sind. Das künstlich geschaffene Reservoir in 5 km Tiefe (unteres Reservoir) und ein hydrothermales Reservoir im Dach des kristallinen Grundgebirges zwischen 2,5–3 km Tiefe (oberes Reservoir). Für beide Reservoirs gilt, dass eine schlüssige Beurteilung des Potentials noch nicht vorgenommen werden konnte, weil wichtige Nachmessungen bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt ausstehend sind. Im vorliegenden Konzept werden verschiedenen Vorgehensweisen formuliert, die darauf abzielen das Potential der beiden Reservoirs abzuschätzen.

Nationale Zusammenarbeit

Im Berichtsjahr wurde mit den folgenden Schweizer Institutionen eng zusammengearbeitet:

- **Universitäten und Fachhochschulen:** ETHZ (Institute für Geophysik bzw. Erdwissenschaften), Hochschule Wädenswil, Université de Neuchâtel, Centre de recherche en géothermie, Crège, EPFL (Département de génie civil, Institut des sols, roches et fondations), Université de Genève (Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie), Scuola universitaria della Svizzera italiana Supsi (Istituto di Sostenibilità Applicata all'Ambiente Costruito), Haute école spécialisée de Suisse occidentale, Sion, und Hochschule für Technik und Informatik Burgdorf.
- **Stromindustrie und Wärmeversorgung:** BKW Energie AG, Bern, Aare-Tessin AG für Elektrizität (ATEL), Elektra Baselland, Industrielle Werke Basel, Geopower Basel AG, Services Industriels de Genève, Services industriels de Lausanne, Canton de Vaud: service de l'environnement et de l'énergie, Technische Betriebe St Gallen, Verband Fernwärme Schweiz (VFS).
- **Bundesämter, Agenturen und Fachverbände:** Agentur für erneuerbare Energien und Energieeffizienz (AEE, APES), Aktion für vernünftige Energiepolitik Schweiz (AVES), BAFU, Geothermie.ch, SBF, Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz (FWS), Energie-cluster, u.a.
- **Energiefachstellen der Kantone.**

Internationale Zusammenarbeit

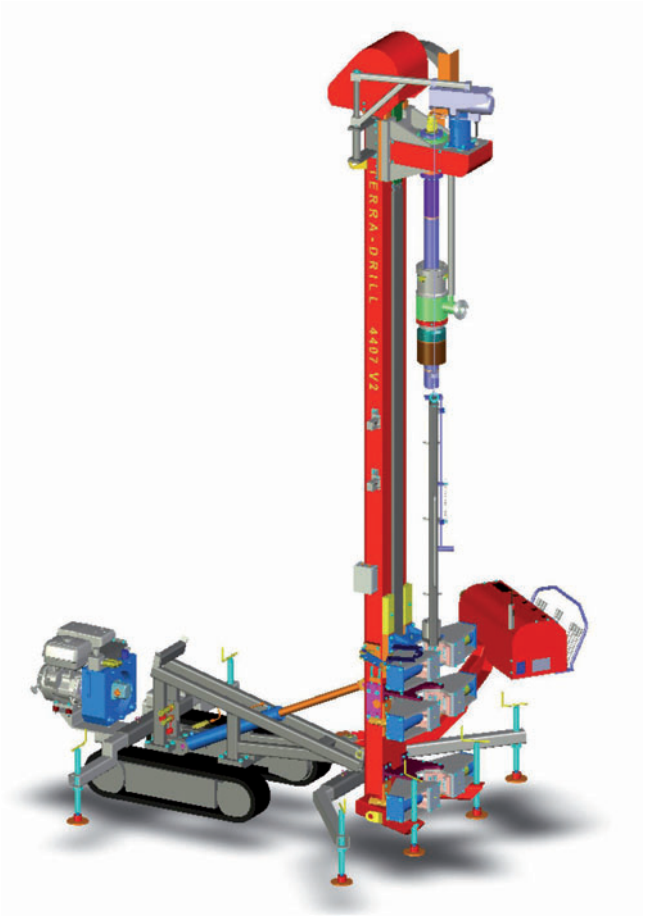
Geothermal Implementing Agreement (GIA) der IEA [16]: Mit der Teilnahme im Geothermal Implementing Agreement (GIA) der IEA kann die Schweiz regelmässigen Kontakt mit führenden Geothermie-Ländern pflegen, was den Weg zu sonst schwer zugänglichen Informationen öffnet. Zugleich lassen sich Schweizer F&E-Resultate international positionieren und durch die Kanäle

der IEA verbreiten. Die Schweiz wird im Executive Committee durch das BFE (Dr. G. Siddiqi) und einen Vertreter aus dem Beratungsbereich (Prof. L. Rybach, Vice Chairman des Executive Committee) vertreten. Derzeit sind folgende Arbeitsbereiche (Annexes) aktiv:

- Annex I: Environmental Impacts of Geothermal Energy (mit Schweizer Teilnahme);
- Annex III: Enhanced Geothermal Systems (EGS) (mit Schweizer Teilnahme);
- Annex VII: Advanced Geothermal Drilling Techniques (ohne Schweizer Teilnahme);
- Annex VIII: Direct Use of Geothermal Energy (mit Schweizer Teilnahme).

Ein Schwerpunkt in der aktuellen Tätigkeit des GIA ist die Positionierung der Geothermie als nachhaltige und Klima schonende Energie-Technologie. In diesem Zusammenhang fand im November 2008 ein Workshop in Taupo, Neuseeland statt, der Schweizer Beitrag findet sich unter [18]. Ein Positionspapier des GIA zu Handen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ist unter [19] aufgeführt.

EGS Pilot Plant. European Geothermal Project for the Construction of a Scientific Pilot Plant based on enhanced Geothermal System, Soultz- sous-Forêts, France [17]: 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 (see title photograph). Owing to careful monitoring of all reservoir parameters (seismic, thermal, hydraulic and chemical), the coming project phase will bring for the first time a wealth of data on the continuous production/injection exploitation of an EGS reservoir. The Soultz power plant has two purposes: on the one hand commercial electricity production and on the other hand a scientific platform open to the research teams and their programmes. The management of the Soultz programme is very favourable to the continuation of the work carried out by the Swiss EGS R&D team in the domains of integrated data analysis and the development and use of mathematical modelling tools for predicting physical and chemical behaviour within the underground system under producing conditions. Participation in the project planning and in the technical and scientific working groups is advantageous both to actively contribute and to expand the knowledge base on all aspects of the EGS technology.



Figur 5: Das Bohrgerät Terradrill, 2. Prototyp.

Mit verschiedenen weiteren internationalen Institutionen fanden im Berichtsjahr Kontakte statt, u.a. mit *Engine* («Enhanced Geothermal Innovative Network for Europe»), *I-GET* («Integrated Geophysical Exploration Technologies»), *EGEC* («European Geothermal Energy Council), *IGA* («International Geothermal Association»), *BRGM* («Bureau de Recherches Géologiques et Minières»), GTV (Geothermische Vereinigung e.V. – Bundesverband Geothermie, Deutschland), LaGeo (El Salvador).

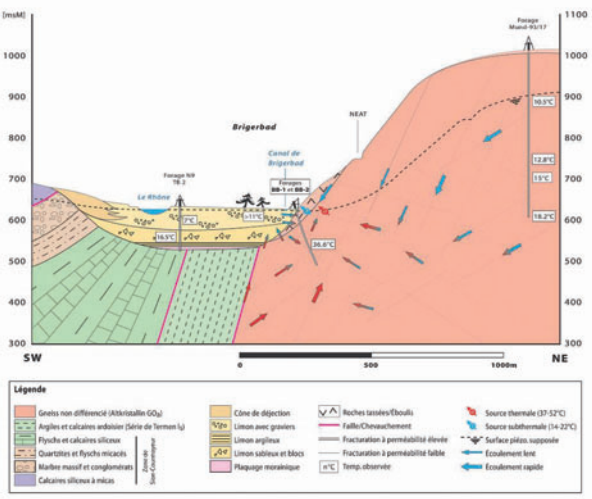
Pilot- und Demonstrationsprojekte

Erfolgskontrolle und Planungsinstrumente für EWS-Feld Hotel Dolder Zürich [18]: Im Frühling 2008 wurde nach einem umfassenden Umbau der Hotelbetrieb wieder aufgenommen. Der Um- und Erweiterungsbau wurde mit einer komplett neuen Haustechnik ausgerüstet mit dem Ziel, den Energieverbrauch zu halbieren, obwohl die Energiebezugsfläche mehr als verdoppelt wurde. Mit einer stark gedämmten Gebäudehülle werden Heizkosten und Stromverbrauch massiv gesenkt. Im Mittelpunkt des Energiekonzepts beim Neubau des *Dolder Grand Hotels* in Zürich stehen 70 Erdwärmesonden von je 152 m Länge, mit welchen Wärme und Kälte aus dem Unter-

grund gewonnen wird. Seit Herbst 2008 werden über das Haustechnik-Leitsystem kontinuierlich die Geothermiespeicher-Daten erhoben. Die Datenregistrierung funktioniert grundsätzlich gut und liefert plausible Daten. Nach Abschluss der Messkampagne werden die ermittelten Daten mit den Simulationsrechnungen verglichen und analysiert.

Entwicklung eines Vertikal-Bohrgeräts [19]: Das Projekt hat zum Ziel, ein kleines und leichtes Bohrsystem zu entwickeln, welches sich für den EWS-Anlagenbau im Wohnbereich eignet. Insbesondere EWS-Anlagen für Minergie-Bauten sollen damit rasch und kostengünstig realisiert werden können. Wegen seinen kleinen Abmessungen und der geringen Lärmentwicklung lässt sich das Bohrgerät auch in dicht überbauten und schwer zugänglichen Zonen einsetzen. Im Jahr 2008 wurde ein zweiter Prototyp gebaut, bei welchem die bisher gemachten Erfahrungen einflossen (Figur 5). Insbesondere wurden folgende Verbesserungen vorgenommen: (1) das Raupenfahrwerk wurde auf 950 mm verbreitert. (2) der Bohrwagen erhielt einen eigenen Fahrantrieb. Dieser ist so konstruiert, dass er während des Bohrens abgekoppelt werden und als direkter Antrieb für eine Spülbohrpumpe verwendet werden kann. (3) Duplexaufnahme für zeitgleiches Abteufen von Futterrohren und Imlochhammer: Die Duplexaufnahme wird die Bohrzeit stark verkürzen. Diese Entwicklung wurde beim Europäischen Patentamt angemeldet.

Pilotprojekt Geothermie Brig-Glis (Phase 2A) [20]: Brigerbad ist neben Lavey-les-Bains der bis anhin vielversprechendste potenzielle Standort für ein derartiges Energieprojekt, insbesondere weil in der Nähe auch Wärmeabnehmer verfügbar



Figur 6 : Schematischer geologischer Schnitt in südöstlicher Richtung mit konzeptionellem hydraulischen Modell der Berg- und Tiefengewässer in der Region Brigerbad. Meteorisches Wasser zirkuliert durch das Kristallin (in rot), erwärmt sich und wird am Brigerbad an die Oberfläche produziert. Auf Grund des geothermischen Gradienten wird vermutet, dass in grösseren Tiefen höhere Temperaturen vorherrschen.

sind. Jedoch gibt es bisher nur etwa 100 m tiefe Bohrungen, deren Temperatur von der Mischung des heissen, tiefen Thermalwassers mit meteorischen, oberflächennahen Wässern bestimmt ist, wie in nachfolgender Figur 6 dargestellt. Entlang dem untiefen Füllmaterial des Rhonetals treten parallel dazu am steil einfallenden Störungskontakt des nord liegenden Kristallins mit den süd liegenden Sedimenten heisse Quellen auf. Ähnlich dem Standort Lavey-les-Bains (VD) werden in Brigerbad (VS) Temperaturen der sehr tiefen Quellen von rund 110 °C vermutet, welche bei genügenden Fliessraten zur Wärme- und Stromproduktion genutzt werden könnten.

Bewertung 2008 und Ausblick 2009

Die geothermische Forschung stand auch im 2008 im Zeichen der Kontinuität. Bei der **untiefen Geothermie** wurden einerseits Projekte unterstützt, welche sich mit speziellen Anwendungen befassen, beispielsweise der Nutzung von Erdwärmesonden bzw. -sondenfeldern zur Heizung und Kühlung. Insbesondere bei grösseren, gut isolierten Gebäuden ist die (passive) Kühlung von grossem Interesse. Nach wie vor von hoher Priorität sind auch Vorhaben, welche mithelfen, die Effizienz und Qualität der Anlagen zu verbessern.

Bei den **tiefen hydrothermalen Ressourcen** wurden im Jahr 2008 mehrere neue Projekte in verschiedenen Regionen der Schweiz lanciert. Die jüngsten Erfolge mit solchen Anlagen in Deutschland haben sicher das Interesse öffentlicher und privater Institutionen gefördert. Mit diesen Projekten bestehen gute Aussichten, dass eine erste Schweizer Pilotanlage dieser Art in den nächsten Jahren realisiert werden kann. Ein wichtiger Aspekt ist dabei der Informationsaustausch zwischen den verschiedenen Akteuren in diesem Bereich, der weiterhin unterstützt werden soll.

Bei der **tiefen Geothermie bzw. den «Enhanced Geothermal Systems» (EGS)** stellt das europäische Forschungsprojekt in Soultz-sous-Fôrets einen Forschungsschwerpunkt dar. Die Inbetriebnahme der ORC-Kraftwerksanlage im 2008 war dabei ein wichtiges Etappenziel. Die Begleitung des Betriebs und die Auswertung der gesammelten Daten und Erfahrungen stehen im Zentrum der schweizerischen Beteiligung an diesem Pro-

jekt. Das schweizerische EGS-Projekt – Deep Heat Mining Basel – ist nach wie vor sistiert. Gegenwärtig ist eine Risikostudie in Bearbeitung, welche Optionen für das weitere Vorgehen aufzeigen sollte. Um aus den bisherigen umfangreichen Investitionen möglichst grossen Nutzen zu ziehen, werden Messungen an der Tiefbohrung durchgeführt, welche auch alternative Nutzungen evaluieren sollen. Ermutigend ist die Tatsache, dass die Erfahrung der im Projekt Basel involvierten Spezialisten bei ähnlichen Projekten im Ausland sehr gefragt ist.

Für das Jahr 2009 (und folgende) sind bei der Ausrichtung des Forschungsprogramms keine grundsätzlichen Änderungen geplant. Der Forschungsaufwand im untiefen Bereich wird relativ zu den Bereichen «Tiefe oder hydrothermale Geothermie» und «EGS» vermindert und wird sich auf komplexe Systeme (z.B. EWS Grossanlagen) konzentrieren. Wichtig ist, dass die Anstrengungen im Gebiet der hydrothermalen Ressourcen mit verstärkter Intensität weitergeführt werden können, um mittelfristig den Nachweis der technischen Machbarkeit erbringen zu können und die Wahrscheinlichkeit und Qualität der Reservoirerkundung und -erschliessung zu steigern. Im Bereich der «EGS» wird neben dem fortgesetzten Engagement an den EGS Projekten in Soultz und Basel sowohl an grundlegenden Problemen der hydraulischen Stimulation (e.g. induzierte Seismizität) als auch an Bohrtechnologien gearbeitet werden. Dabei ist neben der Forschungsunterstützung auch die Kontinuität bei der Förderung von Pilotanlagen unabdingbar.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2008 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch unter der angegebenen Projektnummer).

Unter der angegebenen Internet-Adresse sind die Berichte sowie weitere Informationen verfügbar.

[1] F.-D. Vuataz, (francois.vuataz@unine.ch), Crège, Neuchâtel: Implémentation de la Base de données des fluides géothermiques de la Suisse (BDFGeotherm) sur Google Earth (SB, 101'842).

[2] C. Baujard, S. Signorelli & T. Kohl, (signorelli@geowatt.ch), Schweizerische Geophysikalische Kommission (SGPK), Zürich: Geothermische Ressourcen, Erarbeitung und Bewertung des geothermischen Potentials der Schweiz, Phase 2008 (SB, 100'022).

[3] D. Pahud, (daniel.pahud@dct.supsi.ch), LEEE – Supsi, Canobbio: Manuel pour le refroidissement de bâtiments par «géo- cooling» sur sondes géothermiques verticales: critères d'intégration, potentiel de refroidissement et règles simplifiées de dimensionnement (JB, 101'295).

[4] D. Pahud, (daniel.pahud@dct.supsi.ch), LEEE – Supsi, Canobbio: Etude du potentiel d'utilisation du «géo- cooling» d'une installation avec sondes géothermiques verticales appliqué à un bâtiment administratif Minergie à Chiasso (SB, 101'291).

[5] E. Rohner, (rohner@geowatt.ch), Geowatt AG, Zürich: Erfahrungsbericht Heizen/Kühlen mit Erdwärmekörben (JB, 102'141).

[6] J. Poppei, (POJ@colenco.ch) ARGE TRT c/o Colenco Power Engineering AG, 5405 Baden-Dättwil: Innovative Improvements of Thermal Response Tests: Assessment and Validation of hydraulic testing methods (JB, 101'680).

[7] M. Eberhard (eberhard@eberhard-partner.ch) Effizienz- und thermische Behaglichkeitsermittlung einer über den Fussboden wirkenden erdgekoppelten Heiz- und Kühlanlage in Aarau (JB, 102'461).

[8] M. Eberhard (eberhard@eberhard-partner.ch), J. Poppei (joachim.poppei@colenco.ch), AF_Colenco AG, Baden: Grundlagedatenüberprüfung und Anpassungen des Groundwater Energy Designer Programms mittels realisierter Anlagen (JB, 102'885).

[9] G. Bianchetti, (bianchetti@alpgeo.ch), Alpgeo SARL, Sierre: Projet de géothermie profonde à Lavey-les-bains, étude de faisabilité (JB, 102'130).

[10] M. Huwiler (Marco.Huwiler@stadt.sg.ch), Stadt St. Gallen, Machbarkeitsstudie Tiefen-Geothermie Stadt St.Gallen JB, 102'635).

[11] P. Vallat (patrick.vallat@bluewin.ch), IFWE, Lausanne: Géothermie profonde sur la côte lémanique (JB, 102'845).

[12] D. Sidler (damien.sidler@sig-ge.ch) SIG, Genève: Valorisation de la forage géothermique à Thonex (JB, 102'779).

[13] F.-D. Vuataz, (francois.vuataz@unine.ch), Crège, Neuchâtel: Modelling stimulation geothermal wells (FracChem - LaGeo) (102'888).

[14] J. Hofer (juerg.hofer@bs.ch), Amt für Umwelt und Energie, Stadt Basel: Durchführung einer Risikoanalyse zum seismischen Risiko des Projekts Deep Heat Mining Basel (102'869).

[15] F. Ladner (florentin.ladner@geothermal.ch), Geothermal Explorers, Pratteln: Nachmessungen Geothermiebohrung Basel1 (102'676).

[16] Th. Mégel, (megel@geowatt.ch), Geowatt AG, Zürich: Teilnahme am Geothermal Implementing Agreement der IEA, Fortsetzung 2008) (JB, 41'661).

[17] F.-D. Vuataz, (francois.vuataz@unine.ch), Deep Heat Mining Association, Steinmaur: FP6 Strep EGS Pilot Plant. European Geothermal Project for the Construction of a Scientific Pilot Plant based on enhanced Geothermal System, Soultz- sous- Forêts, France (JB, 100'528).

Liste der P+D-Projekte

[18] B. Sigg, (info@doldergrand.ch), Dolder Grand Hotel, Zürich: Erfolgskontrolle und Planungsinstrumente für EWS- Feld Hotel Dolder Zürich (JB, 100'878).

[19] D. Jenne, (terra.dj@bluewin.ch), Terra AG, Brittnau: Entwicklung eines Vertikal-Bohrgeräts (JB, 102'304).

[20] M. Buser (marcos.buser@bluewin.ch), Planergemeinschaft Geothermie, Brig: Pilotprojekt Geothermie Brig-Glis (Phase IIa) (JB, 102'505).

Referenzen

[21] International Energy Agency, Implementing Agreement for a Co-operative Programme on Geothermal Energy Research and Technology (http://www.iea-gia.org/).

[22] I. Fridleifsson et al., The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change, (February 2008), http://www.iea-gia.org/documents/FridleifssonetalIPCCGeothermalpaper2008FinalRybach20May08_000.pdf.

[23] G. Siddiqi et al.,15 Years of Direct Use – District Heating Riehen, CantonBasle-City, NW Switzerland, IEA Sustainability Workshop, Taupo (New Zealand) 10 Nov 2008.

Impressum

Juni 2009
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
Druck: Ackermanndruck AG, Bern-Liebefeld
Bezug der Publikation: www.energieforschung.ch

Programmleiter
Dr. Rudolf Minder
Minder Energy Consulting
Ruchweid 22
CH-8917 Oberlunkhofen
rudolf.minder@bluewin.ch

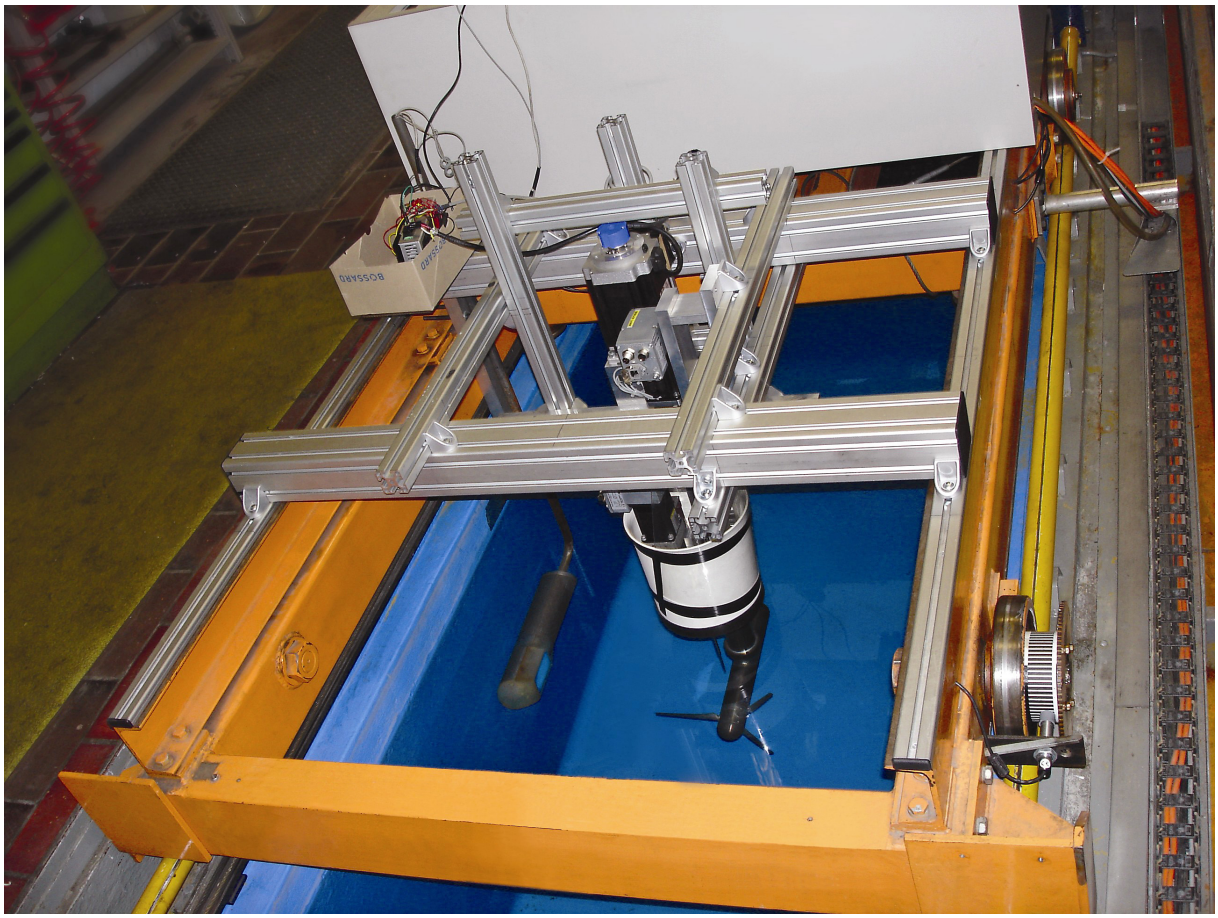
Bereichsleiter
Dr. Gunter Siddiqi
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
gunter.siddiqi@bfe.admin.ch

Rapport de synthèse 2008 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2008 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Windenergie

Robert Horbaty

robert.horbaty@enco-ag.ch



Strömungsmodell für Windkraftanlagen an der ETH Zürich (Foto ETHZ)

Versuchsaufbau im Rahmen des Projektes *Development of Wind Turbines for safe Operation in Alpine Environments*. Quantifizierung der Einflüsse von Vereisung, Böen und Turbulenzen auf die Performance einer Windturbine im komplexen Gelände.

Programmschwerpunkte

Weltweit hat sich die installierte Leistung von Windenergieanlagen zwischen 1997 und Ende 2007 von 7'475 auf 93'849 MW mehr als verzehnfacht. Diese Anlagen liefern ca. 200 TWh Elektrizität und reduzieren so die CO_2-Emissionen um jährlich über 150 Millionen Tonnen. Diese Entwicklung ist ungebrochen; der Windenergiemarkt wächst weltweit nach wie vor mit rund 30 % pro Jahr. Bis ins Jahr 2012 werden weltweit rund 280 Milliarden Franken in diese Technologie investiert werden.

Ende 2008 waren in der Schweiz 38 Windkraftanlagen mit einer Gesamtleistung von 13,6 MW installiert, welche rund 19 GWh Strom pro Jahr erzeugen. In der Schweiz hat sich eine Zulieferindustrie entwickelt, welche international agiert und in der Schweiz jährlich ca. 200 Mio. Franken umsetzt. Die Schweizer Forschung ist international vernetzt, vor allem auf dem Gebiet von Anlagen im Gebirge und an schlecht zugänglichen Standorten.

Im Vordergrund der Forschung stehen:

- **Entwickeln von Anlagekomponenten** für die Nutzung von Windenergie unter spezifisch schweizerischen Verhältnissen durch die einheimische Industrie:
  - Reduktion der Lasten mit neuen Werkstoffen Erhöhung des Energieertrags bei tiefen Windgeschwindigkeiten;
  - Einsatz der Nano-Technologie gegen Verschmutzung und Vereisung.
- **Erhöhung der Verfügbarkeit und des Energieertrages** von Windkraftanlagen an extremen Standorten:
  - Erarbeiten von Planungs-Know-how für komplexe Terrains;
  - Tests an extremen Standorten;
  - Auswertung von Betriebserfahrungen, Empfehlungen.
- **Erhöhung des «Wertes» der Windenergie**, Optimierung der Integration von Windkraftanlagen in die Stromversorgung:
  - Fore- und Nowcasting der Energieproduktion aus Wind;
  - Netzregulierung mit hohem Anteil an Windenergie;
  - Optimierung der Bedingungen für intermittierende Produktionsanlagen im Netz.
- **Erhöhung der Akzeptanz für Windenergie** unter Einbezug sozial- und umweltwissenschaftlicher Kompetenz;
- Ermitteln von Erfolgsfaktoren und -strategien; lokale Planungsprozesse, soziale Akzeptanz öffentliche Beteiligungsmodelle.

Ergänzend werden mit Pilot- und Demonstrationsprojekten die nicht technischen Hemmnisse zur stärkeren Marktdurchdringung der Windenergie reduziert und die Lücke zwischen eigentlichen Forschungsaktivitäten und der Anwendung in der Praxis geschlossen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2008

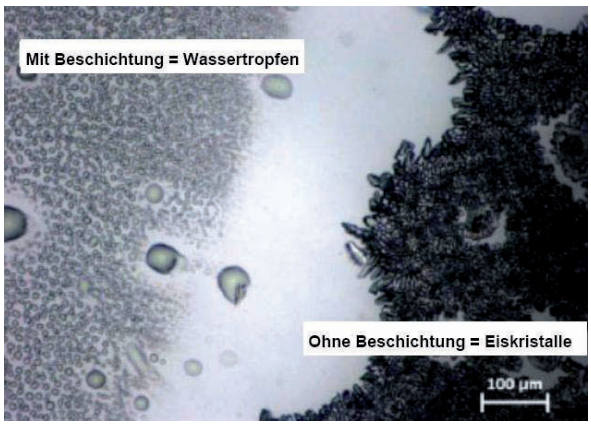
Entwickeln von Anlagekomponenten

Umfassende Standortabklärungen in gebirgigen Lagen und in Skandinavien zeigen das grosse Potenzial für Windenergienutzung in kälteren Klimazonen. Kalte Luft ist dichter, verspricht also prinzipiell höhere Leistung. Auch im Alpenraum der Schweiz und Österreichs wurden vielfältige Erfahrungen mit Windenergieanlagen gesammelt. Die Windkarte der Schweiz zeigt, dass die Winde vor allem in höheren Lagen stark sind. Die geeigneten Standorte liegen hier fast ausschliesslich mehr als 800 m über dem Meeresspiegel in turbulentem und harschem Klima, wo Vereisungen häufig sind.

Im Rahmen des Projektes *Antifreeze Beschichtung für Rotorblätter von Windenergieanlagen* [1] wurden verschiedene Polymere auf ihre Eignung als gefrierpunktsenkende Beschichtungen untersucht. Die Polymere wurden auf Glas aufgebracht und die Beschichtung in einer Kältekammer verschiedenen Luftfeuchtigkeiten und Kühlrampen ausgesetzt. Die Entstehung von Eis auf der Beschichtung wurde mit der Entstehung von Eis auf dem Glas verglichen. Es wurden Verbindungen entwickelt, welche eine Gefrierpunktsenkung auf Glasoberflächen bewirken. Diese Verbindungen sind durch den Antifreezeffekt der arktischen Fische inspiriert, deren Blut auch bei Temperaturen unter 0 °C nicht gefriert.

Es wurde gezeigt, dass Antifreezbeschichtungen möglich sind. Um aus den gefundenen Verbindungen letztlich brauchbare Beschichtungen, die Rotorblätter vor dem Vereisen schützen, herzustellen, muss jedoch noch viel Entwicklungsarbeit geleistet werden:

- der vereisungsverhindernde Effekt der Beschichtung muss unter realistischeren Bedingungen getestet werden (d. h. in einem Klimawindkanal);



Figur 1: Eine Antifreezbeschichtung auf Glas. Links: Wassertropfen auf der Beschichtung. Rechts: Eiskristalle auf unbeschichtetem Glas. (Foto ZHAW)

– Beschichtungen müssen entwickelt werden, welche die Anforderungen wie Haftung, UV-Beständigkeit, Abriebfestigkeit, Langlebigkeit etc. erfüllen.

Erhöhung der Verfügbarkeit und des Energieertrages

Vereisung beeinflusst die Planung und den Betrieb einer Windkraftanlage in unterschiedlicher Art und Weise:

– Sie führt zu einer gestörten Aerodynamik der Flügel und damit zu Produktionseinbussen.
– Vereiste Windmessgeräte auf der Gondel einer Windkraftanlage führen zu einem fehlerhaften Betrieb bis hin zur Sicherheitsabschaltung.
– Eisansatz an den Rotorblättern erzeugt Zusatzlasten und Unwuchten, welche zu Materialermüdung führen.
– Der Eiswurf von Windkraftanlagen stellt ein Sicherheitsrisiko für Passanten und Servicepersonal dar.

Um die Forschungsergebnisse des Projektes *Alpine Test Site Gütsch: Meteorological measurements and wind turbine performance analysis*, welches im Rahmen der *COST Action 727* [16] von 2005 bis 2008 durch das Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz) und durch Meteotest durchgeführt wurde, einem breiteren Publikum zugänglich zu machen, wurde 2007 eine Fachtagung zum Thema organisiert. Die gesammelten Forschungsresultate sowie die international zugänglichen Forschungsergebnisse sind nun zusätzlich in einem Handbuch *Alpine Test Site Gütsch* [2] in einer verdichteten und für den Windenergie-Planer verständlichen Art und Weise dargestellt worden.

Mit dem Projekt *Measuring and forecasting icing on structures* [3] wird das Projekt *Alpine Test Site Gütsch* nochmals erweitert. Die Vereisungsmessungen werden auf andere Gebiete der Schweiz (Schwyberg, FR und Matzendörfer Stierenberg, SO) ausgedehnt. Ausserdem werden neue Methoden zur Simulation und Vorhersage der Eisbildung an Strukturen mit Hilfe numerischer Wettermodelle erstellt.



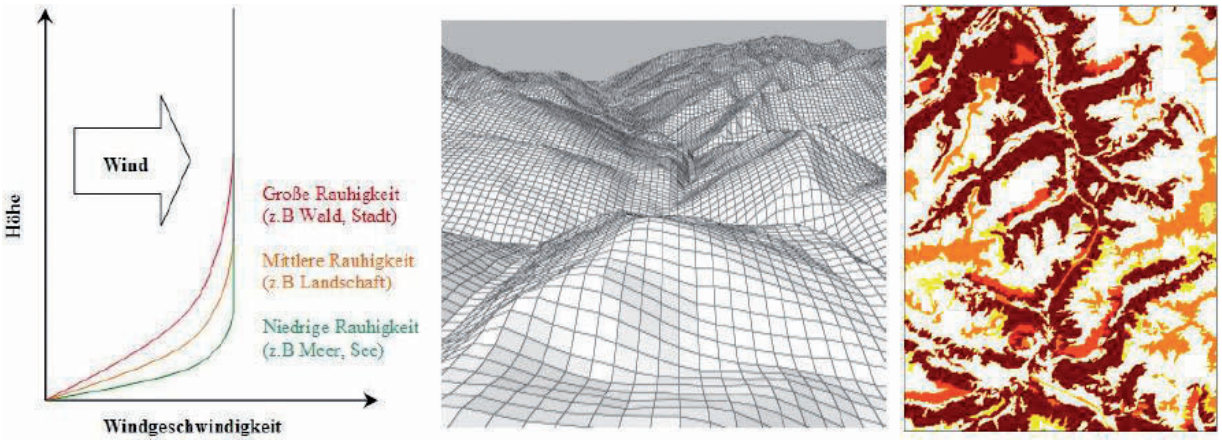
Figur 2: Die drei Messstationen Gütsch (links), Schwyberg (Mitte) und Matzendörfer Stierenberg (rechts). (Quelle: Meteotest)

Ziel des am Institut für Energietechnik an der ETH durchgeführten Projektes *Development of Wind Turbines for Safe Operation in Alpine Environments* [4] ist die Quantifizierung der Einflüsse von Vereisung, Böen, und Turbulenzen auf die Performance einer Windturbine im komplexen Gelände unter Verwendung der *sub-scale model wind turbine test facility* an der ETH Zürich. Die ermittelten Resultate könnten zur optimalen Platzierung von Windkraftanlagen im komplexen Gelände in der Schweiz verwendet werden.

Erhöhung des «Wertes» der Windenergie

Die Energiequelle Wind besitzt eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität. Diese Eigenschaft erhöht die Anforderungen bei der Einspeisung von Windstrom ins Stromnetz, da die verfügbare Energiemenge variiert, nicht steuerbar und nicht mit abschliessender Gewissheit bekannt ist. Dies führt zu deutlich höheren Fehlern bei Energieproduktionsprognosen. Die besondere Herausforderung für die Windvorhersage in der Schweiz liegt im sehr komplexen Gelände. In der Regel erreichen Vorhersagesysteme in komplexem Gelände deutlich geringere Vorhersagequalität als in flachem Gelände. Das Ziel des Projekts *Fore- und Nowcasting der Stromproduktion von Windenergieanlagen in komplexem Gelände* [5] ist es, ein für die Bedingungen und Anforderungen der Schweiz geeignetes Vorhersagesystem zu entwickeln, indem bereits vorhandene Modelle und Verfahren möglichst optimal kombiniert werden.

Das für die Schweiz angepasste Vorhersagesystem wird in Kooperation von Meteotest und dem Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz erarbeitet. MeteoSchweiz entwickelt und betreibt das hoch auflösende numeri-



Figur 3: Eingangsdaten für die CFD-Modellierung: Anströmprofil des Windes (links), Geländehöhen (Mitte) und Rauhigkeitsinformationen (rechts). (Quelle Meteotest)

sche Wettervorhersagemodell *Cosmo (Consortium for Small-scale Modelling)*.

Zudem ist geplant, das dynamische Downscaling mit dem Modell WindSim durchzuführen. Das CFD-Modell WindSim berechnet Windfelder auf der Grundlage einer dreidimensionalen, nicht linearen Strömungsmodellierung und wurde speziell für Windenergie-Modellierung in komplexem Gelände entwickelt. Das Modell berücksichtigt als Eingabedaten Orographie (Geländehöhe) und die Bodenrauhigkeit (Figur 3).

Erhöhung der Akzeptanz für Windenergie

Die Planung, Projektierung, Bewilligung und Realisierung von Windkraftanlagen (WKA) in der Schweiz ist zeit- und ressourcenaufwändig und für die Investoren oftmals mit schwer kalkulierbaren Risiken verbunden. Das liegt einerseits an der noch geringen Anzahl von realisierten Projekten, aber auch an den vielen situations- und fallspezifischen Einflussfaktoren, die bei jeder einzelnen Anlage beachtet werden müssen. Die Nutzung von Windenergie in der Schweiz wird dadurch zurzeit erschwert.

Das Projekt *Auswirkungen von Windkraftanlagen* [6] liefert konsolidierte Erkenntnisse zu projektierungsrelevanten Grundlagen und Auswirkungen von WKA, mit dem Ziel, diese für die aktuellen sowie für künftige Projekte nutzbar zu machen. Bisherige schweizerische und ausländische Erfahrungen im Windenergiebereich sind eingeflossen, um die Planung und Erstellung von WKA zu vereinfachen und zu beschleunigen sowie um Projektrisiken zu vermindern. Als Hauptprodukte dieses Projekts wurden eine Checkliste für Investoren und eine Vorlage für eine Analyse der Umweltauswirkungen erarbeitet.

Der weltweite Boom der Windenergie hat auch zur Folge, dass Projekte mehr und mehr mit Akzeptanzproblemen zu kämpfen haben – nicht nur in der Schweiz. Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen des IEA Implementing Agreement «Wind» ein neuer Task lanciert: *Social Acceptance of Wind Energy Projects: Winning Hearts and Minds* [27]. Operating Agent ist Robert Horbaty, Programmleiter der Windenergieforschung des BFE. Der schweizerische Beitrag konkretisiert sich in den folgenden Projekten:

Im Rahmen des an der Epfl in Lausanne durchgeführten Forschungsvorhaben *Social Acceptance of Wind Energy in Switzerland – To Invest or Not to Invest* [7] wird untersucht, wieso Investoren in der Schweiz im Bereich der Windenergie aktiv sind und falls sie von Investitionen absehen, welche Rahmenbedingungen geändert werden müssten.

Im Projekt *Code of Conduct für Windkraftprojekte* [8] werden mit Hilfe eines mehrstufigen partizipativen Verfahrens Instrumente und Standards erforscht, die innerhalb nützlicher Frist zur Anwendungsreife entwickelt werden können, um die Umsetzung von Windkraftprojekten in der Schweiz wirksam zu unterstützen und die heute herrschende hohe soziale Akzeptanz gegenüber der Windenergie zu stabilisieren und zu stärken. Dabei werden folgende Aspekte besonders berücksichtigt:

- Langfristige Sicherung von politischer und sozialer Akzeptanz der Entscheidungsträger, Interessengruppen, NGOs und der breiten Bevölkerung;
- Aufbau und Stärkung wertvoller und unkomplizierter Partnerschaften zwischen Interessenvertretern zur Sicherung von effizienter Planung und konstruktiven Prozessen;
- Unterstützung der Nachfrage nach Windparks, insbesondere in Gegenden, wo sowohl die Erträge als auch die Akzeptanz hoch sind;
- Minimierung des Aufwandes durch verkürzte Planungszeiten und damit verbesserte Renditen;

– Risikominimierung für Investoren, Projektentwickler, Besitzer, Betreiber und Technologie-Anbieter.

Im Vordergrund stehen das aus der Wirtschaft bekannte Instrument eines freiwilligen Code of Conduct für die Akteure der Projektentwicklung sowie andere Instrumente, die sich im Rahmen der Machbarkeitsstudie ergeben. Alle Instrumente müssen im Markt erfolgreich angewendet werden können, allen relevanten Interessengruppen und Akteuren zur Verfügung stehen sowie eine signifikante Wirkung entfalten.

Nationale Zusammenarbeit

Organisation der Windenergieforschung in der Schweiz

Der Leiter des Energieforschungsprogramms «Wind» ist gleichzeitig Geschäftsführer der Schweizerischen Windenergievereinigung «Suisse Eole». Dadurch ist eine enge Verbindung zwischen relevanten Marktanliegen und der Forschung sicher gestellt. Ein Ausschuss innerhalb des Verbandes beschäftigt sich im Sinne einer Begleitgruppe auch mit den Forschungsanliegen. An regelmässigen Treffen des Programmleiters mit dem CORE-Paten Prof. Dr. Rolf Wüstenhagen, der BFE-Bereichsleiterin Katja Maus und dem Verantwortlichen beim BFE für Marktentwicklung, Markus Geissmann, wird die Entwicklung des Programms mit den Zielen der CORE abgestimmt.

Am Laboratory of Energy Conversation LEC an der ETH Zürich baut eine Gruppe von 7 Peronen unter der Führung von Prof. Dr. Reza Abhari ein Kompetenzcenter zur Windenergieforschung in der Schweiz auf. Ein erstes Projekt ist «Development of wind turbines for safe operation in alpine environment» von Dr. Sarah Barber; weitere Forschungsarbeiten insbesondere im Zusammenhang mit Standortabklärungen im komplexen Terrain sind geplant.

Darüber hinaus findet ein reger Erfahrungsaustausch mit den kantonalen Planungsbehörden statt, insbesondere im Kontext mit der Unterstützung von Richtplanungen auf kantonaler Ebene. Aufgrund der aktuellen energiepolitischen Diskussion diente der Programmleiter häufig als Auskunftsstelle für Medien, Hersteller von Produkten und generell Windenergie-Interessierten.

Abgrenzungen zu und Synergien mit anderen Programmen

Das Forschungsprogramm Windenergie hat bereits in der Vergangenheit mit anderen Programmen aus der Energieforschung aktiv zusammengearbeitet. Diese Kooperationen wurden auch im Berichtsjahr weiter geführt. Weiter bestehen gute Kontakte zum Bereich der Photovoltaik, der Akkumulatoren, Superkondensatoren, Elektrizitätstechnologien und -anwendungen und Verkehr.

Energiewirtschaftliche Grundlagen

Vor allem im Zusammenhang mit dem Thema «Soziale Akzeptanz» von Windenergieanlagen entwickeln sich interessante Synergien, insbesondere auch im Kontext mit dem *IEA Task 28 Social Acceptance*. Eines der Ziele dieser Aktivitäten ist, die Milieus der Energieingenieure und der Sozialwissenschaftler zu diesem komplexen Thema einander näher zu bringen.

Netze

Das Thema «Intelligente Verteilnetzstrukturen» (Smart Grids) und Regelenergie für erneuerbare Energien bekommt sowohl im Zusammenhang mit einem zunehmenden Anteil an unregelmässig produzierenden Anlagen aus erneuerbaren Energien als auch bez. neuen Speichermöglichkeiten in den Batterien von elektrisch betriebenen Fahrzeugen zunehmend grössere Aktualität.

Institutionen

Folgende Forschungsinstitutionen haben Aktivitäten im Bereich der Windenergie entwickelt:

– Die EPFL (Laboratoire de Systèmes Energétiques lasen) [17] betreut Windenergie-Projekte, insbesondere auch im Zusammenhang mit der Entwicklungszusammenarbeit.

– Ebenfalls mit der EPFL, College of Management of Technology (CDM), findet eine Zusammenarbeit im Rahmen des Projektes Social Acceptance of Wind Energy in Switzerland – To Invest or Not to Invest statt. [18].

– Das Labor für Strömungsmaschinen an der ETH Zürich [19] ermittelt im Rahmen des Projektes «Development of Wind Turbines for safe Operation in Alpine Environments». Die Einflüsse von Vereisung, Böen, und Turbulenzen auf die Performance einer Windturbine im komplexen Gelände.

– An der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) arbeitet eine Gruppe um Prof. Martina Hirayama an der Entwicklung von Nano-Oberflächen zur Verhinderung von Vereisung der Rotorblätter [20].

- Das Irap (Institut für Raumentwicklung an der Hochschule für Technik Rapperswil) besitzt umfassendes Know how zur Fragestellung Windenergie und Raumplanung. [21].
- Der Dreh- und Angelpunkt zur Förderung der Windenergie in der Schweiz ist Suisse Eole, die Schweizerische Vereinigung zur Nutzung der Windenergie [22].

Sämtliche Planungsinstrumente, insbesondere ein Map-Server mit allen relevanten Aussagen zu möglichen Windenergie-Standorten sind auf der Website von «Suisse Eole» vorhanden. [23]

Internationale Zusammenarbeit

Seit 2002 beteiligt sich die Schweiz *am IEA-Projekt Wind Energy in Cold Climates (WECO)* [9]. 2008 fanden drei Treffen der Experten statt. Umfassende Informationen sind auf der Website dieses Programms zu finden [25].

Die Arbeiten beim Alpine Test Site Gütsch [16] sind eng verknüpft mit dem genannten IEA-Projekt. Dessen Resultate und Empfehlungen werden im Rahmen des Forschungsvorhabens *COST 727 Alpine Test Site Gütsch, Meteorological measurements and wind turbine performance analysis* verifiziert und einem weiteren Umfeld nutzbar gemacht. Im Jahre 2008 wurde durch das Forschungsprogramm das Handbuch *Alpine Test Site Gütsch* [2] veröffentlicht, welches die entsprechenden Resultate darstellt. Im September 2009 wird ein weiteres internationales Seminar zu diesen Fragestellungen in Andermatt stattfinden. [26]

Im Jahre 2007 wurden Aktivitäten aus dem Forschungsprogramm «Wind» lanciert, um innerhalb der IEA einen neuen Task «Social Acceptance» [27] zu starten. Am ExCo-Meeting vom 22.4.2008 in Aalborg wurde das Arbeitsprogramm des Task 28 grundsätzlich bestätigt. Ein erstes inoffizielles Treffen fand am 28.8.2008 in Bubendorf, BL, statt. Bis heute partizipieren Kanada, Deutschland, Finnland, Japan, Norwegen, Schweiz und die USA. Der offizielle Start des Task 28 findet am 20.3.2009 in Magdeburg statt.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Im Zusammenhang mit der Kostendeckenden Einspeisevergütung (KEV) wird das Interesse vor allem an der Optimierung der Anlagenperformance durch die Planer und Betreiber zunehmen. Mit der Aufstockung der P+D-Mittel wird auch hier wieder ein vermehrtes Engagement sichtbar. Der im Konzept Windenergie Schweiz [15] dargelegte Grundsatz, Windenergieanlagen an möglichst gut geeigneten Standorten zu konzentrieren geniesst breite Anerkennung – er wird insbesondere auch von den Kantonen im Rahmen der kantonaler oder regionaler Grundlagenarbeiten angewandt.

Nach Schätzungen des Bundesamts für Energie bestehen nur für einen Viertel der unter KEV angemeldeten Anlagen Festlegungen in den kantonalen oder regionalen Richtplänen. Für die weitere Entwicklung der Windenergie ist es deshalb absolut zentral, dass möglichst rasch und möglichst flächendeckend raumplanerische Festlegungen in den kantonalen Richtplänen vorhanden sind. Diese werden helfen;

- zu verhindern, dass bedeutende finanzielle Mittel für die Projektentwicklung an Standorten investiert werden, welche aufgrund der raumplanerischen Interessensabwägung nicht bewilligungsfähig sind.
- Anzahl und Umfang von Streitfällen für die Bewilligung von Windenergieanlagen möglichst gering zu halten.
- die Entwicklung für künftige Projekte an die geeigneten Standorten zu lenken.
- die Akzeptanz der Windenergienutzung in der Schweiz auf hohem Niveau zu halten und somit das längerfristige Potenzial der Windenergie in der Schweiz positiv zu beeinflussen.

Das Rahmenprojekt *Unterstützung kantonale Raumplanung Windenergie* [10] ermöglicht eine gezielte Unterstützung von kantonalen und regionalen Arbeiten zur Behandlung der Windenergie in der Raumplanung mit einem Rahmenvertrag zwischen BFE und dem Fachverband Windenergie «Suisse Eole». In den Kantonen Basellandschaft, Aargau, Schaffhausen, Bern (Region Emmental/ Oberaargau) und Neuenburg wurden entsprechende Vorhaben unterstützt und durch Suisse Eole begleitet.

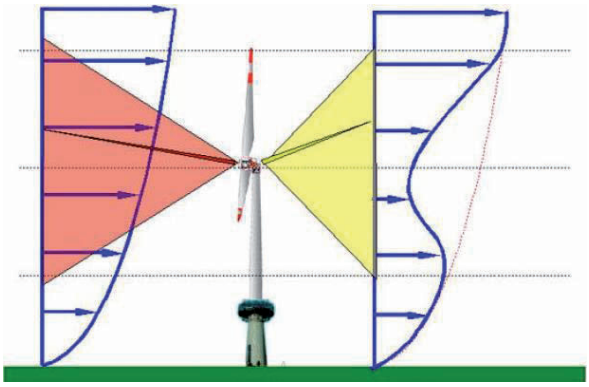
Die Qualität eines Standortes hängt entscheidend von den vorhandenen Windverhältnissen ab. Mit dem *P+D-Rahmenprojekt Unterstützung Windmessungen* [11] werden folgenden Ziele verfolgt:

- Gezielte Unterstützung von Windmessungen/ Windgutachten, damit die ermittelten Daten öffentlich zugänglich gemacht werden;
- Generelle Erhöhung der Genauigkeit des Windmodells Schweiz durch eine breitere Datengrundlage;

– Grundlagen zur Identifizierung geeigneter Standorte;
– für die Erarbeitung kantonaler Windenergiekonzepte zur Konkretisierung des Konzepts Windenergie Schweiz;
– für unabhängige Projektentwickler.

Das Planungsrisiko für Projektentwickler wird durch einen finanziellen Beitrag an die Windmessung/Windgutachten reduziert. Suisse Eole führt dieses Förderungsprogramm administrativ. An folgenden Standorten wurden im Jahre 2008 Windmessungen durchgeführt und mit P+D-Mittel unterstützt: Dürrenroth, Fischbach, Haldenstein, Heimisbach, La Joux-du-Plâne, Lindenberg, Männlichen, Sanetsch, Schwengimatt und Twann. Die entsprechenden Resultate stehen nach einer gewissen Sperrfrist der Allgemeinheit über die Planungsgrundlagen auf der Website von «Suisse Eole» [23] zur Verfügung.

Ein Lidar ist ein hochmodernes Messsystem zur berührungslosen, dreidimensionalen Erfassung des Windes mit hoher räumlicher Auflösung. Überall dort, wo sich der Wind räumlich und zeitlich ändert, kann dies mit dem Gerät genau, schnell und in grösseren Höhen erfasst werden (siehe Figur 4). Die mittlere Windverteilung in hügeligem Gelände ist z.B. für die Festlegung rentabler Standorte von Windenergieanlagen von grossem Interesse. Im Projekt *Lidar für die Schweiz, Beschaffung und Verwaltung* [12] hat das BFE ein Lidar-Gerät beschafft, übergibt dieses aber zur treuhänderischen Verwaltung an den Branchenverband «Suisse Eole». Diese muss das Gerät für Forschungsprojekte zur Verfügung stellen. In



Figur 4: Das Messen mit einem Lidar erlaubt das Erstellen von Wind-Profilen in mehr als 200 m Höhe.

der übrigen Zeit können Marktteilnehmer, die über genügende Fachkenntnisse verfügen, das Gerät für eigene Messprojekte gegen Entgelt ausleihen. Erste Erfahrungen werden 2009 vorliegen.

Die Betriebserfahrungen der installierten Windenergieanlagen werden kontinuierlich erfasst werden. Die entsprechenden Erfahrungen dienen weiteren Projektentwicklern zur Optimierung ihrer Vorhaben.

Mit über 2'400 Volllaststunden ist die Performance der 2-MW-Anlage Enercon E70 der Firma Rhoneole in Collonges im Kanton Wallis mit Küstenstandorten vergleichbar. (*Campagne de mesures (Erfolgskontrolle) 2-MW éolienne à Collonges VS* [13]).

Im Projekt *Betriebsresultate der Windenergieanlage Feldmoos* [14] in Rengg/Entlebuch werden auf 1020 m.ü.M. bei einer 900-kW-Windenergieanlage die Betriebsergebnisse gesammelt und ausgewertet.

Bewertung 2008 und Ausblick 2009

Der Bundesrat hat am 14.3.2008 die Einspeisevergütung (KEV) für die Windenergie auf 17 – 20 Rp./kWh festgelegt. Dies unter Missachtung der Berechnungen des BFE, der Windenergiebranche und von externen Experten. Trotzdem wurden bis Ende 2008 Projekte angemeldet, welche insgesamt rund 1'200 GWh erzeugen könnten. Da für die ersten Anmeldungen nur rudimentäre Informationen vorliegen müssen, ist es zum heutigen Zeitpunkt relativ schwierig vorher zu sagen, wie viele dieser Projekt letztlich auch realisiert werden – insbesondere aufgrund der tiefen Entschädigungen durch die KEV.

Analysen des Fachverbandes weisen heute Projekte im fortgeschrittenen Planungsstand aus, welche rund 150 GWh generieren könnten. Im Jahre 2008 hat sich die installierte Leistung der Windkraftanlagen in der Schweiz nicht wesentlich erhöht. Von den 38 Anlagen, welche während des ganzen Berichtsjahrs in Betrieb waren, wurden rund 19 GWh Elektrizität erzeugt.

Trotz den veränderten Rahmenbedingungen, z.B. *Kostendeckende Einspeisebedingungen* [28] oder *Konzept Windenergie Schweiz* [15] bestehen jedoch weiterhin planerische und betriebstechnische Unsicherheiten für Projektentwickler, welche im Rahmen bisheriger oder neuer Forschungs- oder P+D-Projekte geklärt werden, u.A.:

– Definieren und Durchsetzen von Qualitätsanforderungen an Projekte; wirkungsvolle Qualitätssicherung, Alpine Test Site Gütsch, Handbuch [2];
– Quantifizierung der Einflüsse von Vereisung, Böen, und Turbulenzen auf die Performance einer Windturbine im komplexen Gelände De-

velopment of Wind Turbines for safe Operation in Alpine Environments [4];

- Genaue und langfristige Vorhersage der Windressourcen, z.B. Fore- und Nowcasting der Stromproduktion von Windenergieanlagen in komplexem Gelände [5]
- Konsolidierte Erkenntnisse zu projektierungsrelevanten Grundlagen und Auswirkungen von WKA Auswirkungen von Windkraftanlagen [6]
- Diskussion um Akzeptanz bei mehr Projekten, Angst vor generellem Wildwuchs, z.B. Social Acceptance of Wind Energy in Switzerland – To Invest or Not to Invest [7];
- Erforschung von Instrumenten und Standards um die Umsetzung von Windkraftprojekten in der Schweiz wirksam zu unterstützen und die heute herrschende hohe soziale Akzeptanz gegenüber der Windenergie zu stabilisieren und zu stärken. Code of Conduc» [8];
- Unterstützung von kantonalen raumplanerischen Aufgaben im Zusammenhang mit der Nutzung der Windenergie Unterstützung kantonale Raumplanung Windenergie [10];
- Fördermittel für Standortabklärungen P+D-Rahmen-Projekt Unterstützung Windmessungen [11];
- Zur Verfügungsstellung eines Messgerätes zur Ermittlung der Windressourcen in grossen Höhen, LiDAR für die Schweiz, Beschaffung und Verwaltung [12].

Energieforschungskonzept 2008–2011:

Anlässlich der Präsentation des Forschungskonzeptes für die Windenergie bei der CORE am 9.9.2008 genehmigte dieses Führungsgremium der nationalen Energieforschung das vorgelegte Konzept [24]. Im Vordergrund der Forschung stehen weiterhin:

- Entwickeln von **Anlagekomponenten**, z.B. Produkteentwicklung im Bereich Antifreezebeschichtungen; Entwicklung funktionstüchtiger Eissensoren;
- Erhöhung der Verfügbarkeit und des Energieertrages von Windkraftanlagen an extremen Standorten, z.B. Erstellen einer Vereisungskarte Auswirkungen der Vereisung auf das Betriebsverhalten und den Energieertrag von Windkraftanlagen im Jurabogen;
- Erhöhung des «Wertes» der Windenergie, z.B. Entwickeln eines Produktes zu «Fore- and Nowcasting»
- Erhöhung der Akzeptanz für Windenergie, z.B Weitere Entwicklung des Code of Conduct, akzeptiertes Vorgehen bei der Planung Projekt «Vorher/Nachher» zur Ermittlung der effektiven Auswirkungen.

Pilot- und Demonstrationsprojekte schliessen die Lücke zwischen den eigentlichen Forschungsresultaten und der Anwendung in der Praxis. Die über den Fachverband Suisse Eole eingeleiteten Förderinstrumente haben sich bewährt.

Mit den Forschungsresultaten bezüglich des Betriebs von Windkraftanlagen unter turbulenten und vereisenden Bedingungen erarbeitet sich die Schweiz auch internationales Renommée im Bereich der Windenergienutzung im kalten Klima.

Mit dem IEA-Projekt *Social Acceptance* [27] werden die mittlerweile umfassenden Erfahrungen in Akzeptanzfragen in unserem Land international vernetzt – im Sinne von besseren und rascher realisierbaren Projekten.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2008 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

(siehe www.energieforschung.ch unter der angegebenen Projektnummer)

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

[1] Martina Hirayama (martina.hirayama@zhwin.ch, www.zhaw.ch/de/zhaw.html zhaw, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Winterthur, Antifreeze Beschichtungen für Rotorblätter von Windenergieanlagen (SB), 101'903.

[2] Stefan Kunz, René Cattin (kunz@meteotest.ch, www.meteotest.ch), Meteotest, Bern: Alpine Test Site Gütsch, Handbuch und Fachtagung (SB) 101'318 www.meteotest.ch/cost727/index.html.

[3] René Cattin (cattin@meteotest.ch, www.meteotest.ch), Meteotest, Bern: Measuring and forecasting icing on structures (JB).

[4] Sarah Barber, (barber@lec.mavt.ethz.ch), www.lec.ethz.ch/ Institut für Energietechnik, lec, eth Zürich, ML J 24: Development of Wind Turbines for safe Operation in Alpine Environment (JB).

[5] Stefan Kunz, René Cattin (kunz@meteotest.ch, www.meteotest.ch), Meteotest, Bern: Fore- und Nowcasting der Stromproduktion von Windenergieanlagen in komplexem Gelände (JB).

[6] Walter Ott, Yvonne Kaufmann, (walter.ott@econcept.ch), www.econcept.ch/ Econcept AG, Zürich: Auswirkung von Windkraftanlagen in der Schweiz (SB), 101'358.

[7] Professor Christopher Tucci, Mary Jean Bürer (maryjean.burer@epfl.ch, cdm.epfl.ch/homepage.php, epfl, College of Management of Technology (CDM), Lausanne: Social Acceptance of Wind Energy in Switzerland – To Invest or Not to Invest (JB).

[8] Pierre Strub, Christine Ziegler (info@pierrestrub.ch), www.pierrestrub.ch/, Pierre Strub, freischaffender Berater; Code of Conduct für Windkraftprojekte (SB) 102'553.

[9] Patricia Weis-Taylor, (pwt_communications@comcast.net), www.ieawind.org/nrel iea-Implementing Agreement on Wind Energy Research and Development, Task 19 Wind Energy in Cold Climates: arcticwind.vtt.fi/. (JB).

Liste der P+D-Projekte

[10] Reto Rigassi, Robert Horbaty, info@suisse-eole.ch; www.wind-energie.ch, Suisse Eole, Bubendorf: *Unterstützung kantonale Raumplanung Windenergie* (JB).

[11] Reto Rigassi, Robert Horbaty, info@suisse-eole.ch; www.wind-energie.ch, Suisse Eole, Bubendorf: P+D-Rahmen-Projekt Unterstützung Windmessungen (JB).

[12] Reto Rigassi, Robert Horbaty, info@suisse-eole.ch; www.wind-energie.ch, Suisse Eole, Bubendorf: *LiDAR für die Schweiz, Beschaffung und Verwaltung* (JB).

[13] Jean-Marie Rouiller (jean.marie.rouiller@lausanne.ch www.lausanne.ch) Services industriels de Lausanne, *Lausanne*, *Campagne des mesures (Erfolgskontrolle) 2MW éolienne à Collonges VS.*

[14] Roland Aregger (info@windpower.ch, www.windpower.ch), Windpower AG, *Entlebuch:* Betriebsresultate der Windenergieanlage Feldmoos (JB).

Referenzen

[15] *Konzept Windenergie Schweiz,* Grundlagen für die Standortwahl von Windparks, Bundesamt für Energie (BFE), Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), Autoren Meteotest, Nateco, Metron Raumentwicklung AG, Atelier North & Robyr Soguel, Bern 2004 www.wind-energie.ch/fileadmin/PDF/Accueil/KonzeptWindenergieCH-d.pdf.

[16] *Alpine Test Site Gütsch, Website zu diesem COST 727-Projekt* www.meteotest.ch/cost727/index.html.

[17] *epfl, Ecole Politechnique Fédéral de Lausanne*, Laboratoire de systèmes énergétiques lasen: lasen.epfl.ch/page39406.html.

[18] *epfl, College of Management of Technology (CDM)*, Lausanne, cdm.epfl.ch/homepage.php.

[19] Prof. R. Abhari, Dr. S. Barber, *Labor für Strömungsmaschinen an der eth Zürich*, www.lsm.ethz.ch/.

[20] *ZHAW, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Winterthur*, Martina Hirayama (martina.hirayama@zhwin.ch, www.zhaw.ch/de/zhaw.html.

[21] Kurt Gilgen, Alma Sartoris, (irap@hsr.ch), www.irap.hsr.ch/, irap Institut für Raumentwicklung an der Hochschule für Technik Rapperswil: *Planerische Voraussetzungen für die Nutzung der Windenergie* (SB).

[22] *Schweizerische Vereinigung für Windenergie, Suisse Eole*: www.suisse-eole.ch.

[23] *Windenergie Daten der Schweiz* www.wind-data.ch/.

[24] *Energieforschungsprogramm «Windenergie» 2008 –2011*, ausgearbeitet durch R. Horbaty, von der CORE am 9.9.2008 zur Umsetzung freigegeben.

[25] *Wind Energy in Cold Climate,* Website des IEA Task 19 «WECO», arcticwind.vtt.fi/.

[26] *Veranstaltung zur Vereisung, IWAIS,* Sept. 2009 in Andermatt www.iwais2009.ch/.

[27] Patricia Weis-Taylor, (pwt_communications@comcast.net), www.ieawind.org/ NREL IEA-Implementing Agreement on Wind Energy Research and Development, Task 28 *Social Acceptance of Wind Energy Projects:* (JB) www.socialacceptance.ch/.

[28] Unterlagen zur Kostendeckenden Einspeisvergütung kev von Windkraftanlagen in der Schweiz, Bundesamt für Energie www.bfe.admin.ch/themen/00612/02073/index.html?dossier_id=02168&lang=de.

Impressum

Juni 2009
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
Druck: Ackermanndruck, Bern-Liebefeld
Bezug der Publikation: www.energieforschung.ch

Programmleiter
Robert Horbaty
ENCO AG
Wattwerkstrasse 1
CH-4416 Bubendorf
robert.horbaty@enco-ag.ch

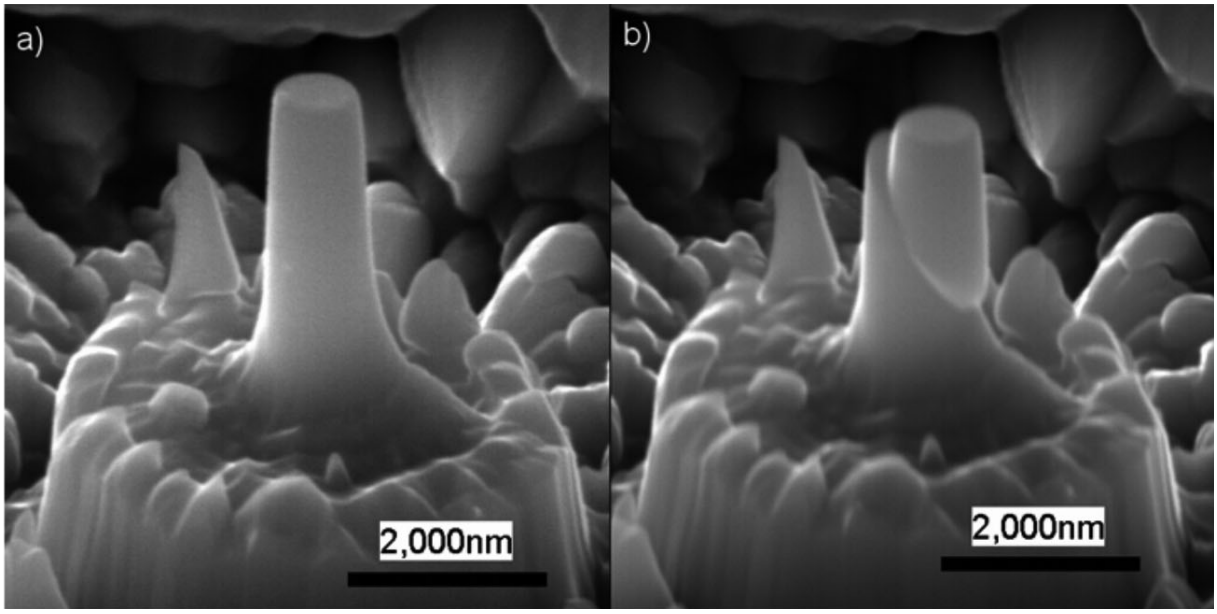
Bereichsleiterin
Dr. Katja Maus
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
katja.maus@bfe.admin.ch

Rapport de synthèse 2008 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2008 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Kerntechnik und Nukleare Sicherheit

Jörg Dreier

joerg.dreier@psi.ch



Kleinstproben für Festigkeitsuntersuchungen

Die beiden Fotos zeigen eine Kleinstprobe links vor und rechts nach der Druckbelastung. Solche Proben können, falls ihr Festigkeitsverhalten für das ganze Bauteil repräsentativ ist, für die «zerstörungsfreie» Zustandsüberwachung eingesetzt werden.

Programmschwerpunkte

Die nukleare Energieforschung findet in der Schweiz hauptsächlich im Forschungsbereich Nukleare Energie und Sicherheit (NES) des Paul Scherrer Institutes (PSI) statt, während die Ausbildung in der Kerntechnik primär die Aufgabe der Eidgenössischen Technischen Hochschulen von Zürich und Lausanne ist. Die Verordnung über die Forschungsanstalten des ETH-Bereichs bildet die Basis für die Mission des Forschungsbereichs NES. Sie wird ferner bestimmt durch die Bedürfnisse an Forschung und wissenschaftlichen Dienstleistungen der nuklearen Gemeinschaft in der Schweiz, d.h. der Betreiber der Kernkraftwerke (KKW), die einen sicheren und wirtschaftlichen Betrieb ihrer (alternden) Reaktoren anstreben, der Entsorgungsorganisation Nagra und der Aufsichtsbehörde HSK, welche die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen durch die KKW kontrolliert. Alle diese Partner sind zudem daran interessiert, dass mittel- und langfristig eine adäquate Anzahl von Nachwuchsspezialisten der Kerntechnik erhalten bleibt, um Verantwortung im Bereich der nuklearen Stromerzeugung zu übernehmen.

Der Wert der nuklearen Energieforschung wird sowohl am PSI als auch innerhalb des ETH-Bereiches anerkannt, und ihr Umfang soll daher mindestens stabil gehalten werden. Für die strategische Planung wird weiter angenommen, dass heutige Reaktoren durch neue, mit den Nachhaltigkeitsgeboten noch kompatiblere ersetzt werden, was inzwischen durch die Einreichung von drei Rahmenbewilligungsgesuchen auch bestätigt wurde, und dass ein Lager für radioaktive Abfälle in der Schweiz gebaut werden soll. Die erforderliche hohe Flexibilität und Robustheit der Forschung werden durch Forschung auf generischen Gebieten, durch Verstärkung der Vernetzung innerhalb des PSI und durch Aufnahme neuer Hauptaktivitäten im Rahmen internationaler Zusammenarbeiten sichergestellt.

Die strategischen Arbeitsgebiete des NES umfassen daher folgende Hauptpunkte:

- Beiträge zum sicheren und wirtschaftlichen Betrieb der existierenden Kernkraftwerke in der Schweiz und zu Sicherheitsnachweisen für die geologische Endlagerung von Abfällen durch Stärkung der wissenschaftlichen Grundlagen in den entsprechenden Gebieten;
- Unterstützung der KKW-Betreiber und der Sicherheitsbehörde, sowie die Sicherstellung einer Stand-by-Funktion in Schlüsselgebieten, insbesondere jene, welche ein Hotlabor benötigen;
- Bereitstellung von Input für Entscheidungen der «Stakeholders»;
- Förderung der Kernenergie mittels F&E in Richtung erhöhter Nachhaltigkeit, einschliesslich Sicherheit und Wirtschaftlichkeit;
- Angebot eines breiten Spektrums von Möglichkeiten für die Ausbildung junger Kernfachleute mit Erfahrung auch in anderen Energiequellen;
- Unterstützung von und Nutzen aus der weltweit eingeleiteten «Renaissance» der Kernenergie, und deren Anwendung auf die aktuellen Bedürfnisse in der Schweiz.

Der NES ist in fünf Forschungslabors strukturiert, entsprechend spezifischen wissenschaftlichen und technischen Kompetenzfeldern; und er betreibt das einzige Hotlabor in der Schweiz, sowie darüber hinaus die Reaktorschule für angehende Reaktoroperateure (Techniker HF).

Labor für Reaktorphysik und Systemverhalten (LRS)

Die vier Hauptprojekte im Rahmen der aktuellen LRS-Aktivitäten sind:

- LWR-Proteus: Messung reaktorphysikalischer Grunddaten für moderne, komplexe Brennstoffbündel in der kritischen Anlage Proteus zur Validierung von Computercodes und zur Reduktion von deren Unsicherheiten;
- LWR-Upgrade: Umbau und Ertüchtigung der Anlage Proteus für Messungen an hoch abgebranntem Brennstoff;
- Stars: Entwicklung, Betrieb und Unterhalt eines komplexen Codesystems inklusive Datenbasis für Sicherheitsanalysen (Transiente Systemanalysen mit Unsicherheitsanalyse, Brennstoff-Modellierung, Neutronikanalysen inklusive Kritikalitätssicherheit) für die Schweizer KKW;
- Fast: Entwicklung und Implementierung eines Codesystems nach dem Stand der Technik für Sicherheitsanalysen von nuklearen Systemen mit schnellen Neutronenspektren.

Die Aktivitäten im LRS haben einen direkten Bezug zur Kerntechnik-Ausbildung an der EPFL (Fission); die Forschungsprojekte im Labor bestimmen weit gehend den Rahmen von Doktor- und Diplomarbeiten.

Labor für Thermohydraulik (LTH)

Die Aktivitäten im LTH fokussieren auf die Anwendung von Kenntnissen zur Wärme- und Stoffübertragung und der Hydraulik auf relevante Sicherheits- und Auslegungsfragen heutiger und zukünftiger Kernreaktoren. Dabei werden hinsichtlich der Sicherheitsbeurteilung sowohl

auslegungs- als auch auslegungsüberschreitende Unfallbedingungen untersucht. Die zwei Hauptprojekte im Rahmen der aktuellen LTH-Aktivitäten sind:

- Alpha: Bestätigung von Auslegungsmerkmalen passiver Sicherheitssysteme für fortgeschrittene LWR mittels grossmassstäblicher Integraltests; experimentelle Untersuchung grundlegender Phänomene im Primärkreislauf und im Containment (Zweiphasenströmungsphänomene wie z.B. Blasenströmungen oder kritische Wärmestromdichten, Mischung/Stratifizierungs-Phänomene etc.) mit Separateffekt-Tests (Versuchsanlagen Panda – grossmassstäblich/Containment – und Linx; Ewicklung und Validierung neuer Methoden und Computercodes, einschliesslich 3D-Effekte u.a. mit CFD (Computational Fluid Dynamics)-Programmen,
- Schwere Unfälle: Experimentelle Untersuchung hauptsächlich zum Aerosolverhalten (derzeit nach einem Rohrbruch im Dampferzeuger in der Artist-Anlage) und der Jodchemie während postulierter schwerer Unfälle; Entwicklung und Validierung von Computercode-Modellen, Nutzung der Codesysteme zur Bestimmung der Quellterme für die Schweizer KKW.

Labor für Nukleare Materialien (LNM)

Das LNM untersucht (insbesondere stark radioaktive) Materialien und Komponenten und ihre umgebungsbedingten Veränderungen, u.a. durch (a) Studium der Alterungsvorgänge und damit gekoppelter Komponentenschäden, (b) Analyse des Verhaltens heutiger und zukünftiger nuklearer Brennstoffe im Reaktor und (c) Modellierung von mikrostrukturellen Veränderungen in nuklearen Werkstoffen und experimentelle Validierung dieser Modelle. Die drei Hauptprojekte im Rahmen der aktuellen LNM-Aktivitäten sind:

- Hochtemperaturmaterialien: Charakterisierung von Werkstoffen für den Einsatz in (insbesondere gasgekühlten) Reaktoren der Generation IV bei signifikant höherer Betriebstemperatur und stärkerer Strahlung; Entwicklung mechanistischer Modelle vom atomaren Niveau bis hin zum Kontinuum zur Voraussage des Werkstoffverhaltens. Experimentelle Validierung der Modelle durch fortgeschrittene spektroskopische Methoden, insb. Einsatz von Synchrotron-Strahlung;
- Nukleare Brennstoffe: Mikrostrukturelle/mikromechanische Untersuchungen sowie modelltheoretische Arbeiten zur Alterung von Kerneinbauten (Brennstäbe, Strukturmaterialien); wissenschaftliche Begleitung der Untersuchung von Schäden und Identifizierung von Versagensursachen; Erprobung von Ansätzen für die Herstellung von Generation IV Brennstoffen und der dazugehörigen Brennstoffzyklen;
- Bauteilsicherheit: Feststellung von Ermüdungs- und Korrosionsrissen in einem frühen Stadium ihrer Bildung mittels zerstörungsfreier Methoden (z.B. elektrochemisches Rauschen, Seebeck-Koeffizient, mikromagnetische Kenngrössen) basierend auf mikrostrukturellen Veränderungen; experimentelle Bestimmung qualitätsgesicherter Daten für Spannungsrisskorrosion und thermomechanische Ermüdung für Stähle unter KKW-Betriebsbedingungen.

Labor für Endlagersicherheit (LES)

Das LES hat zwei Aufgaben: (a) ein F&E-Programm zur Stärkung der wissenschaftlichen Basis für die Entsorgung nuklearer Abfälle durchzuführen, und (b) zusammen mit dem SLS (Swiss Light Source)-Team eine Mikro-Xas-Strahllinie zu betreiben. Die zwei Hauptprojekte im Rahmen der aktuellen LES-Aktivitäten sind:

- Unterstützung des Bundes und der Nagra bei ihrer Aufgabe, radioaktive Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung sowie aus den KKW sicher zu entsorgen. Die Aktivitäten umfassen grundlegende Endlagerchemie, Radionuklid-Chemie und -Physik auf geologischen Grenzflächen und Radionuklidtransport. Die Resultate werden bei umfassenden Sicherheitsnachweisen Anwendung finden,
- Betrieb einer Strahllinie an der SLS für Spektroskopie mit harten Röntgenstrahlen, die hohe räumliche Auflösung erfordern. Die Strahllinie umfasst auch das Femto-Projekt zur Untersuchung zeitabhängiger Phänomene.

Labor für Energiesystem-Analysen (LEA)

Das LEA, ein PSI-Labor des NES unter gemeinsamer Führung mit dem Forschungsbereich «Allgemeine Energie» (ENE) befasst sich mit übergeordneten Aspekten der Energiebereitstellung. In Zusammenarbeit auch mit externen Partnern (ETHZ und viele andere) decken die LEA-Aktivitäten drei Hauptgebiete ab:

- Technologie-Bewertung (Projekt GaBe): Entwicklung und Implementierung von Methoden und Datenbanken nach dem Stand der Technik für die interdisziplinäre Bewertung von Energieversorgungsoptionen zur Unterstützung rationeller und nachhaltiger Entscheidungen,
- Energieökonomie: Durchführung quantitativer Analysen von Energiesystemen auf schweizeri-

scher, europäischer und globaler Ebene zur Verbesserung des Verständnisses der Wechselwirkungen zwischen Energie, Ökonomie, Umwelt und Technik,

– Risiko und menschliche Zuverlässigkeit: Beiträge zur Lösung aktueller und aufkommender Fragen bei der Behandlung menschlicher Faktoren im Rahmen der probabilistischen Sicherheitsanalysen (PSA).

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2008

Um die unterschiedlichen Bedürfnisse und Interessen der schweizerischen Kernenergiegemeinschaft entsprechen zu können, geht bereits aus der obigen Einleitung deutlich hervor, dass die Arbeiten im Rahmen der NES-Projekte breit gefächert und sehr facettenreich sein müssen. Eine detaillierte Berichterstattung darüber würde den Rahmen dieses Bereichtes bei weitem sprengen. Die untenstehenden Ergebnisse entsprechen daher nur Teilen der jeweiligen Projekte und sind entsprechend als Beispiele oder Teilresultate zu verstehen.

Sicherheit und sicherheitsbezogene Betriebsprobleme schweizerischer Kernkraftwerke

Stars (Sicherheitsexpertise und -forschung bezüglich Transientenanalysen der Reaktoren in der Schweiz) [1]

Mit dem Projekt Stars wurde im Labor für Reaktorphysik und Systemverhalten (LRS) während der letzten Jahre eine unabhängige Kompetenz zur Beurteilung des transienten Verhaltens von Leichtwasser-Reaktoren (LWR) aufgebaut, die mittlerweile auch international genutzt wird. Diese Arbeit erfordert ein multidisziplinäres Vorgehen, das heute auch mit «Multi-Physics» bezeichnet wird und bezüglich Stars darin besteht, Analyse-Techniken aus den Bereichen Neutronik, Thermohydraulik und Thermomechanik zu einer integralen Analyse zusammenzuführen.

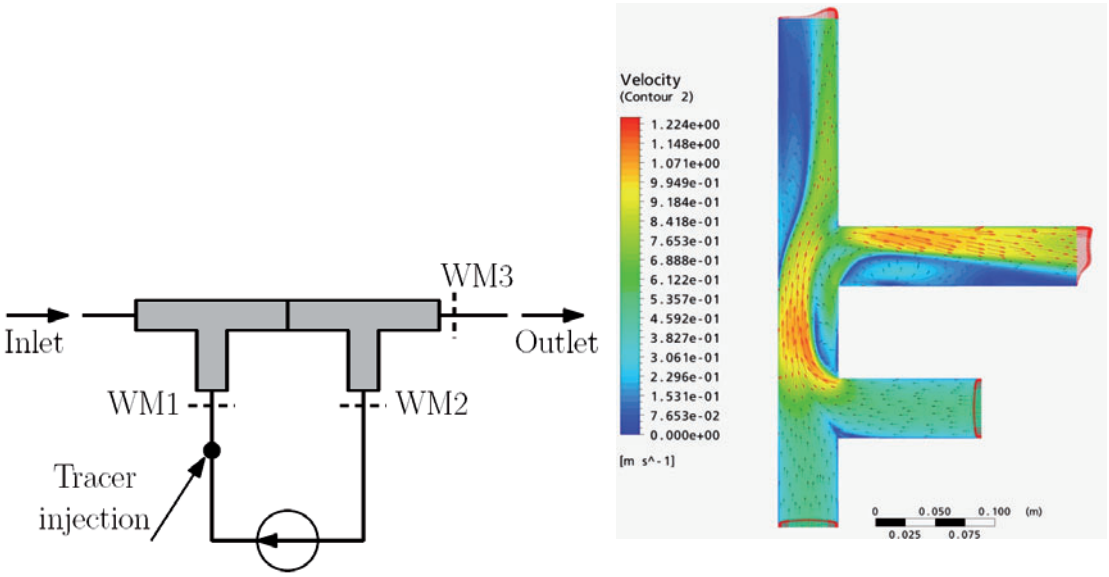
Gegenwärtig gibt es einen starken Trend, Ergebnisse von Computational Fluid Dynamics (CFD) in die Beurteilung des Transientenverhaltens von LWR's einfliessen zu lassen, in einem ersten Schritt vor allem auf dem Gebiet von einphasigen mehrdimensionalen Mischvorgängen. Da CFD jedoch sehr grosse Rechnerressourcen benötigt, ist es vorderhand nicht denkbar, einen Druckwasser-Reaktor vollständig mittels CFD zu simulieren. Als gangbarer Ausweg bietet sich deshalb die Kopplung eines CFD-Codes mit einem Systemcode an: der CFD-Code liefert für ein beschränktes Gebiet des Reaktorsystems die mehrdimensionale Darstellung der Strömungsvorgänge, während der Systemcode das gesamte restliche Reaktorsystem in vereinfachter (typischerweise eindimensionaler) Weise simuliert. Eine Anwendung bildet die Analyse eines Dampfleitungsbruches, der zu einer Abkühlung in einem Teilbereich des Reaktorkerns führt, was seinerseits zu einem positiven Reaktivitätseintrag und damit zu einem lokalen Leistungsanstieg führt. Dabei wird die Verteilung der Kühlmitteltemperatur durch die Mischvorgänge im unteren Reaktorplenum stark beeinflusst.

Im Rahmen einer Doktorarbeit wurde eine Kopplung zwischen dem CFD-Code CFX und dem Systemcode Trace entwickelt, und im Laufe des Jahres 2008 konnten erste viel versprechende Ergebnisse erzielt werden. Um die Rechenergebnisse zu beurteilen, wurde in Zusammenarbeit mit dem Labor für Thermohydraulik ein kleines Mischexperiment aufgebaut (siehe Figur 1): Die Wasserströme am Einlass und durch die Pumpe betragen je 80 L/min. In den durch die Pumpe getriebenen Kreislauf wird kurzzeitig Markierungsstoff eingespeist, und dessen Konzentration wird an den 3 Messstellen WM1, 2 und 3 mittels eines Drahtgitter («Wire-mesh»)-Sensors gemessen.

Dieses Experiment zeigte den Erfolg des gekoppelten Code-Systems in eindrücklicher Wiese: während die Rechnung nur mit dem Systemcode eine Strömungsaufteilung von 1:1 an der zweiten T-Verzweigung ergibt, zeigt das gekoppelte Code-System CFX-Trace als Folge der Rezirkulation einen höheren Eintrag von Tracer in den Seitenast, was genau der Beobachtung im Experiment entspricht. Dieses Ergebnis zeigt die Wichtigkeit der mehrdimensionalen Strömungsverhältnisse in der Nähe der T-Verzweigung, die mit einer eindimensionalen Strömungsdarstellung nicht ausreichend genau wiedergegeben werden können. Allerdings muss die Schnittstelle zwischen der eindimensionalen (Trace) und der dreidimensionalen (CFX) Simulation derart gelegt werden, dass einfache Annahmen zum Geschwindigkeitsprofil getroffen werden können. Entsprechende Arbeiten sind gegenwärtig im Gange.

Risiko und menschliche Zuverlässigkeit (HRA) [2]

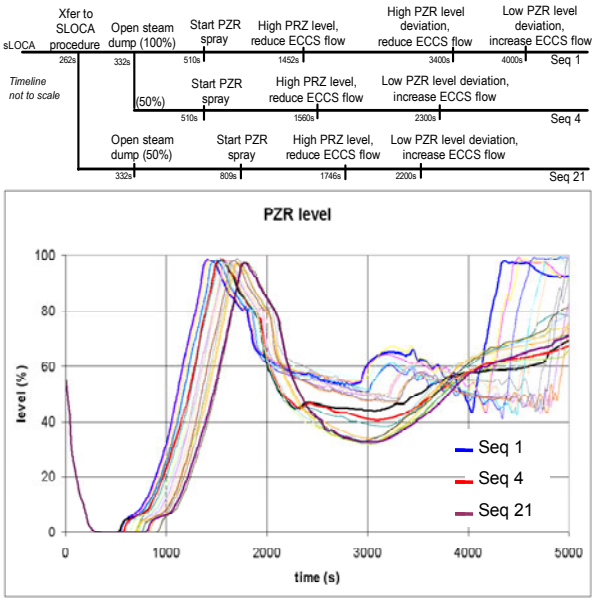
In der Untersuchung der menschlichen Zuverlässigkeit (Human Reliability Analysis, HRA), wird die menschliche Leistungsfähigkeit qualitativ analysiert, sodass die Ausfallarten identifiziert werden



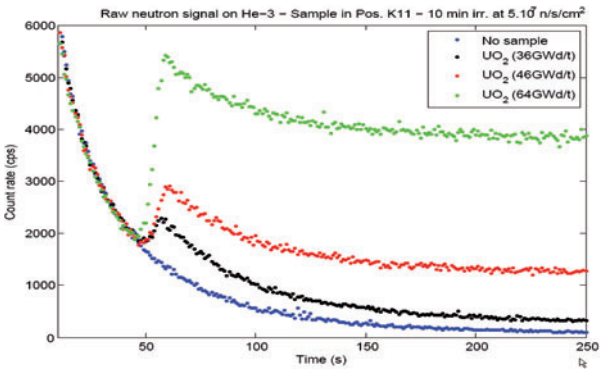
Figur 1: Schema des Mischungsexperiments (links) und mit dem gekoppelten Code-System CFX-Trace berechnetes stationäres Strömungsfeld.

und daraus Bewertungen dieser Fehlfunktionen entwickelt werden können. Ein Simulationswerkzeug für die dynamische Szenarioanalyse, das die Simulation des Anlagenverhaltens mit der Reaktion der Betriebsmannschaft direkt koppelt, ermöglicht ein besseres Verständnis der Szenarien und deren Weiterentwicklung, sowie der Handlungsbedingungen, mit denen die Operateure konfrontiert sind. Dieses verbesserte Verständnis unterstützt die qualitative Untersuchung der menschlichen Zuverlässigkeit, inklusive der Analyse von potenziellen Fehlhandlungen («Errors of Commission», EOC). Das am PSI entwickelte Szenarioanalyse-Werkzeug basiert auf der ADS (Accident Dynamic Simulator)-Software, d.h. auf einer Implementierung der Methode des dynamischen Ereignisbaums. Ein Anlagenmodell steht in Wechselwirkung mit einem Verhaltensmodell der Betriebsmannschaft, das sich auf die Störfall-Vorschriften abstützt. Per Input werden die letzteren, sowie zusätzliche Reaktionsregeln basierend auf Training und abgeschätzte Wahrscheinlichkeitsverteilungen für das zeitliche Verhalten, für die Ausführung der Simulation zur Verfügung gestellt.

Von einer Fallstudie eines Kühlmittelverluststörfalls mit kleinem Leck, die auf abgeschätzten Daten basiert, sind einige Resultate in Figur 2 dargestellt. Für diesen Fall sind die Ereignisbaumäste limitiert auf die zeitliche Variabilität in der Umsetzung der Prozeduren, die Übernahme der korrekten Prozedur bei einer späteren Diagnosegelegenheit und das Ausführen der Dampfentlastung bei verschiedenen Füllständen. Die Sequenzen 1 und 4 zeigen das Resultat von «schnellen» Mannschaften, während Sequenz 21 zu einer «langsameren» Mannschaft gehört. Während die schnelleren Mannschaften die Hochdrucknoteinspeisung (ECCS) früher reduzieren, stellt die Mannschaft der Sequenz 1 den Füllstand im Druckhalter erst später wieder her (bei ca. 4'000 s) und füllt den Druckhalter annähernd. Das Szenarioanalyse-Werkzeug zeigt, dass die Gegebenheiten des Szenariums, mit dem die Operateure konfrontiert werden, nicht nur durch das «Wenn», sondern auch durch das «Wie» ihrer Reaktion beeinflusst wird. Die Handhabung



Figur 2: Der Füllstand im Druckhalter während dem untersuchten Kühlmittelverlustszenarium (unten) hängt nicht nur vom unterschiedlichen zeitlichen Verhalten und der Aktionen der Betriebsmannschaft ab (oben), sondern auch von der Art der Bewerkstelligung der mehrfachen Zielsetzungen in Verbindung mit der Begrenzung der Unterkühlung, dem Speisewasserdurchsatz sowie dem Füllstand im Druckhalter.



Figur 3: Signale verzögerter Neutronen bestrahlter Brennstoffproben mit verschiedenen Abbränden im Proteus.

der Zielsetzungen, die Begrenzung der Unterkühlung, den Speisewasserdurchsatz und den Füllstand im Druckhalter gleichzeitig zu kontrollieren, sowie die Wechselwirkung ihrer Reaktionen mit dem Verhalten der Anlage spielt in diesem Fall eine wichtige Rolle. Solche Ergebnisse erlauben die Festlegung eines realistischeren Umfangs der Handlungsbedingungen, welche in den Untersuchungen der menschlichen Zuverlässigkeit zu berücksichtigen sind.

Proteus Upgrade [3]

Eines der Ziele des Projektes «Proteus Upgrade» ist die Nachrüstung und Erweiterung des Nullleistungsreaktors Proteus, so dass zukünftige Experimente mit hochabgebrannten LWR-Brennstoffstäben (Projekt «Largescale-Irradiated-Fuel-Experiments», Life@Proteus) durchgeführt werden können. Dabei soll der Status einer Kernanlage mit geringem Gefährdungspotenzial beibehalten werden.

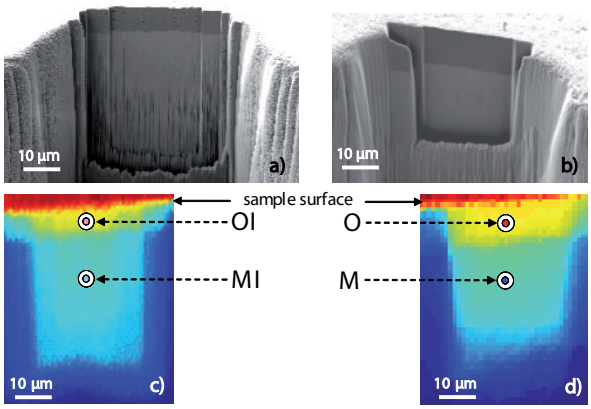
Im Jahr 2008 lag der Schwerpunkt des Projekts auf der Beantwortung von Fragen, die bei der Grobprüfung der Gesuchsunterlagen der Bau- und Betriebsbewilligung durch die HSK gestellt wurden. Wesentliche Fragestellungen wie beispielsweise zu Störfallanalysen und Baugrundeigenschaften des Proteus konnten positiv beantworten werden. Zudem hat das PSI einen Strategiewechsel im Bewilligungsverfahren vorgenommen. Ein getrenntes Einreichen von Bau- und Betriebsbewillligungsunterlagen führt zu einer deutlichen Entflechtung in der Projektplanung und -ausführung und erlaubt auch eine signifikante Vereinfachung der Prozesse. Das Projekt wird auch im nächsten Jahr mit hoher Priorität vorangetrieben, und Mitte nächsten Jahres werden die Gesuchsunterlagen der Baubewillligung zur Prüfung eingereicht. Um eine Betriebsbewilligung wird im Jahre 2010 nachgesucht.

Im Laufe dieses Jahres wurden die Messmethoden für das experimentelle Programm Life@Proteus weiter entwickelt. Der Einsatz von Segmenten hoch abgebrannter Brennstoffstäbe führt zu einem deutlichen Anstieg des Strahlungsuntergrundes (γ und Neutronen) und erschwert die Analyse (siehe Figur 3). Daher wurden am Proteus vielfältige Bestrahlungen mit Segmenten von abgebrannten Brennstoffstäben durchgeführt, um Messtechniken zu ertüchtigen. Hierzu wurden beispielsweise die Anordnungen hoch reiner γ-Detektoren und Neutronendetektoren optimiert, um Reaktionsraten und verzögerte Neutronen zu bestimmen.

Nukleare Brennstoffe [4]

Die aus Zirkonium-Legierungen bestehenden Brennstab-Hüllrohre sind im Reaktor extremen Bedingungen ausgesetzt wie hohen Temperaturen und Drücken, Neutronenstrahlung sowie dem korrosiven Einfluss des Kühlmittels. Durch Zugabe spezieller Legierungspartner, z.B. Niob, kann die Korrosionsbeständigkeit beeinflusst werden. Zum besseren Verständnis des Einflusses von Niob wurde eine 2,5-%-Nb-haltige Zirkonium-Legierung nach Behandlung im Autoklaven sowie nach dem Einsatz im Druckwasserreaktor mittels Synchrotronstrahlung an der Swiss Light Source (SLS) untersucht. Der Grund für die Wahl der unterschiedlichen Proben (Autoklav bzw. Reaktor) liegt darin, dass das Oxidationsverhalten im Reaktor auf Grund der Neutronenbestrahlung vom Verhalten im Autoklaven abweichen kann. Dies äussert sich beispielsweise in strahlungsinduzierten, mikrostrukturellen Änderungen an der Metall-Oxid-Grenzfläche oder an den für das Korrosionsverhalten wichtigen Sekundärausscheidungen. Mit der gewählten Methode (Synchrotronstrahlung), lassen sich mikroskopische Bereiche hinsichtlich Elementverteilung, Speziierung (Ausprägung) und Struktur analysieren. In diesem Fall wurde die Raster-Röntgen-Mikroskopie sowohl im Transmissions (STXM)- als auch im Fluoreszenzmodus mit der Mikro-Röntgen-Absorption (micro-XAS) kombiniert. Die zweidimensionale Zirkonium-Verteilung, die für die unbestrahlte, autoklavierte wie auch die neutronenbestrahlte Zr-2,5-%-Nb-Legierung ermittelt wurde, ermöglichte eine mikrometergenaue Lokalisierung der Schnittstelle zwischen Oxid und Metall. Micro-XAS-Untersuchungen erlaubten die Bestimmung der Zirkonium- und Niob-Speziierungen (Figur 4). Die Koordinationszahlen und/oder die Valenzen von Zirkonium und Niob wurden für beide Materialien (Autoklav bzw. Reaktor) im Metall und Oxid nahe der Grenzfläche ermittelt.

Im Metall nahe der Grenzfläche ist die Koordinationsumgebung für die ersten 3,5 Å um das absorbierende Zirkoniumatom für den bestrahlten wie den unbestrahlten Fall gleich, ähnlich



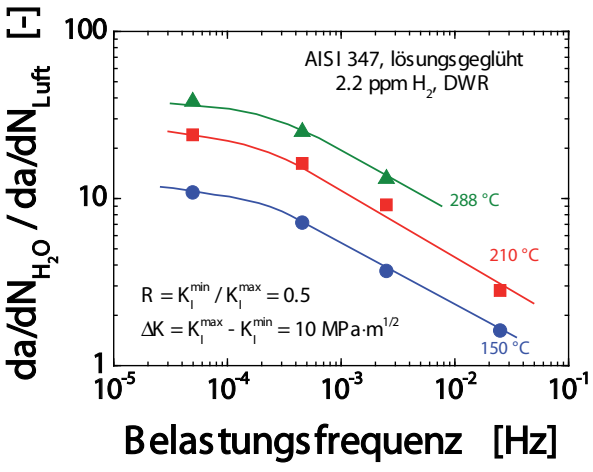
Figur 4: Mikroskopische Resultate für die bestrahlte (links) und die autoklavierte Zr-2,5 %-Nb-Probe (rechts):a) und b) REM (Raster Elektronenmikroskop) Bilder nach FIB (Focused Ion Beam)-Probenpräparation; c) und d) die dazu gehörigen, hoch aufgelösten 2D-STXM-Bilder aufgenommen an der Zr-K-Kante. An den Positionen M und MI im Metall bzw. O und OI im Oxid (I steht für irradiated) wurden micro-XAS-Analysen durchgeführt. Die Strahlabmessung betrug etwa 1 µm × 1 µm, bei Transmissionsmode und Raumtemperatur.

einer dichtest gepackten Hexagonalstruktur. Im Oxid ist kein metallisches Zirkonium zu finden; die Bestrahlung macht keinen Unterschied aus. Das Oxid weist eine monokline Struktur auf. Das Niob zeigt im metallischen Bereich einen zu erwartenden metallischen Charakter, jedoch eine zum reinen Niob geänderte Struktur. Während für die bestrahlte Legierung die gleiche Valenz für Niob auch im Oxid gefunden wurde, zeigt das Niob in der autoklavierten Probe einen oxidischen Charakter. Es muss betont werden, dass die Distanz zur Grenzfläche hier deutlich grösser war im Vergleich zur bestrahlten Probe. Um endgültige Aussagen zum möglicherweise unterschiedlichen Oxidationsverhalten von Niob in dieser Legierung zu erhalten, sind weitere Tests geplant mit engmaschigen Messungen, die schrittweise über die Metall-Oxid-Grenzfläche verteilt sind.

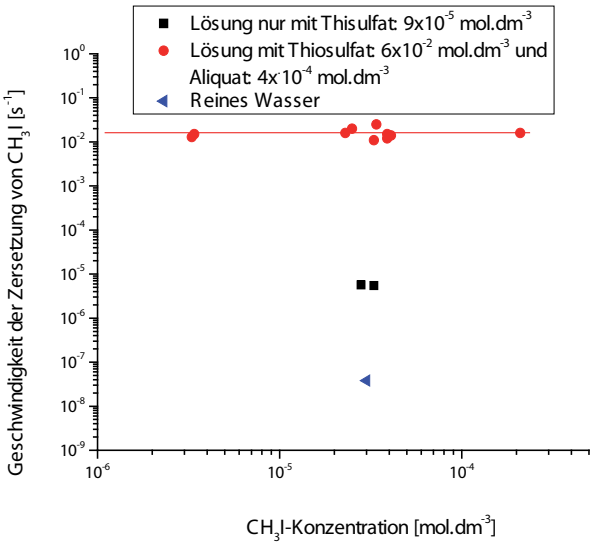
Integer (Bauteilsicherheit) [5]

Das Projekt Integer befasst sich mit Alterungsmechanismen in druckführenden Primärkreislaufkomponenten sowie mit deren möglichen Auswirkungen auf die Lebensdauer und Sicherheit von Kernkraftwerken und wird stark durch die HSK (ENSI) und Schweizer KKW finanziell unterstützt. Die Ermüdung ist ein wichtiger Schädigungsmechanismus, der mit zunehmendem Anlagenalter an Bedeutung gewinnt und vereinzelt auch zu Ermüdungsrissbildungen und Leckagen in Druck führenden Komponenten geführt hat. Im Rahmen des Teilprojektes Kora untersuchen wir mögliche Effekte des Reaktorkühlmittels auf die Ermüdungsrissbildung und das Ermüdungsrisswachstum in rostfreien Stählen unter Druckwasser (DWR)- und Siedewasserreaktor (SWR)-Bedingungen bei Wasserstoffchemiefahrweise (HWC).

Sowohl unter DWR- wie auch SWR/HWC-Bedingungen wurde in allen rostfreien Stählen eine relevante Beschleunigung des Ermüdungsrisswachstums für die Kombination von Belastungsfrequenzen ≤ 0,1 Hz, Temperaturen ≥ 150 °C und Schwingbreiten des Spannungsintensitätsfaktors $\Delta K \geq 3$ MPa m^{½} beobachtet (Figur 5). Falls diese kritischen Bedingungen gleichzeitig erfüllt sind, nehmen die Umgebungseffekte mit abnehmender Belastungsfrequenz und zunehmender Temperatur zu. Das Reaktorkühlmittel führt unter diesen Bedingungen gegenüber Luft



Figur 5: Einfluss von Temperatur und Belastungsfrequenz auf die umgebungsbedingte Beschleunigung des Ermüdungsrisswachstum in einem lösungsgeglühten, Nb-stabilisierten rostfreien Stahl unter simulierten DWR-Kühlmittelbedingungen.



Figur 6: Zersetzung von Methyliodid als Funktion der Methyliodid-Konzentration für reines Wasser, für Wasser mit Thiosulfat und für Wasser mit einer Kombination von Thiosulfat und Aliquat.

unter ansonsten identischen Bedingungen typischerweise zu einer Beschleunigung des Ermüdungsrisswachstums um einen Faktor 5 bis 20. Die Ermüdungsrisswachstumskurven für rostfreie Stähle in Section XI im *Asme Boiler & Pressure Vessel Code*, welche für Strukturintegritätsbewertungen ermüdungsbeanspruchter Komponenten verwendet werden, berücksichtigen solche Umgebungseinflüsse bisher nicht und sollten deshalb für diese kritischen Systembedingungen modifiziert werden.

Für viele Ermüdungsbeanspruchungen sind einer oder mehrere dieser kritischen Bedingungen nicht erfüllt und die Umgebungseffekte deshalb moderat. Aufgrund der hohen Belastungsfrequenzen spielen Umgebungseffekte z. B. bei der hoch zyklischen Ermüdung durch strömungsinduzierte Vibrationen infolge von Leistungserhöhungen keine Rolle. Andererseits liegen die Beanspruchungsgeschwindigkeiten und Temperaturen bei vielen thermischen Ermüdungsphänomenen (z. B. Temperaturschichtung) in einem kritischen Bereich, der relevante Umgebungseffekte erwarten lässt. Langsame Beanspruchungen führen zwar zu sehr starken Umgebungseffekten, bei entsprechenden thermischen Transienten sind aber infolge der stark reduzierten resultierenden mechanischen Rissspitzenbeanspruchungen ΔK die Rissforstschritte pro Belastungszyklus dennoch relativ klein und die Schädigung deshalb nicht so extrem, wie man es vielleicht auf den ersten Blick erwarten würde.

Forschung zu schweren Unfällen [6]

Reduktion der Strahlenbelastung durch Jod: Zu den Schwerpunkten der Sicherheitsbetrachtungen beim Betrieb von Kernkraftwerken (KKW) gehören die Vorkehrungen zur Verhinderung der Freisetzung des Radiojods, einem potenziellen Verursacher von Schilddrüsenkrebs. Die Forschung am PSI dient der Erarbeitung neuer technischer Verfahren und der Entwicklung von Rechenprogrammen zur Modellierung von u.a. solchen Störfällen.

Die Experimente zum Jodverhalten wurden unter Bestrahlungsbelastungen, die mit denen im KKW auftretenden vergleichbar sind, durchgeführt. Die Reaktionen des Jods wurden analysiert und die Konzentrationen radiochemisch verfolgt. Dieses, das Gesamtjod erfassende Verfahren ist neu und bisher nur am PSI einsetzbar.

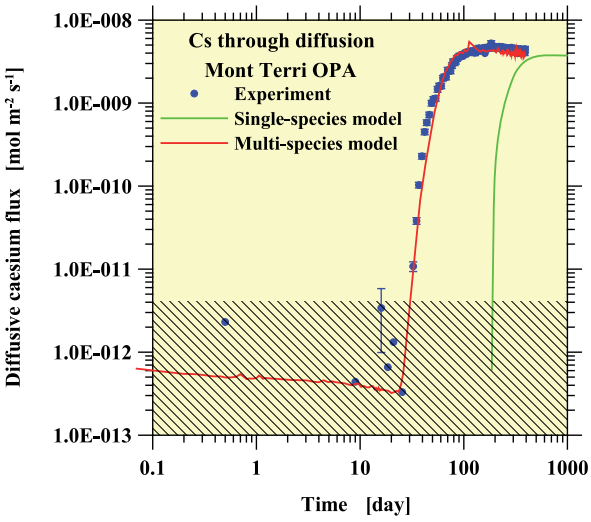
Beim Studium der Umwandlung von sehr flüchtigen organischen Jodspezies wie z.B. Methyljodid (CH_3I) zu Jodidionen konnte mit langkettigen quaternären Aminen wie Aliquat 336 ein Additiv gefunden werden, das die Effektivität der bisher eingesetzten Thiosulfatlösungen wesentlich übertrifft. Dabei kommt die doppelte Funktionalität dieser Verbindungen als Katalysator und Anionenaustauscher zum Tragen. Die Wirksamkeit wurde am Beispiel von Gaswäschern demonstriert (siehe Figur 6). Das Endprodukt Jodid wird gebunden und einer Reoxidation entzogen. Das gelöste Aliquat-Jodid kann an technologisch bewährten Sorptionsmitteln konzentriert und entsorgt werden.

Der Einsatz von Aliquat 336 zur schnellen Umwandlung von flüchtigen Jodverbindungen zu Jodid und dessen Fixierung eröffnet neue Möglichkeiten der Reduzierung der Strahlenbelastung beim Umgang mit Radiojod-haltigen wässrigen Lösungen bei Wartungs- und Revisionsarbeiten im KKW. Die Effektivität und der Wirkungsbereich der Massnahmen zur Jodrückhaltung bei einem Störfall kann wesentlich erhöht und erweitert werden.

Entsorgung radioaktiver Abfälle [7]

Das Labor für Endlagersicherheit entwickelt und testet Modelle und stellt spezifische Daten bereit, die für die Sicherheitsanalysen von geplanten Schweizer Endlagern für radioaktive Abfälle wichtig sind. Die Ausbreitungsparameter von Radionukliden im Opalinuston, einem prädestinierten Wirtsgestein für ein Tiefenlager, sind wichtig für die Sicherheitsanalysen für ein solches Endlager. Sie werden meist in Laborexperimenten bestimmt, entweder in Batch-, Sorptions- oder Diffusionsexperimenten. In ersteren wird der Verteilungskoeffizient für ein Radionuklid zwischen sorbierter Masse auf der Festphase und der im Wasser gelösten Masse in einem «verdünnten System» bestimmt; im zweiten Fall wird die Zeitdauer gemessen, in der Radionuklide durch eine Gesteinsprobe diffundieren. Beide Methoden liefern Parameter für das Rückhaltevermögen vom Gestein. Für Cäsium (Cs) ergaben sich jedoch in Batch-Sorptionsexperimenten immer höhere Sorptionskapazitäten als in Diffusionsexperimenten. Diese scheinbare Inkonsistenz bei der Cs-Diffusion durch Opalinuston konnte jetzt erklärt werden.

Bei der Modellierung der Diffusionsexperimente wurde bisher ein Transportmodell benutzt, in dem nur die «Single-Spezies» Cs-Diffusion und eine nicht lineare Sorption von Cs an Opalinuston berücksichtigt wurde. Die neue Modellierung beinhaltet ein komplexeres In-House-Multi-Spezies-Transportmodell MCOTAC, in dem auch ein detailliertes In-House mechanistisches Sorptionsmodell integriert wurde. Hierbei wird der kompetitive bzw. der sich konkurrierende Ionenaustausch von K, Na, Ca und Mg mit Cs an Opalinuston-Oberflächen sowie die gleichzeitige Diffusion aller Haupt-Ionen im Porenwasser des Opalinustons berücksichtigt, welche wiederum die Cs-Diffusion und -sorption beeinflussen.



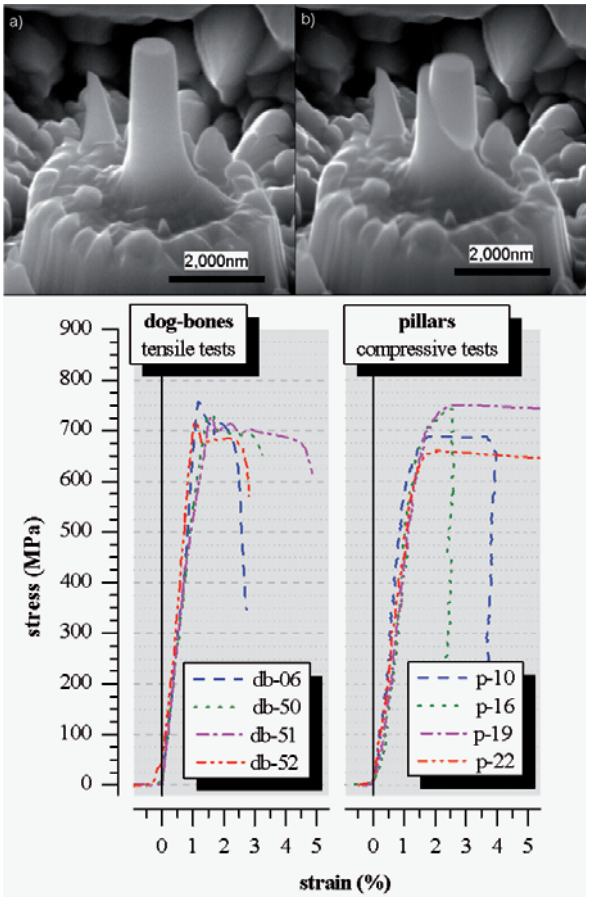
Figur 7: Gemessener diffusiver Cäsium-Fluss durch eine 1,1 cm dicke Opalinuston-Probe aus dem Mont Terri Felslabor im Vergleich zu Rechnungen mit einem Single-Spezies-Transportmodell mit nicht linearer Cs-Sorptionsisotherme und einem Multi-Spezies-Transportmodell mit mechanistischen Sorptionsmodellen für Cs, K, Na, Ca und Mg. Für beide Modellrechnungen wurde die in Batch-Sorptionsexperimenten gemessene Sorptionskapazität von Opalinuston benutzt.

Die in Batch-Sorptionsexperimenten bestimmte Sorptionskapazität konnte direkt im Multi-Spezies Modell benutzt werden, um in Diffusionsexperimenten den Cs-Diffusionskoeffizienten zu bestimmen, indem die gemessene und berechnete diffundierte Cs-Masse in gute Übereinstimmung gebracht wurde. Gleichzeitig war auch die totale Massenbilanz erfüllt. Dieses gelang mit dem «Single-Spezies»-Modell und bei Verwendung der Batch-Sorptionsdaten für Cs nicht (Figur 7). Mit der komplexeren Modellierung ergab sich so ein konsistentes Bild zum besseren Verständnis der Cs-Diffusion durch Opalinuston. Diese Modellierung zeigte aber auch, dass es bei der Analyse von Diffusionsexperimenten häufig nötig ist, eine gekoppelte Modellierung von Transport (Diffusion), Sorption und Wasserchemie zu berücksichtigen, um Transportparameter für Radionuklide, wie hier den Cs-Diffusionskoeffizienten im Opalinuston, korrekt aus Laborexperimenten zu bestimmen, welche dann in Rechnungen zu Sicherheitsanalysen verwendet werden. Dieses verbesserte Systemverständnis spiegelt sich dann auch in einer robusteren Aussagekraft von Sicherheitsanalysen wieder.

Sicherheitsbezogene Merkmale zukünftiger Reaktorkonzepte

Hochtemperaturmaterialien [8]

Eine möglichst genaue Bestimmung von Lebensdauer und Restlebensdauer von hoch belasteten Komponenten in Kernanlagen ist für deren sicheren Betrieb von grösster Bedeutung. Das gilt nicht nur für gegenwärtige Kraftwerke, sondern es gilt in gleichem Masse auch für zukünftige Anlagen. Im Fall des Ultra-Hochtemperaturreaktors (VHTR), der als eine Option für nachhaltige Kombianlagen zur Erzeugung von elektrischer Energie und Prozesswärme gilt, kommen zu den von den Leichtwasserreaktoren bekannten Alterungsmechanismen (Versprödung, Korrosion in wässriger Lösung, Ermüdung) noch andere Beanspruchungen dazu. Die betriebsbedingten Temperaturen (900 – 950 °C) können zu Kriechbelastungen und damit zu Kriechschädigung führen. Zusammen mit Transienten beim An- bzw. Abfahren der Anlage kann es zu Dehnwechselermüdung und zu Kriech-Ermüdungswechselwirkung kommen (Figur 8). Das Kühlmittel Helium, das betriebsbedingte Verunreinigungen beinhaltet, ist bei diesen Temperaturen nicht inert und man muss mit Hochtemperaturkorrosion rechnen. Konventionelle Methoden der zerstörungsfreien Prüfung sind für die Erfassung dieser Vorgänge in den Werkstoffen wenig erprobt. Als Ergänzung bietet



Figur 8: Die beiden Fotos zeigen als Beispiel einen Druckversuch mit einer Kleinstprobe (micro-pillar): links vor, rechts nach der Druckbelastung. Die unten dargestellten Spannungs-Dehnungskurven zeigen, dass in diesem Fall (dispersionsgehärteter Stahl) eine sehr gute Übereinstimmung mit Zugversuchen an konventionellen Proben (dog-bones) gefunden wurde.

sich eine Probennahme belasteter Stellen zur weiteren Untersuchung an. Dazu würden sich besonders Proben im Mikrometerbereich eignen, weil dann der Materialabtrag äusserst gering bliebe. Im Rahmen unseres Projektes forschen wir an der Übertragbarkeit von Ergebnissen von Kleinstproben auf Grossproben.

Alpha [9]

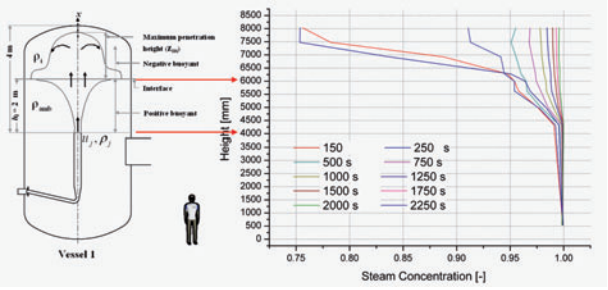
Im Rahmen des OECD-Projekts Seth-2 führt das Labor für Thermohydraulik an der Panda-Anlage Experimente zum Containmentverhalten von Leichtwasserreaktoren durch. In Arbeitsteilung mit der Versuchsanlage Mistra (CEA, Frankreich) wird das Ziel verfolgt, eine umfangreiche Datenbasis zu erstellen, die es gestattet, heute übliche Rechenprogramme hinsichtlich der Vorhersage der Wasserstoffausbreitung bei Störfällen mit Kernüberhitzung zu validieren und zu verbessern. Zusätzlich sollen die gewonnenen Daten zur Entwicklung der nächsten Generation von Computermodellen dienen, die auf einer vollständig dreidimensionalen strömungsmechanischen Behandlung der Phänomene beruhen, den so genannten CFD (Computational Fluid Dynamics) -Codes. Die möglichst zuverlässige Vorhersage der Wasserstoffausbreitung ist entscheidend für die richtige Auslegung von Massnahmen und Einrichtungen zum Schutz des Containments gegen eine Zerstörung durch eine Wasserstoffdetonation.

Die Experimente bilden speziell den Einfluss der Intensität und des Orts der Freisetzung von Dampf und Wasserstoff in das Containment, von Wärmequellen wie Rekombinatoren zur katalytischen Verbrennung des Wasserstoffs, von Wärmesenken wie Containmentkühler oder das Containment-Sprühsystem, sowie die Wärmeabgabe über die Containmentwand auf den Aufbau der Wasserstoffverteilung nach. Spezielles Interesse gilt der Funktionsfähigkeit von passiven Containmentkühlsystemen in Anwesenheit von bei Containmentbedingungen nicht kondensierbaren Gasen (Luft, Wasserstoff), wie sie in Reaktoren der Generation III+ eingesetzt werden oder vorkommen können. Für diese Versuche ist die Instrumentierung der Panda-Anlage beträchtlich erweitert worden, um den Anforderungen an die räumliche und zeitliche Auflösung der Messungen gerecht zu werden, die insbesondere für die Entwicklung von CFD-Verfahren notwendig sind. Die bewährte Messung der Gaszusammensetzung mit Massenspektrometern wurde von 40 auf maximal 80 Messstellen erweitert. Dazu kommt ein Netzwerk von Ultraschallsensoren, die diese Konzentrationsmessungen durch ihre wesentlich höhere Messfrequenz ergänzen. Weiterhin kommen neuartige, mit gepulsten Miniaturheizern ausgestattete Laufzeitmessgeber zum Einsatz, die die Geschwindigkeit an Stellen ermitteln, die für die bewährte PIV-Anlage (Particle Imaging Velocimetry) zur Messung von Geschwindigkeitsfeldern unzugänglich sind. Die neuen Messverfahren wurden in Zusammenarbeit mit dem Labor für Kernenergiesysteme der ETH Zürich im Rahmen eines Doktorats entwickelt.

Die erste Testreihe zum Studium des Abbaus einer Heliumschicht durch Vermischung mit einem vertikalen Dampfstrahl im oberen Containmentbereich wurde erfolgreich abgeschlossen. Dieser Teilprozess stellt auch heutzutage noch eine erhebliche Herausforderung an die numerische Simulation dar. Helium ersetzt hierbei den Wasserstoff als ungefährliches Modellfluid. Die Panda-Anlage erlaubt die vielfältige Variation von Randbedingungen, wie zum Beispiel die Dichteverhältnisse oder die Lage der Dampfinjektion. Als Ausgangssituation für das in Figur 9 dargestellte Experiment wird eine 2 m dicke Schicht aus 25 % Helium und 75 % Dampf vorgelegt. Da der injizierte Dampf zunächst eine höhere Temperatur hat, erfährt der Dampfstrahl einen Auftrieb. Auf dem Weg weiter nach oben baut sich der Anfangsimpuls des Strahls durch Interaktion mit der Umgebung ab. Bei Kontakt mit der Heliumschicht erfährt der Strahl eine nach unten gerichtete Abtriebskraft, weil nun die Dichte des Dampfs grösser ist als die der heliumhaltigen Umgebung. Vertikale, mit einem Massenspektrometer gemessene, Dampfkonzentrationsprofile sind auf der rechten Seite von Abbildung 1 für verschiedene Zeiten dargestellt. Es ist vorgesehen, u.a. diese Profile für einen Vergleich mit den Simulationsresultaten der Rechenprogramme heranzuziehen.

Fast [10]

Der mit Helium gekühlte Schnelle Reaktor (GFR) ist ein Design, das die Ziele des Generation IV International Forums erfüllen könnte. Zur Simulation von sicherheitsrelevanten GFR-Transienten wird der state-of-the-art Computer Code Trace



Figur 9: Vertikale Profile der Dampfkonzentration in Abhängigkeit von der Zeit während des Abbaus einer Heliumschicht im Kopfbereich des Drywell-Behälters von Panda.

eingesetzt, der Teil des im Projekt Fast entwickelten Codesystems ist.

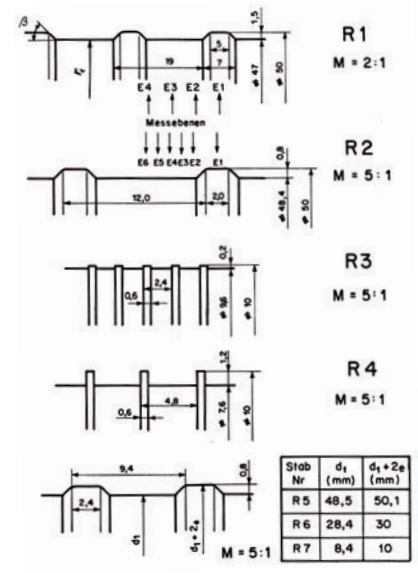
Im Rahmen des Forschungsprojekts zum gasgekühlten schnellen Reaktor (GFR) wurden in den 1970er und 80er Jahren am PSI (damals noch EIR) verschiedene Experimente mit Gaskreisläufen durchgeführt. Ziel dieser Tests war es, bei prototypischen GFR-Verhältnissen den Wärmeübergang und die reibungsbedingten Druckverluste zu untersuchen. Dabei wurden verschiedene Gase getestet, unter anderem auch Luft, CO_2 und Helium. Eine erste Kategorie von Tests beschäftigte sich mit Strömungen in Ringkanälen mit glatten und künstlich aufgerauten Wänden. Ziel des künstlichen Aufrauens der Wände war es, den Wärmeübergang vom Brennstab ins Kühlgas zu verbessern. Der linke Teil der Figur 10 zeigt die getesteten Aufrauungs-Geometrien. Die zweite Kategorie von Tests befasste sich mit Stabbündeln, in denen der Wärmeübergang und Druckverlust untersucht wurde. Die Messdaten wurde damals für einen Benchmark für das am PSI benutzte Computer Programm (Scrimp) verwendet.

Im Rahmen des aktuellen Generation-IV-Projekts wurden nun die damaligen Daten neu zusammengefasst und analysiert. Diese Aufarbeitung der Daten stellt zudem einen wichtigen Beitrag zur Erhaltung des damaligen Wissens dar. Die damals gesammelten Daten wurden teilweise für ein neues Benchmark des Trace Codes verwendet mit dem Ziel, die Modellierung des Wärmetausches vom Brennstoff in das Kühlmittel Helium sowie den Kern-Druckverlust eines Generation IV GFR zu verbessern.

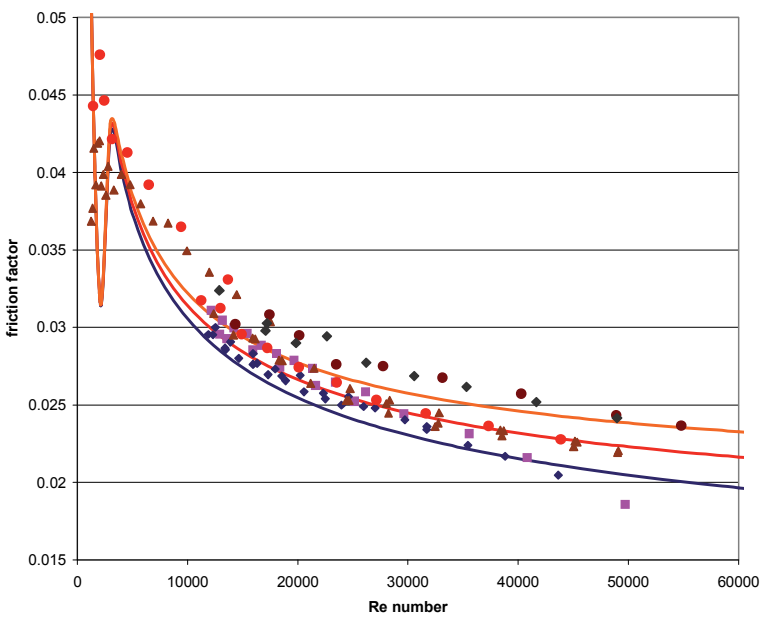
Als Beispiel zeigt der rechte Teil der Figur 10 die am damaligen Experiment gemessenen Reibungskoeffizienten (Punktwolke) als Funktion der Reynolds-Zahl in einem glattwandigen Rohr, während die durchgezogenen Linien die in Trace enthaltenen Korrelationen darstellen. Die gute Übereinstimmung zeigt, dass Trace in der Lage ist, die reibungsbedingten Druckverluste in Gasströmungen, insbesondere von Helium, gut zu simulieren.

Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen [11]

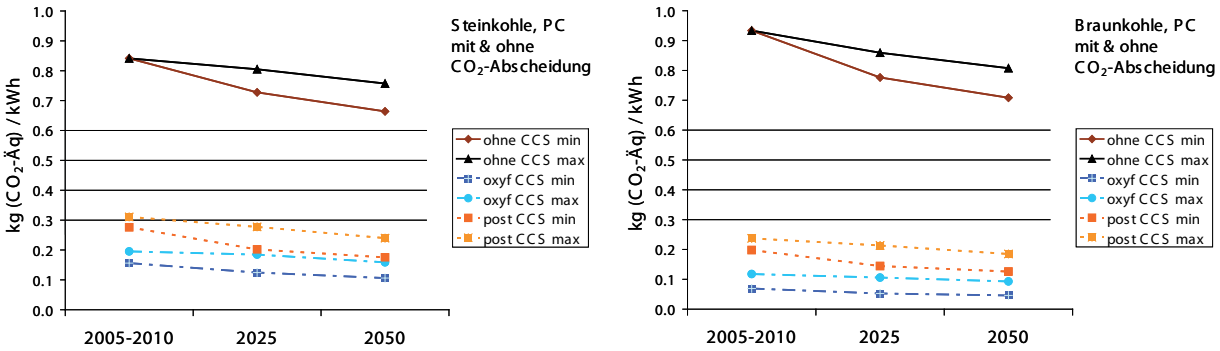
Technologiebewertung: Im Berichtsjahr wurde als Beitrag zum europäischen Forschungsprojekt Needs (New Energy Externalities Development for Sustainability) die Analyse heutiger und zukünftiger (bis 2050) fossiler Stromerzeugungstechnologien in Zusammenarbeit mit der Universität Stuttgart abgeschlossen. Diese beinhaltet sowohl ökologische als auch ökonomische Aspekte: Die Umweltbelastung der Stromproduktion wurde mit Hilfe von Ökobilanzen quantifiziert, die zukünftigen Stromerzeugungskosten mittels Lernkurven abgeschätzt. Die analysierten Technologien umfassen zentrale Stein- und Braunkohle-, sowie Erdgaskraftwerke mit und ohne Abscheidung und Einlagerung von CO_2 (Carbon Capture and Storage, CCS) und dezentrale Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK) inklusive der zugehörigen Brennstoffketten. Um die mögliche Bandbreite der zukünftigen Technologieentwicklung berücksichtigen zu können, wurden Umweltauswirkungen für drei verschiedene Szenarien quantifiziert: pessimistisch, realistisch-optimistisch und sehr



Stab Nr	d_1 (mm)	$d_1+2\delta$ (mm)
R5	48,5	50,1
R6	28,4	30
R7	8,4	10



Figur 10: Getestete Aufrauungs-Geometrien um den Wärmetausch zu verbessern (links); rechts: Vergleich zwischen gemessenen Reibungskoeffizienten (Punktwolke) und Trace-Korrelation (Linien).



Figur 11: Treibhausgasemissionen aus Stein- und Braunkohlekraftwerken mit und ohne CCS bis zum Jahre 2050 (PC = «Pulverized Coal»). «min» entspricht den niedrigsten Emissionen der jeweils untersuchten Optionen und Szenarien, «max» den höchsten.

optimistisch. Für die Ökobilanzen wurden die drei wichtigsten Verfahren zur CO_2-Abscheidung modelliert: «post-combustion», «pre-combustion» und «oxyfuel-combustion» sowie der CO_2-Transport per Pipeline und die CO_2-Endlagerung in salinen Aquiferen und erschöpften Gaslagerstätten.

Figur 11 zeigt als Beispiel der Ergebnisse der Ökobilanzen die Treibhausgasemissionen der Stromerzeugung mit Stein- und Braunkohlekraftwerken mit und ohne CCS bis 2050. Es verdeutlicht, dass eine relativ klimafreundliche fossile Stromerzeugung in Zukunft nur mit CCS erreicht werden kann. Allerdings liegen die berechneten Emissionen für die kompletten Energieketten auch im Jahr 2050 im Bereich von 50 – 250 g (CO_2-Äq.) pro kWh Strom – das oft in Aussicht gestellte fossile «Null-Emissions-Kraftwerk» wird damit nicht Realität. Die CO_2-Abscheidung erfordert einen hohen Energieverbrauch und zieht einen stark sinkenden Kraftwerkswirkungsgrad (5 – 10 %) sowie eine entsprechende Steigerung von Brennstoffverbrauch (inkl. der damit verbundenen Umweltauswirkungen) und Stromproduktionskosten nach sich. Abhängig von Brennstoff und Kraftwerkstechnologie steigen die Stromerzeugungskosten gegenüber Anlagen ohne CCS um ein Drittel bis knapp die Hälfte und werden im Jahr 2050 schätzungsweise 6,2 – 6,5 Rp./kWh für Strom aus Stein- und Braunkohle und 13,5 Rp./kWh für Strom aus Erdgas betragen.

Forschungseinrichtungen

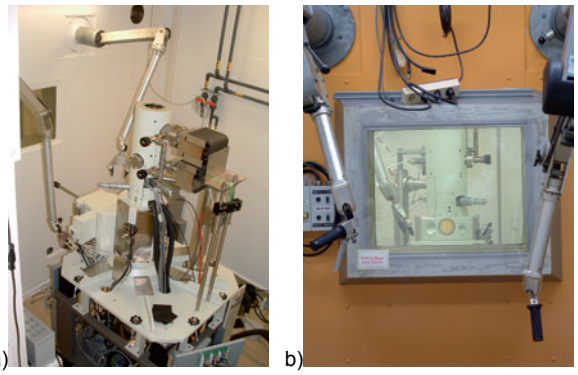
Hotlabor [12]

Das PSI-Hotlabor ist als einzige schweizerische Forschungsanlage zur Bearbeitung und Untersuchung aller Arten von radioaktiven Materialien und stark radioaktiver Komponenten (oder Teilen davon) von Kraftwerken und Forschungs- oder Beschleunigeranlagen ausgerüstet. Das Hotlabor als PSI-Grossanlage ist gemäss Kernenergieverordnung eine der schweizerischen Kernanlagen und erfüllt die für solche Anlagen erforderlichen Sicherheitsstandards. Seit Anfang 2008 ist die neue PSI-Abteilung Hotlabor (AHL) zuständig für die Operation des Labors.

Die Anlage wird von ca. 35 Mitarbeitenden betrieben, die für die Hausinstallationen, die heissen Zellen, aber auch für die anspruchsvolle fortschrittliche Instrumentalanalytik verantwortlich sind. Die hauptsächlich bearbeiteten wissenschaftlichen Dienstleistungs- und Forschungsschwerpunkte bestehen in der:

- Charakterisierung des Bestrahlungsverhaltens von heutigen und fortschrittlichen LWR-Brennstäben;
- Analyse von verschiedenen Ablagerungen auf Reaktor-Komponenten (z.B. CRUD);
- Untersuchungen zur Radionuklidausbreitung aus einem zukünftigen Endlager für radioaktive Abfälle;
- Eignungsabklärung von Containments aus einer Blei/Bismut-Legierung für das PSI-«Spallationstarget».

Im Berichtsjahr wurde die analytische Infrastruktur des Labors weiter verbessert und erneuert. Zwei



Figur 12: Installation der neuen Epma (Dezember 2008) im Hotlabor.
a) Aufbau des neuen Geräts im Labor;
b) Sicht auf das neue Gerät durch die biologische Abschirmung.

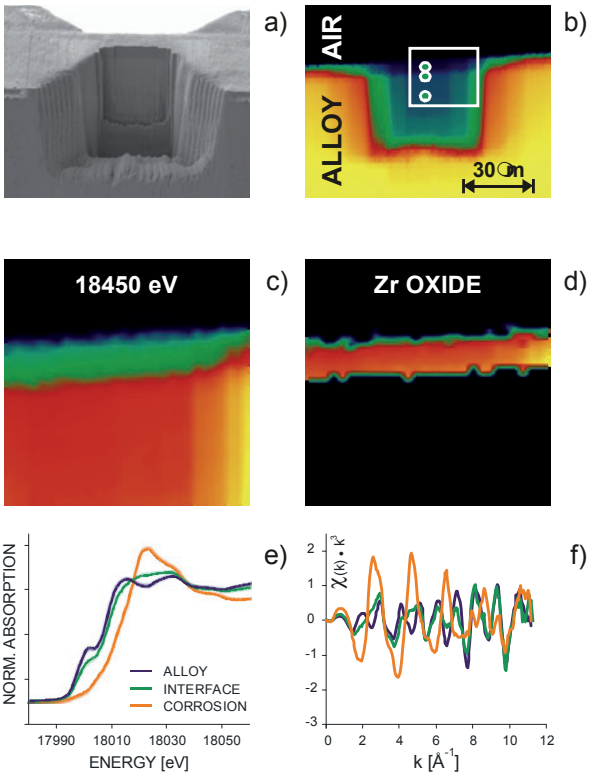
Hotzellen wurden komplett revidiert und umgerüstet; der alte «Elektron Probe»-Mikro-Analysator (Epma) wurde ausser Betrieb genommen und das Labor für ein neues Gerät vorbereitet (siehe Figur 12); schlussendlich wurde auch eine neue hoch auflösende ICP-MS in Betrieb genommen. Diese neuen Einrichtungen erlauben noch detailliertere Untersuchungen von nuklearen Materialien für die Hotlabor-Benutzer.

Mikro-XAS Beamline [13]

Ein Röntgen-Mikroskop im Dienste der nuklearen Materialwissenschaften: Ein zentraler Themenkomplex der nuklearen Materialwissenschaften ist die Korrosion von metallischen Komponenten in Nuklearanlagen. Korrosionsphänomene sind in zweierlei Hinsicht von grosser Bedeutung. Einerseits beeinflusst die Korrosion sicherheitsrelevante Materialeigenschaften wie Brüchigkeit, Rissbildung etc. Andererseits bestimmen Aktivierungsprodukte angereichert in den Korrosionsschichten zu einem grossen Teil die Strahlenbelastung während Unterhaltsarbeiten. Ein vertieftes Verständnis der Korrosionsvorgänge hätte demzufolge einen bedeutenden betriebswirtschaftlichen und sicherheitstechnischen Nutzen. Das System «Metall-Legierung-Hochtemperatur-Wasser» ist jedoch chemisch und physikalisch sehr komplex und mangels detailliertem Prozessverständnis noch nicht restlos kontrollierbar.

Nebst den häufig genutzten empirischen, makroskopischen Methoden und den klassischen mikroskopischen Analysen (z.B. Elektronenmikroskopie) stehen den nuklearen Materialwissenschaften seit kurzem auch Röntgenmikroskope zur Verfügung. Diese Instrumentierung erlaubt es insbesondere, vertiefte Einblicke betreffend chemischen Zuständen und Eigenschaften zu gewinnen. Aufgrund der charakteristischen Art der Wechselwirkung der Röntgenstrahlung mit Materie wird die Abbildung von komplexen molekularen Strukturen mit atomarer Auflösung mittels Streu-, Diffraktions- oder Absorptionsexperimenten möglich. Die microXAS-Strahllinie an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz (SLS) ist ein solch hoch auflösendes Röntgen-Mikroskop und erlaubt als Besonderheit die Untersuchung von aktivierten Proben.

In einer ersten Betriebsphase wurden bereits verschiedene nukleartechnisch relevante Systeme untersucht. Ein illustratives Beispiel ist in Figur 13 wiedergegeben. In dieser Studie wurden Zirkon-Niobium-Legierungen unter Neutronen-Bestrahlung im Druckwasserreaktor gealtert. Die entstandenen Korrosionsprodukte wurden mittels Röntgen- und Elektronenmikroskopie eingehend untersucht. Diese Untersuchungen wurden durch eine ausgeklügelte Probenpräparation mittels fokussiertem Ionenstrahl (FIB) ermöglicht. Im



Figur 13: Untersuchung von Neutronen-bestrahltem Cladding.

a) SEM Bild

b) Röngten-Mikroskopie: Absorptionskontrast-Bild

c) Röngten-Spektromikroskopie: Absorptionskontrast-Bild bei durchstimmbarer Anregungsenergie

d) Röngten-Spektromikroskopie: Rekonstruiertes Verteilungsmuster der oxidierten Zr-Atome

e) Röngten-Mikrospektroskopie: Unterschiedliche mikro-XANES-Signale aufgrund unterschiedlicher Chemie und molekularer Struktur

f) Unterschiedliche mikro-EXAFS-Signale erlauben die Bestimmung der molekularen Zr Strukturen in der Legierung und in der Korrosionsschicht.

Das Rechteck in b) zeigt die Lage der Abbildungen c) und d). Die Kreise in b) entsprechen den Lagen der spektroskopischen Messungen in e) und f).

(limitierten) Zeitfenster der Alterung bildete sich eine nur 8 – 10 µm dicke Korrosionsschicht. Dies verdeutlicht bereits die Notwendigkeit von mikroskopischen Methoden zur Analyse der Korrosionsvorgänge.

Von den Kenntnissen der chemischen, molekularen Bindungsformen insbesondere der Dotierelemente versprechen sich die nuklearen Materialwissenschaften grundlegende Erkenntnisse hinsichtlich verbesserter Korrosionsbeständigkeit von dotierten Legierungen. Die gewonnenen Strukturinformationen und das Wissen über die Identität und räumliche Verteilung von mineralischen Phasen erlauben Rückschlüsse über die Abläufe der verschiedenen Prozesse während der Korrosionsschichtbildung.

Nationale Zusammenarbeit

Eine Vielzahl der im NES durchgeführten Projekte werden aufgrund ihrer Thematik in enger Zusammenarbeit mit den Betreibern der Schweizer Kernkraftwerke, der Elektrizitätswirtschaft und der HSK (ENSI) durchgeführt. Arbeiten zur Entsorgung radioaktiver Abfälle finden in Zusammenarbeit und mit Unterstützung der Nagra statt. Aufgrund gemeinsamer Projekte und der engen personellen Verbindungen mit den Schweizer Universitäten, den Eidgenössischen Technischen Hochschulen sowie einer Vielzahl von Fachhochschulen ergeben sich auch im Bereich der Ausbildung enge Verbindungen, insbesondere auch im Rahmen von Dissertationen, Master- und Diplomarbeiten sowie von Semesterarbeiten.

Internationale Zusammenarbeit

Alle im NES laufenden und oben aufgeführten Projekte finden im Rahmen intensiver internationaler Zusammenarbeiten statt. Über die Beteiligung an Projekten internationaler Organisationen wie der Euratom, der OECD/NEA und der IAEA, sowie durch direkte vertragliche Vereinbarungen ergeben sich Zusammenarbeiten mit rund 30 Partnern aus etwa 10 Ländern, wobei sowohl alle wichtigen Forschungsinstitutionen wie auch die grössten Hersteller von Nuklearsystemen, aber auch diverse Aufsichtsbehörden vertreten sind. Eine detaillierte Auflistung befindet sich auf: http://nes.web.psi.ch/int_cooperations.html.

Bewertung 2008 und Ausblick 2009

Die Ziele aller Projekte wurden im Jahr 2008 erreicht. Insbesondere sind auch die beiden neuen Organisationseinheiten, das Labor für Nukleare Materialien (LNM), das sich der nuklearen Materialforschung widmet, und die Abteilung Hotlabor (AHL), welche die PSI-Grossanlage Hotlabor mit Ihrer Infrastruktur betreibt, erfolgreich in ihre Selbstständigkeit gestartet. Mit rund einem Drittel haben die Änderungen in der Pensionskasse des Bundes zum ohnehin schon grossen Personalabgang von rund 35 Personen beigetragen, welcher aber auch Ausdruck der erhöhten Nachfrage nach verschiedenartigen Fachleuten in der Nukleartechnik ist. Das sich abzeichnende Personalnachwuchsproblem im Nuklearbereich wird hoffentlich durch das neue Master-Ausbildungsangebot der beiden Technischen Hochschulen, das im Herbst 2008 gestartet wurde, mehrheitlich aufgefangen.

Auf der Vertragsseite wurde im Jahre 2008 ein neuer Vertrag mit der Nagra, ein bilateraler Zusammenarbeitsvertrag mit der Areva NP mit dem Thema Siedewasserreaktor der dritten Generation, sowie mit dem GIF (Generation IV International Forum) die System- und Projektvereinbarungen zum VHTR abgeschlossen. Im Rahmen der EU-Forschungsprogramme wurden 2008 vier neue Projekte ins Leben gerufen: Fuel-Bridge, Assept, Nuresp, Rescoy. Besonders hervorzuheben ist auch die Vereinbarung mehrerer zweijähriger Arbeitsprogramme mit Swissnuclear im Rahmen des Vertrags zur Förderung der Kernenergie-Forschung und der Nachwuchsförderung. Sie sichern die Fortführung von NES-Forschungsarbeiten in verschiedenen wichtigen und interessanten Gebieten.

Neben den fortlaufenden Projektarbeiten werden auch im Jahre 2009 verschiedene auslaufende Verträge erneuert werden müssen, um die Kontinuität in den einzelnen Forschungsgebieten aufrecht zu erhalten. Zum Teil sind diese neuen Verträge bereits in Vorbereitung, wie zum Beispiel für Stars, für sechs Projekte im 7. EU-Forschungsrahmenprogramm sowie für den natriumgekühlten Brüter im Rahmen von GIF. Daneben werden die Arbeiten zur Erlangung der Baubewilligung für den Nullleistungsreaktor Proteus einen Schwerpunkt bilden. Die bereits im Jahre 2008 begonnenen Kontakte vor dem Hintergrund des möglichen Baus von neuen Kernkraftwerken in der Schweiz werden 2009 intensiviert, mit dem Ziel, eine entsprechende vertragliche Zusammenarbeit auf nationaler Ebene zu beginnen.

Liste der F+E-Projekte

[1] H. Ferroukhi, (hakim.ferroukhi@psi.ch), PSI, Villigen, Stars, http://stars.web.psi.ch.

[2] V. N. Dang (vinh.dang@psi.ch), PSI, Villigen, HRA, http://safe.web.psi.ch/.

[3] O. Köberl, (oliver.koeberl@psi.ch), PSI, Villigen, Proteus Upgrade; http://proteus.web.psi.ch.

[4] J. Bertsch (johannes.bertsch@psi.ch), PSI, Villigen, Nukleare Brennstoffe, http://lnm.web.psi.ch/ssi/lnm_projects_nf.html.

[5] H.P. Seifert, (hanspeter.seifert@psi.ch), PSI, Villigen, Integer, http://lnm.web.psi.ch/ssi/lnm_projects_cs.html.

[6] S. Güntay, (salih.guentay@psi.ch), PSI, Villigen, Forschung zu schweren Unfällen, http://sacre.web.psi.ch.

[7] M. Bradbury (michael.bradbury@psi.ch), PSI, Villigen, Entsorgung radioaktiver Abfälle, http://les.web.psi.ch/groups/index.html.

[8] W. Hoffelner (wolfgang.hoffelner@psi.ch), PSI, Villigen, Hochtemperaturmaterialien, http://lnm.web.psi.ch/ssi/lnm_projects_htm.html.

[9] H-M.Prasser(horst-michael.prasser@psi.ch),PSI,Villigen, Alpha, http://lth.web.psi.ch/LTH.htm.

[10] K. Mikityuk (konstantin.mikityuk@psi.ch), PSI, Villigen, Fast, http://fast.web.psi.ch/.

[11] P. Burgherr, (peter.burgherr@psi.ch), PSI, Villigen, Technology Assessment, http://gabe.web.psi.ch/.

[12] D. Gavillet (didier.gavillet@psi.ch), PSI, Villigen, Hotlabor, http://lwv.web.psi.ch/lwv/hotlab.shtml.

[13] D. Grolimund (daniel.grolimund@psi.ch), PSI, Villligen, Mikro-XAS-Beamline, http://sls.web.psi.ch/view.php/beamlines/mxas/index.html.

Impressum

Juni 2009
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
Druck: Ackermanndruck, Bern-Liebefeld
Bezug der Publikation: www.energieforschung.ch

Programmleiter
Dr. Jörg Dreier
Paul Scherrer Institut PSI
CH-5232 Villigen – PSI
joerg.dreier@psi.ch

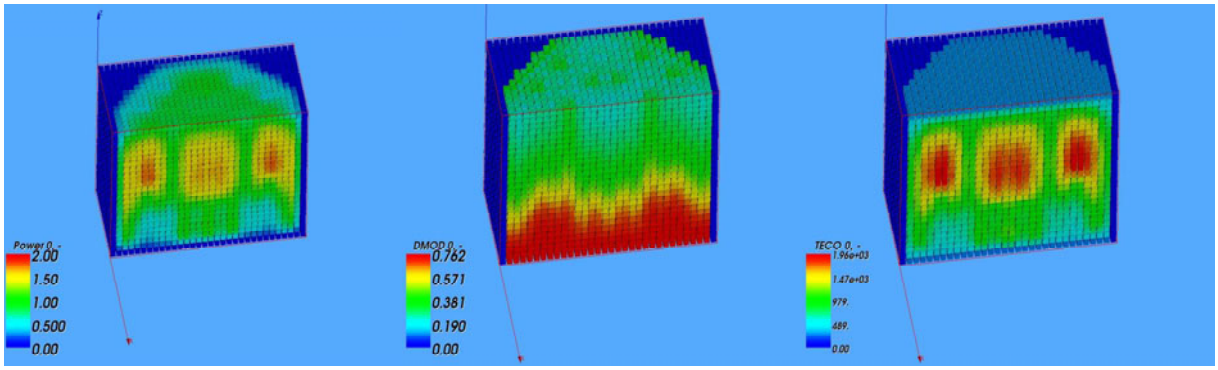
Bereichsleiter
Dr. Christophe de Reyff
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
christophe.dereyff@bfe.admin.ch

Rapport de synthèse 2008 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2008 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Regulatorische Sicherheitsforschung

Reiner Mailänder

reiner.mailaender@ensi.ch



Projekt STARS

3D-Simulationen von thermohydraulischen Parametern im Kern eines Siedewasserreaktors: Von links nach rechts Darstellungen der Leistung, der Moderatordichte und der Temperatur unter Gleichgewichts-Bedingungen. Quelle: PSI

Programmschwerpunkte

Im Rahmen der regulatorischen Sicherheitsforschung vergibt und koordiniert das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) Forschungsaufträge mit dem Ziel, den aktuellen wissenschaftlich-technischen Kenntnisstand zu ermitteln, zu erweitern und für die Aufsicht verfügbar zu machen. Diese Forschungsprojekte tragen zu Erhaltung und Ausbau der hohen Sicherheit der Schweizer Kernanlagen bei. Das ENSI betreibt nationale und internationale Forschungsprojekte in den vier folgenden Themenbereichen:

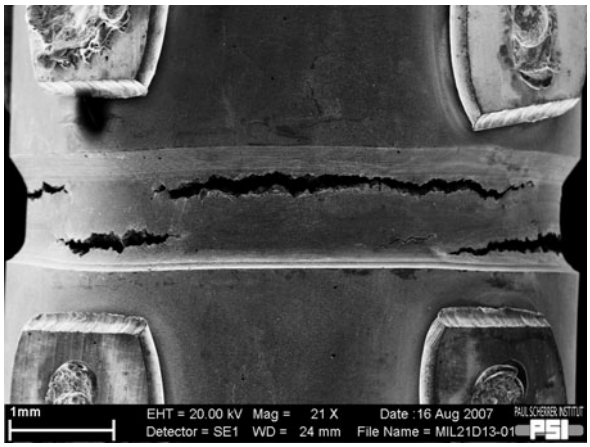
- Im Bereich **Reaktorsicherheit** stehen nebst der Materialforschung nach wie vor die Begleitforschung über Stör- und Unfälle zur Weiterentwicklung der deterministischen und probabilistischen Sicherheitsanalysen im Vordergrund. Zudem beteiligt sich das ENSI an einer Reihe von internationalen Datenbankprojekten und erhält so Informationen über die Ursachen, Häufigkeiten und Verläufe verschiedener Störfälle.
- Der Strahlenschutz dient dem Schutz des Personals, der Bevölkerung und der Umgebung der Kernanlagen vor ionisierender Strahlung.
- Im Bereich Transport und Entsorgung konzentriert das ENSI seine Forschung zurzeit auf die Untersuchung geeigneter geologischer Schichten für die Tiefenlagerung hochradioaktiver und langlebiger Abfälle. Im Felslabor Mont Terri werden Experimente zur Eignung des Opalinustons für die geologische Tiefenlagerung durchgeführt.

Mensch, Organisation und Sicherheitskultur haben einen wesentlichen Einfluss auf die Sicherheit einer Kernanlage. Die dazu vom ENSI unterstützten Forschungsprojekte beschäftigen sich unter anderem mit dem Einfluss menschlicher Handlungen in Störfallsituationen und mit Anforderungsprofilen für das Personal von Kernkraftwerken.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2008

Reaktorsicherheit

Kora – Environmentally-Assisted Cracking in Austenitic LWR Structural Materials [1]: Kora (**Kor**rosionsrisswachstum in **a**ustenitischen Strukturwerkstoffen) ist ein mehrjähriges Forschungsprojekt des Paul Scherrer Institutes (PSI). Kora beschäftigt sich mit den Schädigungsmechanismen der Spannungsrisskorrosion (SpRK) und der Korrosionsermüdung (Figur 1). Es ist in drei Themenbereiche aufgeteilt: Das Teilprojekt I beschäftigt sich mit der Korrosionsermüdung von austenitisch rostfreien Stählen, das Teilprojekt II mit dem elektrochemischen Rauschen, einer neuen Methode zur Früherkennung von Spannungsrisskorrosion, und das Teilprojekt III mit der Spannungsrisskorrosion in Mischschweissnähten (zwischen Nickelbasis-Werkstoffen und niedrig legierten Stählen).



Figur 1: Elektronenmikroskopische Aufnahme der in Versuchsproben gebildeten Risse. (Quelle: PSI)

Die Projektziele umfassten in der Berichtsperiode 2008:

Teilprojekt 1: Diese Versuche wurden unter den Bedingungen von Druckwasserreaktoren (DWR) und Siedewasserreaktoren (SWR) durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass das bestehende Regelwerk den Umgebungseinfluss auf die Initiierung von Ermüdungsrissen und die Geschwindigkeit der Rissausbreitung nicht ausreichend erfasst. Dies gilt für geringe Belastungsfrequenzen und niedrigen Dehnraten. Die experimentellen Daten bestätigen aber neue Ansätze, insbesondere diejenigen der US-Aufsichtsbehörden (Nureg/CR6909 & NRC Regulatory Guide 1.207).

Teilprojekt 2: Mit einer optimierten Technik zur Messung des elektrochemischen Rauschens konnte gezeigt werden, dass die Rissinitiierung auch unter Siedewasser-Bedingungen im Labor erfasst werden kann. Allerdings ist die Messtechnik sehr oberflächensensitiv, und der Abstand zwischen Referenzelektrode und Probenoberfläche muss sehr klein gehalten werden. Dennoch kann die elektrochemische Rauschtechnik wertvolle weitere Versuchsdaten liefern, insbesondere bei experimentellen Untersuchungen zur Rissinitiierung.

Teilprojekt 3: Diese Versuche wurden an Mischnähten aus so genanntem Alloy 182 durchgeführt. Ein Schwerpunkt der Experimente betraf die Fragestellung, ob interdentrische Risse in der Legierung Alloy 182 unter bestimmten Bedingungen auch im ferritischen Stahl des Reaktordruckbehälters weiter wachsen können. Es wurde festgestellt, dass bei erhöhten Chloridgehalten im Primärwasser der Übergang zwischen austenitischem und ferritischem Schweissgut die sonst beobachtete Barrierenwirkung für das Risswachstum verlieren kann.

Diagnostik-II – Monitoring of Thermomechanical Fatigue and RPV Embrittlement due to Neutron Irradiation [2]: Rostfreie Stähle in Kernkraftwerken werden oft zyklisch wechselnden Lasten und Neutronenflüssen ausgesetzt, welche diese Werkstoffe altern bzw. verspröden lassen. Die Erfahrung zeigt, dass sich dabei unter Umständen Risse bilden, welche zum Versagen von mechanischen Komponenten führen können. Im Rahmen des Projekts Diagnostik wird versucht, neue Methoden zu entwickeln, mit denen daraus folgende Schäden besonders früh in austenitisch rostfreien Stählen entdeckt werden können. Das Projekt wurde während der Jahre 2006 – 2008 durchgeführt und gliedert sich in zwei Bereiche. Teilprojekt 1 beschäftigte sich mit Bewertung und Früherkennung von thermomechanischer Ermüdung, Teilprojekt 2 mit Werkstoffversprödung durch Neutronenbestrahlung.

Teilprojekt 1: Im Jahre 2008 wurden experimentelle thermomechanische sowie isotherme LCF-Versuche durchgeführt. Die dabei an den Probenoberflächen erzeugten Ermüdungsrissnetzwerke wurden systematisch erfasst und entsprechend der Rissdichte dem Erschöpfungsgrad zugeordnet. Weitergehende mikrostrukturelle Aspekte während Rissinitiierung und -wachstum wurden mit neusten Analysemethoden untersucht. Die experimentellen Ergebnisse wurden auch verwendet, um die Parameter einer theoretischen Modellierung der Ermüdungsschädigung zu optimieren.

Mit den experimentellen Arbeiten wurden Referenzproben aus austenitischen Rohrleitungsmaterialen mit definierter Ermüdungsschädigung erzeugt. Weiterhin standen für Labormessungen auch Rohrleitungssegmente zur Verfügung, die aus Schweizer Kernkraftwerken ausgebaut wurden. Projektziel war die zerstörungsfreie Bestimmung der Materialermüdung. Dabei sollte auch der Martensiteffekt ausgenutzt werden, der eine Änderung der elektromagnetischen Eigenschaften mit zunehmendem Martensitgehalt zur Folge hat. Die Messungen an den ausgebauten Rohrleitungssegmenten, deren Oberflächenzustand den realen Einsatzbedingungen entspricht, zeigten eine hohe Störempfindlichkeit der Messtechnik. Damit musste festgestellt werden, dass die Methode des Martensitseffekts zur Ermüdungsgradbestimmung für austenitische Rohrleitungsstähle aus dem Nuklearbereich nur sehr beschränkt einsetzbar ist.

Teilprojekt 2: In einem weiteren Teilprojekt sollte untersucht werden, ob eine zerstörungsfreie Messtechnik entwickelt werden kann, um die Materialversprödung durch Neutronenbestrahlung zu erfassen. Dazu wurde insbesondere der themoelektrische Seebeck-Koeffizient an Kerbschlag-Proben mit unterschiedlicher Materialversprödung gemessen. Es konnte dabei gezeigt werden, dass es eine monotone Änderung des Seebeck-Koeffizienten mit zunehmender Fluenz gibt. Herausfordernd sind aber die relativ geringe Änderung des Seebeck-Koeffizienten sowie die Streuung der zurzeit eingesetzten Messtechnik.

Bruchmechanische Werkstoffcharakterisierung zur Überwachung der Neutronenversprödung von Reaktordruckbehältern [3]: Die Änderung der Materialeigenschaften des Reaktordruckbehälters (RDB) infolge der Neutronenbestrahlung spielt eine entscheidende Rolle für das Lebensdauermanagement der gesamten Anlage. Aus strukturmechanischer Sicht kommt es in der kernnahen Zone des Reaktors zu einer Neutronenversprödung des Behälter- und Schweissmaterials. Gemäss kerntechnischem Regelwerk wird die Versprödung der RDB-Werkstoffe aufgrund der Erhöhung der Sprödbruch-Referenztemperatur und der Abnahme der Hochlagenenergie der Kerbschlagarbeit-Temperatur-Kurven als Funktion der Neutronenfluenz beurteilt. International wird in den letzten Jahren zunehmend das auf probabilistischer Grundlage basierende Masterkurvenkonzept nach ASTM E 1921 in Verbindung mit den ASME Code Cases N-629 und N-631 angewendet. Bei der Übertragung der bruchmechanischen Resultate von den kleinen Materialproben auf den RDB gibt es jedoch noch offene Fragen, die in diesem Forschungsprojekt behandelt werden.

Nachdem im Vorjahr die Probenentnahme und Probenfertigung erfolgte, bestand das Jahresziel 2008 in der plangemässen Durchführung der Versuche. Dabei wurden verschiedene Verfahren zur Probenpräparation (elektro-erosiv eingebrachte Kerben, Schwingrisse), verschiedene Probenformen und Probengrössen (Biege- und Kompaktzugproben), unterschiedliche Risstiefen sowie unterschiedliche Beanspruchungsgeschwindigkeiten verwendet. Als Probenmaterial standen zwei Segmente aus dem RDB des nicht in Betrieb gesetzten deutschen Reaktors Biblis C zur Verfügung. Die Ergebnisse lassen sich hin-

sichtlich ihrer Anwendung folgendermassen zusammenfassen:

- Es ergeben sich relevante Unterschiede bei der Ermittlung von T_o mittels Masterkurven-Konzept nach ASTM E1921 bei der Verwendung von elektro-erosiv gekerbten und angeschwungenen Proben, die nicht vernachlässigbar sind. Deshalb sind als Probenpräparation das Einbringen eines Schwingrisses sowie zusätzlich Seitenkerben vorzuschreiben.
- Im Gültigkeitsbereich der T_o-Bestimmung ($(T_o - 50\ K) \leq T_o \leq (T_o + 50\ K)$) ist das Masterkurvenkonzept hinsichtlich der Anwendung unterschiedlicher Probenformen und -grössen relativ robust. Auch die Anrisstiefe bei einem Risstiefen-Probenbreiten-Verhältnis a/W von 0,3 bis 0,5 hat einen geringen Einfluss auf T_o. Somit können die in der Schweiz vorhandenen Proben aus den Bestrahlungssätzen der Kernkraftwerke ohne weitere Präparation verwendet werden. Es wird dennoch empfohlen, die Anrisstiefe auf einheitlich a/W = 0,5 nachzuschwingen. Die bestimmten Werte an Kleinproben sind weitgehend auf Bauteile übertragbar.
- Es muss unterschieden werden zwischen der quasistatischen und der dynamischen Bestimmung von Masterkurven, da Unterschiede in der T_o von mehr als 60 K auftreten können. Nach aktuellem Stand der Spannungsberechnungen an den RDB-Stutzen bei Kühlmittelverluststörfällen ist jedoch bekannt, dass hohe Belastungsgeschwindigkeiten, die eine dynamische Bestimmung von T_o rechtfertigen würden, nicht auftreten. Somit sind zum Sprödbruch-Sicherheitsnachweis des RDB quasistatisch ermittelte Masterkurven ausreichend.

Bei den 1,6T-Biegeproben ergaben sich für drei Proben (V6, V7, V13) sehr geringe Bruchzähigkeitswerte von 20 – 30 MPa $m^{½}$ bei den Prüftemperaturen von –60 °C und –70 °C. Die Werte liegen klar unter der 5 %-Bruchwahrscheinlichkeitskurve. Die bisherigen Untersuchungen konnten für dieses Bruchverhalten keine Erklärung finden.

Stars V – Safety Research in Relation to Transient Analysis for the Reactors in Switzerland [4]: Das vom Paul Scherrer Institut durchgeführt Projekt Stars-V beschäftigt sich mit der Pflege und Weiterentwicklung von Methoden und Rechenprogrammen für die Durchführung von deterministischen Sicherheitsanalysen. Diese schliessen das Anlageverhalten der Sicherheitsebene 1 (Normalbetrieb) bis hin zu auslegungsüberschreitenden Störfällen (Sicherheitsebene 4 bis zum evtl. Kernschmelzen) ein. Die Projektresultate 2008 werden im Berichtsteil des PSI zur nuklearen Sicherheit und Entsorgung beschrieben.

MSWI – Melt-Structure-Water Interactions during Severe Accidents in LWR [5]: Das Programm MSWI wird von der schwedischen Königlich-Technischen Hochschule (KTH) in Stockholm durchgeführt. Seit 2006 liegt der Schwerpunkt der Forschungsarbeiten bei der Untersuchung von Phänomenen, welche bei einem schweren Unfall, also einem Unfall mit Kernschmelze, in einem Siedewasserreaktor (SWR) zu erwarten sind. Das übergeordnete Projektziel besteht darin, das Verständnis der bei einem Schwerunfall ablaufenden Prozesse zu verbessern. Die wichtigsten Arbeiten in 2008 waren:

- Fortsetzung der numerischen Simulation der Ausbildung eines Schmelzesees in der Bodenkalotte des Reaktordruckbehälters eines SWR.
- Fortsetzung der Experimente und numerischen Simulationen zur Bildung einer Schmelzpartikelschüttung (durch Ausfliessen der Schmelze nach RDB-Versagen) und Ableitung von Erkenntnissen zur Kühlbarkeit der Schmelze ausserhalb des RDB.

Nachfolgend werden die wichtigsten dabei erzielten Resultate kurz zusammengefasst:

Numerische Simulation der Kernschmelze in der unteren Kalotte eines SWR-RDB: Mittels numerischer Simulation (Computational Fluid Dynamics, CFD) wurde die Ausbildung eines oxidischen Schmelzesees in der RDB-Kalotte eines ABB-SWR dreidimensional berechnet. Die Resultate weisen darauf hin, dass der (lokale) Wärmestrom von der Schmelze in die RDB-Wand grösser ist, als bisher mit einfacheren Verfahren berechnet.

Bei nicht vorhandener RDB-Aussenkühlung werden von der Simulation lokale Temperaturen im Bereich der peripheren Steuerstab-Durchführungen vorhergesagt, bei welchen mit der Steuerstab-Antriebskühlung ein Kriechversagen des RDB-Stahls lediglich verzögert werden kann.

Bildung einer Schmelzpartikelschüttung (Defor-Programm): Bei den Defor-Experimenten wird die Ausbildung der Schmelzpartikelschüttung untersucht, wenn ein Schmelzestrahl in ein Wasserbecken eintritt, dessen Temperatur deutlich unter dem Siedepunkt liegt. Die Versuche haben eine besondere Relevanz im Zusammenhang mit Unfallbeherrschungsstrategien (Severe Accident Management Guidance, SAMG) für SWR, weil diese als zentrale mildernde Massnahme ein Fluten des Containments vorsehen. Ziel der Experimente ist es, letztendlich bessere Vorhersagen zur Kühlung der aus dem RDB ausgetretenen Kernschmelze zu erhalten. Die bei der Schmelze-Wasser-Wechselwirkung ablaufenden Prozesse sind hochkomplex. Im Jahr 2008 standen experimen-

telle Arbeiten zur Partikelform und die numerische Simulation des Partikelbetts im Vordergrund. Die bisher im Defor-Programm erzielten Resultate lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Bei hohem Kühlungsgrad bildet sich – nach starker Strahlfragmentierung – eine hochporöse Partikelschüttung (60 – 70 %). Die chemische Zusammensetzung der Schmelze hat dabei kaum einen Einfluss auf die Porosität.
- Bei geringem Kühlungsgrad wird nach Eintritt der Schmelze ein starkes Sieden beobachtet. Die sich ausbildende Schüttung besteht aus stark zusammengeballten Partikeln, d. h. einem «Schmelzkuchen» mit einer Porosität im Bereich von 45 – 59 %.
- Typischerweise weisen die gebildeten Partikel eine raue Oberfläche auf.
- Die mikroskopischen Parameter (z.B. Partikelform, Oberfläche der Partikel etc.) haben einen bedeutenden Einfluss auf die Eigenschaften der gesamten Partikelschüttung.
- Die Zirkulation des Wassers durch das Partikelbett, angetrieben von der Nachzerfallswärme der Partikel, verhindert – z.B. durch Kanalbildung – die Ausbildung einer kompakten, schwer kühlbaren Konfiguration.

Melcor – Überprüfung und Weiterentwicklung des Rechencodes Melcor für die Analyse schwerer Unfälle in Leichtwasserreaktoren [6]: Das Rechenprogramm Melcor dient der Simulation von schweren Unfällen in Leichtwasserreaktoren. Es bildet Unfälle vom einleitenden Ereignis bis zur Freisetzung radioaktiver Substanzen in die Umgebung ab und wird ständig den Erkenntnissen der Unfallforschung angepasst.

Als besonders bedeutsam für die Beschreibung von schweren Unfällen gilt die Oxidation der Brennstoff-Hüllrohre in sauerstoffhaltiger Umgebung. Das Hauptziel des dritten Projektjahres war die Programmierung des Oxidationsvorgangs. Die Kinetik, also der Geschwindigkeitsverlauf der Oxidationsreaktion, wurde für das Hüllrohr-Material Zircaloy und für drei weitere Legierungen bei Temperaturen zwischen etwa 600 und 1'100 °C untersucht. Dabei wurden gleichzeitig die Anteile von Sauerstoff, Stickstoff und Wasserdampf variiert. Es zeigte sich einerseits, dass die genauen Eigenschaften der Oxidschicht (Kristallstruktur) und deren periodisches Abbrechen bei Überschreiten einer bestimmten Mächtigkeit die Oxidationsgeschwindigkeit bestimmen. Andererseits kam es bei geringen Sauerstoff- und hohen Stickstoffgehalten der Gasphase zur Bildung von Zirkonnitrid, das ebenfalls von der Oberfläche abbrechen kann. Einen Einfluss auf die Oxidation hat ausserdem, ob das Hüllrohrmaterial unter normalen Reaktorbedingungen vorbehandelt wurde oder nicht. Typischerweise erfolgt die Oxidation unter sauerstoffreichen Bedingungen anfänglich sehr schnell (parabolische Kurve) und geht mit dem Anwachsen der schützenden Oxidschicht nach einigen Minuten in einen linearen Verlauf über.

Eine zunächst parabolische und dann lineare Kinetik wurde im Oxidationsmodell nachgebildet. Anschliessend wurde das Modell mit den experimentellen Daten verglichen. Dabei zeigte sich, dass das Modell bei niedrigen Temperaturen bis 800 °C bereits gut mit den gemessenen Werten übereinstimmt, während mit zunehmender Temperatur die Abweichungen etwas grösser werden. Daher kann das Modell in der momentanen Form noch nicht in Melcor eingebaut werden. Der nächste Schritt ist die Validierung des Modells mit Daten aus weiteren Experimenten, die in Cadarache (Frankreich) und Luch (Russland) durchgeführt wurden. Anschliessend soll der Einbau in das Programm Melcor erfolgen.

OECD MCCI – Melt Coolability and Concrete Interaction [7]: In diesem Projekt werden am Argonne National Laboratory in Chicago (USA) Versuche zur Kühlbarkeit von Kernschmelze und der Wechselwirkung zwischen Kernschmelze und Beton durchgeführt. Im Jahr 2008 handelte es sich um folgende Arbeiten:

Im Oktober 2008 wurde ein weiterer Test der Reihe *Small-Scale Water Ingression and Crust Strength* (SSWICS-11) durchgeführt. Er bestätigte, dass sich der Austritt von Gasen aus dem mit der Kernschmelze wechselwirkenden Beton positiv auf die Kühlbarkeit auswirkt.

Test Nr. 5 der Reihe *Core-Concrete Interaction* (CCI-5, September 2008) lieferte wichtige Daten zum Unfallablauf bei fehlender Kühlung, insbesondere zum Temperaturverlauf und zur Betonabtragung während der Schmelze-Beton-Wechselwirkungen.

OECD OPDE – Piping Failure Data Exchange Project [8]: Die OPDE-Datenbank beinhaltet Informationen von Schadensbefunden an sicherheitstechnisch klassierten und risikorelevanten Rohrleitungen in Kernkraftwerken, die zu Wandstärkeschwächungen, Rissen, Leckagen oder Brüchen geführt haben. Im Vordergrund steht der internationale Erfahrungsaustausch über Ursachen und Auswirkungen von Rohrleitungsschäden.

Am 1. Juni 2008 wurde die dritte Phase des Projektes begonnen, die vom 1. Juni 2008 bis 31. Mai 2011 dauert und bei der nach derzeitigem Stand 11 Länder mitwirken werden. Neben der Weiter-

führung der Datenbank und der formellen Einleitung der dritten Projektphase war die Durchführung eines Workshops zur RISMET-Studie über die verschiedenen Vorgehensweisen zur Erstellung von Wiederholungsprüfprogrammen ein wichtiges Projektziel für das Jahr 2008. Das Treffen wurde von 63 angemeldeten Teilnehmern aus den wichtigsten OECD-Ländern mit Kernkraftwerken besucht.

OECD ICDE – International Common Cause Failure Data Exchange [9]: Generelles Ziel des Projekts ist die Förderung des internationalen Erfahrungsaustausches über Ereignisse, bei denen gleichartige Fehler an mindestens zwei (sicherheitsrelevanten) Komponenten aufgrund gemeinsamer Ursache auftraten, so genannte Common-Cause Failure (CCF)-Ereignisse. Im Jahr 2008 wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Die Auswertung der CCF-Ereignisse für den Komponententyp Füllstandsmessung wurde abgeschlossen, der Analysebericht wurde erstellt und veröffentlicht.
- Der Analysebericht für den Komponententyp Steuerstabantriebe ist in Vorbereitung.
- Die Datensammlung für den Komponententyp Wärmetauscher ist im Gange.
- Für den neu in die Datensammlung aufgenommenen Komponententyp Lüfter wurde die Kodierungsrichtlinie erstellt und von den anderen Mitgliedsländern kommentiert. Die Richtlinie wird dementsprechend überarbeitet.
- Die für die Datenerfassung neu entwickelte ICDE-Datenbank wurde um zusätzliche Filterfunktionen erweitert, um die Verwaltung und Auswertung der Datensätze zu erleichtern, beziehungsweise besser zu unterstützen. Insgesamt wurde das Ziel eines weit gehend fehlerfreien Betriebs der Datenbank erreicht.

OECD FIRE – Fire Incident Record Exchange [10]: Das Ziel des Projekts ist die Erhebung und die Analyse von Daten zu Brandereignissen in Kernkraftwerken der OECD-Mitgliedstaaten. Die in OECD FIRE entwickelte Datenbank steht denjenigen Staaten zur Verfügung, die Daten beisteuern. Im Jahre 2008 wurden Daten zu weiteren Brandereignissen gesammelt und ein Teil der Dokumentation («Coding Guidelines») weiter entwickelt, die zu der bereits festgelegten Datenbankstruktur gehört. Auch wenn die Anzahl der bisher ausgewerteten Brände (334 Ereignisse, die meisten davon qualitätsgesichert) noch relativ klein ist, ermöglicht sie z. B. eine grobe Abschätzung der Häufigkeit schwerwiegender Brände. Diese überschreiten auf jeden Fall die unterschiedlichen Meldeschwellen der teilnehmenden Länder und sind daher mit hoher Zuverlässigkeit in der Datenbank erfasst. Erste, noch vorläufige Ergebnisse lassen vermuten, dass die Häufigkeit solcher Brände in bisher durchgeführten probabilistischen Brandanalysen tendenziell zu hoch angesetzt ist, die darauf basierenden Kernschadensbeiträge also konservativ berechnet sind.

OECD Cabri Waterloop Project [11]: Am Forschungsreaktor Cabri in Cadarache (Frankreich) werden Versuche zum Hochabbrandverhalten von Brennstäben bei schnellen Reaktivitätsstörfällen («Reactivity Initiated Accidents», RIA) in Kernreaktoren durchgeführt. Das Projekt stützt sich auch auf Einzeleffekt-Tests im Rahmen des Versuchsprogramms PROMETRA, mit denen vom Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) in Saclay, Frankreich, das mechanische Verhalten bestrahlter Hüllrohrproben bei den für RIA typischen hohen Dehnungsraten untersucht wird. Im Jahre 2008 wurden folgende Projektziele erreicht resp. aufgrund neuer Anforderungen modifiziert:

- Ende April 2008 wurden an Schweissnähten der seismischen Verstärkung des «in-pile»-Tanks mehrere Defekte festgestellt. Die Reparatur ist im Gange, jedoch wird sich der Qualifikationstest CIPQ für den Water Loop um ca. 8 Monate verzögern.
- Die Testmatrix des Cabri International Project (CIP) wurde überprüft und hinsichtlich der Testserie CIP3 modifiziert. Weitere Hüllrohrmaterialien (z. B. M–MDA von Mitsubishi) sollen einbezogen werden. Auf den Test mit chromdotiertem Brennstoff wurde verzichtet.
- Für die Tests mit verschiedenen Brennstoffen/Hüllrohrmaterialien CIP2-1 wurde das stationäre Brennstabverhalten rechnerisch modelliert und mit Messwerten verglichen.
- Die für den Test CIP4-2 vorgesehenen MOX-Brennstabsegmente aus dem Kernkraftwerk Beznau wurden zusätzlich mittels zerstörender Verfahren charakterisiert.

OECD COMPSIS – Exchange of Operating Experience Concerning Computer-based Systems Important to Safety [12]: Im COMPSIS-Projekt wurde im Rahmen der OECD–NEA eine internationale Datenbank von Betriebserfahrungsdaten von rechnerbasierten Systemen in Kernkraftwerken erstellt. Diese Daten werden nun erweitert und ausgewertet. Dringendstes Anliegen ist die Erfassung und Qualitätsprüfung weiterer Daten sowie deren Bereitstellung für Analysen. Die Haupttätigkeiten des zentralen so genannten Clearing House bestanden vor allem in der Unterstützung der Teilnehmer bei der Erfassung der Daten und die Bereitstellung der Daten. Die Auswertung der Daten erfolgt aus den bekannten Ereignissen, welche in der Datenbank anonym erfasst werden.

OECD Halden Reactor Project (HRP) [13]: Das OECD Halden Reactor Project (HRP) hat zwei Stossrichtungen: Brennstoff- und Materialverhalten («Fuels & Materials») sowie Mensch-Technologie-Organisation. Im Bereich Brennstoff und Materialverhalten stehen zurzeit der Hochabbrand von Brennstoffen in Leichtwasserreaktoren und der Einfluss von Strahlung, Wasserchemie sowie mechanischen und thermischen Belastungen auf die Materialalterung von Kerneinbauten im Vordergrund. Im Bereich Mensch–Technologie–Organisation (MTO) werden empirische Studien durchgeführt zum Zusammenspiel zwischen Reaktoroperateuren und den ihnen in den Kontrollräumen zur Verfügung stehenden Kontrollanzeigen und Steuerpulten. Im Folgenden werden die für die Schweiz besonders interessanten Arbeiten im Berichtsjahr kurz beleuchtet.

Halden Board of Management: Schwerpunkte der zwei Treffen vom Juni in Halden und Dezember in Lyon waren die Berichterstattung über die laufenden Experimente im Versuchsreaktor sowie im «Man–Machine Laboratory» und «Virtual Reality Center» im norwegischen Halden, zudem die Erneuerung des Vertrags für die Fortführung des Programms in der Periode 2009 – 2011. Die Betriebsbewilligung des 1959 in Betrieb genommenen Halden-Versuchsreaktors wurde von der norwegischen Regierung um sechs Jahre verlängert.

Bereich Brennstoff- und Materialverhalten: Die Untersuchungen zielen auf die Messung von Kenngrössen der keramischen Brennstoffe bei hohem Abbrand und unter Störfallbedingungen ab. In vergleichenden Bestrahlungen wird zudem das Betriebsverhalten von Hüllrohrmaterialien bezüglich Korrosion und Aufbau von «Crud» untersucht. Die verschiedenen Bestrahlungstests liefern einzigartige Daten für die Validierung der Modelle zum thermomechanischen Verhalten von Brennstoff und Hüllrohren. Die Testeinrichtung für Versuche unter Kühlmittelverlust-Störfallbedingungen mit Hochabbrandbrennstoffen aus kommerziellen Reaktoren wurde erneut qualifiziert, nachdem eine Reihe von Tests bei 800 ºC und 1’050 ºC durchgeführt worden waren. Ein erster Versuch mit einem Brennstoffsegment aus einem Siedewasserreaktor (Kernkraftwerk Leibstadt) wurde ausgeführt und ergab eine gute Übereinstimmung mit der Modelierung des Paul Scherrer Instituts. Die erhaltenen Resultate geben jedoch noch kein ausreichendes Bild und sollen weitergeführt werden. Von besonderem Interesse ist das Experiment mit Zusatzstoff-haltigen Uranoxidbrennstoffen bei hoher linearer Stableistung. Die Nachbestrahlungs-Untersuchungen sind im Gang.

Bei einem weiteren Experiment mit einem Siedewasserreaktor-Brennstab mit hohem Abbrand wurde der Brennstab-Innendruck stufenweise erhöht. Die dabei beobachtete Aufweitung des Hüllrohrs und Ausdehnung des Brennstoffs lässt sich nicht anhand von Kenndaten erklären, die in früheren Versuchen mit Druckwasserreaktor-Brennstoff ermittelt wurden. Der Versuch wird weitergeführt.

Die Versuche mit Materialien von Kerneinbauten gelten vorab der strahlungsinduzierten Spannungsrisskorrosion in normaler und reduzierender Wasserchemie. Rostfreie Stähle, die für Reaktoreinbauten verwendet werden, zeigten interessante strahlungsinduzierte Veränderungen. Der Einfluss einer variierenden Wasserchemie auf das Risswachstum unter Bestrahlung konnte nachgewiesen werden. Mit einer Reihe von Versuchen wurden die Resultate bei hohen und mittleren akkumulierten Neutronenfluenzen erhärtet.

Bereich Mensch–Technik–Organisation: Auf dem Gebiet der Gestaltung und Evaluation von Verbindungsstellen zwischen Mensch und technischen Systemen («Human–System-Interface», HSI) wurde das HSI-Konzept für Kernkraftwerke der Zukunft vorgestellt. Das Ziel ist, Stärken und Schwächen der zukünftigen Verbindungsstellen zu bestimmen und Lösungen zu deren Optimierung zu erarbeiten. Die Gestaltungs- und Evaluationsarbeiten liefern gleichzeitig erste Antworten auf die Frage, wie die Operateure in Zukunft geschult werden sollen.

Elektronische Visualisierungs-Instrumente, die mit virtueller Realität arbeiten, haben sich als viel versprechend für die Planung und Schulung herausgestellt. Im Rahmen des HRP wurden hierfür nötige Software-Applikationen weiterentwickelt. Zudem wurden elektronische Handgeräte, die auf dem Halden «ProcSee Display System» basieren, in der Halden-Reaktoranlage getestet: Solche Handgeräte können einen Anlagenoperateur unterstützen, indem er jederzeit dort, wo er gerade tätig ist, aktuelle Betriebs- und Anlagendaten abrufen kann.

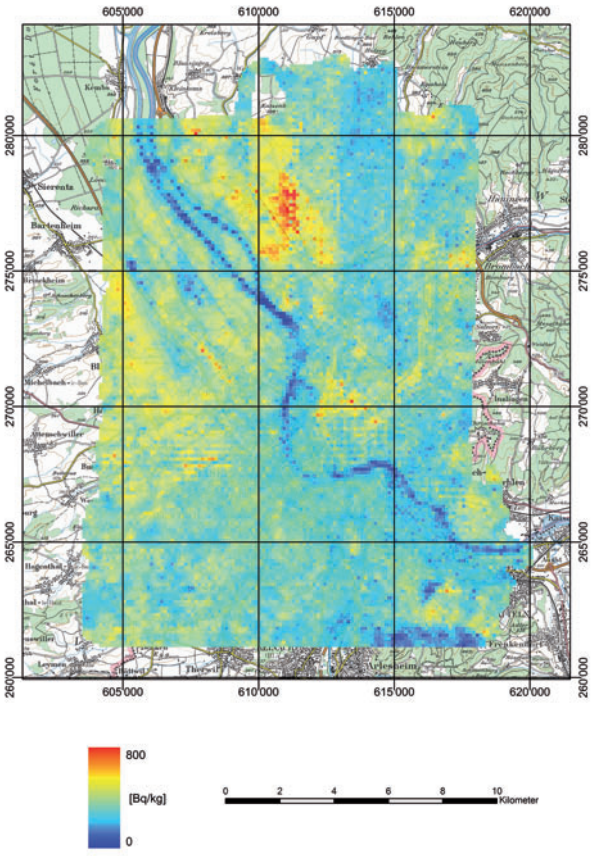
Das HRP spielt eine wichtige Rolle bei der Bewertung von Methoden für die Analyse von menschlichen Versagenswahrscheinlichkeiten und den Auslösern für menschliches Versagen («Human Reliability Analysis», HRA). Halden führte Versuche mit Operateurgruppen im Simulator durch, um Referenzdaten für Störfälle in Kernkraftwerken zu erhalten. Im Rahmen der «International Empirical HRA Study» werden zwölf verschiedene HRA-Methoden bewertet. Kernkraftwerks-Betreiber, Methodenentwickler, Nuklearforschungs-Institute und Aufsichtsbehörden nehmen daran teil. Die Studie soll im Jahr 2009 abgeschlossen werden.

Bei den heutzutage stark rechnergesteuerten Kernanlagen ist der Einfluss von Software-Systemen auf die Sicherheit eine zentrale Fragestellung. Im Vordergrund stehen dabei die Anforderungen an das zu entwickelnde System, die im Rahmen des so genannten Requirements Engineering ermittelt werden. Das HRP entwickelte eine Methode, mit der sich die Resultate des «Requirements Engineering» in eine Risikoanalyse übertragen lassen, und führte hierzu eine Fallstudie durch.

Strahlenschutz

Entwicklungs- und Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Strahlenmesstechnik [14]: Die Sektion Messwesen der Abteilung für Strahlenschutz und Sicherheit des PSI befasst sich mit Fragen zur Eichung und zur Kalibrierung von Dosimetriesystemen und Strahlenmessgeräten. Für das ENSI führt diese Sektion Expertisen sowie Entwicklungs- und Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Strahlenmesstechnik durch. Die wichtigsten Ergebnisse im Jahre 2008 waren:

Das Teilprojekt «Umsetzung der Richtlinie R-13 an den Beispielen Rückbau DIORIT und SAPHIR» wurde abgeschlossen. Die Kalibrierungen



Figur 2: Zusammengesetzte Karte der Kalium-40-Aktivitätskonzentration. Die in der Region Basel entdeckten erhöhten K-40-Werte konnten durch Bodenmessungen des Kantonalen Laboratoriums Basel Stadt bestätigt werden. Ursache sind Gesteine mit natürlicher K-40-Anreicherung. (Quelle: PSI)

der Freimessanlage (RTM644Inc) mit einem so genannten Metallplattenphantom wurden validiert. Unter einem Phantom versteht man eine Einrichtung, die das Messgut möglichst realistisch nachbildet. Zusätzlich wurde eine Kalibrierung mit dem Plattenphantom in eine Kalibrierung für eine Mulde mit Kies umgerechnet. Zudem konnten die vom Hersteller der Freimessanlage vorgegebenen nuklidspezifischen Korrelationsfaktoren zwischen Kobalt-60 und Caesium-137 bestätigt werden.

Das Teilprojekt «Vollständige Beschreibung der Energieabhängigkeit eines Messinstrument-Transfernormals für die Ortsdosisleistung von Umgebungs- und Hochenergiephotonenstrahlung» wurde ebenfalls abgeschlossen. Dabei ging es um die Erstellung der Dokumentation für eine Hochdruck-Ionisationskammer vom Typ Reuter-Stokes.

Im Teilprojekt «Eichung und Kalibrierung von Ortsdosisleistungs-Messgeräten für die Umgebungsüberwachung» wurden Messungen am Zaun des Kernkraftwerks Leibstadt durchgeführt. Dabei wurden die Antworten tragbarer Messgeräte auf die Umgebungsdosisleistung von Hochenergiephotonen untersucht. Als Referenzmesssystem wurde die oben erwähnte Hochdruck-Ionisationskammer vom Typ Reuter-Stokes verwendet. Die Auswertung der Ergebnisse verschiedener Messgeräte ergaben für die N-16-Ortsdosisleistungen sowohl Unter- wie auch Überschätzungen in der Grössenordnung von ca. 40 – 50 %.

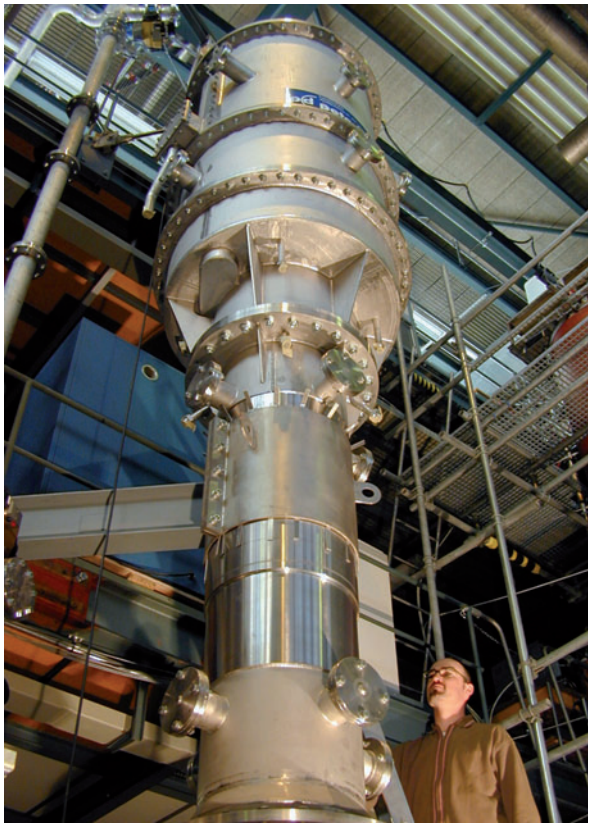
Im Rahmen des Teilprojekts «Teilnahme und Berichterstattung über die jährlichen Aeroradiometrieübungen» wurden die Stadtgebiete von Basel (Figur 2), Bern und Genf und das Gebiet um die Kernkraftwerke Beznau und Leibstadt sowie die Umgebung des ZWILAG und des PSI radiometrisch ausgemessen. Es konnten mit Ausnahme der Betriebsareale der Kernanlagen keine erhöhten Messwerte registriert werden. Auf den Betriebsarealen wurden die gesetzlichen Grenzwerte eingehalten.

Entwicklungs- und Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Radioanalytik [15]: In der Radioanalytik werden chemische und physikalisch-chemische Untersuchungen in Verbindung mit Kernstrahlungsmessungen an verschiedensten radionuklidhaltigen Proben durchgeführt. Im PSI befasst sich damit die Sektion Messwesen der Abteilung Strahlenschutz und Sicherheit. Im Jahr 2008 wurden vier Teilprojekte durchgeführt:

– Das Rückhaltebecken PSI-Ost soll zurückgebaut werden. Zur Entsorgung des darin abgelagerten Schlammes muss sein Aktivitätsinventar bestimmt werden. Zur qualitativen Bestimmung des Strontium-90 wurde eine Methode für den Totalaufschluss komplexer Matrizen eingeführt.

- Auch die Trennung von trivalentem Americium mit einem Extraktionsharz (DGA-Resin) konnte erfolgreich an Schlammproben aus dem PSI-Rückhaltebecken sowie an Bodenproben (Immissionsüberwachung) durchgeführt werden.
- Die Evaluation von massenspektrometrischen Verfahren zur Bestimmung von Alphastrahlern bei der Inkorporations- und Immissionsüberwachung ergab, dass diese im Vergleich zur Alpha-Spektrometrie nur unwesentlich empfindlicher sind.
- Im Jahr 2008 nahm die Sektion Messwesen an Vergleichsmessungen auf nationaler und internationaler Ebene teil. Bei fast allen Vergleichsmessungen lies sich eine sehr gute Übereinstimmung der PSI-Resultate mit den Referenzwerten feststellen.

Artist – Aerosol Trapping in the Steam Generator [16]: Das Artist-Projekt befasst sich mit KKW-Unfallsequenzen mit Kernschmelzen, Containment-Bypasssequenzen, Dampferzeuger-Heizrohrbruch und fehlerhafter Isolation des Dampferzeugers. Denn bei diesem Unfalltyp können radioaktive Stoffe in form von Aerosolen direkt an die Umwelt abgegeben werden. Das Ziel des Artist-Projekts ist es, die Rückhaltung der Aerosole im Dampferzeuger genauer zu quantifizieren.



Figur 3: Dampferzeuger-Modell, mit dem die Rückhaltung von radioaktiven Stoffen im Falle von schweren KKW-Unfällen untersucht wird. (Quelle: PSI)

Im Rahmen des Artist-Projekts wurden am PSI insgesamt 42 Versuche zum Aerosolverhalten und 50 Versuche zum Tropfenverhalten im Tropfenabscheider und Dampftrockner durchgeführt (Figur 3). Zusätzlich wurden von den Konsortiumspartnern 13 Versuche zum Aerosolverhalten im Nahfeld und 21 Versuche zum Ablagerungs- und Freisetzungsverhalten in Rohren vorgenommen. Begleitet wurden die experimentellen Arbeiten von zahlreichen Computersimulationen sowie von Arbeiten zur Modellentwicklung und zur Entwicklung einer Methodik, wie die Artist-Daten in Sicherheitsanalysen zur Risikobewertung schwerer Unfälle umgesetzt werden können.

Das Projekt untersucht parallel verschiedene Einzelaspekte des Aerosoltransports. Es ist nach räumlichen Gesichtspunkten der untersuchten Effekte im Dampferzeuger in sieben Projektphasen, gegliedert. Die wichtigsten Ergebnisse können folgendermassen zusammengefasst werden.

Phase I: *Aerosol-Rückhaltung in den Dampferzeugerrohren:* Bei trockenen Bedingungen ohne Dampfanteil und sehr geringen Aerosolkonzentrationen hat die Grösse der Aerosolpartikel erheblichen Einfluss auf die Rückhaltung. Für grössere Partikelkonzentrationen von 60 mg/m^3 und mehr wurde ein sehr dynamisches Verhalten des Abscheideprozesses gefunden. Bereits bei geringem Dampfanteil erhöht sich die Rückhaltung erheblich.

Phase II: Aerosol-Rückhaltung im Nahbereich des Heizrohrbruches (trockene Bedingungen): Im Nahbereich des Heizrohrbruches liegt ein hohes Potenzial für die Rückhaltung von Aerosolen vor. Die Partikelgrösse hat dabei einen erheblichen Einfluss auf den Rückhaltegrad. Grössere Partikel werden stärker zurückgehalten als kleinere.

Phase III: Aerosol-Rückhaltung im Fernfeld des Heizrohrbruches (trockene Bedingungen): In weiterer Entfernung von der Heizrohrbruchstelle wurde nur eine geringe Rückhaltung von Aerosolen gefunden. Die Partikelabscheidung erfolgt im Wesentlichen im Bereich der Stützplatten der Heizrohre. Dort bildet sich eine sehr dünne Aerosolschicht.

Phase IV: Aerosol-Rückhaltung im Tropfenabscheider und im Dampftrockner (trockene Bedingungen): Das Rückhaltevermögen, charakterisiert durch den Dekontaminationsfaktor (DF), ist sowohl im Tropfenabscheider als auch im Dampftrockner relativ konstant. Der gemessene DF in Tests, bei denen nur der Tropfenabscheider verwendet wurde, unterscheidet sich nur unwesentlich vom DF in solchen Tests, bei denen der Tropfenabscheider zusammen mit dem Dampftrockner eingesetzt wurde. Der Massendurchfluss des Trägergases hat dabei nur einen sehr kleinen Effekt auf die gesamte Rückhaltung.

Phase V: Aerosol-Rückhaltung bei gefluteter Sekundärseite des Dampferzeugers: Wird die Sekundärseite des Bündelbereichs des Dampferzeugers mit Wasser geflutet, so ist der gemessene DF in den beiden durchgeführten Tests sehr hoch. Bei kleinem Massendurchfluss des Trägergases verweilen die in den Gasblasen enthaltenen Aerosolpartikel länger in der Wasservorlage. Dadurch wird der Gaswaschprozess effektiver und der DF höher.

Phase VI: Rückhaltung von Wassertropfen im Tropfenabscheider und Dampftrockner (trockene Bedingungen): Das Spektrum der Tropfendurchmesser, Abscheidungsgrade für mehrere Durchflussraten des Trägergases und Geschwindigkeitsprofile an verschiedenen Positionen wurden ermittelt. Insgesamt gesehen nimmt die Abscheidung im Tropfenabscheider und Dampftrockner mit zunehmender Tropfengrösse und mit abnehmenden Durchflussraten des Trägergases zu. Dieser Trend wurde besonders für den Drallkörper des Tropfenabscheiders beobachtet. Die Tropfenrückhaltung in den oberen Strukturen des Tropfenabscheiders und im Dampftrockner ist geringer als im Drallkörper und vergleichsweise wenig abhängig von Tropfengrösse und Durchfluss des Trägergases.

Phase VII: Integrale Tests im Modell-Dampferzeuger: Die Versuche, die im integralen Modell-Dampferzeuger durchgeführt wurden, zeigen Ergebnisse, die mit denen aus den Einzeleffekt-Tests konsistent sind. Unter trockenen Bedingungen erfolgt der wesentliche Teil der Aerosolrückhaltung im Nahbereich des Heizrohrbruches.

Transport und Entsorgung

Forschungsprojekt Felslabor Mont Terri [17]: Das internationale Forschungsprojekt Felslabor Mont-Terri hat zum Ziel, die geologischen, hydrogeologischen, geochemischen und felsmechanischen Eigenschaften des Opalinustons zu untersuchen. Diese Eigenschaften sind für die Beurteilung der Sicherheit und der bautechnischen Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers für radioaktive Abfälle in diesem Gestein massgebend.

Im Rahmen der Erweiterung des Felslabors und des Baus der neuen Galerie-08 wurde ein neues Projekt, das RC-Experiment («Rock Mass Characterization») für die kommenden 4 Jahre ausgearbeitet und im April 2008 gestartet. Im Vordergrund dieses Experimentes stehen die Gebirgseigenschaften des Opalinustons im projektrelevanten Massstab (geologisches Tiefenlager für radioaktive Abfälle). Diese Gebirgseigenschaften werden aus gemessenen Deformationen in Zusammenhang mit dem Ausbruch der Galerie-08 sowie aus kleinskaligeren Laborversuchen an Trennflächen abgeleitet. Mit dem Experiment sollen Beurteilungsgrundlagen erarbeitet werden, die der späteren Festlegung der Anforderungen an ein Pilotlager-Monitoringsystem dienen. Das Experiment hat drei Testphasen:

Testphase 1 (vor dem Ausbruch): Charakterisierung der ungestörten geologischen Verhältnisse (anhand von Bohrkernen, Aufnahmen mit einem optischen Bohrlochscanner und geophysikalischen Reflexionsseismik-Messungen) und Einbau der Messgeräte für die Erfassung der Verformungsvorgänge in der Testphase 2.

Testphase 2 (während dem Ausbruch): Kontinuierliche Erfassung der Verformungen im Gebirge mittels Messungen in stollenparallelen Bohrungen. Die Stollenabschläge betrugen jeweils 1,3 bis 1,7 m pro Tag. Nach jedem Abschlag wurde die Stollenwand geologisch-tektonisch charakterisiert und Verformungen in den Stollenwänden mittels eines 3D-Tachymeter-Systems und anhand von Laser-Scanning-Messungen erfasst.

Testphase 3 (nach dem Ausbruch): Weiterführen der Verformungs-Messungen in den Bohrungen, Seismikmessungen (Tomographie, Figur 4) entlang den Stollenwänden und ergänzende 3D-Laser-Scanning-Messungen.

Testphase 2 des Experiments konnte dabei plangemäss und erfolgreich durchgeführt werden. Gegenwärtig läuft die Testphase 3 mit kontinuierlicher Langzeitmessung der nur sehr langsam ablaufenden Konvergenzverformung des Gebirges.

Mensch, Organisation und Sicherheitskultur

HRA – Human Reliability Analysis [18]: Hier wird der Einfluss menschlicher Handlungen auf Störfälle in Kernkraftwerken untersucht. Die HRA analysiert diese Handlungen und bewertet sie unter Berücksichtigung der entsprechenden Randbedingungen wie zum Beispiel das für die Handlung zur Verfügung stehende Zeitintervall, die Komplexität der Handlung, die Ausbildung



Figur 4: Instrumentierung für die Seismik-Messungen entlang der Stollenwand der Galerie-08 nach deren Erstellung und Sicherung mit Spritzbeton. (Quelle: ENSI)

der Operateure und die Hilfsmittel der Operateure (insbesondere Vorschriften). Es ist Stand der Technik, mit der HRA Fehlerwahrscheinlichkeiten für Handlungen zu bestimmen, die während eines Störfalls gefordert sind, aber unterlassen werden. Das vom PSI durchgeführte Forschungsprojekt beschäftigt sich mit ungeplanten menschlichen Handlungen, welche den Verlauf eines Störfalls negativ beeinflussen – den so genannten EOC («*Errors of Commission*»). Die Projektresultate 2008 werden im Berichtsteil des PSI zur nuklearen Sicherheit und Entsorgung beschrieben.

Anforderungsanalyse für das Personal in Schweizer Kernkraftwerken [19]: Die Aufgaben des Schichtpersonals (Schichtchef, Reaktoroperateure, Pikett-Ingenieur) im Kommandoraum eines Kernkraftwerks verlangen von den verschiedenen Personengruppen ihrer Tätigkeit angepasste Persönlichkeitsmerkmale. Der dafür nötige Anforderungskatalog wurde letztmals Ende der achtziger Jahre vom Institut für Angewandte Psychologie IAP (heute «Hochschule für Angewandte Psychologie». HAP) in Zürich überarbeitet. In der Zwischenzeit haben sich die Anforderungen an alle genannten Personenkreise erweitert und bedürfen einer eingehenden Überarbeitung. Dabei stellte sich die Frage, ob sich für die drei Personengruppen abgeschlossene Anforderungsprofile erstellen lassen, wie weit sich diese Profile überschneiden und ob sich eine Methode entwickeln lässt, welche auch Personen ohne spezielle Kenntnisse in der Eignungsdiagnostik ermöglicht, diese Profile den sich verändernden Bedürfnissen anzupassen.

Das Projektziel für 2008 bestand in einer Modifizierung und Validierung des Verfahrens zur Erreichung einer möglichst hohen Benutzerfreundlichkeit. Gleichzeitig sollte auch die Güte des Verfahrens sichergestellt werden. Dazu wurden Versuche mit dem Verfahren in anderen Industriezweigen durchgeführt. Mit den Daten aus weiteren Expertenbefragungen in Kernanlagen wurde das Verfahren verfeinert und speziell auf die Situation in schweizerischen Kernkraftwerken abgestimmt. Anhand der durchgeführten Studien in den Werken und an diversen Referenztätigkeiten konnte aufgezeigt werden, dass das Verfahren sowohl *reliable* (genau im Sinne von wiederholbar) wie auch *valide* (genau im Sinne der Zweckerfüllung) Ergebnisse liefert, und dass die Erhebungsdurchführung angemessen ist. Die Güte des Verfahrens konnte klar aufgezeigt werden.

Nationale Zusammenarbeit

Innerhalb der Schweiz haben die Institute, welche die Forschungsarbeiten ausführten, effizient und kooperativ zusammengearbeitet. Regelmässige Gespräche mit dem ENSI ermöglichten eine Ausrichtung der Fachinhalte entsprechend der aktuellen Bedürfnisse. Dabei wurde ausführlich über die Umsetzung der Resultate in die schweizerische Sicherheits- und Aufsichtspraxis diskutiert. Neben dem Paul Scherrer Institut findet im Rahmen der regulatorischen Sicherheitsforschung eine Zusammenarbeit insbesondere mit folgenden Institutionen statt: Institut de Radiophysique Appliquée (IRA) in Lausanne, EMPA, ETH Zürich, EPF Lausanne, Universität Zürich.

Internationale Zusammenarbeit

Die folgenden Projekte sind direkt oder indirekt in Forschungsprojekte des EU-Rahmenprogramms FP6 EURATOM eingebunden:

Kora [1] in den EU-Projekten MTR+I3 und Nulife, ***Diagnostik-II*** [2] im Projekt Nulife, ***Stars*** [4] im EU-Projekt Nuresim, ***MSWI*** [5] im EU-Projekt Sarnet, ***Melcor*** [6] im EU-Projekt Sarnet.

Bei den folgenden Projekten handelt es sich um internationale Kooperationsprogramme:

OECD-MCCI [7], ***OECD-OPDE*** [8], ***OECD-ICDE*** [9], ***OECD-FIRE*** [10], ***OECD Cabri Water Loop Project*** [11], ***OECD COMPSIS*** [12], ***OECD Halden Reactor Project*** [13], ***Artist*** [15], ***Mont Terri*** [16].

Weitere internationale Kooperationen im Rahmen von Forschungsprojekten, internationalen Organisationen und Standardisierungsaktivitäten können den einzelnen Projektberichten (s. u.) entnommen werden.

Bewertung 2008 und Ausblick 2009

Die Projekte konnten im Berichtsjahr grösstenteils planmässig abgewickelt werden. Sie lieferten wichtige wissenschaftliche Grundlagen, welche direkt oder indirekt in die Aufsichtstätigkeit des ENSI einfliessen werden. Der Transfer der wissenschaftlichen Ergebnisse in die operativen Bereiche des ENSI und umgekehrt erfolgt dank der guten Arbeitsbeziehungen mit den Projektlei-

tern und ihren Teams reibungslos. Der Kompetenzerhalt und Kompetenzausbau innerhalb der Aufsichtsbehörde sowie die Bereitstellung von interessanten Forschungsthemen für die Wissenschaftler sind somit gewährleistet. Die Forschungsprojekte, welche im Jahr 2009 gestartet werden, orientieren sich inhaltlich ebenfalls an den oben beschriebenen Schwerpunkten. Grösstenteils wird es sich dabei um Nachfolgeprojekte der im Berichtsjahr abgeschlossenen Aktivitäten handeln.

Liste der F+E-Projekte

Jahresberichte (JB), Berichte und Referenzen zu allen Projekten sowie weitere Informationen finden sich im *Erfahrungs- und Forschungsbericht 2008* des ENSI, der unter www.ensi.ch erhältlich ist oder als Druckversion unter derselben Internet-Adresse bestellt werden kann.

[1] H.P. Seifert, S. Ritter, M. Breimesser, B. Baumgartner, L. Nue, (hans-peter.seifert@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, KORA – Environmentally-Assisted Cracking in Austenitic LWR Structural Materials (JB).

[2] H.J. Leber, M. Niffenegger, B. Tirbonod, M. Ramesh, R. Schwenold, P. Simon, U. Tschanz, (hans.leber@psi.ch), Paul Scherrer Institut, Labor für Werkstoffverhalten, 5232 Villigen PSI, Diagnostik-II – Monitoring of Thermomechanical Fatigue and RPV Embrittlement due to Neutron Irradiation (JB).

[3] C. Zurbuchen, H.-J. Schindler, (c.zurbuchen@fzd.de), Forschungszentrum Dresden-Rossendorf, Postfach 51 01 19, 01314 Dresden, Deutschland, Bruchmechanische Werkstoffcharakterisierung zur Überwachung der Neutronenversprödung von Reaktordruckbehältern (JB).

[4] M.A. Zimmermann and collaborators from the project team, (martin.zimmermann@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, Stars-V – Safety Research in Relation to Transient Analysis for the Reactors in Switzerland (JB).

[5] W.M. Ma, P. Kudinov, A. Karbojian, C.T. Tran, R.C. Hansson, T.N. Dinh, (namdinh@safety.sci.kth.se), Division of Nuclear Power Safety - Royal Institute of Technology, Sweden, MSWI – Melt-Structure-Water Interactions during Severe Accidents in LWRs (JB).

[6] T. Haste, J. Birchley, (tim.haste@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, Code Assessment Program for Melcor1.8.6 (JB).

[7] B. Reer (Bernhard.Reer@ensi .ch), ENSI , 5232 Villigen, Bewertung des Projekts OECD MCCI – Melt Coolability and Concrete Interaction (JB).

[8] S. Schulz (Susanne.Schulz@ensi .ch), ENSI , 5232 Villigen, Bewertung des Projekts OECD OPDE – Piping Failure Data Exchange Project (JB).

[9] R. Hausherr (Rainer.Hausherr@ensi .ch), ENSI , 5232 Villigen, Bewertung des Projekts OECD ICDE – Common Cause Failure Data Exchange (JB).

[10] A. Ramezanian (Annette.Ramezanian@ensi.ch), ENSI, 5232 Villigen, Bewertung des Projekts OECD FIRE – Fire Incident Record Exchange (JB).

[11] H. Wand (Hartmut Wand@ensi .ch), ENSI , 5232 Villigen, Bewertung des Projekts OECD Cabri Waterloop Project (JB).

[12] R. Jäggi (Rudolf.Jaeggi@ensi .ch), ENSI , 5232 Villigen, Bewertung des Projekts OECD COMPSIS – Exchange of Operating Experience Concerning Computer-based Systems Important to Safety (JB).

[13] W. Wiesenack, F. Øwre (Wolfgang.Wiesenack@hrp.no), Institutt for energiteknikk, OECD Halden Reactor Project, P.O. Box 173, NO-1751, Halden, Norway, OECD Halden Reactor Project: Fuels and Materials / Man, Technology, Organisation (JB).

[14] Ch. Schuler, G. Butterweck, M. Boschung, S. Mayer und C. Wernli, (christoph.schuler@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen, Entwicklungs- und Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Strahlenmesstechnik (JB).

[15] J. Eikenberg, M. Jäggi, (jost.eikenberg@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen, Entwicklungs- und Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Radioanalytik (JB).

[16] T. Lind, D. Suckow, A. Dehbi, S. Güntay, (Terttaliisa.Lind@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, Artist – Aerosol Trapping in the Steam Generator (JB).

[17] F. Amann, S. Löw, E. Button, R. Thöny, (florian.amann@erdw.ethz.ch), Chair for Engineering Geology, ETH Zürich, ETH Hönggerberg, CH-8093 Zürich, RC-Experiment Rock Mass Characterisation (JB).

[18] V.N. Dang, L. Podofillini, D. Mercurio, (vinh.dang@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, Human Reliability Analysis (HRA) (JB).

[19] S. Schumacher, M. Kleinmann, Universität Zürich, Psychologisches Institut, Arbeits- und Organisationspsychologie, Binzmühlestrasse 14, 8050 Zürich, Anforderungsanalyse für das Personal in Schweizer Kernkraftwerken (JB).

Impressum

Juni 2009
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
Druck: Ackermanndruck AG, Bern-Liebefeld
Bezug der Publikation: www.energieforschung.ch

Programmleiter
Dr. Reiner Mailänder
Eidg. Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI
CH-5232 Villigen – ENSI
reiner.mailaender@ensi.ch

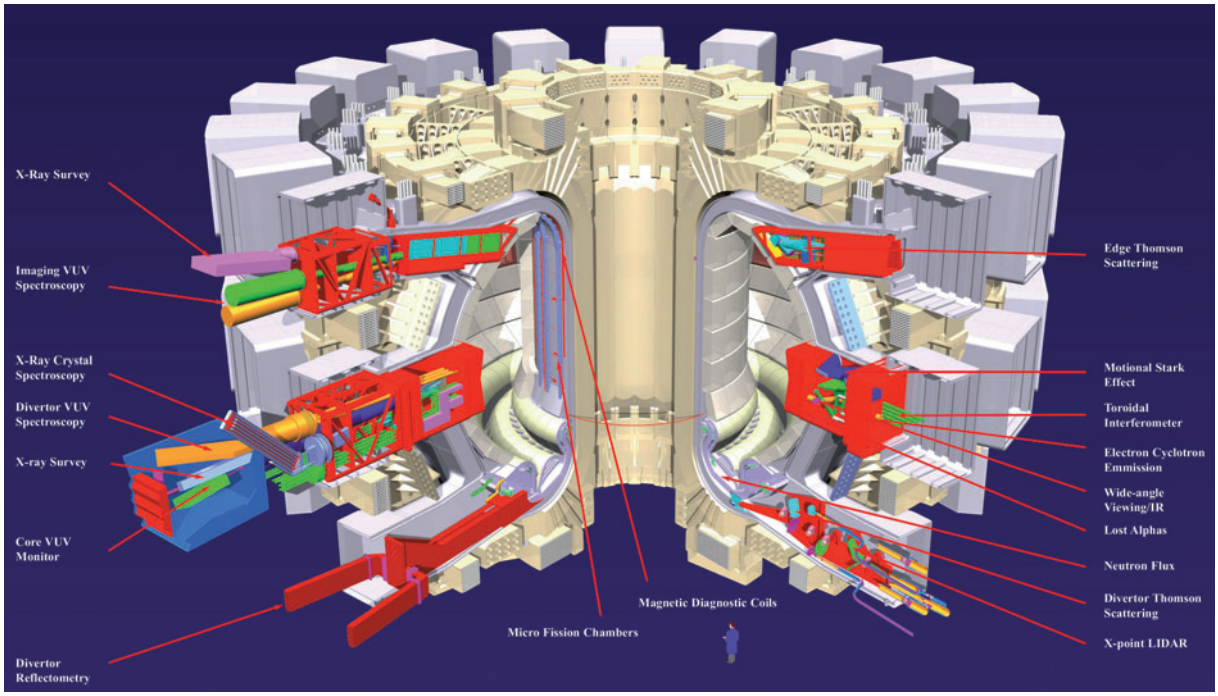
Bereichsleiter
Dr. Christophe de Reyff
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
christophe.dereyff@bfe.admin.ch

Rapport de synthèse 2008 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2008 des BFE-Programmleiters

Programme de recherche
Fusion thermonucléaire contrôlée

Andreas Werthmüller

andreas.werthmueller@sbf.admin.ch



ITER

Le réacteur ITER en coupe, avec les éléments de diagnostic mis en évidence.

Centres de gravité du programme

International thermonuclear experimental reactor (ITER)

La participation formelle suisse dans le projet *ITER* [1] a fait l'objet d'un échange de lettres entre la Suisse et l'Union Européenne. En 2008, le Conseil des États a ratifié, en première lecture, l'échange de lettres. Le Conseil National s'est prononcé le 3 mars 2009.

La construction de *ITER* progresse avec les travaux de génie civil portant sur le site lui-même. La Direction du projet, l'« *ITER Organization* » (*IO*), analyse les conclusions du « *ITER Design Review* » et implémente les mesures nécessaires correspondantes. L'impact de ces mesures sur le coût du projet, son *planning* et sur le *management* est en cours.

Coopération européenne dans le cadre d'Euratom

En 2008, l'Euratom a organisé une évaluation scientifique de sa stratégie à long terme et de l'infrastructure à disposition pour mener à bien cette stratégie. Cet examen a été effectué par un comité international comprenant des spécialistes de la fusion ainsi que d'autres personnalités hors de la fusion. Il est intéressant de noter que, dans le rapport final, le *tokamak TCV* du CRPP [2] est une des quelques installations européennes dont l'importance est reconnue jusqu'à la mise en exploitation d'*ITER* (prévue pour 2018) : en conséquence le maintien du *TCV* jusqu'à cette date est recommandé par le Comité d'évaluation. Le rôle important des autres infrastructures du CRPP a été également souligné.

Pratiquement, toute la recherche effectuée en Europe dans le domaine de la fusion thermonucléaire contrôlée se déroule au sein du programme « Fusion » de l'UE, dans le cadre du traité Euratom [3]. Ce programme, rattaché aux Programmes-cadres de recherche et développement de l'UE, et dont le budget représente environ 30 % des sommes totales attribuées à la fusion en Europe, finance l'exploitation des grandes infrastructures de recherche, comme le *JET* [4], de même que la participation européenne à *ITER* [5]. En outre, il cofinance de nombreuses activités conduites dans les laboratoires nationaux qui lui sont associés, comme, pour la Suisse, le CRPP de l'EPFL. Au titre du 7e PCRDT d'Euratom (2007 – 2011), la recherche en fusion dispose de 1'947 M€ (millions d'euros). Selon une décision du Conseil de l'Union Européenne, 900 M€ sont destinés à la participation européenne à *ITER*. Pour la gestion de cette participation, Euratom a mis sur pied une entreprise commune, appelée « *JU F4E* » (pour « *Joint Undertaking for ITER and the Development of Fusion Energy* **»**, plus simplement dite : « *Joint Undertaking Fusion for Enegy* », d'où dérive le sigle utilisé) [6].

Euratom et la Suisse

L'Accord de coopération entre la Confédération suisse et la Communauté européenne de l'énergie atomique dans le domaine de la fusion thermonucléaire contrôlée et de la physique des plasmas, conclu le 14 septembre 1978, est un accord-cadre de durée illimitée. Des accords plus spécialisés, dits accords d'exécution, fixent les modalités de la coopération avec Euratom en matière de fusion. Ces accords sont actuellement au nombre de quatre : l'*EFDA* (« *European Fusion Development Agreement* »), le *JIA* (« *JET Implementing Agreement* »), qui règle l'utilisation de la grande installation européenne *JET*, l'Accord sur la mobilité, qui encourage et facilite les échanges de personnel entre les Associations, et le Contrat d'association, qui précise les rapports scientifiques, techniques, administratifs et financiers du CRPP/EPFL avec le Programme « Fusion » de l'UE. Ces contrats ont été renouvelés en 2007 pour des durées de un à six ans.

Le CRPP et l'Association Suisse / Euratom

Le CRPP a continué en 2008 à participer aux activités scientifiques et technologiques du programme Euratom. Ses recherches en matière de fusion thermonucléaire contrôlée portent, d'une part, sur la physique du *Tokamak*, la technologie de la fusion (en particulier, le chauffage du plasma et la génération de courant par ondes hyper-fréquences), la théorie et la simulation numérique, à l'EPFL et, d'autre part, sur la supraconductivité et les matériaux, au PSI, à Villigen.

Le *TCV* (*Tokamak à Configuration Variable*) est la plus grande installation expérimentale exploitée sur le site de l'EPFL. Elle présente deux propriétés uniques au monde : d'une part, la grande flexibilité de sa conception et de son mode d'opération permet la création et le contrôle de plasmas de formes très différentes ; ce qui s'avère essentiel pour vérifier les simulations numériques et planifier la géométrie optimale du cœur des futurs réacteurs de fusion ; d'autre part, la densité de puissance hyper-fréquence injectée dans le plasma est un record mondial. C'est en utilisant ces deux caractéristiques uniques que les recherches sur le *TCV* se poursuivent. En 2007 - 2008, une série d'améliorations et de réparations ont été effectuées, impliquant notamment le démontage et le nettoyage des quelque 1'600 tuiles de graphite constituant la paroi. Malgré une campagne

expérimentale relativement courte, de nouveaux résultats significatifs ont été obtenus.

Parmi les points forts obtenus, le *TCV* a apporté une contribution importante à l'étude des régimes stationnaires dans les *tokamaks* : un courant de plasma de plus de 70 kA a pu être maintenu grâce à l'effet dit de « *bootstrap* », dans des décharges présentant par ailleurs une barrière de confinement interne, améliorant d'un facteur 3 à 4 la qualité du confinement par rapport aux lois d'échelles semi-empiriques obtenues dans des décharges standard.

Un autre résultat original a été la création, en première mondiale, d'une configuration appelée « *snowflake* » dans laquelle la configuration magnétique au voisinage de la séparatrice crée un plus grand étalement de la puissance de sortie, offrant ainsi une possibilité de diminuer le maximum de la densité de puissance atteignant les structures de la paroi de la chambre à vide, qui est l'un des facteurs principaux limitant l'opération d'un réacteur de fusion.

Les activités du groupe de théorie et simulation numérique portent sur les domaines suivants : la turbulence et le transport de chaleur et de particules dans les *tokamaks*, l'analyse de l'équilibre et de la stabilité MHD (magnéto-hydrodynamique) des *tokamaks* et *stellarators*, l'application d'ondes radiofréquence et la prospection et l'optimisation de nouvelles configurations de confinement magnétique. Un des résultats importants obtenus en 2008 a été la démonstration de simulations de turbulence en état stationnaire du point de vue statistique, grâce à de nombreuses améliorations apportées aux schémas numériques. Les premières simulations globales de la turbulence d'électrons piégés ont été effectuées avec succès. Un autre résultat majeur a été la prédiction, suivie d'une vérification expérimentale sur le *tokamak* européen *JET*, du contrôle de l'instabilité dite « dent-de-scie » par l'effet des ions rapides créés par chauffage radiofréquence.

Les recherches du groupe de physique des plasmas de base ont pour but la compréhension des fluctuations, de la turbulence et des phénomènes de transport dans les plasmas magnétisés toriques. L'avantage de la machine *Torpex* est qu'elle permet des mesures *in situ* à haute résolution spatio-temporelle. Parmi les résultats obtenus en 2008, mentionnons les interactions des ions rapides avec la turbulence, l'étude d'un régime de confinement amélioré, la découverte d'aspects universels de la statistique des fluctuations, l'étude de l'existence d'un gradient critique pour le déclenchement de la turbulence, le développement d'un nouveau code fluide 3D et la caractérisation complète de la propagation de filaments de plasma.

Le groupe *Fusion Technology Materials*, au PSI, a pour objectif principal l'étude des effets des dégâts provoqués par l'irradiation des matériaux structurels entourant les futurs réacteurs de fusion. Dans ces machines, les neutrons de fusion à haute énergie produiront des cascades de déplacements et des transmutations nucléaires. Ces études ont porté, en particulier, sur les alliages métalliques à faible activation, des aciers ferritiques ou à base de tungstène, et la qualification de ces matériaux pour *ITER* et pour *IFMIF* (« *International Fusion Material Irradiation Facility* », un projet d'installation destinée à des matériaux de fusion sous irradiation). L'approche scientifique est basée sur une analyse à échelle multiple (micro-, méso- et macroscopique) et comporte un volet expérimental et un volet de modélisation. Les expériences d'irradiation ont été effectuées sur le *Swiss Spallation Neutron Source* (*SINQ*) au PSI, ainsi que sur d'autres installations en Belgique, aux Pays-Bas et en Hongrie.

Une part importante des travaux effectués au CRPP en 2008 est étroitement liée à *ITER* :

- Le développement des gyrotrons européens. Un premier prototype a été testé en utilisant le banc d'essai des gyrotrons spécialement développé pour *ITER*. Une puissance de pointe de 1,4 MW a été atteinte sur une impulsion courte.
- Le lanceur d'ondes hyper-fréquences pour *ITER*. Le CRPP représente la principale Association impliquée dans la conception, l'analyse et le test de ce lanceur. Le système de focalisation et d'orientation dynamique a été validé. Un prototype a été testé et a montré la faisabilité des choix initiaux.
- L'usage de l'installation Sultan pour le développement et le test des supraconducteurs d'*ITER*. L'installation Sultan est unique au monde pour qualifier les supraconducteurs qui seront utilisés pour *ITER*. En 2008, plusieurs échantillons destinés aux bobines de champ toroïdal ont été testés pour leurs propriétés de courant critique et de pertes AC.
- Le développement des diagnostics magnétiques sur *ITER* s'est poursuivi en 2008, avec. notamment. la quantification des niveaux de bruit et le développement de prototypes de bobines rapides.
- Le développement du système de contrôle et d'acquisition de données pour *ITER* a abouti à la version finale d'un concept, après révision par les partenaires d'*ITER*.
- Le développement de simulations numériques complètes du *tokamak ITER*, servant à la mo-

délisation de scénarios, a impliqué la combinaison d'un code de calcul d'évolution de l'équilibre et d'un code de transport.

Toutes ces activités de recherches ont abouti en 2008 à une centaine d'articles scientifiques dans des revues spécialisées et à une centaine de communications lors de congrès internationaux, dont plusieurs en tant que papiers invités.

Notons encore que le CRPP a été l'organisateur local de la *22nd IAEA Fusion Energy Conference* qui a eu lieu du 13 au 18 octobre 2008 au Palais des Nations à Genève, sous les auspices de l'AIEA (Agence Internationale de l'énergie atomique, à Vienne) et de la Confédération Suisse. C'était exactement le 50e anniversaire de sa première tenue à Genève lors du 2e Salon international des applications pacifiques de l'énergie atomique « L'atome pour la paix », du 1er au 14 septembre 1958.

L'excellence scientifique se manifeste aussi dans la formation : le CRPP a environ 40 doctorants sur un effectif total de 160 personnes. Enfin, en 2008, 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.

En parallèle, le CRPP a initié les actions qui lui ont été confiées par le SER/SBF dans le cadre des engagements suisses pour la « *Broader Approach* » (approche élargie). Ceux-ci portent sur :

- la livraison d'alimentation haute tension pour les gyrotrons du *tokamak* japonais JT60-SA.
- La conception d'une cellule de test dans *IFMIF (« International Fusion Material Irradiation Facility »)*.
- La R&D en vue de la caractérisation des matériaux en utilisant des mini-échantillons ou éprouvettes.

En plus, le CRPP assure la tâche de promotion industrielle dans le domaine de la fusion et d'*ITER*.

Collaboration nationale

Studies related to plasma-wall interaction in *ITER*, University of Basle [7, 8] : The growing interest about the use of rhodium (Rh) as a material for the first mirrors in *ITER* and the necessity of using it as a thin film deposited on a polished substrate has raised the necessity of the development of a robust deposition technique for the preparation of high-reflectivity mirrors.

Preparation of Rh-coated mirrors by magnetron sputtering has been studied in Basle, and Rh layers with a thickness of 2 µm (micrometers) have been produced so far with a negligible amount of impurities in the layers. Different deposition conditions such as gas pressure, deposition rate and substrate temperature were investigated.

The films have a low roughness and their structure exhibit nanometric crystallites with a dense columnar structure. Amongst all investigated parameters, only the gas pressure during the deposition was observed to have an influence on the optical properties of the film. Otherwise, the measured reflectivity is close to the reflectivity calculated from optical constants of pure rhodium. Storage of the samples in air did not affect the reflectivity. The first laboratory test of erosion by deuterium ions and also annealing cycles are promising in view of diagnostic mirror applications. It is also important to note that the layer survived under erosion conditions in real *tokamak* (*Textor*), although the reflectivity was decreased after exposure in *tokamak* plasmas, further *tokamak* exposures are scheduled.

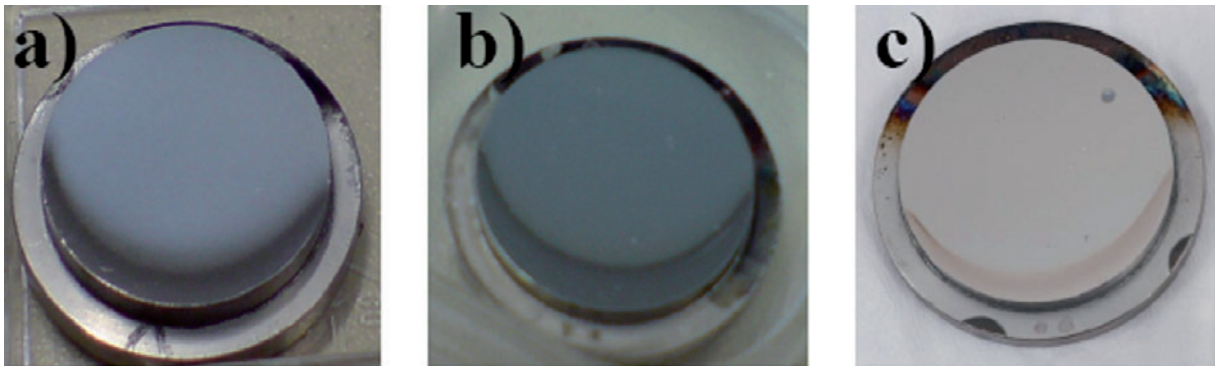


Figure 1 : view of the mirrors after exposure : a) Rh-coated mirror 234_Rh (Univ. of Basle) ; b) Rh-coated mirror ENEA (ENEA Frascati) ; c) Mo-coated mirror 215_Mo. (Univ. of Basle)

A robust method for the finishing of high quality mirrors was successfully tested at the University of Basle. Cleaning of the mirror surface by hydrogen glow discharge is now routinely applied before detailed optical characterisation for mirrors to be exposed in different *tokamaks*. The optimization of the mirror reflectivity by such technique is a prerequisite for a successful mirror test (Figure 1).

Such experiments are ongoing in the present project, and a modified plasma chamber enables us *in-situ* monitoring of the mirror reflectivity during cleaning in deuterium RF plasma. A molybdenum (Mo) mirror exposed in the deposition dominated area of *Textor* was used for this test. Removal of the carbon layer is achieved by chemical erosion and enhanced by increasing the surface temperature. However, for all the conditions investigated, no complete recovery of the reflectivity was achieved. The reason for that seems to be the presence of molybdenum carbide at the interface between the molybdenum substrate and the carbon film. Such carbide can not be removed by chemical sputtering only and an increase of the ion energy to values higher than the physical sputtering threshold would be necessary.

Collaboration internationale

Collaboration dans le cadre de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) [9]

Le programme de l'AIE en fusion nucléaire est étroitement coordonné avec les programmes de recherche nationaux et avec d'autres programmes internationaux, y compris le programme Euratom. Les « *Implementing Agreements* » (IA, ou Accords d'exécution) de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) permettent de réaliser des activités de R&D en exploitant efficacement le savoir combiné d'experts et en évitant des duplications inutiles.

Neuf IA sont actuellement en cours d'exécution, sous la supervision du « *Fusion Power Co-ordinating Committee* », FPCC, dans lequel la Suisse est également représentée. Ils couvrent des thèmes divers liés à la physique des plasmas, aux matériaux et aux aspects socio-économiques de la fusion. Euratom participe à tous ces IA, et les chercheurs suisses sont directement impliqués dans deux de ces IA, l'un concernant la recherche sur les matériaux (EPFL et PSI), l'autre étudiant les interactions plasma-paroi du réacteur (Université de Bâle).

Références

[1] Site internet ITER : http://www.iter.org, Informations sur le projet ITER.

[2] Site internet CRPP : http://crppwww.epfl.ch.

[3] Site internet EFDA : http://www.efda.org, Informations sur la recherche européenne dans le domaine de la fusion.

[4] Site internet JET : http://www.jet.efda.org, Informations sur le Joint European Torus JET.

[5] Site internet ITER-industry : http://www.iter-industry.ch Informations sur les offres d'emplois et sur les appels d'offres en relation avec le projet ITER ou sur la recherche européen dans le domaine de la fusion.

[6] Site internet Joint Undertaking F4E : http://fusionforenergy.europa.eu/index_en.htm, Informations sur le Joint Undertaking «Fusion For Energy» et ses activités, incluant des appels d'offres ou des offres d'emplois.

[7] Site internet Universität Basel : http://pages.unibas.ch/phys-esca.

[8] L. Marot, P. Oelhafen, Universität Basel : Studies related to plasma-wall interaction in ITER (RA/JB) http://pages.unibas.ch/phys-esca/fusion.html.

[9] Site internet des Accords d'exécution en fusion nucléaire de l'AIE http://www.iea.org/Textbase/techno/technologies/fusion.asp.

Impressum

Juni 2009
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
Druck: Ackermanndruck AG, Bern-Liebefeld
Bezug der Publikation: www.energieforschung.ch

Programmleiter
Dr. Andreas Werthmüller
Staatssekretariat für Bildung und Forschung SBF/SER
Hallwylstrasse 4
CH-3003 Bern
andreas.werthmueller@sbf.admin.ch

Bereichsleiter
Dr. Christophe de Reyff
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
christophe.dereyff@bfe.admin.ch

Rapport de synthèse 2008 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2008 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Radioaktive Abfälle

Stefan Jordi
stefan.jordi@bfe.admin.ch



Dialog zwischen Wissenschaft und Gesellschaft

Die Tagung «Experten und Laien – Eine Beziehung mit Perspektiven?!» vom 22. Juni 2007 war ein Ausgangspunkt für das Forschungsprojekt *Kommunikation mit der Gesellschaft*.

Programmschwerpunkte

Das Forschungsprogramm radioaktive Abfälle hat zum Zweck, die regulatorischen Forschungstätigkeiten des Bundes zu koordinieren. Im Rahmen des Forschungsprogramms werden neben technisch-naturwissenschaftlichen Projekten auch solche aus geistes- und sozialwissenschaftlichen Bereichen durchgeführt. Das Programm wurde von einer Arbeitsgruppe aus Vertreterinnen und Vertretern des Bundesamtes für Energie (BFE), der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), der Kommission Nukleare Entsorgung (KNE), der Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA) sowie einer Fachhochschule in den Jahren 2006/07 erarbeitet und mit der Arbeitsgruppe des Bundes für die nukleare Entsorgung (AGNEB) konsolidiert. Eine ad-hoc-Untergruppe der AGNEB entwarf im April 2008 einen Zeitplan für die anstehenden Forschungsprojekte und diskutierte die Abhängigkeiten der einzelnen Forschungsprojekte untereinander. An der AGNEB-Sitzung vom 12. September 2008 wurde das Forschungsprogramm radioaktive Abfälle verabschiedet. Mit diesem ist der Forschungsbedarf im Bereich Entsorgung radioaktiver Abfälle des Bundes bis ca. 2013 abgedeckt. Das BFE betreut die geisteswissenschaftlichen Projekte und das Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) die regulatorische Sicherheitsforschung. Sowohl das BFE als auch das ENSI initiieren die Projekte in ihrem Bereich, vergeben die Aufträge und stellen die Finanzierung sicher. Die AGNEB begleitet und koordiniert die Umsetzung und Aktualisierung des Forschungsprogramms radioaktive Abfälle. Die einzelnen Forschungsprojekte werden wissenschaftlich begleitet. In diesen Begleitgruppen sind je nach Projekt die entsprechenden Bundesstellen vertreten und/oder Vertretende der Hochschulen sowie weitere Expertinnen und Experten. Im Jahr 2008 bildeten die Themen Kommunikation mit der Gesellschaft sowie Wissenserhalt und Markierungskonzepte die Schwerpunkte des BFE. Die HSK arbeitete am Forschungsprojekt Abfallbewirtschaftung im Vergleich. Angaben zu diesem Projekt finden sich im Erfahrungs- und Forschungsbericht der HSK.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2008

Kommunikation mit der Gesellschaft

Das im Juni 2007 gestartete Forschungsprojekt *Kommunikation mit der Gesellschaft* hat zum Ziel, Grundlagen für die Informations- und Kommunikationstätigkeiten der Behörden und der regionalen Partizipation während der Umsetzungsphase des Sachplans geologische Tiefenlager zu liefern, und aufzuzeigen, wie Vertrauen zwischen den Akteurinnen und Akteuren aufgebaut und ein konstruktiver Dialog geführt werden kann. Den Auftrag für das Projekt erhielten die Firma Synergo, Zürich, sowie die gemeinnützige Gesellschaft Dialogik, Stuttgart. Im Jahr 2008 haben drei Begleitgruppensitzungen stattgefunden. Daran nahmen Vertreterinnen und Vertreter des Bundes und der Wissenschaft sowie Kommunikationsfachleute teil. Nach einer Diskussion zum methodischen Vorgehen an der ersten Sitzung im März, wurden an den Sitzungen im Juli und November die Zwischenberichte besprochen. Die Resultate des Projektes werden in zwei Berichten festgehalten: Einer enthält die Synthese der ausgewerteten Fallstudien in Belgien, Deutschland und Schweden, ein anderer Grundlagen guter Kommunikationspraxis. Darauf basierend wird als Abschluss des Forschungsprojekts im Jahr 2009 ein Leitfaden für die Kommunikation in den von der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) für geologische Tiefenlager vorgeschlagenen Gebiete erstellt.

Umfrage zu radioaktiven Abfällen

Im Auftrag des BFE wurde im Juli 2008 eine repräsentative Umfrage bei 1 026 Schweizer Bürgerinnen und Bürgern in allen Landesteilen durchgeführt. Eine nahezu identische Befragung ist im Frühjahr 2008 im Auftrag der Europäischen Kommission bei rund 27 000 Bürgerinnen und Bürgern in der ganzen EU durchgeführt worden. Die vom BFE in der Schweiz durchgeführte Umfrage hat ergeben, dass die Schweizerinnen und Schweizer mehrheitlich skeptisch gegenüber der Kernenergie eingestellt sind. Demgegenüber wünschen sie sich aber eine rasche, konkrete Lösung für die Entsorgung der radioaktiven Abfälle und verlangen einen direkten Einbezug in die damit verbundenen Entscheidungsprozesse. Die Umfrage liefert eine Grundlage für das Forschungsprojekt *Werthaltungen und Interessen in der Entsorgung radioaktiver Abfälle*, welches 2009 gestartet werden soll.

Wissenserhalt und Markierungskonzepte

Der Bund hat gemäss Kernenergiegesetz und -verordnung dafür zu sorgen, dass die Informationen über Tiefenlager langfristig erhalten bleiben. Zudem muss er Vorschriften zur Markierung geologischer Tiefenlager erlassen. Damit sollen Informationen über die Lage und den Inhalt des Lagers lange über dessen Verschluss hinaus erhalten bleiben. Mit zunehmender Dauer wird die

Weitergabe dieser Informationen auf Grund unterschiedlichster Veränderungen immer schwieriger werden. Deshalb hat das Projekt zum Ziel, einen Überblick über den heutigen Stand der Kenntnisse bezüglich des möglichen Vorgehens zur langfristigen Weitergabe von Informationen sowie über den internationalen Stand der Vorhaben und Anforderungen an die Markierung von Tiefenlagern zu geben. Der erste Teil des Projekts wurde im Sommer 2008 gestartet und beinhaltet eine Literaturrecherche und eine Analyse des aktuellen Stands der Wissenschaft. Dieses Teilprojekt wird eine Grundlage für den zweiten Teil des Forschungsprojektes liefern, bei dem ein Markierungskonzept für die Schweiz erarbeitet werden soll. Der zweite Teil des Projekts soll im Jahr 2009 gestartet werden.

Internationale Zusammenarbeit

Mit der Teilnahme an internationalen Konferenzen und Workshops werden in den OECD-Ländern Kontakte gepflegt und internationale Forschungsergebnisse ausgetauscht. Vom 4. bis 6. Juni 2008 fand in Paris das 9. Jahrestreffen des *OECD-NEA Forum on Stakeholder Confidence* statt. Neben den Berichten aus den teilnehmenden Ländern wurde über *Analogues* (Beispiele, wie die Natur konserviert und entsorgt) und ihren Beitrag zur Vertrauensbildung, die Verwendung von Mustern und Symbolen in der Kommunikation, *Policy Making* und *Implementation* sowie über Kampagnen zum Einbezug von Stakeholdern referiert und debattiert. Die Vorstellung des Sachplan geologische Tiefenlager durch die Schweiz ist auf Interesse gestossen.

Ausblick 2009

Die Forschungsprojekte Kommunikation mit der Gesellschaft und Wissenserhalt und Markierungskonzepte werden im Jahr 2009 abgeschlossen. Im Jahr 2009 soll ein neues Forschungsprojekt zum Thema Werthaltungen und Interessen in der Entsorgung radioaktiver Abfälle gestartet werden. Während im Projekt Kommunikation mit der Gesellschaft der bestehende Stand der Kenntnisse erhoben und ausgewertet wurde, dient das Forschungsprojekt Werthaltungen und Interessen in der Entsorgung radioaktiver Abfälle dazu, aktuelle Informationen über die Meinungslandschaft zur Entsorgungsthematik in der Schweiz zu gewinnen. Die Ergebnisse sollen es dem BFE ermöglichen, auch bisher versteckte Konfliktpotenziale frühzeitig zu erkennen und mit Spannungsfeldern und Informationsdefiziten angemessen umzugehen.

Impressum

Juni 2009
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
Druck: Ackermanndruck AG, Bern-Liebefeld
Bezug der Publikation: www.energieforschung.ch

Programmleiter
Dr. Markus Hugi
Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI
CH-5232 Villigen-ENSI,
markus.hugi@ensi.ch

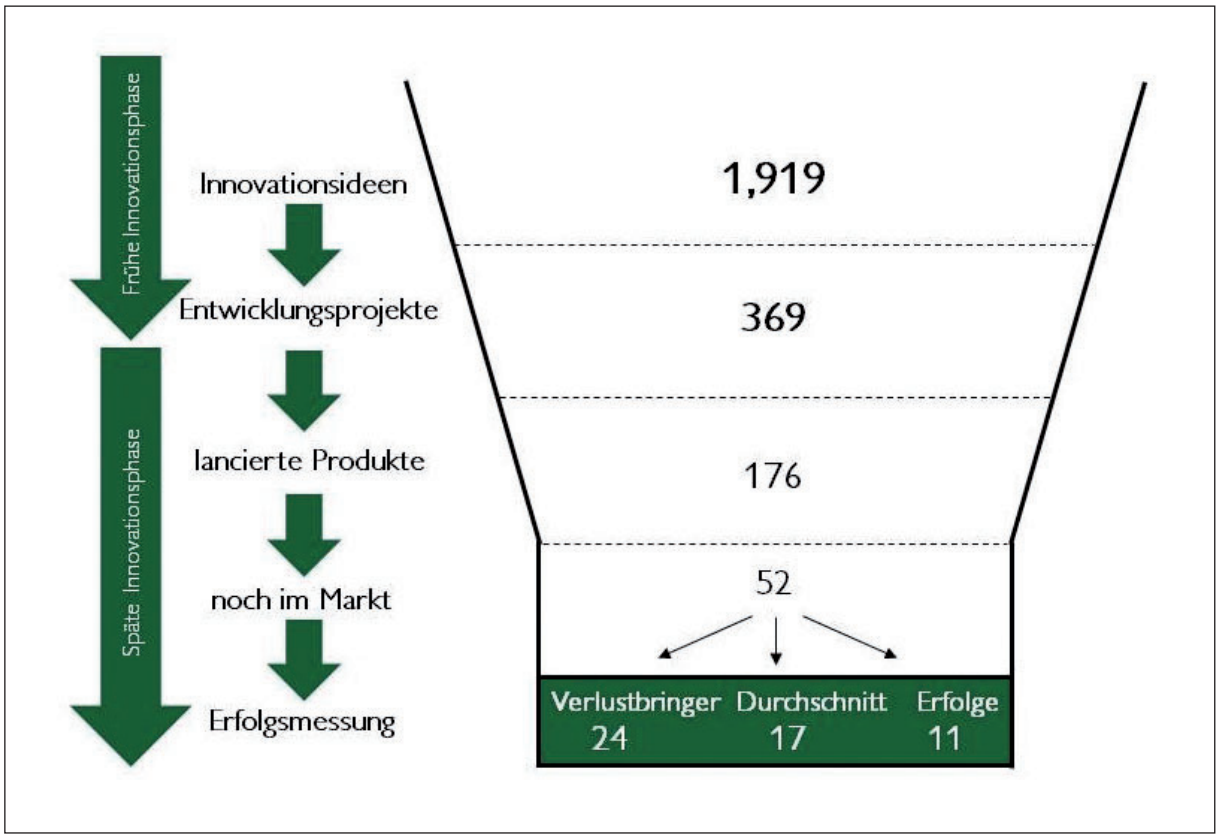
Bereichsleiterin
Simone Brander
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
simone.brander@bfe.admin.ch

Rapport de synthèse 2008 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2008 der BFE-Programmleiterin

Forschungsprogramm Energiewirtschaftliche Grundlagen

Nicole Andréa Mathys

nicole.mathys@bfe.admin.ch



Frühe Innovationsphase als Selektionsprozess

Die «frühe Innovationsphase» dient der frühzeitigen Identifizierung Erfolg versprechender Ideen. Nur wenige Ideen schaffen es bis zum Stadium eines Basiskonzeptes. O. Gassmann (2008) in Anlehnung an R. Berth (1992).

Programmschwerpunkte

Im **Forschungsprogramm Energiewirtschaftliche Grundlagen (EWG)** des Bundesamtes für Energie (BFE) werden ökonomische, soziologische, psychologische sowie politische Fragestellungen bezüglich der Produktion, der Verteilung und der Nutzung von Energie untersucht. Das Ziel ist es zu ergründen, wann staatliche Eingriffe nötig sind und falls ja, welches die beste Intervention ist.

Das im Forschungsprogramm erarbeitete Wissen ist die Basis sowohl für die Behandlung politischer Geschäfte (politiknahe Forschung) als auch für die längerfristige Ausrichtung der Energiepolitik (angewandte Forschung). Es dient somit der Erarbeitung neuer und der Überprüfung bestehender politischer Instrumente. Die Forschungsresultate kommen nebst der Wissenschaft, den Kantonen, der Energiewirtschaft sowie verschiedenen Verbänden und Organisationen zugute.

Die energiewirtschaftliche Forschung befasst sich mit den energiepolitischen Rahmenbedingungen in den vier Wirtschaftsektoren **Haushalte** (Gebäude und Elektrogeräte), **Verkehr**, **Dienstleistungen** und **Industrie**, wie sie auch den Perspektivmodellen zu Grunde liegen. Dazu kommen die **sektorübergreifende Energiepolitik**, der **Technologietransfer** und der **Energieumwandlungssektor (Strom- und Wärmeerzeugung, Raffinerien)**.

2008 wurden vermehrt Mittel für die angewandte Forschung eingesetzt. So konnten, auf Grund des Workshops zu Forschungslücken im November 2007, 2008 acht Projekte an Forschungsinstitute der Universitäten vergeben werden. Doktoranden werden dabei über mehrere Jahre in den Bereichen Innovation (2 Projekte), Modelle (1 Projekt geplant) und Verhalten (4 Projekte) mit Unterstützung des BFE forschen. Neun politiknahe Projekte wurden 2008 gestartet und drei neue Projekte werden Anfang 2009 beginnen. Das Forschungsprogramm verfolgt zudem alle relevanten nationalen (und falls angebracht internationalen) Aktivitäten im sozioökonomischen Bereich. Das vorliegende Konzept beschränkt sich jedoch auf die vom BFE mitfinanzierten Projekte.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2008

Haushalte (Gebäude und Elektrogeräte)

Projekt «Praxistest Minergie-Modernisierung»

Das 1998 eingeführte Minergie-Label kann auf eine eindrucksvolle Erfolgsgeschichte zurückblicken. Bis Ende 2007 wurden über 8'000 Gebäude nach Minergie-Standard zertifiziert. Davon entfallen rund 700 auf Modernisierungen: 540 Wohngebäude und 160 Dienstleistungsgebäude. Trotzdem fällt die Mehrheit der in den letzten zehn Jahren insgesamt in der Schweiz durchgeführten Gebäudeerneuerungen in Bezug auf energetische Massnahmen und damit auf die energiepolitischen Ziele der Schweiz unbefriedigend aus. Die Energiereduktionspotenziale werden bei weitem nicht ausgeschöpft. In Bezug auf den gesamten Gebäudebestand in der Schweiz besteht zudem ein erhebliches Modernisierungsdefizit.

In der Studie *Praxistest Minergie-Modernisierung* [1] wurden Erfahrungen mit Minergie-Modernisierungen ausgewertet und kritische Punkte und Hemmnisse aufgedeckt. Weiter wurden Empfehlungen zur Verbesserung der Anwendung von Minergie und hinsichtlich der energiepolitischen Rahmenbedingungen ausgearbeitet. Die Studie basiert auf zwei sich ergänzenden Erhebungen: schriftliche Befragung der Bauherren von Wohngebäuden mit Minergie-Modernisierungen in der deutschen Schweiz sowie einer Vergleichsgruppe mit energetischen Modernisierungen ohne Minergie-Standard und leitfadengestützte Expertengesprächen bei Mehrfachbauherren und Architekten. Folgende Kernresultate wurden identifiziert:

- Minergie-Modernisierungen bedingen ein Gesamtkonzept und eine vorausschauende Planung.
- Minergie-Modernisierungen sind in der Regel mit Eingriffen in den Innenraum verbunden (z.B. Einbau einer Lüftung).
- Bei den Minergie-Modernisierungen wird die Wärmedämmung konsequenter umgesetzt als bei energetischen Modernisierungen ohne Minergie. Die Minergie-Anforderungen in Bezug auf den Energieverbrauch werden in der Regel erreicht.
- Minergie-Bauherren entscheiden sich aus Überzeugung für Minergie.
- Die wichtigsten Argumente für einen Verzicht auf Minergie sind technischer Art. Die grösste Schwierigkeit liegt dabei beim Einbau der Lüftung.
- Vorurteile und Desinformationen wirken gegen die Wahl von Minergie.
- Energieeffizientes Modernisieren wird allgemein als nötig erachtet, das Minergie-Label hingegen in Bezug auf ein allfälliges Energiespar-/Klimaziel nicht.

– Minergie-Sanierung bedeutet Mehraufwand für Architekten, Planer und Unternehmer.

Folgende Empfehlungen wurden abgegeben:

– Technische Neuerungen betreffend vorfabrizierten Komponenten und der Lüftung fördern
– Kommunikation/Information ausbauen und intensivieren
– Etappierung gewährleisten
– Schulung der am Bau beteiligten Planer und Bauleute auf den verschiedenen Stufen
– Bewertungsmethoden für Liegenschaften und Nebenkostenabrechnungen
– Vorreiterrolle der öffentlichen Hand verstärken und Handlungsspielraum nutzen
– Anpassung jeglicher Förderung.

Projekt «Konzept, Vollzug und Wirkung der VHKA»

Nach ihrem Entstehen in den 1970er Jahren wurde die verbrauchsabhängige Heiz- und Warmwasserkostenabrechnung (VHKA) Anfang der 1980er Jahre allmählich eingeführt und 1990 in Alt- und Neubauten vom Bund verbindlich vorgeschrieben. 1998 wurde die Regelung vom Bund teilweise zurückgenommen und das Obligatorium auf Neubauten beschränkt. In der Folge nahmen verschiedene Kantone ihre Regelungen ebenfalls wieder zurück. Insgesamt entstand so eine «Stop-and-go-Politik». Die Studie *Konzept, Vollzug und Wirkung der VHKA* [2] hat sich vor diesem Hintergrund zwei Ziele gesetzt:

– Strategisches Ziel: Bewertung der Bedeutung der VHKA für die zukünftige Effizienzstrategie im Bereich der Gebäude.
– Operatives Ziel: Die Untersuchung soll aktuelle Daten über den Vollzug der VHKA, sowie über die Akzeptanz und die Wirksamkeit bei den Zielgruppen liefern. Daraus lassen sich konkrete Hinweise zur Optimierung des Instrumentes ableiten.

Darüber hinaus wurde ein Zusatzmodul umgesetzt, in dem die Kosten der VHKA den Einsparungen gegenübergestellt und Aussagen über den Nutzen der VHKA vor dem Hintergrund gestiegener Energiepreise gemacht werden. Es wurde herausgefunden, dass der VHKA das Image eines «Ladenhüters» anhaftet und derzeit aller Voraussicht nach keine Schritte zur Intensivierung des Vollzugs der VHKA unternommen werden. So ergeben sich aus der dezentralen kantonalen Gesetzgebung starke Unterschiede sowohl hinsichtlich der Intensität des Vollzugs als auch in Bezug auf den Ausrüstungsgrad. Generell ist aber der Vollzug sehr gering. Auf Grund einer Befragung von 1575 Personen, bei welchen die Wirkung der VHKA theoretisch eintreffen könnte (Kontaktperson lebt in einem Gebäude, das nach dem Jahr 1990 – gesamtschweizerische Einführung der VHKA – gebaut wurde und kontrolliert und bezahlt die Nebenkostenabrechnung im Haushalt) tritt eine Wirkung nur bei 17 % ein. Dies kann dadurch erklärt werden, dass die VHKA gar nicht umgesetzt wurde oder die Mieter sich nicht mehr an die Verbrauchswerte erinnern. Auf strategischer Ebene wird empfohlen zu prüfen, ob es Sinn machen würde, die VHKA in Zukunft bei Alt- und Neubauten nur einzufordern, falls kein Gebäudeenergieausweis vorhanden ist. Aus operativer Sicht (basierend auf der momentanen Gesetzgebung) wird empfohlen, das Vollzugsdefizit durch folgende Massnahmen zu beheben:

– Kontrollen sollten verschärft werden und parallel dazu sollten Informationskampagnen auf die Bedeutung der VKHA hinweisen. Eine Alternative zu den Kontrollen wäre die Einführung eines Kürzungsrechts für die Mieter (nach dem Vorbild in Deutschland).
– Verständlichere Darstellung der Verbrauchsinformationen.

Projekt «Energieverbrauch von Bürogebäuden und Grossverteilern»

Ein Viertel des schweizerischen Stromverbrauchs geht auf das Konto des Dienstleistungssektors. In den vergangenen zehn Jahren hat sich im Bereich Bürobau und bei Grossverteilern (Verkaufsflächen) einiges verändert: Zunehmend werden Bürobauten im Minergie-Standard erstellt; infolge der hohen internen Wärmelasten und der grossen verglasten Flächen hat sich die Kühlproblematik zugespitzt; bei der IT-Infrastruktur steht die Ablösung von Röhrenbildschirmen einer Zunahme weiterer Geräte gegenüber. Die Resultate des Projektes *Energieverbrauch von Bürogebäuden und Grossverteilern* [3] zeigen, dass thermische Anwendungen, welche im Gebäudesektor von der Raumheizung dominiert sind, im zeitlichen Ablauf energetisch eher rückläufig sind und im Strombereich eher von einer Stagnation oder gar einer Erhöhung auszugehen ist. Bei rund der Hälfte der Gebäude sind die wichtigen Grundvoraussetzungen für intensive betriebliche Energieeffizienzmassnahmen, nämlich die Kenntnis des Energiebedarfs und dessen beeinflussende Faktoren, nicht oder nur ungenügend vorhanden sind. Eine Umfrage bei 30 Grossverteilern hat ergeben, dass der Energieverbrauch (Strom und Wärme) markant grösser ist, als die vom SIA 380/4 und 2024 vorgegeben Standards. Die Werte, welche in der Ravel-Studie 1995 verwendet wurden, kommen schon näher an die neu erhobenen

Daten heran. Grosse Stromverbraucher sind die Kühlgeräte und die Beleuchtung. Die Kühlgeräte sind oft falsch eingestellt und nicht der aktuellen Nachfrage angepasst, und eine energieeffiziente Beleuchtung geht oft gegen die Verkaufsstrategie der Grossverteiler.

Projekt «Gewichtung der Heizgradtage (HGT)»

Beim BFE werden die von Meteo Schweiz berechneten Heizgradtage mit der Bevölkerungsdichte gewichtet. In den letzten Jahren wurden jeweils 40 Anetz (Automatisches Messnetz)-Stationen verwendet. Das Projekt *Gewichtung der Heizgradtage (HGT)* [4] machte Neuberechnungen und Aktualisierungen, wobei die Gewichtungsvarianten Dichte der Wohnbevölkerung und Gebäudeflächen analysiert wurden. Es wurde festgestellt, dass sich der Einbezug der Wohnungsdaten sowie der Beschäftigten für die Gewichtung der HGT nicht aufdrängt, da sich die beiden Zeitreihen der gewichteten Heizgradtage nahezu identisch sind. Das BFE kann deshalb entweder die bisherigen Faktoren weiterverwenden oder die neuen Faktoren anwenden.

Projekt «Temperatur- und Strahlungsabhängigkeit des Energieverbrauchs im Wärmemarkt»

Im Projekt *Temperatur- und Strahlungsabhängigkeit des Energieverbrauchs im Wärmemarkt* [5] wurde der Zusammenhang zwischen Witterung und Energieverbrauch mittels einer Analyse von täglichen Einspeisemengen ins Fernwärme- und Gasnetz der *Energie Wasser Bern* (*ewb*) mit statistischen Methoden empirisch untersucht.

Im ersten Schritt wurden aus den vorhandenen Rohdaten die Verbrauchsanteile für Raumwärme extrahiert und grafisch analysiert. Im zweiten Schritt wurden die Verbrauchsreihen mit den Wetterfaktoren Temperatur und Strahlung verknüpft. Mit Hilfe statistischer Verfahren wurden Regressionsparameter geschätzt, welche die Beeinflussung der Raumwärmeverbräuche durch die Wetterfaktoren beschreiben. Auf Basis dieser geschätzten Parameter wurden anschliessend neue Witterungsbereinigungsfaktoren für die beiden Netze der *ewb* abgeleitet. Die Bereinigungsfaktoren bilden das Verhältnis des effektiven Energieverbrauchs zum witterungsbereinigten Energieverbrauch ab. Sie wurden einerseits Tageswert-basiert, andererseits Monatsmittelwert-basiert bestimmt. Ein Vergleich der neu abgeleiteten Bereinigungsfaktoren mit den gängigen Verfahren zur Witterungsbereinigung des Energieverbrauchs (Heizgradtagverfahren, Gradtag-Strahlungs-Verfahren von Prognos, vereinfachter BAFU-Ansatz) zeigt, dass die neuen Faktoren in den betrachteten Netzen eine bessere Anpassungsgenauigkeit aufweisen als die bisherigen Verfahren. Die auf Monatsbasis abgeleiteten Bereinigungsfaktoren schneiden dabei nur unwesentlich schlechter ab als die tagesbasierten Faktoren. Grössere Abweichungen treten hingegen bei den bisherigen, jahresbasierten Verfahren auf (z.B. BAFU-Ansatz), da diese variierende Verteilungen innerhalb des Jahres nicht berücksichtigen. Dies tritt v.a. bei atypischen Jahren wie beispielsweise 2007 deutlich zu Tage. Ob sich die neuen Witterungsbereinigungsfaktoren für die Gesamtschweiz eignen, ist jedoch noch nicht eindeutig klar.

Projekt «Der Bestand an Elektroheizungen in den Kantonen»

Zwei Arten von elektrischen Heizungen werden unterschieden: die elektrischen Widerstandsheizungen und die Wärmepumpenheizungen. Bei den elektrischen Widerstandsheizungen wird Strom durch einen Leiter mit einem Ohm'schen Widerstand geleitet, über welche die elektrische Energie in Wärme umwandelt wird. Wärmepumpen sind Heizungsanlagen, welche unter Zufuhr von mechanischer Arbeit (Stromverbrauch) der Umwelt Wärme entziehen und diese über einen Wärmetauscher an die Innenräume als Heizwärme abgeben (Umkehrung der Wirkungsweise eines Kühlgerätes). Obwohl elektrische Widerstandsheizungen Strom mit Wirkungsgraden über 90 % sehr effizient in Wärme umwandeln, ist diese Art von Verwendung vom Strom für die Bereitstellung von Raumwärme gesamtenergetisch betrachtet wenig sinnvoll. Einerseits ist der Gesamtnutzungsgrad niedriger, wenn auch die vorgelagerte Prozesskette der Umwandlung von Primärenergie zu Strom berücksichtigt wird, und Andererseits sollte gemäss dem Exergie- Ansatz der hochwertige Strom für Prozesse eingesetzt werden, welche ein hohes Mass an Arbeitsfähigkeit erfordern (z.B. für elektrische Geräte) und nicht für die Erzeugung von energetisch minderwertiger Raumwärme. Daraus ergibt sich das energiepolitische Ziel, langfristig die elektrischen Widerstandsheizungen so weit wie möglich aus dem Bestand zu entfernen. Das Projekt *Der Bestand an Elektroheizungen in den Kantonen* [6] liefert für die Jahre 1990, 2000 und 2008 kantonale Angaben über Anzahl, Energiebezugsfläche (EBF) und Heizenergieverbrauch der Wohnungen, die mit elektrischen Widerstandsheizungen beheizt werden. Diese Angaben wurden aufgeschlüsselt nach Heizungstyp, Gebäudetyp und Belegungsart. In Bezug auf die Anzahl der Wohnungen besitzt der Kanton Tessin im Jahr 2008 die grösste Bedeutung (22 % der Wohnungen). Mehr als die Hälfte der Wohnungen findet sich in den vier Kantonen Tessin, Wallis, Bern und Waadt (56 %). Überdurchschnittliche Anteile an den gesamten

beheizten Wohnungen zeigen sich aber auch in den Innerschweizer Kantonen (Uri, Obwalden, Nidwalden, Glarus, Schwyz), in der Westschweiz (Freiburg, Jura) und im Graubünden. Die Nationalen Veränderungen sind stark bestimmt durch die Zunahmen im Kanton Tessin. Trotzdem zeigt sich auf nationaler Ebene im Gegensatz zum Kanton Tessin eine deutliche Abnahme des Bestandes an Wohnungen mit Elektro-Zentralheizungen.

Verkehr

Projekt «Tanktourismus»

Das Betanken des Fahrzeugs ausserhalb der Landesgrenze, meist motiviert durch Preisüberlegungen der Fahrzeuglenker, wird Tanktourismus genannt und auf ca. 10% des gesamten Treibstoffverbrauchs der Schweiz geschätzt. Im Projekt *Tanktourismus* [7] sollen die treibenden Kräfte und die Mechanismen analysiert werden, die das Phänomen «Tanktourismus» erklären. Dazu werden Expertengespräche geführt (Tankstellengesellschaften, ausländische Partner, Transporteure etc.) und zu einer Auslegeordnung zusammengefasst, welche die aktuelle Situation in der Schweiz und dem nahen Ausland ausleuchtet. Gleichzeitig werden die Inputdaten für das anschliessend eingesetzte Modell gesammelt und aufbereitet. Die ökonometrische Tanktourismus-Schätzung soll helfen, den Tanktourismus insgesamt zu quantifizieren und die regionalen Disparitäten (unterschiedliche Preisgefälle zum Ausland in verschiedenen Regionen der Schweiz) zu analysieren, um daraus Elastizitätsüberlegungen anzustellen. Nebst einer eigenständigen Analyse zum Tanktourismus, fliessen die Resultate nicht zuletzt in die an anderer Stelle (z.B. Energieperspektiven) eingesetzten Bottom-up-Betrachtungen ein, indem die dort verwendeten Modelle verfeinert werden sollen.

Technologietransfer und Innovationsprozesse

Projekt «Innovationsprozesse bei Energietechnologien»

Die Studie *Innovationsprozesse bei Energietechnologien* [8] untersucht ausgewählte Innovationsprozesse in den Bereichen Photovoltaik, Wärme-Kraft-Koppelung (WKK) und Wärmepumpen-Tumbler. Als Datenquelle für die Fallstudien dienen in erster Linie leitfadengestützte Interviews mit unmittelbar am Innovationsprozess beteiligten Personen. Der Innovationsprozess wird grob in fünf Phasen eingeteilt: Grundlagenforschung, angewandte Forschung, Entwicklung von Prototypen oder Pilotanlagen, Markteinführung im Sinne einer ersten Vermarktung und breitere Marktdiffusion. Aus der Analyse der Fallstudien hat sich ein Grundprinzip herauskristallisiert: Innovationsförderung sollte ganzheitlich ausgerichtet sein, d.h. die verschiedenen Phasen, aber auch die verschiedenen Ebenen von Innovationsprozessen sollten berücksichtigt werden. Der Förderbedarf von Innovationsprozessen hängt nicht nur von der jeweiligen Phase ab, sondern auch von grundsätzlichen Eigenschaften. So ist für forschungsintensive Innovationen tendenziell eine enge Zusammenarbeit von Unternehmen mit Hochschulen und Fachhochschulen von Bedeutung, für kapitalintensive Innovationen die Vermittlung von Venture Capital oder eine direkte Beteiligung von finanzkräftigen Unternehmen oder die Förderung von Pilot-und Demonstrationsanlagen (P+D). Für erprobungsintensive Innovationen kann ebenfalls eine P+D-Förderung, aber auch die frühe Einbindung zukünftiger Anwender wichtig sein. Folgende Handlungsfelder und Instrumente wurden in der Studie identifiziert:

- Eine Stärkung der Perspektive auf den gesamten Innovationsprozess sowie eine engere Projektbegleitung.
- Für eine erfolgreiche Marktumsetzung ist die P+D-Phase wichtig; die Etablierung bzw. Wiederaufnahme einer entsprechenden Förderung sollte gestärkt werden.
- KMU sind wichtige Träger von Innovation und können direkt und indirekt stärker gestützt werden.
- Ein Technologie-Monitoring zur kontinuierlichen Verfolgung von Technologebereichen wäre hilfreich.
- Ein stärkerer Fokus auf Schwerpunktsetzungen bei der Förderung ermöglicht das Erreichen einer kritischen Masse in Bezug auf das Fördervolumen und die Vernetzung.

Neben den Erkenntnissen aus den Fallstudien wurde ein Set von Indikatoren zur Darstellung der Charakteristika von Innovationsprozessen erstellt. Die vorgeschlagenen Kernindikatoren beruhen auf Kosten-Nutzenüberlegungen und aus den Erkenntnissen der Fallstudien. Folgende Indikatoren sind primär verwendet worden: Beschäftigungszahlen und deren Entwicklung; Überleben des innovativen Geschäftsbereich im Unternehmen; Beschäftigte bei F+E; innovative Technologien; Produkte oder Dienstleistungen auf dem Markt; Beteiligung/Förderung von privaten Investoren.

Projekt «Auswirkungen politischer Energiesparmassnahmen auf die Innovationskraft, die Beschäftigung und die internationale Konkurrenzfähigkeit der Schweiz»

Das Projekt *Auswirkungen politischer Energiesparmassnahmen auf die Innovationskraft, die*

Beschäftigung und die internationale Konkurrenzfähigkeit der Schweiz [9] befasst sich mit den ökonomischen Auswirkungen politischer Energiesparmassnahmen in der Schweiz. Ansatzpunkt ist insbesondere das Szenario der 2000-Watt-Gesellschaft, deren technische Umsetzbarkeit bereits aufgezeigt wurde, deren Effekte auf ökonomische Grössen aber noch ungenügend bekannt sind. Zur Analyse wird ein multisektorales CGE-Modell (Computable General Equilibrium Model) erstellt. Die wesentliche Neuerung hierbei ist der explizite Einbezug der neuen Wachstumstheorie, d.h. Wachstum entsteht durch die Akkumulation von physischem und nicht-physischem Kapital, wobei der Anreiz zur Akkumulation endogen im Modell begründet wird. Eine genestete (d.h. verschachtelte) Struktur ermöglicht die Substitution zwischen einzelnen Produktionsfaktoren auf der Inputseite sowie zwischen den einzelnen Gütern auf der Outputseite. Datenmässige Grundlage für das Modell ist die 2005-Version der Input-Ouput-Tabelle für die Schweiz.

Projekt «InnoPower: Stärkung der frühen Innovationsphase von KMUs unter besonderer Berücksichtigung des Sektors Energie»

Das Projekt *InnoPower: Stärkung der frühen Innovationsphase von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) unter besonderer Berücksichtigung des Sektors Energie* [10] hat zum Ziel, den frühen Innovationsprozess bei KMU im Energiesektor besser zu verstehen und Ansätze zu dessen Stärkung zu erarbeiten. Ausgangspunkt der Studie ist die Erkenntnis, dass die Schweizer Volkswirtschaft stark von der Innovationskraft der KMU profitiert und diese auch im Energiesektor immer wieder Produkte und Dienstleistungen auf den Markt bringen, welche Wertschöpfung und qualifizierte Arbeitsplätze in der Schweiz sichern. Zudem bietet der Energiebereich interessante Möglichkeiten für KMU, ihre angestammten Kompetenzen auf diesen internationalen Wachstumsmarkt zu übertragen. Das BFE und weitere Stellen stehen diesen Unternehmen bei der Umsetzung von konkreten Projekten sowie bei Markteinführungen als kompetente Partner zur Verfügung. Allerdings ist bisher noch wenig systematisches Wissen darüber vorhanden, wie KMU im Energiebereich derartige Innovationen in einer frühen Phase entwickeln, und wie sich deren Qualität und Anzahl steigern lassen könnte. Die Studie zielt daher darauf ab, zentrale Aspekte der frühen Innovationsphase (Ideengenerierung und -quellen; frühe Evaluations- und Selektionsprozesse; Entscheidungsgremien und -kriterien; Ausmass zwischen- und überbetrieblicher Kooperation) zu analysieren und Ansätze zu deren Stärkung im Kontext des Energiesektors abzuleiten. Seit dem Start des Projektes im Oktober 2008 wurden bestehende Studien und wissenschaftliche Literatur auf dem Gebiet aufgearbeitet und ein Untersuchungsrahmen erstellt. Dieser dient im nächsten Schritt der Formulierung von Hypothesen in Zusammenarbeit mit Entscheidungsträgern und Experten in den Unternehmen. Im Laufe der weiteren Projektphasen sollen mittels Befragungen, Fallstudien und ersten Umsetzungsprojekten die Hypothesen weiter abgestützt und Implikationen für die Stärkung der frühen Innovationsphase von KMU im Energiesektor erarbeitet werden.

Umwandlungssektor

Projekt «Ausgestaltung einer Einspeisevergütung für die erneuerbare Wärme»

Im Februar 2008 verabschiedete der Bundesrat die Aktionspläne zur Energieeffizienz und zu erneuerbaren Energien. Basierend auf dem «Aktionsplan erneuerbare Energien» konkretisierte das Projekt *Ausgestaltung einer Einspeisevergütung für die erneuerbare Wärme* [11] Vorschläge für die Umsetzung der im Aktionsplan aufgeführte Massnahme «Einspeisevergütung für erneuerbare Wärme». Nah- und Fernwärmenetze liefern rund 3 % des schweizerischen Wärmebedarfs. Der Anteil an erneuerbarer Wärme setzt sich aus der Biomassenutzung, der Umweltwärme und dem erneuerbaren Anteil aus Abfall zusammen. Würden die Nah- und Fernwärmenetze vollständig auf erneuerbare Wärme umgestellt, liessen sich jährlich 3'740 GWh Erdöl einsparen. Zudem würde die Versorgungssicherheit erhöht bzw. die Abhängigkeit von Erdöl- und Erdgaslieferungen aus dem Ausland verringert. Die Idee der Einspeisevergütung für erneuerbare Energien lehnt sich an das erfolgreiche Modell aus dem Strommarkt an. Vergleicht man jedoch die Strom- und den Wärmemarkt hinsichtlich einer Einspeisevergütung, so zeigen sich grundlegende Unterschiede. Das Bestimmen der Mehrkosten ist bei Wärmenetzen schwieriger, da sich die Preise für fossile Energien dynamisch und kurzfristig ändern. Anlagen, die in einem Jahr Mehrkosten verursachen sind möglicherweise im nächsten Jahr wirtschaftlich. Insgesamt betrachtet ist die Bemessung einer Einspeisevergütung für Wärme sehr schwierig. Das Projekt kam zum Schluss, dass eine Einspeisevergütung als Förderinstrument, welches sich am Modell der Einspeisevergütung für erneuerbare Elektrizität orientiert, nicht zu empfehlen ist. Anstelle dessen wird vorgeschlagen, auf das bewährte Förderinstrument der Investitionsbeiträge zu setzen. Eine Förderung von erneuerbarer Wärme wird weiterhin für nötig erachtet.

Projekt «Abwasserwärmenutzung: Potenzial, Wirtschaftlichkeit und Förderung»

Die Nutzung von Niedertemperaturwärme aus kommunalen Abwässern mittels Wärmepumpeanlagen zur Gebäudeheizung und Brauchwarmwasserbereitung ist heute praxistauglich. Die Studie *Abwasserwärmenutzung: Potenzial, Wirtschaftlichkeit und Förderung* [12] untersuchte die potenzielle Wärmeabnahmedichte im besiedelten Gebiet aller 296 grossen Abwasserreinigungsanlagen (ARA) mit Hilfe von Geodaten. Ergänzend dazu wurden die Rahmenbedingungen zur Abwärmenutzung erläutert. Zu heutigen Bedingungen (Szenario mit hohem Ölpreis und reduzierter CO_2-Abgabe – 104 CHF/100liter) birgt die Abwärme mittels Wärmepumpenanlagen ein grosses, wirtschaftlich realisierbares Potenzial von 2,12 TWh/a, das sich künftig (147 CHF/100liter) noch um über 50 % steigern lässt. Dieses künftige Potenzial könnte den Heizungs-und Warmwasserbedarf von gut einer Million Einwohnern decken. Was die Hemmnisse betrifft, wurden folgende Faktoren identifiziert:

- Mangelnde Wirtschaftlichkeit (Anlage liegt in wenig besiedeltem Gebiet oder es gibt bereits eine bestehende leitungsgebundene Energieversorgung)
- Abwärmenutzung aus ARA wird durch bestehende leitungsgebundene Energieträger erschwert
- Fehlende Initiatoren für einen Wärmeverbund, da die sehr hohen Vorinvestitionen einen finanzkräftigen Bauherrn voraussetzen
- Zurückhaltung beim Einsatz von nicht seit Jahrzehnten bewährter Technik.

Gemäss diesen Hemmnissen kommen für die Förderung der Abwärmenutzung folgende Instrumente in Frage:

- Basis für die Wirtschaftlichkeit sind *dauerhaft hoch* bleibende Preise für fossile Energieträger; dies kann durch eine CO_2-Abgabe oder Subventionen (Bsp; Klimarappen oder kantonale und städtische Beiträge) unterstützt werden.
- Prioritätensetzung und weiter führende Bundesvorschriften über einen längerfristigen Rückbau von Erdgas
- Die bestehenden Informationsdefizite der Besitzer und Bauherren sollten eliminiert werden.

Projekt «Vorstudie zur Bewertung der Entsorgungs- und Nutzungsverfahren von biogenen Abfällen und Hofdünger»

Hauptziel des Projektes *Vorstudie zur Bewertung der Entsorgungs- und Nutzungsverfahren von biogenen Abfällen und Hofdünger* [13] war es, eine Bewertungsmethode für die unterschiedlichen Nutzungsarten biogener Abfälle und Hofdünger zu entwickeln. Die erarbeitete Methodik sollte dabei breit abgestützt und breit anwendbar sein. Breit abgestützt heisst, dass die verschiedenen Entsorgungs- und Nutzungsmöglichkeiten für Abfallbiomasse und Hofdünger anhand möglichst aller relevanten Kriterien aus den Bereichen Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft bewertet werden. Breit anwendbar bedeutet, dass mit Hilfe der Methodik sehr unterschiedliche Entsorgungs- und Nutzungswege bewertet werden können. Für diese komplexe Art von Bewertung wurde im Rahmen dieser Studie eine Multikriterienanalyse entwickelt, da eine solche einerseits umfassend und anderseits transparent und nachvollziehbar ist.

Die Ergebnisse der Anwendung zeigen, dass sich die untersuchten Verfahren auf einem relativ hohen Nutzenniveau aus Sicht der ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Kriterien befinden. Daraus lässt sich ableiten, dass die aktuellen Rahmenbedingungen für die Entsorgung von biogenen Abfällen und Nutzung von Hofdünger grundsätzlich die richtigen Anreize vermitteln, so dass vorwiegend nachhaltige Verfahren zur Anwendung oder vermehrten Verbreitung gelangen. Die Angaben zur Bewertung der drei Pilotverfahren hydrothermale Vergasung, Alkoholgärung und Vergasung/Methanisierung sind mit den grössten Unsicherheiten behaftet. Können die Planungsdaten tatsächlich eingehalten werden, handelt es sich insbesondere bei der hydrothermalen Vergasung um eine viel versprechende Option, bei welcher sich eine präzisere Analyse lohnt. Im Weiteren kann festgestellt werden, dass mit der Kostenbasierten Einspeisevergütung (KEV) die richtigen Anreize gesetzt werden, da die KEV Verfahren zur Strom- und Wärmeproduktion fördert, welche in der vorliegenden Studie sehr gut bewertet werden.

Projekt «Bewertung von Schutz-, Wiederherstellungs- und Ersatzmassnahmen bei Wasserkraftanlagen»

Das Projekt *Bewertung von Schutz-, Wiederherstellungs- und Ersatzmassnahmen bei Wasserkraftanlagen* [14] erarbeitete 18 Empfehlungen für die praktische Anwendung bei neuen Kraftwerkprojekten beziehungsweise bei Kraftwerkerneuerungen. Sie sollen bei der Bestimmung, Bewertung und Verfügung von Schutz-, Wiederherstellungs- und Ersatzmassnahmen nach Bundesgesetz über den Natur- und Heimatschutz vom 1. Juli 1966 sowie bei der damit verbundenen Interessen- und Verhältnismässigkeit der Massnahmen hilfreich sein. Die Handlungsanweisungen setzen sich aus Erfahrung, Empfehlungen

und anderen, im Laufe der Projektbearbeitung erlangten Erkenntnissen zusammen. Es handelte sich um verfahrenstechnische (Vorgehen), sowie um juristische, ökologische und ökonomische Anweisungen. Die Liste könnte Grundlage für einen allfälligen Leitfaden sein.

Projekt «Holz als Rohstoff und Energieträger»

Das Projekt *Holz als Rohstoff und Energieträger* [15] verfolgt das Hauptziel, die künftige Holzangebots- und Nachfragesituation in der Schweiz durch die Entwicklung eines dynamischen Holzmarktmodells abzuschätzen. Es wurden die für das künftige Holzangebot sowie die Holznachfrage bestimmenden Einflussparameter identifiziert und ihre jeweiligen Einflussstärken abgeschätzt. Mittels Szenariotechnik wurden mögliche Entwicklungen des künftigen potenziellen Holzangebots und der Holznachfrage analysiert und beschrieben.

Als erster Schritt wurde eine Stoffflussmatrix für die erste und zweite Verarbeitungsstufe der Schweizer Wald- und Holzwirtschaft erarbeitet. Bisher lagen verschiedene, in sich inkonsistente Statistiken unterschiedlicher Quellen vor. Unter Mitarbeit von Experten wurde eine realistische und in sich konsistente Stoffflussmatrix für das Basisjahr 2005 erarbeitet.

Weiter wurde basierend auf vorhandener Literatur, ökonometrischen Analysen und Experteneinschätzungen ein Simulationsmodell für den Schweizer Holzmarkt entworfen und programmiert. Basierend auf bereits erkennbaren Trends und auf Zukunftseinschätzungen von Experten wurde ein Trendszenario des Holzmarktes bis zum Jahr 2025 erarbeitet. Dabei resultierte bezüglich der Gesamtnutzungsmenge von Waldholz eine Zunahme von einem Drittel bis ins Jahr 2025. Durch den prognostizierten Aufbau von Sägewerkkapazitäten beim Nadelholz wird ein Nachfrageanstieg nach Nadelstammholz erwartet. Dies führt zu einer Zunahme der Nadelstammholzmenge um 20 %. Die prognostizierten steigenden Erdölpreise führen zu zunehmenden Preisvorteilen des CO_2-neutralen Energieträgers Holz, was zu einem starken Nachfrageanstieg beim Waldenergieholz führt. Bis 2025 wird ein Anstieg der Waldenergieholzmenge um 63 % auf 3,3 Mio. m^3 pro Jahr geschätzt. Die Gesamtmenge an Energieholz (also inklusive weiterer Energieholzkategorien wie Sägenebenprodukte, Flur- und Altholz) wird gemäss Trendszenario für 2025 auf 6,2 Mio. m^3 pro Jahr prognostiziert. Damit würde das nachhaltig nutzbare Energieholzpotenzial der Schweiz weitgehend ausgeschöpft. Neben dem Trendszenario werden in diesem Projekt auch weitere Szenarien simuliert und quantifiziert, so der substanzielle Anstieg von Energiekosten, der Anstieg des Pro-Kopf-Verbrauchs von Säge- und Holzwerkstoffen, der Anstieg der globalen Holzpreise, der massive Ausbau von Einschnittkapazitäten sowie verschieden starke Sturmereignisse.

Projekt «Zahlungsbereitschaft für den Service public und Versorgungsqualität im Strombereich»

Um auf die Herausforderungen der Strommarktöffnung vorbereitet zu sein, wurden die Bedürfnisse der Schweizer Stromkonsumenten im Rahmen der Studie *Zahlungsbereitschaft für den Service public und Versorgungsqualität im Strombereich* [16] analysiert. Es wurden drei verschiedene Methoden zu diesem Zweck verwendet: eine Haushaltbefragung um die allgemeine Zufriedenheit zu ermitteln, spezielle Befragungsexperimente um die Zahlungsbereitschaft zu berechnen und eine Unternehmensbefragung, um die Stromversorgungssituation und die Kosten eines Unterbruchs abzuschätzen.

Folgende Ergebnisse ergaben sich:

- Rund zwei Drittel der befragten Haushalte äusserten sich sehr zu frieden mit ihrem Stromlieferanten.
- Die Stromkonsumenten sind sich bewusst, dass es zu Stromausfällen kommen kann. Nur gerade 12 % der Befragten akzeptieren keine einzige Unterbrechung. 20 % akzeptieren hingegen drei Unterbrüche pro Jahr. Die Hälfte der Befragten war mit dem jeweiligen Störungsservice sehr zufrieden.
- 60 % der Befragten sind damit einverstanden, dass in der Schweiz in allen Regionen gleiche Preise für die Stromversorgung verlangt werden, und nur ein Fünftel sprach sich für unterschiedliche Preise aus.
- Der durchschnittliche Stromkonsument ist bereit, pro Jahr, im Vergleich zur heutigen Stromrechnung 100 CHF (ca. 12 % der durchschnittlichen Jahresstromkosten) mehr zu bezahlen, wenn damit schweizweit gleiche Preise erreicht werden können. Die Westschweizer haben eine fast doppelt so grosse Zahlungsbereitschaft als die Deutschschweizer und junge Stromkonsumenten haben keine Zahlungsbereitschaft für schweizweit gleiche Preise.
- Es konnte keine Zahlungsbereitschaft für die Erhöhung des Versorgungsgrades von heute über 95 % auf 100 % ermittelt werden.
- Für eine zusätzliche Störung erwartet der Konsument eine Reduktion der Jahresstromrechnung von 34 CHF (ca. 4 % der Jahreskosten). Für eine einstündige Störung verlangt der durchschnittliche Konsument eine Kompensation von seiner Jahresstromrechnung

von 60 CHF (ca. 7 % der Jahreskosten). Die unter 45-jährigen erleiden einen höheren Nutzenverlust als die älteren. Störungen welche unangekündigt sind, tagsüber oder im Winter stattfinden, verlangen nach einer fast doppelten Kompensationsforderung.

- Zwei Drittel der befragten Unternehmen äussern sich als sehr zu frieden mit ihren Stromlieferanten. Eine Mehrheit der befragten Unternehmen rechnet auf Grund der Marktöffnung mit sinkenden Preisen bei gleich bleibender Qualität.
- Die von den Unternehmen angegebenen Kosten einer einstündigen Störung betragen je nach Zeitpunkt und Art im Mittel zwischen 1'000 und 6'500 CHF.

Projekt «Wirkung und Potenzial der Preisregulierung für Stromeffizienz»

Ebenfalls im Kontext der Öffnung der Energiemärkte läuft das Projekt *Wirkung und Potenzial der Preisregulierung für Stromeffizienz* [17]. Forderung nach verursachergerechten Netznutzungsentgelten und die Zielsetzung einer Förderung der effizienten Elektrizitätsverwendung können in der Praxis zu einem Zielkonflikt führen, da für die Erfüllung der Zielsetzungen unterschiedliche Einflussfaktoren von Bedeutung sind. Das Projekt zeigt theoretisch und anhand von Modellrechnungen mit einem branchentypischen Beispielunternehmen auf, wie sich die unterschiedliche Ausgestaltung von Price-Cap- und Revenue-Cap-Regulierungen auf die beiden im StromVG erwähnten Zielsetzungen «verursachergerechte» und «energieeffiziente» Netznutzungsentgelte auswirken. Anhand einer Wirkungsanalyse sollen auch noch die gesamtwirtschaftlichen Effekte ermittelt werden.

Projekt «Sachplan geologische Tiefenlager: Kommunikation mit der Gesellschaft»

Das Projekt *Sachplan geologische Tiefenlager: Kommunikation mit der Gesellschaft* [18] untersuchte die Kommunikation von Behörden bei der Standortsuche von nuklearen Endlagerstätten in der Schweiz und drei ausgewählten Vergleichsstaaten: Belgien, Deutschland und Schweden. Spezifisch ging das Projekt folgende Fragen an: Wie kann der Dialog zwischen Wissenschaft, Politik, Wirtschaft und der organisierten und nicht organisierten Öffentlichkeit verbessert werden? Wie können Informations-, Partizipations- und Kommunikationskonzepte optimiert und wie kann die Gesellschaft zweckmässig in den Planungs- und Entscheidungsprozess eingebunden werden, damit das Verfahren als verständlich, fair und akzeptabel wahrgenommen wird?

Folgende Erkenntnisse gehen aus der Studie hervor: An die Kommunikation werden in der Schweiz verhältnismässig zu den Vergleichsstaaten sehr hohe Anforderungen gestellt, zum einen, weil die möglichen Standortregionen über keine industrielle Erfahrung verfügen und zum anderen weil der Prozess keine regionale Vetomöglichkeit vorsieht. Demgegenüber ist die Entscheidung ganz am Schluss des Auswahlverfahrens dem fakultativen Referendum unterstellt. Die Schweiz ist durch die direktdemokratische Mitsprache geprägt, d.h. sie hat mit dieser Art einer ergebnisoffenen Risikokommunikation sehr wenig Erfahrungen gesammelt. Der Schlüssel für die erfolgreiche Kommunikation liegt in der Vertrauensbasis zwischen zuständigen Behörden, Entsorgungspflichtigen und betroffenen Regionen. Neben dem wissenschaftlichen Bericht wurde auch ein Kommunkationsleitfaden zu diesem Projekt erstellt.

Projekt «Literaturstudie Kernenergie»

Die gleiche Energiequelle betreffend, wird das Projekt *Literaturstudie Kernenergie* [19] durchgeführt. Die Studie soll Grundlagen für die Bewertung der offenen Fragen und mehr Informationen über die Herkunft von unterschiedlichen Standpunkten rund um das Thema Kernenergie liefern. Dazu soll anhand der bestehenden Literatur eine möglichst objektive Übersicht über die Bandbreite der Beantwortung der Fragen erstellt und die bestehenden Unterschiede wo möglich begründet werden. Dabei konzentriert sich die Studie auf die Themenbereiche Beurteilung der Unfallrisiken, Umweltrelevanz, gesellschaftliche Akzeptanz, externe und Gesamtkosten sowie Versorgungsrisiko.

Sektor übergreifende Energiepolitik

Projekt «Sozialwissenschaftlicher Forschungsbeitrag für die Energiepraxis»

Das Projekt *Sozialwissenschaftlicher Forschungsbeitrag für die Energiepraxis* [20] identifizierte sozialpsychologische Grundmechanismen, auf denen energiepolitische Instrumente aufbauen können, sowie sozialpsychologische Effekte und Dynamiken, welche bei deren Einsatz entstehen können. Ein zweites Ziel bestand darin, diese Erkenntnisse für die Analyse der Instrumente und Instrumentenkombination in der Praxis nutzbar zu machen.

Die Grundmechanismen können in vier Bereiche eingeteilt werden: Erzwungenes Verhalten durch Vorschriften, überlegtes Handeln, Gewohnheitshandeln und Handeln aufgrund von Heuristiken (dies sind eine Art Faustregeln). Zusätzlich können Informationsverarbeitungs- und Wahrnehmungseffekte unterschieden werden.

Die Analyse des Instruments der Energieetikette für Haushaltgeräte hat gezeigt, dass ein Instrument oder auch die Planung eines Instruments aufgrund der theoretischen Auslegeordnung und der daraus generierten Leitfragen und Betrachtungsaspekte systematisch analysiert werden kann. Der Versuch, das Analyse-Instrument in Rasterform zu gestalten, führte nicht zu einem befriedigenden Ergebnis. Gründe dafür sind die Komplexität des gesamten Prozesses von der Wahrnehmung bis zur Handlung, welche sich zum Beispiel im Zusammenspiel von Heuristiken und überlegtem Handeln zeigen, und der Umstand, dass im Rahmen der Instrumentanalyse gleichzeitig mit dem Instrument selber auch die Charakteristik des Zielobjekts des Instruments d.h. ob das Instrument auf die Veränderung von überlegtem Handeln oder von Gewohnheitshandeln, auf die Vermittlung von Werten oder von Wissen etc. zielt analysiert werden muss.

Die Aufarbeitung der Literatur, die Umsetzung in ein Analyseraster und die Anwendung dieses Rasters auf das Beispielinstrument der Energieetikette für Elektro-Haushaltgeräte hat hinsichtlich der Energieforschung folgenden Bedarf deutlich gemacht:

- mehr integrative Forschung, weniger Detailforschung
- mehr Forschung zur Verbindung von Heuristiken und überlegtem Handeln
- mehr Forschung zu habituellem Handeln inkl. Verbindung zum überlegten Handeln
- mehr angewandte Forschung, weniger Laborforschung
- Ausrichtung der Forschung auf energierelevante Anwendungsfelder
- Verwendung des Lifestyle-Ansatzes zur Zielgruppenforschung

Projekt «Analyse finanzieller Massnahmen im Energiebereich: Theoretische Reflexion der Wirkungsweise und Auswertung empirischer Studien»

Der Einsatz von finanziellen Massnahmen ist im Energiebereich auch heute noch von grosser Relevanz. Das Projekt *Analyse finanzieller Massnahmen im Energiebereich: Theoretische Reflexion der Wirkungsweise und Auswertung empirischer Studien* [21] verwendet die politikwissenschaftliche Diskussion der Wirkungslogik (explizit oder implizit) und leitet drei Kategorien von finanziellen Mitteln daraus ab: finanzielle ex-ante Anreize, symbolische ex-ante Finanzbeiträge und ex-post eingesetzte Belohnungen. Die verschiedenen Gruppen wurden mittels zweier theoretischer Zugänge beschrieben. Die klassische ökonomische Theorie vermag insbesondere die finanziellen ex-ante Anreize zu erklären. Als zweiter Zugang wurde ein psychologischer Ansatz verwendet. Generell gelten folgende Gestaltungsprinzipien: Die Konzeption sollte auf einer sorgfältigen Marktanalyse und einer Segmentierung der Zielgruppe basieren.

Im Besonderen ist die Höhe der Subvention möglichst auf das finanzielle Kalkül (Kosten-Nutzen-Abwägung) der zu beeinflussenden Akteure abzustimmen. Bei symbolischen ex-ante Finanzbeiträgen und ex-post Belohnungen ist darauf zu achten dass der immaterielle Nutzen umso höher ist, je besser die Instrumente auf die Ziele, Einstellungen und das soziale Umfeld der Zielgruppe angepasst sind. Komplementäre Kombinationen von politischen Steuerungsinstrumenten können auch besonders wirksam sein. Eine solche zuverlässige Kombination ist zum Beispiel die Kopplung von Subventionen und Steuern mit Informations- und Beratungsmassnahmen oder die Kopplung von Belohnung und symbolischen Finanzbeiträgen mit persuasiven Massnahmen (Kampagnen, Aus- und Weiterbildungsmassnahmen und Beratungsaktivitäten).

Weiter wurde als Vertiefung vor allem bei finanziellen ex-ante Anreizen auftretenden Mitnahmeeffekte (Personen, die finanzielle Zuschüsse in Anspruch nehmen, das vom Staat erwünschte Handeln aber auch ohne die Zuschüsse an den Tag gelegt hätten) diskutiert. Die Subvention als eine Kategorie von finanziellen ex-ante Anreizen nimmt in der energiepolitischen Praxis einen grossen Stellenwert ein und ist nicht zuletzt wegen des Mitnahmeeffekts umstritten. Neben der Information und der Beratung kann der Mitnahmeeffekt im Vollzug mittels Überwachung und Kontrolle bis zu einem bestimmten Mass gesteuert werden.

Projekt «Wirksamkeit von Instrumenten zur Steigerung der Energieffizienz und zur Förderung erneuerbarer Energien: State-of-the-art-Bericht»

Das Projekt *Wirksamkeit von Instrumenten zur Steigerung der Energieffizienz und zur Förderung erneuerbarer Energien: State-of-the-art-Bericht* [22] nahm eine Literaturauswertung von total 122 Untersuchungen im Zeitraum 2000 - 2008 vor. Dazu wurden die staatlichen Instrumente in vier Kategorien aufgeteilt: regulative Instrumente (Gebote und Verbote), finanzielle Instrumente (Subventionen, Steuern und marktförmige Instrumente), persuasive Instrumente (Information, Werbung, Beratung) und strukturierende Instrumente (Netzwerke, freiwillige Vereinbarungen). Es wurde herausgefunden, dass sich für alle vier Instrumentenkategorien Studien finden lassen, die eine Wirksamkeit nachvollziehbar darstel-

len. Die zwei Instrumententypen, zu welchen am meisten Erfahrungen vorliegen, und die schon am längsten eingesetzt werden, sind die regulativen und finanziellen Instrumente. Voraussetzung für die Wirkung ist, dass die für die Gestaltung und den Vollzug der Instrumente bekannten «Regeln der Kunst» eingehalten werden. In der Praxis zeigen die Instrumente oftmals nicht die erhoffte Wirkung weil Fehler bei der Gestaltung und dem Vollzug gemacht werden. In diesem Zusammenhang taucht unter anderem die Frage auf, wie stark die Zielgruppen und ihre Organisationen wie Verbände und Interessengruppen (Stakeholder) durch die Programmverantwortung eingebunden werden sollen. Für regulative Instrumente soll die Distanz zwischen Programmverantwortlichen und Stakeholdern gross sein, während bei Subventionen eine engere Zusammenarbeit es erlaubt, das Informationsdilemma abzuschwächen. Folgende Empfehlungen wurden formuliert:

- evidence based energy policy: Politikgestaltung, die sich in hohem Mass auf bestehendes Wissen in einem Politikbereich abstützt, und dieses in die Gestaltung von Instrumenten einfliessen lässt.
- ein möglichst gut abgestimmter Instrumenten-Mix;
- Instrumente erhalten eine höhere Wirksamkeit, wenn sie langfristig umgesetzt werden (Perioden von mehr als fünf Jahren sind ideal).
- Bei allen Instrumenten ist die Formulierung von messbaren, erreichbaren und terminierten Zielen empfehlenswert.
- Eine eindeutige Definition und Segmentierung der Zielgruppe ist wichtig.
- Die Zielwerte von regulativen und finanziellen Instrumenten sind laufend den wirtschaftlichen und technologischen Entwicklungen anzupassen.
- Energieprogramme sollten über ein internes Monitoring und eine externe Evaluation verfügen.

Projekt «Determinanten des Vollzugs energiepolitischer Massnahmen auf kantonaler Ebene»

Durch das Subsidiaritätsprinzip im föderalistischen System der Schweiz entstehen in den Kantonen unterschiedliche Ansätze zur innovativen Lösung von energiepolitischen Problemen. Während das Thema Föderalismus beständige Beliebtheit in der politikwissenschaftlichen Forschung erfährt, ist die Frage der Verbreitung von Politik-Innovationen im föderalistischen System ein Aspekt, der für die Schweiz noch wenig geklärt ist. Das Projekt *Determinanten des Vollzugs energiepolitischer Massnahmen auf kantonaler Ebene* [23] untersucht, welche Determinanten und Prozesse zu einer Ausbreitung oder Nichtausbreitung von energiepolitischen Massnahmen im Gebäudebereich führen, da die Massnahmen hier weitgehend in den Kompetenzbereich der Kantone fallen. Im Zentrum stehen folglich einerseits das mögliche Ausbreitungsmuster, und andererseits die Mechanismen und Wege einer Ausbreitung, also die Frage wie und weshalb sich Politiken im Energiebereich ausbreiten. Im ersten Teil sucht das Projekt nach Erklärungen, wie sich innovative Politiken in den 26 Kantonen ausbreiten (Politikdiffusion). Im zweiten Teil stehen die Prozesse konkreter Politik-Transfers im Forschungsfokus. Während der erste Teil des Projektes als quantitative Analyse auf der Basis einer Vollerhebung relevanter Indikatoren bei allen 26 Kantonen konzipiert ist, erfolgt im zweiten Teil eine qualitative Analyse mit einem Fallstudienvergleich.

Projekt «Energieeffizienz und Reboundeffekte: Entstehung, Ausmass, Eindämmung»

Die Bestrebungen für griffige und weitgehende Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz nehmen stark zu. Effizienzmassnahmen bergen aber unter gewissen Bedingungen die Gefahr so genannter Reboundeffekte in sich: Wenn die Steigerung der Energieeffizienz an sich eine Mehrnachfrage induziert, wird dies als Rebound bezeichnet. Dies kann die errechneten Effizienzgewinne teilweise deutlich reduzieren. Dieser Gefahr wurde bisher wenig Aufmerksamkeit zu teil. Weder der viel diskutierte Stern-Review-Report, die neuesten IPCC-Berichte noch der Aktionsplan Energieeffizienz des BFE berücksichtigen den Rebound-Effekt. Dies vor allem, weil Auftreten und Ausmass noch als nicht gesichert gelten. Das Forschungsprojekt *Energieeffizienz und Reboundeffekte: Entstehung, Ausmass, Eindämmung* [24] versucht, potenzielle Politikmassnahmen unter Beachtung des Reboundeffekts auf ihre effektive Effizienz zu prüfen. Mit einem Haushaltmodell basierend auf der Schweizerischen Verbrauchserhebung wurde eine Bandbreite des Rebound-Effektes bei erhöhten Einkommen von 71 – 297 g CO-Equivalent pro Schweizer Franken errechnet.

Projekt «The Effect of Energy Efficiency Enhancement on Innovation and Competitiveness»

Das Projekt *The Effect of Energy Efficiency Enhancement on Innovation and Competitiveness* [25] analysiert mit ökonometrischen Methoden den Zusammenhang zwischen Energieeffizienz und Konkurrenzfähigkeit für zwanzig Industriesektoren in einer handvoll Industrieländern über die letzten zwanzig Jahre. Dies wird anhand von Produktionsfunktionsschätzungen gemacht, wo-

bei die TFP (total factor productivity) unter anderem durch den Energiepreis erklärt wird. Erste Resultate zeigen dass ein höherer Energiepreis einen direkten negativen Effekt auf die TFP hat, aber einen positiven Effekt indirekt über die Interaktion mit R&D Ausgaben ausübt. Der Nettoeffekt ist Land- und Sektorspezifisch kann aber durchaus positiv sein.

Nationale Zusammenarbeit

Im Rahmen des Forschungsprogramms Energiewirtschaftliche Grundlagen (EWG) wird eine intensive Zusammenarbeit mit privaten Forschungsstellen, Universitäten, Fachhochschulen und Instituten gepflegt. Auf eine hohe **Vernetzung** unter den Forschungsstellen wird grossen Wert gelegt. Deshalb ist auch ein Workshop im 2009 geplant, an welchem verschiedene Projektnehmerteams aus den Hochschulen auf den Energiebereich angewandt, die Methodik der experimentellen Ökonomie diskutieren werden.

Für die politiknahe Forschung sind der Einbezug und die Zusammenarbeit mit den Kantonen insbesondere den kantonalen Energiefachstellen und den interessierten Fachverbänden in den Bereichen Stromversorgung und Bauen wichtig. Im vergangenen Jahr sind alle Projekte des Forschungsprogramms von speziell eingesetzten Begleitgruppen betreut worden. Damit kann die Fachkompetenz aus der Praxis und aus der Wissenschaft berücksichtigt werden, und die Umsetzung der Forschungsergebnisse wird erleichtert. Zur Kommunikation der EWG-Schlussberichte werden Resultate jeweils mit einer Medienmitteilung gestreut, an Fachtagungen präsentiert und je nach Projekt in Fachzeitschriften publiziert. Diese wurden im Berichtsjahr durch die Tagespresse durchwegs positiv aufgenommen. Das Projekt *Praxistest Minergie-Modernisierung* wurde an der Baumesse in Bern vorgestellt, während verschiedene Projekte am Schweizerischen Status-Seminar des Nationalen Kompetenznetzwerks *Gebäudetechnik und Erneuerbare Energien* präsentiert wurden. Das Projekt Kommunikation *Sachplan Tiefenlager* wird für die Kommunikation in den potenziellen Standortregionen verwendet.

Internationale Zusammenarbeit

In diversen Projekten sind internationale Hochschulinstitute oder Forschungsstellen im Rahmen von Projekten direkt beauftragt oder indirekt beteiligt. Die Berücksichtigung der internationalen Forschungsliteratur und der rege Austausch an Fachkongressen, in Zeitschriften usw. stellt dabei eine Selbstverständlichkeit dar. Auf europäischer Ebene ist innerhalb des siebten Rahmenprogramms – wie für die technischen Forschungsprogramme – das Schwerpunktthema *Sustainable Energy Systems* wichtig. Je nach Bedarf werden Schweizer Beteiligte auch im Rahmen von klar umschriebenen Aufgaben in anderen Programmen finanziell unterstützt, beispielsweise im Programm *Intelligent Energy Europe*. Zudem ist das Programm EWG indirekt im Era-Net Transport, Action Group 10 (Policy Tools for Vehicle Purchasing Behavior) vertreten, in welchem aber bisher noch kein konkretes Projekt lanciert werden konnte.

Bewertung 2008 und Ausblick 2009

Das Jahr 2008 war geprägt durch den Abschluss der politiknahen Projekte, welche 2007 lanciert wurden, und durch den Beginn von vielen Projekten sowohl im Bereich der angewandten als auch der politiknahen Forschung. Die angewandte Forschung hat an Gewicht gewonnen, da die Forschungslücken, welche im Workshop mit den Universitäten im Jahr 2007 identifiziert wurden, nun in konkreten Projekten angegangen werden können.

Anfang 2009 wird ein Workshop, fokussiert auf die Methodik der Experimente (befragte Personen werden mit hypothetischen, aber möglichst realitätsnahen Entscheidungssituationen konfrontiert) durchgeführt. Der Workshop wird es erlauben, einen optimalen Informationsaustausch zu haben und die Methodenkompetenzen für den Energiebereich zu verfeinern. Da 2008 keine neuen Projekte im Bereich Modelle gestartet wurden, es aber ein grosses Anliegen der eidgenössischen Forschungskommission CORE ist, die Modelle weiterzuentwickeln, sollen 2009 die Möglichkeiten der realistischen und politisch relevanten Erweiterungen klar identifiziert werden. Dies ist nötig, da längerfristig angelegte, mit den Energieperspektiven abgestimmte Modelle eine grosse Investition bedeuten. 2009 wird vor allem wichtig sein, die bereits aufgegleisten Projekte optimal zu begleiten und neue Forschungslücken für 2010 zu identifizieren.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2008 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

(siehe www.energieforschung.ch unter der angegebenen Projektnummer).

[1] H. Rütter, U. Rütter, (Rütter und Partner), W. Hässig (sustec), M. Jakob (CEPE), (heinz@ruetter.ch), Praxistest Minergie Sanierung (SB Projekt 102184).

[2] S. Rieder (interface, stefan.rieder@interface-politikstudien.ch), Konzept, Vollzug und Wirkung der VHKA (SB Projekt 102181).

[3] D. Aiulfi, (Sorane SA), A. Primas (Basler und Hoffmann) (dario.aiulfi@sorane.ch), Energieverbrauch von Bürogebäuden und Grossverteilern (SB Projekt 102288).

[4] Th. Künzle, Meteotest, (thomas.kuenzle@meteotest.ch), Gewichtung der Heizgratage, (SB Projekt 102657).

[5] P. Hofer, A. Kemmler (prognos) und J. Schwarz (Schwarz & Partners) (peter.hofer@prognos.com), Temperatur- und Strahlungsabhängigkeit des Energieverbrauchs im Wärmemarkt (SB Projekt 102534).

[6] A. Kemmler, prognos, (andreas.kemmler@prognos.com), Der Bestand an Elektroheizungen in den Kantonen, (SB Projekt 102804).

[7] M. Keller, P. Wüthrich, J. Trageser, H. Lückge (Infras) und S. Banfi (cepe), (mario.keller@infras.ch), Tanktourismus (JB).

[8] A. Berwert (Rütter und Partner), J. Markard (EAWAG) (adrian.berwert@ruetter.ch) Innovationsprozesse bei Energietechnologien (SB Projekt 101719).

[9] L. Bretschger, R. Ramer, F. Schwark (ETHZ, lbretschger@ethz.ch) Auswirkungen politischer Energiesparmassnahmen auf die Innovationskraft, die Beschäftigung und die internationale Konkurrenzfähigkeit der Schweiz (JB).

[10] M. Bader und P. Hürzeler (HSG, martin.bader@unisg.ch), InnoPower: Stärkung der frühen Innovationsphase von KMUs unter besonderer Berücksichtigung des Sektors Energie (JB).

[11] R. Dettli, W. Ott, D. Philippen und A. Umbricht (econcept, reto.dettli@econcept.ch) Ausgestaltung einer Einspeisevergütung für erneuerbare Wärme (SB Projekt 102610).

[12] S. Gutzwiller, R. Rigassi und H. Eicher (Eicher und Pauli, stephan.gutzwiller@eicher-pauli.ch) Abwasserwärmenutzung: Potenzial, Wirtschaftlichkeit und Förderung, (SB Projekt 101722).

[13] R. Dettli (econcept), M. Bättig und R. Frischknecht (esu-services), (reto.dettli@econcept.ch), Vorstudie zur Bewertung der Entsorgungs- und Nutzungsverfahren von biogenen Abfällen und Hofdünger (SB Projekt 102183).

[14] W. Ott (econcept), J. Hürlimann (AquaPlus) und Jörg Leimbacher (walter.ott@econcept.ch), Bewertung von Schutz-, Wiederherstellungs- und Ersatzmassnahmen bei Wasserkraftanlagen, (SB Projekt 101725).

[15] B. Pauli (SHL) und O. Thees (WSL), (Bernhard.Pauli@shl.bfh.ch), Holz als Rohstoff und Energieträger – Entwicklungstendenzen 2025 (SB Projekt 102178).

[16] K. Leukert,H. Telser, S. Vaterlaus und P. Mahler (Polynomics, karolin.leukert@polynomics.ch) Zahlungsbereitschaft für Service public und Versorgungsqualität im Strombereich (SB Projekt 102463).

[17] H. Worm, Ch. Spielmann (Polynomics), R. Iten und A. Vettori (Infras, rolf.iten@infras.ch), Wirkung und Potenzial der Preisregulierung für die Stromeffizienz (JB).

[18] W. Schenkel (Synergo) und D. Gallego (Dialogik), (schenkel@synergo.ch) Sachplan: Kommunikation mit der Gesellschaft (SB Projekt 101283).

[19] P. Koch und M. Schmid (BSS, patrick.koch@bss-basel.ch), Literaturstudie Kernenergie (SB Projekt 102722).

[20] J. Artho (Uni Zürich, artho@sozpsy.uzh.ch) Sozialwissenschaftlicher Forschungsbeitrag für die Energiepraxis (SB Projekt 102253).

[21] S. Rieder (interface, stefan.rieder@interface-politikstudien.ch) Analyse finanzieller Massnahmen im Energiebereich: Theoretische Reflexion der Wirkungsweise und Auswertung empirischer Studien (SB Projekt 101956).

[22] S. Rieder (interface, stefan.rieder@interface-politikstudien.ch) Wirksamkeit von Instrumenten zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Förderung Erneuerbaren Energien: State-of-the-Art Bericht zu Handen des Energie Trialogue Schweiz (SB Projekt 102535).

[23] Th. Widmer und F.Strebel (Uni Zürich, thow@ipz.uzh.ch), Determinanten des Vollzugs energiepolitischer Massnahmen auf kantonaler Ebene (JB).

[24] P. de Haan (ETH Zürich, dehaan@env.ethz.ch), Energie-Effizienz und Reboundeffekte: Entstehung, Ausmass und Eindämmung (JB).

[25] O. Cadot and C. Gonseth (HEC Lausanne, olivier.cadot@unil.ch), The Effect of Energy Efficiency Enhancement on Innovation and Competitiveness (JB).

Impressum
Juni 2009
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
Druck: Ackermanndruck AG, Bern-Liebefeld
Bezug der Publikation: www.energieforschung.ch

Programm- und Bereichsleiterin
Dr. Nicole Andréa Mathys
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
nicole.mathys@bfe.admin.ch

ANHANG / *ANNEXE*

CORE-Mitglieder 2008

Mitglieder	Vertreter von
Dr. Kaiser Tony, Präsident Alstom Power, Future Technologies, Direktor	Grossindustrie
Closset Alexandre VHF-Technologies SA, CEO	Start-up, innovative KMU
Regierungsrat Freitag Pankraz Baudirektion Kt. Glarus, Vorsteher	Kantonale Energiedirektoren
Prof. Dr. Gutscher Heinz Uni Zürich	Universitäten, Sozialwissenschaft
Hunziker-Ebneter Antoinette Forma Future Invest AG, CEO	Investoren, Venture Capital
Prof. Dr. Kunze Christian École d'Ingénieurs du Canton du Vaud, Directeur	Fachhochschulen, Schweizerischer Nationalfonds
Dr. Leutenegger Hajo Wasserwerke Zug AG, Direktor	Energiewirtschaft (Wasser und Gas)
Dr. Lustgarten George Allan Technology and Business Consulting, CEO	Consulting
Prof. Dr. Lux-Steiner Martha Christina Hahn-Meitner-Institut, Bereichsleiterin Solarenergieforschung	Universitäten, internationale Beziehungen
Prof. Dr. Püttgen Hans-Björn Energy Center EPFL, Directeur	EPF-Lausanne
Rohrbach Kurt BKW-FMB Energie AG, Direktionspräsident	Energiewirtschaft (Elektrizität)
Prof. Dr. Schlapbach Louis EMPA, Gesamtleiter	EMPA, Kommission für Technologie und Innovation
Togni Giuseppina eTeam TOGNI ENERGIE GmbH, Mitinhaberin	Ingenieurbüros, KMU
Prof. Dr. Wokaun Alexander Paul Scherrer Institut, Leiter Forschungsbereich allgemeine Energie	PSI, ETH Zürich, Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften, Novatlantis
Dr. Wüstenhagen Rolf HSG, Vizedirektor Institut für Wirtschaft und Ökologie	Universitäten, Entrepreneurship, Venture Capital
Beobachter	**Amt**
Dr. Rolf Schmitz Leiter Sektion Energieforschung	BFE
Daniel Zürcher Leiter Sektion Innovation	BAFU
Dr. Zinsli Paul-Erich stellvertretender Direktor	SBF
Sekretariat	**Adresse**
Dr. Katja Maus BFE, Sektion Energieforschung	☎ G: 031 322 39 78 E-mail: katja.maus@bfe.admin.ch

BFE-FORSCHUNGS- UND MARKTBEREICHE (2009)
DOMAINES DE L'OFEN POUR LA RECHERCHE ET LE MARCHÉ (2009)

		Forschung *Recherche*		Markt / EnergieSchweiz *Marché / SuisseEnergie*
	Programme *Programmes*	**Programmleiter** *Chefs de programme*	**Bereichsleiter** *Responsables de domaine*	**Bereichsleiter** *Responsables de domaine*
I. Effiziente Energienutzung *Utilisation efficace de l'énergie*	**I.1** Energie in Gebäuden *Énergie dans les bâtiments*	C. Filleux	A. Eckmanns	S. Wiederkehr
	I.2 Verkehr *Transports*	M. Pulfer	M. Pulfer	H. Scherrer
	I.3 Akkumulatoren und Supercaps *Accumulateurs et supercondensateurs*			---
	I.4 Verfahrenstechnische Prozesse (VTP) *Technologie des procédés*			M. Stettler
	I.5 Elektrizitätstechnologien und -anwendungen *Technologies et utilisations de l'électricité*	R. Brüniger	M. Moser	F. Frey
	I.6 Netze und Systeme *Réseaux et systèmes*	R. Bacher		---
	I.7 Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) *Couplage chaleur-force (CCF)*	T. Kopp	A. Eckmanns	R. Phillips
	I.8 Verbrennung *Combustion*	S. Renz	S. Hermle	
	I.9 Kraftwerk 2020 und Carbon Capture & Storage (CCS) *Centrales à gaz 2020 et CCS*	P. Jansohn	G. Siddiqi	
	I.10 Brennstoffzellen *Piles à combustible*	S. Oberholzer	S. Oberholzer	---
II. Erneuerbare Energien *Sources d'énergie renouvelables*	**II.1** Wasserstoff *Hydrogène*	S. Oberholzer	S. Oberholzer	---
	II.2 Photovoltaik *Photovoltaïque*	S. Nowak		U. Wolfer
	II.3 Industrielle Solarenergienutzung (Solare Hochtemperaturprozesse) *Utilisation industrielle de l'énergie solaire (Processus solaires à haute température)*	P. Renaud		
	II.4 Solarwärme und Wärmespeicherung *Chaleur solaire et stockage de chaleur*	J.-C. Hadorn	A. Eckmanns	
	II.5 Umgebungswärme (inkl. Wärmepumpen, Kälte) *Chaleur ambiante (incl. pompe à chaleur, froid)*	T. Kopp		R. Phillips
	II.6 Holzenergie *Énergie du bois*	S. Hermle	S. Hermle	D. Binggeli
	II.7 Biomasse (ohne Holz) *Biomasse (sans le bois)*			B. Guggisberg
	II.8 Wasserkraft *Force hydraulique*	K. Jorde	M. Moser	
	II.9 Geothermie *Géothermie*	R. Minder	G. Siddiqi	M. Geissmann
	II.10 Windenergie *Énergie éolienne*	R. Horbaty	K. Maus	
III. Kernenergie *Énergie nucléaire*	**III.1** Kerntechnik und Nukleare Sicherheit *Technique et sécurité nucléaires*	J. Dreier	C. de Reyff [1)]	---
	III.2 Regulatorische Sicherheitsforschung *Recherche réglementaire en sécurité nucléaire*	R. Mailänder		
	III.3 Kernfusion *Fusion nucléaire*	A. Werthmüller		
	III.4 Radioaktive Abfälle *Déchets radioactifs*	M. Hugi	S. Brander	---
IV. EWG & WTT *FEE & TST*	**IV.1** Energiewirtschaftliche Grundlagen (EWG) *Fondements de l'économie énergétique (FEE)*	N. Mathys		
	IV.2 Wissens- und Technologietransfer (WTT) *Transfert scientifique et technologique (TST)*	Y. Calisesi		

[1)] Das BFE hat hier hauptsächlich die Rolle der Auskunftsstelle. Die Betreuung der Forschung des Bereichs III.1 obliegt dem PSI, die des Bereichs III.2 dem ENSI und die des Bereichs III.3 dem SBF. / *L'OFEN a ici un rôle de répondant. La gestion de la recherche du domaine III.1 est du ressort du PSI, celle du domaine III.2 de l'IFSN et celle du domaine III.3 du SER.*

ADRESSEN DER BFE-BEREICHSLEITER / *ADRESSE DES RESPONSABLES DE DOMAINES À L'OFEN*

Daniel Binggeli, Tel. 031 322 68 23
Simone Brander, Tel. 031 325 85 57
Yasmine Calisesi, Tel. 031 322 53 21
Andreas Eckmanns, Tel. 031 322 54 61
Felix Frey, Tel. 031 322 56 44
Markus Geissmann, Tel. 031 322 56 10
Bruno Guggisberg, Tel. 031 322 56 40
Sandra Hermle, Tel. 031 325 89 22
Katja Maus, Tel. 031 322 39 78
Nicole Mathys, Tel. 031 325 54 45
Michael Moser, Tel. 031 325 36 23
Stefan Oberholzer, Tel. 031 325 89 20
Richard Phillips, Tel. 031 322 47 56
Martin Pulfer, Tel. 031 322 49 06
Christophe de Reyff, Tel. 031 322 56 66
Hermann Scherrer, Tel. 031 322 56 70
Rolf Schmitz, Tel. 031 322 56 58
Gunter Siddiqi, Tel. 031 322 53 24
Martin Stettler, Tel. 031 322 55 53
Stefan Wiederkehr, Tel. 031 324 21 93
Urs Wolfer, Tel. 031 322 56 39

Postanschrift: **BFE, 3003 Bern** / *Adresse commune :* ***OFEN, 3003 Berne***

E-mail: **Vorname.Name@bfe.admin.ch** / ***prénom.nom@bfe.admin.ch***; Fax: 031 323 25 00

ADRESSEN DER PROGRAMMLEITER AUSSERHALB DES BFE / *ADRESSES DES CHEFS DE PROGRAMMES À L'EXTÉRIEUR DE L'OFEN*

Rainer Bacher
Bacher Energie
Hochstrasse 3c, 5405 Baden
Tel. 056 493 59 30
E-mail : rainer.bacher@bacherenergie.ch

Roland Brüniger
R. Brüniger AG, Zwillikerstr. 8, 8913 Ottenbach
Tel. 044 760 00 66 – Fax : 044 760 00 68
E-mail : roland.brueniger@r-brueniger-ag.ch

Jörg Dreier
PSI, 5232 Villigen – PSI
Tel. 056 310 26 81 – Fax : 056 310 44 81
E-mail : joerg.dreier@psi.ch

Charles Filleux
Basler & Hofmann AG
Forchstr. 395, 8032 Zürich
Tel. 044 387 11 22 − Fax : 044 387 11 00
E-mail : filleux.REN@bhz.ch

Jean-Christophe Hadorn
Base Consultants SA
8 Rue du Nant, c.p. 6268, 1211 Genève 6
Tel. 022 840 20 80 – Fax : 022 840 20 81
E-mail : jchadorn@baseconsultants.com

Robert Horbaty
ENCO AG, Wattwerkstrasse 1, 4416 Bubendorf
Tel. 061 965 99 00 – Fax : 061 965 99 01
E-mail : robert.horbaty@enco-ag.ch

Markus Hugi
ENSI, 5232 Villigen – ENSI
Tel. 056 310 38 24, Fax : 031 056 310 39 95
E-mail : markus.hugi@ensi.ch

Peter Jansohn
PSI, 5232 Villigen-PSI
Tel. 056 310 28 71 – Fax : 056 310 26 24
E-mail : peter.jansohn@psi.ch

Klaus Jorde
entec ag
St. Leonhardstr. 59, 9000 St.Gallen
Tel. 071 228 10 20 – Fax : 071 228 10 30
E-mail : jorde@entec.ch

Thomas Kopp
HSR Hochschule für Technik Rapperswil
Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil
Tel. 055 222 49 23 – Fax : 055 222 44 00
E-mail : thomas.kopp@hsr.ch

Reiner Mailänder
ENSI, 5232 Villigen – ENSI
Tel. 056 310 39 19 – Fax : 056 310 39 95
E-mail : reiner.mailaender@ensi.ch

Rudolf Minder
Minder Energy Consulting
Ruchweid 22, 8917 Oberlunkhofen
Tel. 056 640 14 64 − Fax : 056 640 14 60
E-mail : rudolf.minder@bluewin.ch

Stefan Nowak
NET Nowak Energie & Technologie AG
Waldweg 8, 1717 St.Ursen
Tel. 026 494 00 30 – Fax : 026 494 00 34
E-mail : stefan.nowak@netenergy.ch

Pierre Renaud
Planair SA, Crêt 108 a, 2314 La Sagne NE
Tel. 032 933 88 40 − Fax : 032 933 88 50
E-mail : pierre.renaud@planair.ch

Stephan Renz
Beratung Thoma & Renz
Elisabethenstr. 44, Postfach, 4010 Basel
Tel. 061 271 76 36 − Fax : 061 272 57 95
E-mail : renz.btr@swissonline.ch

Andreas Werthmüller
SBF/SER, Hallwylstrasse 4, 3003 Bern
Tel. 031 323 35 95 – Fax : 031 322 78 54
E-mail : andreas.werthmueller@sbf.admin.ch